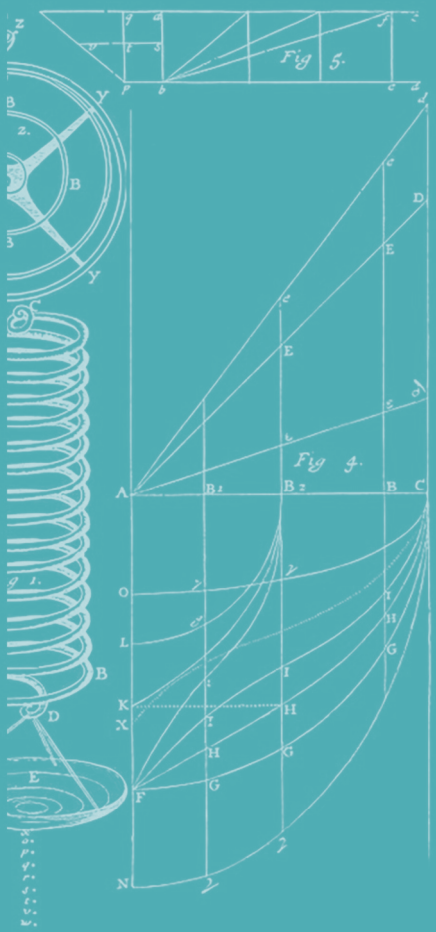
Sabina Muminovic

# Die *Kraft* des Robert Hooke

Die wissenschaftshistorische Kontextualisierung des Hookschen Gesetzes




wbg Academic

Sabina Muminovic

# Die *Kraft* des Robert Hooke

*Flensburg Studies on the History and Philosophy of Science and Science Education*

Herausgegeben von Peter Heering

Band 7

Sabina Muminovic

# Die *Kraft* des Robert Hooke

Die wissenschaftshistorische Kontextualisierung
des Hookeschen Gesetzes

wbg Academic

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

wbg Academic ist ein Imprint der wbg
©2022 by wbg (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt
Die Herausgabe des Werkes wurde durch die Vereinsmitglieder der wbg ermöglicht.
Gedruckt auf säurefreiem und alterungsbeständigem Papier
Printed in Germany

Besuchen Sie uns im Internet: www.wbg-wissenverbindet.de
ISBN 978-3-534-45026-8
Elektronisch ist folgende Ausgabe erhältlich:
eBook (PDF): 978-3-534-45027-5

Dieses Werk ist mit Ausnahme der Abbildungen (Buchinhalt und Umschlag) als Open-Access-Publikation im Sinne der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND International 4.0 (»Attribution-NonCommercial-NoDerivatives International«) veröffentlicht. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/. Jede Verwertung in anderen als den durch diese Lizenz zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.

# Inhaltsverzeichnis

**Einleitung** **11**

**1 Robert Hooke** **15**
1.1 Die Jugendjahre . . . 15
1.2 Die Zusammenarbeit mit Robert Boyle . . . 21
1.3 Die Ära in der Royal Society of London . . . 27
1.3.1 Der Kurator . . . 29
1.3.2 Der Sekretär . . . 33
1.4 Die letzten Jahre . . . 38

**2 Die Harmonie der Natur** **41**
2.1 Die Elastizität der Luft . . . 42
2.1.1 Beobachtungen der *neuen* Eigenschaften der Luft . . . 57
2.2 Die Elastizität von Festkörpern . . . 64

**3 Die Veröffentlichung des Gesetzes** **73**
3.1 Die Vorläufer des Gesetzes . . . 75
3.1.1 Hookes Versuche mit der Luft . . . 79
3.2 Die Feder . . . 84
3.3 Die *Elastizität* von Körpern . . . 86
3.4 Phy. Int. des Zusammenhangs von Boyles und Hookes Gesetz . . . 94

**4 Eigene Experimente** **101**
4.1 Quellenlage . . . 101
4.2 Quellenlage und eigene Beobachtungen . . . 106
4.2.1 Die Spiralfeder . . . 107
4.2.2 Die Uhrfeder . . . 109
4.3 Reflexion der eigenen Beobachtungen . . . 111

**5 Die Diagramme** **115**
5.1 Einführung in das Kapitel . . . 115
5.2 Hookes Beschreibung der Diagramme . . . 117
5.3 Die Interpretation der Diagramme . . . 127
5.3.1 Historischer Hintergrund . . . 127
5.3.2 Die theoretische Analyse . . . 136
5.3.3 Die experimentelle Analyse . . . 171

**6 Historische Kontextualisierung** **179**
6.1 Die Uhr und das Längengradproblem . . . 180
6.1.1 Der Disput Hooke und Oldenburg . . . 190
6.2 Das Pendel und der Isochronismus . . . 197

**7 Im Rückblick** **209**

**Fazit** **215**

**Danksagung** **221**

**Literaturverzeichnis** **225**

**Index** **251**

# Abbildungsverzeichnis


1.1 Robert Hookes Stammbaum. . . . . 17
1.2 Die Naturphilosophie nach R. Hooke . . . . . 20
1.3 Robert Boyle (1627 – 1692) . . . . . 22
1.4 Robert Boyles erste Luftpumpe. . . . . 24
1.5 Robert Hookes U-Rohr . . . . . 26
1.6 Arundel House in London . . . . . 28
1.7 London Monument . . . . . 34
1.8 Gedenkstein in der Westminister Abbey . . . . . 40

2.1 Torricellis Experiment. . . . . 43
2.2 Pecquets Darstellung von der Wirkung des Wassers auf eine Quecksilbersäule. 45
2.3 Das von Power und Towneley verwendete Glasrohr. . . . . 48
2.4 Die tabellarische Darstellung der Messungen auf Pendle Hill. . . . . 50
2.5 Eigene Darstellung der Veränderung der Höhe des Quecksilbers im Glasrohr, das auf Pendle Hill verwendet wurde. . . . . 51
2.6 Boyles Darstellung des verwendeten U-Rohrs. . . . . 56
2.7 Schem XXXVII aus der Micrographia. . . . . 58
2.8 Erste Tabelle der Luftdruckmessungen aus der Micrographia. . . . . 60
2.9 Zweite Tabelle der Luftdruckmessung aus der Micrographia. . . . . 62
2.10 Hookes Messgerät zur Bestimmung der *Force* beim freien Fall . . . . . 67
2.11 Hookes tabellarische Darstellungen der Messungen zum freien Fall. . . . . 68

3.1 Gallileo Gallileis Skizzen von einem Hebel und einem Seil. . . . . 77
3.2 Huygens' Modell einer schwingenden Saite . . . . . 78
3.3 Hookes Veröffentlichung zu den Versuchen zur Kapillarwirkung. . . . . 80
3.4 Eigene Darstellung von Hookes Luftdruck Versuch aus 1662 . . . . . 82
3.5 Hookes Darstellung von Federn aus Lectures de Potentia . . . . . 85
3.6 Hookes Darstellung von Festkörpern aus Lectures de Potentia . . . . . 88

3.7 Hookes Darstellung von der Ausdehnung und der Kompression eines Festkörpers aus Lectures de Potentia . . . 90
3.8 Hookes Darstellung der Verformung eines Festkörpers aus Lectures de Potentia . . . 92
3.9 Analogie vom Verhalten der Feder und der Luftsäule in einem U-Rohr . . . 95
3.10 Die Wechselwirkung der Luft- und der Quecksilbersäule im U-Rohr . . . 97
3.11 Darstellung des Komprimierens einer Feder mit unterschiedlichen Gewichten 99

4.1 Hookes Darstellung der Spiralfeder aus Lectures de Potentia . . . 102
4.2 Hookes Darstellung der Uhrfeder aus Lectures de Potentia . . . 103
4.3 Hookes Darstellung des langen Drahtes aus Lectures de Potentia . . . 105
4.4 Eigenständige Aufnahme der Markierungen der Positionen der Feder verursacht durch verschiedene Verformungen . . . 108
4.5 Eigenständige Aufnahme vom Versuch mit der Spiralfeder . . . 109
4.6 Eigenständige Aufnahme vom Versuch mit der Uhrfeder . . . 110
4.7 Eigenständige Aufnahme von der Drehung während des Versuchs mit der Uhrfeder . . . 111

5.1 Hookes Diagramme aus Lectures Potentia Restitutiva . . . 118
5.2 Hookes Darstellung vom *aggregate of Powers* Diagramm . . . 120
5.3 Die von der *aggregate of Powers* ACD bewirkte Geschwindigkeitskurve . . . 122
5.4 Darstellung der einzelnen Kurven im Diagramm . . . 123
5.5 Darstellung von verschiedenen *Power* und der entsprechenden Geschwindigkeiten . . . 124
5.6 Hookes Darstellung der Wurfbewegung . . . 125
5.7 Der Vergleich von einer gleichförmigen und beschleunigten Bewegung . . . 126
5.8 Oresmes Darstellung von Hilfselementen . . . 129
5.9 Eigene Darstellung von Quantitäten nach Oresme . . . 131
5.10 Oresmes Regel . . . 133
5.11 Galileo Galileis Darstellung von kinematischen Größen . . . 135
5.12 Hookes großes Diagramm . . . 137
5.13 Hookes Darstellung von *Power* und eigene Darstellung der entsprechenden Fläche . . . 140
5.14 Darstellung von Hookes Herleitung der Geschwindigkeit . . . 141
5.15 Darstellung der Fläche des Trapezes CDEB . . . 143
5.16 Darstellung von ähnlichen Dreiecken . . . 145
5.17 Menaechmus Regel . . . 148
5.18 Projektion der harmonischen Schwingung . . . 154
5.19 Geschwindigkeitskurve auf einem Einheitskreis . . . 154
5.20 Zeitkurve auf einem Einheitskreis . . . 155

5.21 Gestrichelte Strecke $KH$ . . . . . 163
5.22 Anwendung vom Merton Style an Hookes kleinem Diagramm . . . . . 165
5.23 Darstellung der *whole velocity* . . . . . 166
5.24 Darstellung von Strecke bei einer zusammengesetzten Bewegung . . . . . 167
5.25 Die Darstellung der maximalen Höhe . . . . . 168
5.26 Darstellung der Wurfweiten bei verschiedenen Wurfwinkel . . . . . 170
5.27 Visualisierung der durchgeführten Beobachtungen . . . . . 172

6.1 Darstellung einer Kreisfeder . . . . . 183
6.2 Darstellung einer Ankerhemmung . . . . . 185
6.3 Wirkung auf die Balance eines Rades . . . . . 187
6.4 Hookes Darstellung von einer Uhr aus Lampas . . . . . 190
6.5 Hookes Theorem des Isochronismus . . . . . 198
6.6 Darstellung der Interpretation von Hookes Theorem . . . . . 199
6.7 Hookes Darstellung von Pendelbewegung zur Erklärung der Bewegung von Himmelskörpern . . . . . 202

Für meine Familie

# Einleitung

Als Robert Hooke sein *ut tensio sic vis* (*wie die Spannung so die Kraft*) in der Form eines Anagramms in seiner Cutlerian Lecture *Helioscopes* (1676) publizierte, spielte er bereits in Gedanken mit der *Theorie der Feder*. Motiviert und inspiriert von seinen Kollegen aus der Royal Society, veröffentlichte er auch sein dazugehöriges *Gesetz der Natur*, was heute als das Hookesche Federgesetz bekannt ist.

Im Werk *Lectures de Potentia Restitutiva, or, of Spring* stellte Hooke ausführlich das Federgesetz dar. Hooke formulierte das Gesetz für Festkörper und fügte eine Beschreibung des Verhaltens diverser Federformen sowie ein entsprechendes Diagramm hinzu, das die Bewegung der Feder im quantitativen Sinne visualisieren sollte. Interessanterweise gab Hooke in dieser Veröffentlichung an, dass dieses Gesetz schon vor Jahren in Bezug auf das Verhalten und die Eigenschaften der Luft veröffentlicht wurde. Das sei angeblich schon in seiner *Micrographia* beschrieben und erklärt.

Im Jahr 1665 veröffentlichte Hooke sein weltbekanntes Werk *Micrographia*. Dieses historisch signifikante Werk beinhaltete verschiedene Beobachtungen von Mikrosystemen, die deskriptiv und grafisch dokumentiert wurden. Hooke präsentierte außerdem in seiner Arbeit seine Sicht von den Bewegungen in der Natur, die ihn sein ganzes wissenschaftliches Leben beschäftigten. Einige seiner Ideen zur Natur und der Kräfte der Natur, die auch in der *Micrographia* erwähnt wurden, sind:

- Bewegung ist ein fundamentaler Bestandteil aller Dinge und die Natur ruht nie.
- Die Wellenform der Bewegung ist die universelle Form aller Bewegungen, wie zum Beispiel die Schwingung von Saiten bei Musikinstrumenten.
- Die Gravitation ist eine Wellenform der Bewegung.
- Durch eine größere Distanz werden alle Formen von Bewegung und Kräften schwächer. Das soll durch Zufall, aber auch zugleich durch genaue mathematische Verhältnisse beschreibbar sein.

- Das endlose Bewegen in der Natur und dessen Wellenform deuten darauf hin, dass jede mechanische Aktion eine entgegengesetzte Reaktion besitzt.[1]

Das Federgesetz, das heute als das *Hookesche Gesetz* bekannt ist, scheint vom Verständnis keine großartigen Fragen oder Unklarheiten mit sich zu tragen. Doch wie kam es zu der Veröffentlichung? Anhand der Entwicklung der klassischen Mechanik von ihren Ansätzen und von dem, was zu ihrer Weiterentwicklung führte, erscheint es fraglich, ob das damals formulierte Gesetz tatsächlich so definiert wurde, wie es heute interpretiert wird. Der Kern dieser Frage liegt in der Tatsache, dass das Konzept der Kraft und der Energie als Quantitäten erst später formuliert wurde. Was ist das Wesentliche in Hookes Veröffentlichung und die Motivation, die dahintersteckt? Als Mitglied der Royal Society of London war Hooke in bester Gesellschaft, was das Erlangen von neuem Wissen und das Forschen betrifft. Die Treffen der Royal Society waren der Ort, wo Ideen und philosophische Fragen ihren Anfang nahmen. Welchen Einfluss hatte die Society auf die Arbeit von Hooke? War die Formulierung des Gesetzes nur ein Auftrag der Royal Society, dem Hooke nachging? Hatte dies auch etwas mit dem sozialen Status zu tun, den sich Hooke zu erarbeiten erhoffte?

Das Hookesche Gesetz, wie es heute formuliert wird, gibt klare definierte Verhältnisse zur Beschreibung von der Schwingung einer Feder und über die Eigenschaften von elastischen Körpern. Diese Eigenschaften können in diversen Technologien und mechanischen Prinzipien angewendet werden. In der Zeit der Entwicklung der klassischen Mechanik hatten die Naturphilosophen jede Menge zu tun. Sie beschäftigten sich nicht nur mit der Formulierung von physikalischen Größen, sondern auch mit der Formulierung und der Entwicklung von Mechanismen, die den Alltag erleichtern sollten. Ob nun Hooke erst einen Mechanismus beobachtete oder erst nach der Veröffentlichung des Gesetzes entwickelte, ist auch eine Frage, die sich bei einer oberflächlichen Betrachtung stellt.

Die Struktur dieser Arbeit entstand durch die Entwicklung der Analyse der Veröffentlichung zum Federgesetz. Durch die Analyse stellten sich folgende Fragestellungen:

- Wer oder was motivierte Hooke überhaupt mit Federn zu arbeiten und ihre physikalischen Eigenschaften mehr zu erforschen?
- Wieso war es Hooke wichtig zu erwähnen, dass er dieses *Gesetz der Natur* schon früher veröffentlicht hat?
- Wenn es schon früher veröffentlicht wurde, wieso der Aufwand mit der Veröffentlichung *Lectures de Potentia*?
- Was hat Hookes Fortsetzung von Boyles Experimenten mit dem Federgesetz zu tun?
- Wieso werden gerade diese Experimente, die in der *Micrographia* zu finden sind, als die Versuche betrachtet, die die Hypothese bestätigen, die angeblich sein bereits veröffentlichtes Gesetz der Natur darstellen soll?

[1] vgl. Hooke R., *Micrographia: or some Physiological Description of Minute Bodies made by magnifying glasses with Observations and Inquiries thereupon*, 1665, S. 15 – 16

- Ist mit dem Wort *Power* tatsächlich der Begriff *Kraft* zu verstehen, der in heutiger Form des Hookeschen Gesetzes bekannt ist?
- Wie sind die komplexen Diagramme zu den physikalischen Quantitäten zu der Federbewegung zu verstehen?
- Wieso war es Hooke wichtig durch diese Diagramme und die Beobachtung der Federbewegung die *Zeit* zu bestimmen?

Mit der Absicht, Antworten auf diese Fragen zu finden, wird in den kommenden Kapiteln genauer auf die Probleme dieser Fragen zugegriffen. Die Geschichte über die Persönlichkeit Hookes und wie es zur Formulierung des *Gesetzes der Natur* (so nannte Hooke selber sein Federgesetz) kam, stellt das erste Kapitel dar. Dabei wird sowohl Hookes Werdegang dargestellt als auch sein gesellschaftlicher Status. Durch die Analyse von Hookes Persönlichkeit und den Umständen, in denen er gelebt und gearbeitet hat, lässt sich ermitteln, was die möglichen Motive für die Entwicklung seines Interesses zu Federeigenschaften waren.
Im zweiten Kapitel wird seine Zusammenarbeit mit Boyle und sein soziales Verhalten in der Welt der Naturwissenschaftsphilosophen des 17. Jahrhunderts erläutert. Weiterhin wird hier auch der mögliche Einfluss erwähnt, den Hooke genossen hat und inwiefern es sich auf seine Arbeit ausgewirkt hat. Mithilfe einer näheren Darstellung der Umstände die Hooke dazu geführt haben, Boyles Hypothese (heute als Boylesches Gesetz bekannt) immer wieder neu zu untersuchen und seine Versuche mehrmals zu wiederholen, kann ersichtlich werden, was genau der Zusammenhang von Boyles Hypothese und Hookes *Gesetz der Natur* ist.

Die *Entwicklung* und die Veröffentlichung des Gesetzes werden im dritten Kapitel verdeutlicht. Dabei wird das Gesetz selbst, mit der dazu veröffentlichten Abbildung, interpretiert. Die Analyse von Hookes Beschreibung des Gesetzes und der dazugehörigen Eigenschaften, die er bei seinen Beobachtungen erkannte, leitet zu einer neuen Perspektive der Betrachtung vom Hookeschen Gesetz. Dies gab Anlass für das Durchführen von experimentellen Beobachtungen, die Hookes beschriebene Prozedur wiedergeben, und der dazugehörigen Analyse.

Das fünfte Kapitel beinhaltet eine ausgiebige Analyse der Diagramme zur Federbewegung. Dabei werden die geometrische Methode und die Interpretation von Verhältnissen der physikalischen Größen im Mittelpunkt stehen. Die Interpretation der Diagramme gibt eine neue Sichtweise und ein anderes Verständnis vom Hookeschen Gesetz.

Nachdem sowohl historische als auch experimentelle Hintergründe analysiert wurden, wird im vorletzten Kapitel eine ausgiebige Kontextualisierung vorgestellt werden. Durch die vorherigen Kapitel wird ersichtlicher, was womöglich die Hintergründe von Hookes Interesse an den Federeigenschaften waren. Weiterhin bietet sich die Möglichkeit, zu erkennen, was Hookes Motivation war, nicht nur das Gesetz mit den Federn erst später zu veröffentlichen, sondern auch, wieso er es unbedingt vorgezogen hat, damit die *Zeit* bestimmen zu wollen.

*Ich hatte ungeheuer vieles noch nicht gesehen und nicht bemerkt an diesem Menschen, den ich bereits verurteilte.*

*F.M. Dostojewski*

# Kapitel 1

# Robert Hooke

Der Name Robert Hooke wird häufig im Zusammenhang mit der Entwicklung des Mikroskops oder dem Federgesetz in Verbindung gebracht. In diesem Kapitel wird die Persönlichkeit Robert Hooke vorgestellt. Um alle Hintergründe der Entwicklung des Federgesetzes zu berücksichtigen, ist es relevant, die Ereignisse in Hookes Leben in einer Zusammenfassung darzustellen. Hookes sozialer Status, die Interaktion mit anderen und seine Handlungen werden bei der Interpretation seiner Arbeiten eine große Rolle spielen. Aus dem Grund wird im kommenden Kapitel nicht nur sein Werdegang erläutert, sondern auch sein sozialer Status in der Gesellschaft.

## 1.1 Die Jugendjahre

Robert Hooke wurde am 18. Juli 1635 als Sohn vom Gemeindepfarrer John Hooke und seiner Frau Cecily in einer kleinen Stadt namens Freshwater auf Isle of Wight geboren. Hooke war eins von vier Kindern der Hookes. Eine klare Darstellung von Hookes Stammbaum konnte erst nach dem Fund von John Hookes Testament gegeben werden (*Abbildung 1.1*). Als kleiner Junge war Robert Hooke sehr oft krank, weswegen ihn seine Eltern diversen Diäten und Ernährungsprogrammen unterzogen. Bis zum Alter von sieben Jahren wurde er zu Hause gepflegt und für eine Weile auch unterrichtet. Im Gegensatz zu vielen seiner Zeitgenossen gibt es bis heute keine nachweisbaren Bilder zu Hookes Aussehen. Richard Waller, ein enger Freund von Hooke, hat in seiner Veröffentlichung *The Posthumous Works* Hookes Aussehen folgendermaßen beschrieben:

> *As to his Person he was but despicable, being very crooked, tho' I have heard from himself, and others, that he was strait till about 16 Years of Age when he first grew awry, by frequent practicing, with a Turn-Lath* [...] *He was always*

> *very pale and lean, and laterly nothing but Skin and Bone, with a Meagre Aspect, his Eyes grey and full, with a sharp ingenious Look whilst younger; his nose but thin, of a moderate height and length; his Mouth meanly wide, and upper lip thin; his Chin sharp, and Forehead large; his Head of a middle size. He wore his own Hair of a dark Brown colour, very long and hanging neglected over his Face uncut and lank* [...][1]

Der junge Hooke lernte schnell und sein Vater hoffte, dass Robert irgendwann seinem Beruf als Pfarrer nachgehen würde.[2] Hooke aber ging seinen eigenen Neigungen nach und befasste sich mit verschiedenen Hobbys, wobei er seine Fähigkeiten zum Bauen von verschiedensten mechanischen Geräten entwickelte. Diese Fähigkeit und die Weiterentwicklung dieser Fähigkeiten haben in der Zukunft Hooke einige Türen geöffnet. Durch die Entwicklung seiner kreativen und mechanischen Fähigkeiten, entwickelte sich auch sein Selbstbewusstsein, dass ihn in seinem späteren Leben in der Gesellschaft häufig unbeliebt machte.

Sein Selbstbewusstsein entwickelte sich stark weiter, nachdem er sich für eine Weile im Jahr 1640 bei dem berühmten Maler John Hoskins aufgehalten hatte. Robert Hooke beobachtete Hoskins bei seiner Arbeit. Hoskins' Arbeit inspirierte Hooke, selbst den Fähigkeiten des Malens anzueignen.[3] Diese Fähigkeit bewährte sich in Hookes späteren Jahren, als er in der *Micrographia* die Mikrowelt auf Papier brachte. Es ist diese Arbeit, die ihm auch den entsprechenden Ruhm brachte.

Am 17. Oktober 1648 starb Pfarrer John Hooke. Robert Hooke war dreizehn und für dieses Zeitalter alt genug, um seinen Platz auf der Welt zu suchen. Er nahm sein Schicksal in seine Hände und zog mit dem Geld, das ihm sein Vater vererbt hatte, nach London. Geleitet vom Rat eines Bekannten, zog es Hooke erstmals nach Westminster, was zu dieser Zeit ein immer mehr wachsender Stadtteil von London war. Dort bewies er sich erstmals als Schüler des Malers Peter Lely.[4] Doch Hookes Zeit bei Lely hielt nicht lange an.[5] Er nahm sein Geld und zog weiter. Aus den Einträgen von Hookes Tagebuch ist jedoch ersichtlich, dass er weiterhin den Kontakt mit Lely und Hoskins gepflegt hatte.[6] Nachdem er Lely

[1] Waller R., *The Posthumous Works of Robert Hooke, M.D.S.R.S. Geom. Prof. Gresh. &c*, 1705, S. xxvi

[2] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius. The Biography of Robert Hooke 1635 – 1703*, MacAdam/Cage, 2003, S. 6

[3] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 7, Jardine L., *The curious life of Robert Hooke. The man who measured London*, Harper Collins, New York, 2004, S. 54

[4] Sir Peter Lely (geboren am 14. September 1618 in Soest Westfalen, gestorben am 30. November 1680 in London) war ein Maler mit niederländischer Herkunft, der sein Berufsleben hauptsächlich in England verbrachte, weswegen er 1662 eingebürgert wurde. Ein bekanntes Werk ist z. B. *The Windsor Beauties.*

[5] vgl. z. B. Kent P, Chapman A., Hrsg., *Robert Hooke and the English Renaissance*, 2005, S. 71, Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 9

[6] Einträge vom 19. Juli 1674, März 1672 bis Mai 1683. Hooke R., *The Diary of Robert Hooke, M.A., M.D., F.R.S., 1672 – 1680: Transcribed from the Original in the Possession of the Corporation of the City of London (Guildhall Library)*, Robinson H.W., Adams W., Hrsg., Indiana University, Taylor & Francis, 1935

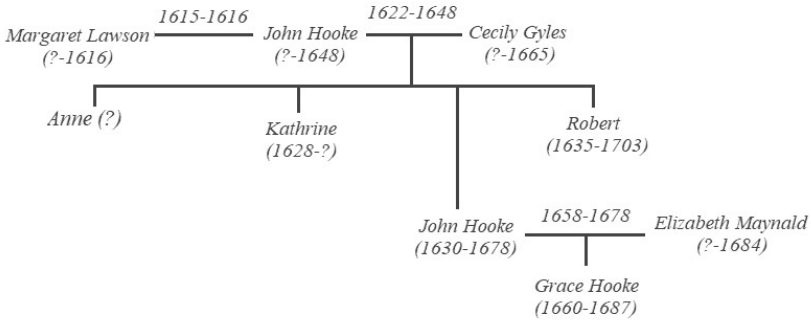



Abbildung 1.1: *Robert Hookes Stammbaum.* [7]

verlassen hatte, schrieb sich Hooke in die Westminster School ein. Er gab sein Geld dem Schulleiter der Westminster School, Dr. Richard Busby. Die Westminster war eine der ältesten und renommiertesten Schulen in London. Dr. Busby schloss seinen neuen Schüler ins Herz. Diese Freundschaft blieb, laut den Einträgen in Hookes Tagebuch, auch in den späteren Jahren erhalten.[8] Busby nahm Hooke in seinem eigenen Haus auf. Während dieser Zeit beschäftigte sich Hooke mit der euklidischen Mathematik und brachte sich das Orgelspiel bei. Er war nicht wie andere Schüler der Westminster wohlhabend. Doch sein erworbenes Wissen ermöglichte es ihm, Nachhilfe für wohlhabende Schüler zu geben und im Kirchenchor zu singen. Das brachte ihm etwas Geld ein. Für Hooke war Musik mehr als nur eine Quelle seines Einkommens. Hooke war der Meinung, dass Musik durch Balance definiert wurde. Nach seinem Verständnis herrschte eine Harmonie im Universum, demnach war diese Balance eine Konsequenz von Harmonie. Was genau diese Harmonie bedeuten könnte, wird im folgenden Kapitel diskutiert.

Im Jahr 1653 verließ Robert Hooke seinen Platz in der Westminster Schule, um eine Stelle im Christ Church, Oxford, anzunehmen.[9] Aus vielen Biografien von Hooke, erscheint diese Zeit seines Lebens ziemlich unklar. Doch über eine Sache scheinen sich Autoren aller dieser Biografien einig zu sein – Oxford war der Ort, wo Robert Hooke seine naturwissenschaftlichen Interessen zum ersten Mal entfaltete. Hier wurde er inspiriert und hier

[7] Eigene Darstellung nach Hideto Nakajima, *Robert Hooke's Family and His Youth: Some New Evidence from the Will of the Rev. John Hooke*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 48, No. 1 (Jan., 1994), S. 11 – 16

[8] Hooke R., *The Diary of Robert Hooke*, 1935

[9] vgl. Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. iii

knüpfte er Freundschaften, die, wie im Fall von Sir Christopher Wren[10], bis zum Ende seines Lebens anhielten.

Einer der wichtigsten Figuren, die Robert Hooke in Oxford kennengelernt hatte, war Dr. John Wilkins.[11]John Wilkins war ein Vertreter der Lehre von Galileo Galilei und Kepler, ein *Kopernikaner* und ein großer Vertreter des englischen Philosophen der Naturwissenschaften Sir Francis Bacon.[12] Im Jahr 1638 schrieb Wilkins sein erstes Buch. In seinem Werk *Discovery of a New World in the Moone* argumentierte er als Fürsprecher von Kopernikus und präsentierte Galileo Galileis Ideen und Entdeckungen in einer *Fachsprache*, die verständlich für Englisch Lesende war. 1648 publizierte Wilkins *Mathematical Magick*, das eine große Anwendung in der Mathematik und der mechanischen Technologie fand. Das, was in seinen Werken dominiert, ist die Idee oder der Wunsch von Anwendungen der Erfindungen und Entdeckungen, womit er im Ganzen der Ideologie von Sir Francis Bacon nachging. Bacons Philosophie beeinflusste Wilkins und auch andere aus seiner Generation. Die Idee war nicht nur die Philosophie der Natur und ihre Funktion darzustellen, sondern auch das Nutzen ihrer Kraft und Eigenschaften, um dadurch zu Erfindungen zu gelangen, die für das Wohlbefinden der Menschheit sorgen sollten. Wilkins unterstützte Hooke in Bereichen der Astronomie, Mathematik und Mechanik. Hierbei ist es wichtig zu erwähnen, dass das 1648 veröffentlichte *Mathematical Magick* von Wilkins einen wichtigen Einfluss auf Hooke ausübte.[13] Dieses Werk wurde 1680 neu aufgelegt und besteht aus zwei Büchern. Das erste Buch beschreibt Wirkungen auf Geräte wie z. B. der Waage. Das zweite Buch – *Daedalus* – beinhaltet Beschreibungen über *Various devices* wie z. B. Uhren, Wind-, Wasser- und Sägemühlen.

Wie auch in einigen anderen Städten der 1640er und 1650er Jahren gab es auch in Oxford Gruppen von Wissenschaftlern und Denkern, die sich mit Philosophien über das Universum befassten. Sie entwickelten verschiedene Methoden und Grundsätze, suchten nach theoretischen und praktischen Erklärungen. Im 17. Jahrhundert gehörten die Wissenschaftler zur einer von zwei Gruppen, zu der Baconianischen oder zu der Kartesianischen Gruppe.

[10]Sir Christopher Wren (geboren im Oktober 1632 in Wiltshire, gestorben im März 1723 in Hampton Court) war ein Astronomie Professor am Gresham College und einer der Gründungsmitglieder der Royal Society of London 1662. Weiterhin war er ein berüchtigter Architekt. Eins der bekanntesten Werke Christopher Wrens ist die St. Paul's Cathedral in London. In Zusammenarbeit mit Robert Hooke entwarf er das Monument, dass als Denkmal des Großen Brandes von London 1666 erinnern soll.

[11]John Wilkins (geboren 1614 in Fawsley, gestorben im November 1672 in London) war ein Gründungsmitglied der Royal Society of London 1662 und er wurde auch als erster Sekretär der Society gewählt. Wilkins spielt eine wichtige Rolle in der Entwicklung von Hookes Forschung, weswegen mehr über seine Persönlichkeit in kommenden Text zu finden sein wird.

[12]Sir Francis Bacon (geboren am 22. Januar 1561 in London, gestorben 9. April 1626 in Highgate) war ein englischer Philosoph. Er teilte die theoretische Naturphilosophie in Physik und Metaphysik. Diese würden jeweils den operativen Wissenschaften Mechanik und Magie entsprechen. Das naturphilosophische Wissen wird in Form einer Pyramide betrachtet: durch Induktion erfolgt der Anstieg von den Daten der Naturgeschichte zur Physik und von dort zu der Metaphysik.

[13]Kent P, Chapman A., Hrsg., *Robert Hooke and the English Renaissance*, 2005, S. 52

> *Seventeenth–century scientists took their positions somewhere on the spectrum between these two approaches, the Baconian (inductive, empirical, arguing from fact to theory) and Cartesian (deductive, hypothetical, arguing theory to fact). Hooke paid homage to Bacon, "the incomparable Verulam", and he was always a proponent of experiment observation and accurate measurement.*[14]

Die Baconianische Gruppe beschäftigte sich mit induktiven und empirischen Forschungen, in denen Fakten über Theorien stehen. Das bedeutet, nur etwas, was experimentell nachgewiesen werden konnte, konnte einen Baustein für eine Theorie darstellen. Aus Hookes Arbeiten ist ersichtlich, dass er seine *Theorien* anhand von Experimenten und Beobachtungen aufbaute, was ihn eindeutig zu einem Vertreter der Baconianischen Herangehensweise machte. Wallers Biografie über Hooke beinhaltet ein *Generelles Schema* (*Abbildung 1.2*) zu der Interpretation von Hookes Verständnis der Naturphilosophie. Aus diesem Schema kann entnommen werden, dass Hooke die Phänomene auf der Erde und im Kosmos unterschiedlich und unabhängig voneinander interpretiert. Das bedeutet, dass die Interpretation seiner Arbeit, im Gegensatz zu den Arbeiten seiner Zeitgenossen, eine andere Herangehensweise erfordert. Trotz der Tatsache, dass Hooke ein Vertreter der Baconianischen Herangehensweise war, kann in einigen seiner Veröffentlichungen eine kurzfristige Phase des intuitiven Vorgehens herausgelesen werden, aber selbst die von ihm gestellten Hypothesen, wurden von ihm selbst nach einem bestimmten Zeitraum entweder bestätigt oder widerlegt. Die zweite Gruppe, die Kartesianische Gruppe, beschäftigte sich eher deduktiv und hypothetisch mit der Wissenschaft.

> *The Oxford group was interested in the practical aspects of science as well as the theoretical, and worked on inventing and improving a tremendous variety of mechanical devices, ranging from dials and flying machines to beehives. Wilkins and Hooke pursued flying experiments, and Hooke constructed a model which, with the help of weights and springs* [...] *The club tried several flying experiments, including the blowing of various objects over London Bridge* [...] *Other experiments involved perpetual motion,"new ways of Intelligence, New Cyphers", all of which had so interested Wilkins earlier, and "Ways of submarine Navigation", which he had discussed in his Mathematical Magick. The club also tried to improve coaches "for ease, strength and lightness"* [...] *This sort of effort suggests that the more practical and utilitarian attitudes of the Royal Society stemmed from the Oxford group*[...][15]

Es kann darüber diskutiert werden, ob einige fundamentale Merkmale von Hookes späteren Ideen durch den Einfluss von Wilkins gesehen werden können oder nicht. Anhand von Wil-

[14] Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 13 – 14

[15] Shapiro B.J., *John Wilkins, 1614 – 1672. An intellectual biography*, Berkeley, University of California Press, 1969, S. 133 – 134

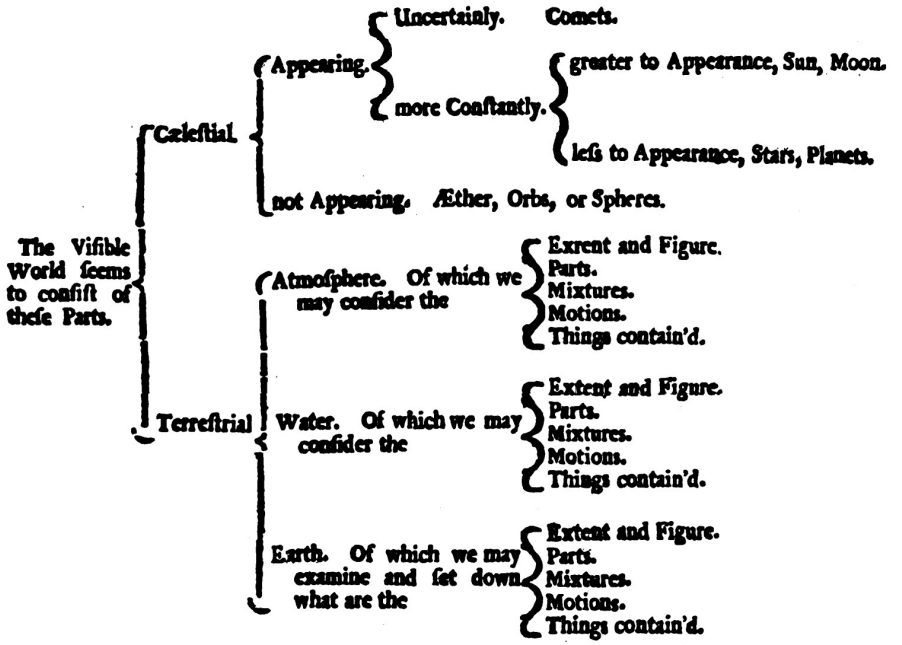



Abbildung 1.2: *Ein generelles Schema der Naturphilosophie nach R. Hooke*[16]

kins' Biografie kann vermutet werden, dass Hooke und Wilkins gute Freunde waren. Wilkins unterstützte Hooke und förderte seine Talente. Es war auch unter anderem Wilkins, der später Hooke für die Positionen des Kurators der Royal Society of London und des Professors für Geometrie am Gresham College vorschlug.[17] Für Hooke war die Freundschaft mit Wilkins sehr wichtig. Er schrieb in dem *Preface* von *Micrographia*:

> *There is scarce one invention, which this nation has produced in our age, but it has some way or other been set forward by his assistance. My Reader, I believe, will quickly guess, that it is Dr. Wilkins that I mean. He is indeed a man born for the good of mankind, and for the honour of his country, in the sweetness of whose behaviour, in the calmness of his mind, in the unbounded goodness of his heart, we have an evident instance, what the true and primitive unpassionate religion was, before it was soured by particular factions* [...] *So may I thank*

[16]Waller R., The Posthumous Works, 1705, S. 22
[17]Shapiro B.J., *John Wilkins, 1614 – 1672*, 1969, S. 200 – 201

> *God, that Dr. Wilkins was an Englishman, for wherever he had lived, there had been the chief Seat of generous Knowledge and true Philosophy.*[18]

Hieraus ist zu erkennen, dass Hooke großen Respekt gegenüber Wilkins und seiner Arbeit empfand. Obwohl es keine übrig gebliebenen oder nachweisbaren Dokumente gibt, die aus der Zeit von Hookes und Wilkins' Zusammenarbeit stammen, geht aus den Berichten von Dr. Wilkins und Hooke (um die Jahre 1655 und 1656) hervor, dass Hooke Wilkins in verschiedenen Projekten unterstützt hat.[19]

Ein fundamentales Ereignis, das Robert Hookes Leben veränderte, war das Treffen mit Robert Boyle. Laut Robert Boyles Biografen passierte dieses Ereignis in der zweiten Hälfte des Jahres 1654.[20] Nicht sehr viel später engagierte Robert Boyle Hooke als seinen Assistenten. Dieses Arbeitsverhältnis öffnete Hooke viele Türen in der Welt der Wissenschaft. Sowohl Wilkins als auch Boyle blieben bis zu ihrem Tod treue Freunde von Hooke.

## 1.2 Die Zusammenarbeit mit Robert Boyle

Robert Boyle wurde im Jahr 1627 als Sohn einer eher wohlhabenden Familie auf Schloss Lismore (Irland) geboren. Es war das Zeitalter des Barock, in der Menschen versuchten, die Natur analytisch zu verstehen und hierbei wesentliche Schritte zum neuzeitigen Experimentieren vollzogen. Dem ging auch Boyle nach. Er war einer der Gründungsmitglieder der Royal Society of London. Boyle war in Besitz eines gut ausgestatteten Labors in London. Da er ein angesehenes Mitglied der Royal Society of London war, beschäftigte Boyle nicht nur einheimische Mitarbeiter in seinem Labor in London, sondern auch auswärtige Korrespondenten.

Bereits einige Jahre vor der Gründung der Royal Society, also in der Zeit als Robert Boyle in Oxford lebte, entwickelte Boyle erste Ideen über die Eigenschaften der Luft.

Schon seit der Antike, und später auch im 17. Jahrhundert, wurde die Luft als ein vitales Element der Natur angesehen. Die Hypothese, dass die Materie aus unteilbaren Teilchen aufgebaut ist, die sich in einem leeren Raum bewegen und durch die Leere des Raumes die Möglichkeit zur Bewegung und Wechselwirkung besitzen, wurde von Aristoteles abgelehnt. Seine Ansicht war, dass eine Bewegung ohne ein treibendes Medium unmöglich erschien. Es galt die Annahme, dass der Raum erfüllt sein muss. Des Weiteren wurde eine Abneigung der Natur gegen das Leere postuliert. Diese Abneigung wurde später mit *horror vacui* bezeichnet. Diese Theorie wurde mit Torricellis Beobachtungen im Jahr 1643 angefochten. Evangelista Torricelli, Schüler von Galileo Galilei, beobachtete einen Leerraum

[18] Hooke R., *Micrographia*, 1665, The Preface S. 27 – Die Seiten im Preface sind nicht gekennzeichnet.

[19] vgl. Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S.iv, R.Hooke, *Lectures de Potentia Restitutiva; or of Springs*, London, 1678, S. 23

[20] vgl. Masson F., *Robert Boyle. A biography.*, London, 1914, Maddison R.E.W., *The life of the honourable Robert Boyle*, London, 1969, Acland H.W., *The inaugural Robert Boyle lecture*, Oxford, 1892

Abbildung 1.3: *Robert Boyle (1627 – 1692)*[21]

direkt über dem Quecksilber in einem abgedichteten Glas seines neu-erfundenen Barometers. Philosophen ganz Europas versuchten eine logische Erklärung für *Torricellis Vakuum* zu finden.

Um dieses Phänomen richtig erforschen zu können, musste das Vakuum in einem größeren Volumen erzeugt werden. Das Volumen des Raums sollte so geschaffen werden, dass es leichter war, als beim Inneren des Barometers experimentelle Anordnungen anzubringen. Ein erster Schritt in dieser Richtung gelang Otto von Guericke. Dieser demonstrierte die Kraft des Luftdrucks in einem Experiment, das mit zwei großen Halbkugeln aus Kupfer (Magdeburger Halbkugeln) durchgeführt wurde. Die beiden Halbkugeln wurden mittels einer Dichtung zusammengelegt.

Es waren Boyles Forschungen zur Luft und zum Vakuum, die in diesem Zusammenhang das Debüt von Hookes wissenschaftlicher Arbeit auf die Bühne brachten. Boyle begann im Jahr 1655 – also vor der Erfindung der Luftpumpe – mit seinen Experimenten zur Erforschung von Luft. Er befasste sich mit der Natur des sogenannten *entflammbaren Prinzips* und dessen Verbindung zur Luft. In diesem Prinzip ging es mehr oder weniger, um die

[21] Birch T., *The Works of the Honourable Robert Boyle*, London, 1772

Tatsache, dass das Feuer keine angeborene Kraft sei, sondern ein chemischer Prozess. In diesem Zusammenhang wurde die Luft nicht mehr als ein pures Element angesehen, sondern als eine Eigenschaft oder eine Komponente, die zu verschiedenen chemischen Reaktionen führen konnte. Hooke und Boyle nannten diese Komponente ein *Menstruum* oder Lösungsmittel.

Boyle wollte das Design von Otto von Guerickes Pumpe verbessern und erneuern. Nach Boyles Ansicht hatte von Guerickes Pumpe ein paar praktische Nachteile. Boyle und Hooke suchten nach Lösungen dieser Probleme. Auf der *Abbildung 1.4* ist ihre erste erfolgreiche Luftpumpe gezeigt. Das Gerät bestand aus zwei Hauptteilen: einer Glaskugel (oder der sogenannte *Empfänger*) und der Pumpvorrichtung selbst. Die Glaskugel stellte eigentlich das Volumen dar, woraus die Luft ausgepumpt werden sollte. Die Glaskugel war an ihrer Basis befestigt, sodass es in ein Messinggerät ($N$), mit einem Hahn ($S$), passte. Dies wiederum wurde mit einem hohlen Messingzylinder, (3) der etwa 36 $cm$ lang und ungefähr einen Innendurchmesser von 8 $cm$ hatte, verbunden. Am oberen Rand des Zylinders befand sich ein kleines Loch, in dem ein Messingventil ($R$) nach Bedarf eingefügt werden konnte. Innerhalb des Zylinders war ein Holzkolben mit einem dicken Stück Leder gekrönt (4), das für eine sehr enge Passung zwischen den Kolben und der Innenseite des Zylinders vorgesehen war. Der Kolben wurde von oben und nach unten mithilfe einer Eisenstange (5) und einem Ritzel (7) bewegt. Die gesamte Maschine war auf einem Holzrahmen befestigt ($I$). Bei einer geschlossenen Position des Hahns ($S$) und dem eingesetzten Messingventil ($R$) wurde der Holzkolben bis zur Oberseite des Zylinders (3) gezogen. Zu diesem Augenblick befand sich keine Luft zwischen dem Holzkolben und der Oberseite des Zylinders (3). Der Hahn ($S$) wurde geöffnet und der Holzkolben wurde nach unten gezogen, sodass eine Luftmenge aus der Glaskugel in den Zylinder (3) gelangen konnte. Der Hahn ($S$) wurde zugedreht, das Ventil ($R$) entfernt und der Holzkolben nach oben gedrückt, wodurch die Luft nach außen getrieben wurde. Dieser Prozess wurde wiederholt, wobei jede *Absaugung* immer mehr Kraft erforderte, da die im Behälter verbleibende Luftmenge verringert wurde.[22]

Hooke arbeitete in Boyles Labor für ungefähr vier Jahre. Diese Zeit verbrachte Hooke damit, Boyle zu helfen die Luftpumpe (später Vakuumpumpe genannt) zu bauen und die Experimente, die in diesem Zusammenhang ausgeführt werden sollten, durchzuführen. Boyle erkannte Hookes ungewöhnliche Geschicklichkeit für die Entwicklung von mechanischen Geräten und seine Begabung für die Mathematik.

Nach Hookes eigener Darstellung erfand und perfektionierte er die Luftpumpe von Boyle im Jahr 1658 oder 1659. Hooke beanspruchte häufig den Verdienst für gewisse Erkenntnisse und Erfindungen, und aus dem Grund erscheinen seine Aussagen zu gewissen Ereignissen nicht immer glaubhaft. Boyle aber, ungewöhnlich für seine Zeit, gab offen zu,

[22]Shapin S., Schaffer S., *Leviathan and the Air-pump. Hobbes, Boyle, and the experimental life*, Princeton, 1985, S. 28

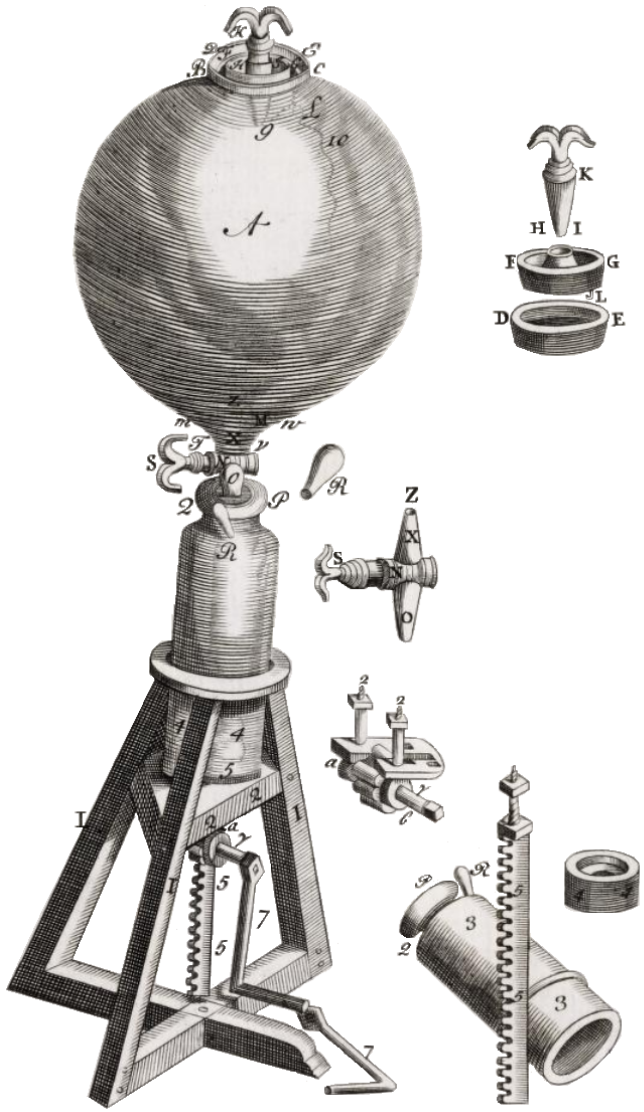



Abbildung 1.4: *Robert Boyles erste Luftpumpe, 1660.*[23]

[23]Shaw P., *The philosophical works of the Honourable Robert Boyle Esq., Vol. II*, London, 1738, S. 449

dass sein Assistent ihm eine Pumpe, die tatsächlich funktionierte, gebaut hatte.[24]. Mit der Anwendung dieses Gerätes konnte sowohl höherer als auch niedrigerer Druck als den normalen Atmosphärendruck in der Glaskugel erzeugt werden. Boyle und Hooke beschrieben dreiundvierzig Versuche zur Messung der Lufteigenschaft mit der Luftpumpe. Unter anderem half das Boyle, sein nach ihm benanntes Gasgesetz zu etablieren: Bei einer konstanten Temperatur ist das Volumen des Gases umgekehrt proportional zum ausgeübten Druck.[25]

Während Hooke bei der Perfektionierung von Boyles Pumpe war, arbeitete er auch mit Christopher Wren am Barometer und am Mikroskop, sowie an astronomischen Instrumenten unter der Leitung von Seth Ward.[26] Nebenbei versuchte Hooke, eine Uhr zu entwickeln, die eine genaue Zeit auf der See zeigen würde. An dieser Stelle wird klar, dass Hooke viele Dinge simultan machte. Das hatte die Konsequenz, dass Hooke häufig angefangene Arbeiten nicht zu Ende brachte.

Eins der ersten Veröffentlichung von Hooke erschien im Jahr 1661. In dieser Veröffentlichung zur Kapillarwirkung nahm er alle Phänomene, die er in den Experimenten mit Boyle beobachtet hatte, in Betracht. Um sich mit vielen Fragen der damaligen Naturphilosophie auseinandersetzen zu können, entwickelte Hooke seine eigene Theorie zur Materie. Er formulierte die Eigenschaft von Flüssigkeiten, sich mit anderen zu vermischen, als *Kongruenz* und ihren Widerstand gegen ein solches Vermischen als *Inkongruenz*.

> *That there is such an unequal pressure, I shall prove from this, that there is a much greater inconformity or incongruity (call it what you please) of Air to Glass, and some other Bodies, than there is of Water to the same. What I mean hereby, I shall in short explain, by defining conformity or congruity to be a property of a fluid Body, whereby any part of it is readily united or intermingled with any other part, either of it self, or of any other Homogeneal or Similar, fluid, or firm and solid body: And unconformity or incongruity to be a property of a fluid, by which it is kept off and hindred from uniting or mingling with any heterogeneous or dissimilar, fluid or solid Body.*[27]

Dieser ungleiche Druck den Hooke hierbei beschrieben hat, bezog sich auf die Beobachtung die er mit einem U-Rohr (*Abbildung 1.5*) gemacht hatte. In diesem U-Rohr befand sich

[24] vgl. Agassi J., *Who discovered Boyle's Law?*, Studies in the History and Philosophy of Science, Vol. 8, 1977, S. 202

[25] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 20

[26] Seth Ward (geboren 1617 in Aspenden, Hertfordshire, gestorben am 1689 in Knightsbridge, Middlesex) war ein Gründungsmitglied der Royal Society of London 1662. Ward schrieb mehrere mathematische Werke. Eins der bekanntesten *Idea trigonometriae demonstratæ* wurde 1654 veröffentlicht. 1661 trat er als Dekan vom Savilianischen Lehrstuhl für Astronomie in Oxford zurück, um im darauffolgenden Jahr Bischof zu werden.

[27] Hooke R., *An Attempt for the Explication of the Phænomena*, London, 1661, S. 7 – 8

Abbildung 1.5: *Das von Hooke verwendete U-Rohr, zur Beobachtung der Höhenveränderung vom Wasser.*[28]

Wasser, dass die Höhe $AB$ des Rohres ausfüllte. An einem Ende $D$, das geöffnet war, pustete er in das Rohr rein, wobei er beobachtete, dass die Oberfläche des Wassers, das vorerst im Punkt $B$ war, sich verschoben hatte. Das verursachte auch, dass sich die Oberfläche des Wassers, das sich vorerst im Punkt $A$ befand, auch änderte. Beim Entnehmen von Luft aus dem Rohr, also beim Aussaugen, kann dasselbe Phänomen beobachtet werden, nur andersrum. Die Hypothese die Hooke hiermit beweisen oder zeigen wollte, ist, dass die Wirkung des Luftdrucks (von außen) die Höhe der Wasseroberfläche beeinflusst.[29]

Hooke behauptete nicht zu wissen, woher diese Kongruenz kam, aber er nahm an, es sei eine mechanische Eigenschaft der Materie, welche vielleicht im Zusammenhang mit Teilchen – Kräften liegen. Vier Jahre später schrieb er in der *Micrographia* mehr dazu.[30]

[28]Hooke R., *An Attempt for the Explication of the Phænomena*, 1661
Die Zeichnung befindet sich am Anfang der Veröffentlichung und die Seite ist nicht nummerisch gekennzeichnet.

[29]Hooke R., *An Attempt for the Explication of the Phænomena*, 1661, S. 7

[30]vgl. Hooke R., *An Attempt for the Explication of the Phænomena*, 1661, S. 9 – 10, Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S.128 – 129, Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 21

## 1.3 Die Ära in der Royal Society of London

Am 28. November 1660 nahm die Geschichte der *Royal Society of London* ihren Anfang. Nach einem Vortrag von Christopher Wren beschlossen zwölf Wissenschaftler des Gresham College, sich künftig wöchentlich zum Gedankenaustausch zu treffen. Es handelte sich hierbei um einen Verein, der die Förderung naturwissenschaftlicher Experimente in den Vordergrund stellte. Der Name *Royal Society* erschien erstmals 1661 in gedruckter Form. Zum ersten Präsidenten wurde William Brouncker[31] gewählt, wobei auch die Mitglieder des Councils festgelegt wurden.

Die Funktionen und die Ernennung derjenigen, die diese Funktion durchführen sollten, wurden von der Society klar definiert. Um ein strukturiertes Verständnis von der Hierarchie in der Society zu gewährleisten, erscheint es für den Inhalt dieser Arbeit wichtig, lediglich die Hauptfunktionen zu beschreiben. Diese sind in der Satzung der Gründung von der Society aus dem Jahre 1662 wie folgt festgesetzt:

**Der Präsident.** Die Aufgabe des Präsidenten bestand darin, in allen Sitzungen der Gesellschaft und des Rates teilzunehmen und alle Debatten zu regeln, Fragen zu stellen und zu beantworten, je nach Sinn und Zweck der Sitzungen, Berichte von Komitees, Kuratoren und anderen einzufordern, Unregelmäßigkeiten zu überprüfen und alle Personen zur Ordnung zu halten, alle außerordentlichen Sitzungen der Gesellschaft und des Rates bei allen dringenden Anlässen einzuberufen und die Statuten der Gesellschaft auszuführen oder für deren Ausführung zu sorgen.

**Der Sekretär.** Die Sekretäre hatten die Verantwortung und das Sorgerecht für das Charter-Buch, das Statuten-Buch, die Protokoll-Bücher der Gesellschaft und des Rates, die Register-Bücher und die Brief-Bücher der Gesellschaft, sowie für alle Papiere und Schriften, die der Gesellschaft gehören; jeder von ihnen sollte veranlassen, dass diese Bücher bei jeder Versammlung der Gesellschaft oder des Rates vorgelegt werden, wie es erforderlich war oder wie es ihnen von der Gesellschaft oder dem Rat befohlen wurde.

**Der Kurator.** Die Aufgabe und Tätigkeit eines Kurators war es, sich um alle Experimente, ihre Durchführung, die Beobachtungen und Demonstration zu kümmern, die von der Society beauftragt wurden und über diese zu berichten. Darüber hinaus sollte er Tätigkeiten durchführen, die mit dem Ziel und Zweck der Society in Übereinkunft standen und von dieser von Zeit zu Zeit beauftragt wurde, wie z. B. beliebige Untersuchungen in den Bereichen der Naturwissenschaften, Künste und Erfindungen.[32]

Gemäß ihrem Motto *Nullius in Verba* (*sich nach niemandes Worten richten*) beschäftigte sich die Vereinigung nicht ausschließlich mit den in ganz Europa aufkommenden neuesten

[31] William Brouncker, (geboren 1620 in Castle Lyons, Irland, gestorben 1684 in Westminster) war ein Gründungsmitglied der Royal Society of London. Er war im Disput mit Hooke bezüglich von Kommentaren, die Brouncker gegenüber Charles II. geäußert hatte, der im Nachhinein von einem Patent für Hookes federregulierte Uhr abriet.

[32] The Royal Society of London, *The Statutes of the Royal Society of London*, Charters and Statutes of the Royal Society of London, 1663, S. 91 – 97

Abbildung 1.6: *Zu Beginn des Bestehens der Royal Society of London fanden wöchentlich Treffen im Arundel House statt. Später, im Jahr 1674 traf sich die Gesellschaft im Gresham College.*[33]

wissenschaftlichen Thesen. Die Gelehrten überprüften Hypothesen mit Experimenten und erforschten dadurch neu entstandene Fragestellungen.

Im Dezember 1660 konzipierte die Gesellschaft Vorschriften für die Durchführung von Experimenten und prägte ein neues Wort für diejenigen, die diese Experimente vorbereiten und durchführen sollten – Kuratoren. In den Anfängen der Entwicklung der Society wurde angenommen, dass die Kuratoren Position nicht unbedingt als eine Dauerstelle angetreten werden musste. Die Mitglieder der Society hatten gehofft, dass während der Entwicklung gewisser Experimente die *Erfinder* freiwillig die Demonstration dieser Experimente selbst ausführen würden. Dadurch hätte sich die Society die Finanzierung dieser Stelle sparen können. Das System von freiwilligen Kuratoren war nicht so erfolgreich, wie es erhofft wurde. Nur ein paar der Mitglieder nahmen ihre experimentelle Arbeit dabei ernst. Ende 1662 entschieden die Gründer der Royal Society, dass die Treffen mehr Vorteile von einem in Vollzeit beschäftigtem Wissenschaftler hätten. Robert Hooke war der perfekte Kandidat für diese Rolle. Er war der Schützling von zwei führenden Persönlichkeiten, Boyle und Wilkins, und er war bereits für seine Fähigkeiten der konzeptuellen Entwicklung und der praktischen Umsetzung von Experimenten und Instrumenten bekannt. Außerdem war er ein kompetenter Wissenschaftler, der für die Arbeit zum Verhalten von Flüssigkeiten in Glasrohren ausgiebige Erfahrungen hatte. Er arbeitete mit einem Mikroskop und Teleskop, und er war einer von Europas Meistern, was das derzeit wichtigste Gerät für Experimente

[33]Knight C., *London, Vol. I*, Published by Charles Knight & Co., Ludgate Street, London, 1841, S. 164

betraf – die Luftpumpe. Da Hooke kein unabhängiges Gehalt hatte, nahm er die Stelle an. Robert Boyle war zum Wohl der Royal Society bereit, seinen Assistenten gehen zu lassen. Am 12. November 1662 akzeptierte die Royal Society den Vorschlag von Sir Robert Moray[34], dass Robert Hooke die Stelle des Kurators bekommen sollte. Hookes offizielles Antreten in der Society fand erst im Jahr 1665 statt, aber mit seinen Aufgaben für die Society begann er sofort. Er unterhielt die Gesellschaft mit verschiedenen Vorführungen mit komprimierter Luft, fallenden Körpern, reflektiertem Licht, usw. Nach sechs Monaten, im Juni 1663, wurde er zum *Fellow* der Society ernannt und im Dezember 1663 wurde er gebeten vier Tage in der Woche im Gresham College zu verbringen, wo er Experimente vorbereitete, die er dann dem König vorführen sollte.[35]

Das Hooke enorme wissenschaftliche und experimentelle Vorteile der Society brachte, steht außer Frage, aber es kann auch behauptet werden, dass die Society auch, ökonomisch gesehen, große Vorteile hatte, da Hooke vorerst ohne Bezahlung für sie gearbeitet hatte. Angesichts der Tatsache, dass die Royal Society vorgab, alle nötigen Vorkehrungen vorgenommen zu haben, um den Betrag von £80 aufzubringen, zeigen die darauffolgenden Ereignisse das Gegenteil. Es kann vermutet werden, dass es der Society sehr wohl bewusst war, dass Hookes Drang nach Anerkennung so groß war, dass er die Tatsache in Kauf nehmen würde, für die Society umsonst zu arbeiten, nur um von der gleichen Gesellschaft anerkannt zu werden.

### 1.3.1 Der Kurator

Hooke war, unabhängig von der Arbeit in der Society, auf der Suche nach einem alternativen Einkommen. Im Mai 1664 trat Isaac Barrow[36] von seiner Position als Professor für Geometrie am Gresham College zurück. Das war eine ideale Position für Hooke, für welche er sich wahrscheinlich Unterstützung der Royal Society erhoffte. Der Ausschuss des Gresham College entschied sich gegen Hooke zugunsten von Arthur Dacres, der ein Naturphilosoph am St. Bartholomew's Hospital war. Einige Tage später traf sich Hooke mit John Graunt, einem Mitglied der Royal Society. Sie kamen dabei mit dem Finanzier Sir John Cutler ins Gespräch. Cutler war ein treuer Freund von Graunt. Nach dem Gespräch über Hookes Misserfolg am Gresham College, bot Cutler Hooke ein jährliches Gehalt von

[34]Sir Robert Moray (geboren 1608 oder 1609 in Perthshire, gestorben 1673 London) war Gründungsmitglied und Präsident der Royal Society of London. Moray führte auf der Gründungsversammlung der Royal Society den Vorsitz. Moray ist hauptsächlich als schottischer Staatsmann, Freimaurer und Diplomat bekannt, jedoch war er auch ein angesehener Chemiker, Metallurg, Mineraloge, Alchemist und Mathematiker.

[35]vgl. z. B. Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 22, Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 27

[36]Isaac Barrow (geboren 1630 in London, gestorben 1677 in London) war ein angesehener Mathematiker, dessen *Lectiones Geometricae* wahrscheinlich die Arbeiten darstellen, die während seiner Gresham Zeit entstanden. Diese Veröffentlichung beinhaltet wichtige Arbeit in Tangenten, die den Ausgangspunkt der Arbeit von Newtons Arbeit in Verbindung gebracht werden können.

£50, wenn Hooke dafür weiterhin für die Royal Society arbeiten würde. 1683, als Hooke in einen Rechtsstreit mit Cutler geriet, behauptete Hooke, dass die £50 ein unaufgefordertes und bedingungsloses Geschenk waren. Wahrscheinlich hatte Hooke dieses Gespräch nach zwanzig Jahren so in Erinnerung gehabt oder er empfand es nach zwanzig Jahren als solches. Die Mitglieder des Rates der Royal Society, die sich über Cutlers Angebot unterhielten, wussten, dass sie vorher Cutlers Bedingungen akzeptieren müssten, bevor die Auszahlung vereinbart werden konnte.

Im Grunde wollte Cutler, dass Hooke die neue Greshamprofessur in dem Bereich Geschichte des Handels bekommt, mit der Verantwortung, Vorlesungen einmal pro Woche zu halten. Diese Veranstaltungen sollten während der Ferienzeit (sechzehn Wochen pro Jahr) gehalten werden, und zwar über Handel, Kunsthandwerk und mechanische Aspekte der Wissenschaft. Trotz Hookes späteren Behauptungen, dass die £50 ohne spezifische Bedingungen gegeben waren, verstand Hooke deutlich, dass er verpflichtet war, sechzehn Vorträge pro Jahr zur Förderung von Kunst und Natur, sowie zu Themen, die von der Royal Society bestimmt wurden, zu halten.[37]

Anfang September 1664 zog Hooke in die Räume des Gresham College, was sein Heim und Labor bis zu seinem Tod war. Hooke bat um eine neue Überprüfung der Auswahl der Stellenbesetzung vom Vorjahr. Im Juni 1664 stellte die Royal Society fest, dass es bei dieser Auswahl von Dacres und dem Ausschusskomitee Unregelmäßigkeiten gab. Die ursprüngliche Besetzung des Komitees, das aus neun Männern bestand, war 5 : 4 für Hooke, doch Sir Anthony Bateman, der keine richtige Position im Komitee hatte, erklärte Dacres als Gewinner. Zwei weitere Mitglieder von Batemans Familie waren ebenso im Komitee, die auch für Decres gestimmt hatten. Sir John Lawrence[38], der das Komitee zusammengestellt hatte, der auch Hookes Fall nachging, wurde sein guter Freund. Dank der Royal Society und seiner Ausdauer wurde Hooke im März 1665 als Professor für Geometrie im Gresham College eingestellt.[39] Zu diesem Zeitpunkt war Hookes Karriere, so schien es für den Augenblick, gesichert. Robert Hooke, Professor für Geometrie am Gresham College, Cutler Dozent, Mitglied und Kurator der Royal Society, wurde als professioneller Forscher der Wissenschaft, in einer Welt, die von Virtuosen und Gelehrten geleitet war, etabliert.

Während seiner Zeit als Kurator führte Hooke viele Experimente über die Eigenschaften der Luft und der Flüssigkeiten durch, machte Vorführungen mit seinem Mikroskop, mit Pendeln und der Luftpumpe. Viele seiner durchgeführten Experimente und Vorführungen können in den Protokollen der Royal Society gefunden werden.[40]

Der Große Brand von London, der im August 1666 vier Fünftel der damaligen Stadt zerstörte, darunter die meisten mittelalterlichen Bauten und etwa Hunderttausend Menschen obdachlos machte, sorgte für eine erneute Wende in Hookes Karriere. Den Wieder-

[37] vgl. Hunter M., *Establishing the New Science*, 1989, S. 279 – 289, Birch T., *The History of the Royal Society of London, Vol. II*, 1756 – 1757, S. 142

[38] Sir John Lawrence war 1664 bis 1665 der Bürgermeister des damaligen Londons

[39] vgl. Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 179

[40] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I – III*, 1756 – 1757, durchgehend

aufbau der Stadt sah Hooke als Möglichkeit an, ein Teil von Londons Geschichte zu werden. Unmittelbar nach dem Feuer hatten der König und die damalige Regierung entschieden, dass die Stadt nach einem komplett neuem Plan wieder erbaut werden soll. Der König formierte eine Kommission zum Wiederaufbau der Stadt, zu welcher auch Hookes guter Freund Sir Christopher Wren zählte. Aus der Bekanntschaft mit Wren erhoffte sich Hooke eine leichtere Kooperation und die Möglichkeit zur Mitwirkung des Aufbaus von London. Die Tatsache, dass er keine Erfahrung in der Erbauung von einer Stadt hatte, hielt ihn nicht davon ab, dabei auch mitwirken zu wollen. Er argumentierte mit seinem Wissen als Professor für Geometrie und der Kenntnis von gewissen Messmethoden. Hooke und Wren trugen mit ihren Ideen und ihrer Kreativität zur Erneuerung der Stadt bei. Ende 1671 waren über 7000 Gebäude neu erbaut und in London kehrte das normale Leben zurück.[41]

Neben seiner Arbeit an dem Wiederaufbau Londons war Hooke weiterhin in der Royal Society tätig und entwickelte neue wissenschaftliche Ideen. Einer gab er besonderes Interesse und das war die Zeitmessung. Er befasste sich auch ausgiebig mit dem Längengradproblem[42], das ihn zur Entwicklung von diversen Formen von Pendeln führte. Im Jahr 1668 führte Hooke vor den Mitgliedern der Royal Society ein neues Gerät vor, das ein Pendel schwingen lässt, trotz der wackeligen Bedingungen, die auch auf der See herrschen. Im Jahr 1675 arbeitete Hooke intensiv an einem Mechanismus für eine Uhr. Dabei arbeitete er eng zusammen mit seinem guten Freund, den Uhrmacher Thomas Tompion.[43] Zu der Zeit, so scheint es, war er auf dem besten Weg zur Formulierung und Veröffentlichung seines Federgesetzes. Aus einem Eintrag in seinem Tagebuch vom 2. September 1675 kann entnommen werden, dass er offenbar Tompion seine *Theorie* erläuterte:

> [...] *told him on my way of opposite springs which I had fully experimented before. All springs at liberty bending equall spaces by aequall* [sic] *increases of weight.*[44]

Ein paar Tage später setzte er das auch im Experiment um und baute einige *philosophicall Scales to show the King.*[45] Das Hooke sich damit intensiv auseinandersetzte, wird auch aus dem *Postscript* seiner Veröffentlichung *Helioscopes* (1676) deutlich:

> 1. *A Way of Regulating all sorts of Watches or Timekeeper, so as to make any way to equalize, if not exceed the Pendulum-Clocks now used.*

[41] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 89 – 95, Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930 S. 30 – 36, Milman L., *Sir Christopher Wren*, London, Duckworth and Co., 1908, S. 169 – 170

[42] Mit dem Ausdruck *Längengradproblem* wird die schwierige Bestimmbarkeit der geografischen Länge auf dem offenen Meer bezeichnet. Darüber wird mehr Rede im Kapitel Historische Kontextualisierung sein.

[43] Thomas Tompion (geboren 1639 in Northill, Bedfordshire, gestorben 1713 in London) war ein englischer Uhrmacher. Zusammen mit Hooke stellte er dem König Charles II. 1675 einen neuen Mechanismus vor, dass unter der Anleitung von Hooke gebaut wurde.

[44] Hooke. R, *The Diary of Robert Hooke*, 1935

[45] Hooke. R, *The Diary of Robert Hooke*, 1935

2. *The true Mathematical and Mechanical form of a manner of Arches for Building, with the true butment necessary to each of them. A Problem which no Architectonick Writer has ever yet attempted, much less performed. abcccddeeeeefggiiiiiiiill mmmmnnnnnooprrsssttttttuuuuuuuux*
3. *The true Theory of Elasticity or Springingness, and a particular Explication thereof in several Subjects in which it is to be found: And the way of computing the velocity of Bodies moved by them. ceiinosssttuu*
4. *A very plain and practical way of counterpoising Liquors, of great use in Hydraulicks. Discovered.*
5. *A new Selenoscope, easie enough to be made and used whereby the smallest inequality of the Moons surface and limb may be most plainly distinguished. Discovered.*
6. *A new sort of Horizontall Sayls for a Mill, performing the most that any Horizontal sayls of that bigness are capable of; and the various use of that principle on divers other occasions. Discovered.*
7. *A new way of Post-Charriott for travelling far, without much wearying Horse or Rider. Discovered.*
8. *A new sort of Philosophical-Scales, of great use in Experimental philosophy. cdeiinnoopsssttuu.*
9. *A new Invention in Mechanicks of prodigious use, exceeding the chimera's of perpetual motions for several uses. aaaaebccddeeeeegiiilmmmnnooppqrrrstttuuuuaaeffhiiiillnrrsstuu*[46]

In diesem Postscript kündigte er an, dass er die Grundsteine für die *Elastizitätstheorie* setzen wird und, dass dadurch, eine Entwicklung von einer neuen Form von Gewichtsmessung möglich sein wird. Das, was in dieser Aufzählung im Postscript aussieht wie Tippfehler, sind Anagramme lateinischer Sätze. Zu dieser Zeit war es üblich für die Formulierung von Zusammenhängen beobachtbarer Größen, Anagramme zu verwenden.[47] Z. B. das Anagramm unter der Nummer drei *cdeiinnoopsssttu* ist entschlüsselt *ut tensio sic uis* [sic]. Übersetzt bedeutet das *wie die Spannung, so die Kraft.* Diese Anagramme entstehen, indem alle Buchstaben des auf Latein formulierten Gesetzes alphabetisch geordnet werden.

Am 22. November 1677 führte Hooke auch diesbezüglich Versuche in der Society durch. Bei dieser Durchführung stellt er seine Beobachtungen zu *verbesserten Lampen* und zusätzlich die neusten Erfahrungen zu physikalisch und mechanisch verbesserten Waagen

[46] Hooke R., *A Description of Helioscopes and Some Other Instruments*, London, 1676, S. 31 – 32

[47] Das kann auch beispielsweise bei der Veröffentlichung von Christiaan Huygens zu den Saturnringen oder bei Galileo Galilei über die Mondphasen gefunden werden.

vor, die mit einer Spiralfeder konzipiert waren.[48] Was genau der Zusammenhang dieser Waagen mit einem Uhrbau ist, und die Relevanz, die dahintersteckt, werden in späteren Kapiteln mehr erläutert. Aus den kommenden Kapiteln wird auch die Bedeutung von *Helioscopes* ersichtlicher. Der Uhrbau spielte eine große Rolle in Hookes Arbeit und stellt, womöglich für Hooke persönlich, eine der größten Aufgaben in seinem Werdegang dar.

### 1.3.2 Der Sekretär

1676 zog sich Hooke immer mehr aus der Royal Society zurück und widmete sich mehr dem Aufbau von London. Zusammen mit Wren brachte Hooke 1676 das Londoner Monument zur Endphase. Das Monument (*Abbildung 1.7*) soll an das Große Feuer von 1666 erinnern. Es ist eine 61 $m$ hohe dorische Säule. Auf der Säule befindet sich eine Aussichtsplattform, die mit einer vergoldeten Urne gekrönt ist.

Im September 1677 starb Henry Oldenburg, der bisherige Sekretär der Royal Society. Das veränderte die Richtung von Hookes Karriere. Die Position des Sekretärs brachte mit sich einen gewissen Status und Macht in der Society. Oldenburgs Tod war ein großer Verlust für die Royal Society. Er war ein Mann mit enormer Energie, Sorgfalt und Aufgeschlossenheit. Die Society empfand es als eine Schwierigkeit, einen würdigen Nachfolger zu finden. Hooke übernahm vorerst vorübergehend die Position des Sekretärs an. Er ging seinen Pflichten der neuen Position nach, aber er war sich nicht sicher, ob er auch die dauerhafte Stelle bekommen würde. Er hatte zwar die nötige Reputation und das Interesse für diese Arbeit, aber seine Neutralität und Ehrlichkeit wurde nicht so geschätzt wie die von Oldenburg.[49] Am 30. November 1677 fand die Wahl statt mit folgendem Ergebnis:

> *With Henshaw in the chair and Grew and Hooke reading and marking the votes, Williamson and Hill were chosen as President and Treasurer, Wren as Vice-President, and Hooke and Grew were both elected as Council members and joint secretaries.*[50]

Zu diesem Zeitpunkt, so scheint es, erlebte Hooke diese Ernennung, als die Anerkennung, die er verdiente. Auch wenn er die Rolle als Sekretär mit Nehemiah Grew[51] teilen musste, sah er es als persönlichen Aufstieg in der Royal Society. Das, was Hooke in seiner neuen Position als wichtig sah, war, dass er nun alle Treffen der Royal Society protokollieren konnte. Wieso das Hooke als relevant empfand, wird durch die nächsten Kapitel ersichtlicher.

[48] vgl. Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VII*, 1930, S. 450 – 455

[49] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 352 – 358, Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 246

[50] Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 246

[51] Nehemiah Grew (geboren 1641 in Mancetter Parish, Warwickshire, gestorben 1712 in London) war ein Botaniker der sich ausgiebig mit der Anatomie von Pflanzen beschäftigte. Außerdem war er ein angesehener Philosoph und Arzt, der die Entdeckung machte, dass sich menschliche Fingerabdrücke von Mensch zu Mensch unterscheiden.

Abbildung 1.7: *Das Monument um 1841.*[52]

Es war Hooke, der Grew 1671 zum Mitglied der Royal Society vorgeschlagen hatte. Hookes Aufstieg lag also nichts mehr im Weg, da er die Position mit einem guten Freund teilen sollte. Bei den ersten Treffen jedoch, zumindest scheint es Hooke so empfunden zu haben, ging er weiterhin der Rolle des Kurators nach und Grew war der neue Sekretär. Hooke führte Experimente mit Linsen durch und diese Demonstration wurde von Grew protokolliert. Daran sollte im Grunde nichts Ungewöhnliches erscheinen, da Hooke selbst die Experimente durchgeführt hatte. Hooke scheint jedoch die Tatsache, dass er die Protokollierung nicht selbst durchgeführt hatte, als nicht würdevoll empfunden zu haben. Seine Aufgaben änderten sich nicht wirklich im Vergleich zu dem, was er bereits vorher getan hatte. Unabhängig von Hookes Empfinden wurde am 19. Dezember 1677 in einem Konzil beschlossen, dass von beiden Sekretären Notizen von den Treffen geführt und erklärt

[52]Knight C., *London, Vol. I*, 1841, S. 429

werden sollten. Weiterhin wurde beschlossen, dass die zukünftigen Experimente, die durchgeführt werden sollen, Wochen vor der eigentlichen Vorführung beschrieben und erklärt werden sollten.[53] Auf diese Art und Weise können objektive Antworten und Aussagen zeitlich besser durchdacht werden als vorher.

Bei allen Treffen, die nach dem 25. Oktober stattgefunden haben, ging Hooke drei Hauptprojekten nach: Beobachtung von Mikroorganismen im Wasser, Messung von der Dichte verschiedener Fluide mit einer Libellenwaage und (am 6. und 13. Dezember) die Anwendung von einem Barometer oder Baroskop zum Nachweis von Variationen des Atmosphärendrucks.[54]

Bereits Mitte 1679 gab es mehrere Anzeichen, dass Hooke seine Arbeit, die Oldenburg einst machte, nicht bewältigen konnte. Im Juni 1678 beschwerte sich Huygens, dass er nicht genug über die Arbeiten der Royal Society of London informiert wurde, und einen Monat später wurden Grew und Hooke aufgefordert, alle an die Royal Society adressierten Briefe, zu beantworten und die Zusammenfassungen der Korrespondenz in den *Philosophical Transaction* einzutragen. Im März 1679 hatte Hooke die Erlaubnis erteilt bekommen, jemanden einzustellen, der die Briefe beantworten sollte. Schon im Juli wurde dafür Denis Papin[55] eingestellt. Weiterhin wurde Hooke aufgefordert, alle seine Experimente und Demonstrationen aufzuzeichnen und zusammenzutragen. Hooke sah es in diesem Moment wahrscheinlich nicht als Priorität und legte diese Aufgabe beiseite. Dadurch würde er nicht seine Aufgaben als Sekretär vernachlässigen. Wenn in Betracht gezogen wird, dass Hooke zu dieser Zeit, zwei ausführlichere Veröffentlichungen publiziert hatte (*Helioscopes* und *Lectures de Potentia Restitutiva*), kann vermutet werden, dass Hooke auf keiner Linie seines Karrierelebens etwas vernachlässigen wollte, dass ihn zum persönlichen Ruhm führen könnte.

Im Sommer 1679 zog sich Grew von der Position des Sekretärs zurück. Diese Tatsache machte es Hooke nicht unbedingt leichter, da er nun auch die Aufgaben von Grew übernehmen musste. Doch die Situation verschlimmerte sich für Hooke noch weiter. Im September gleichen Jahres wollte Papin nach Paris zurück, aber mit einem jährlichen Gehalt von £20 und einer kostenlosen Unterkunft im Gresham Collage konnte ihn Hooke überzeugen, bis zum Ende des Jahres zu bleiben und weiter für ihn zu arbeiten.[56] Die Veröffentlichung seiner zweiten Ausgabe der *Philosophical Transaction* war vielleicht das Entscheidende, was ihm eine positive Kritik über seine Arbeit als Sekretär brachte. Am

[53] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 247

[54] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 364 – 365

[55] Denis Papin (geboren 1647 in Chitenay, Frankreich, gestorben 1712 in London) war ein französischer Physiker, Mathematiker und Erfinder, der durch das Empfehlungsschreiben von Huygens an Oldenburg sich in England und in der Society etablieren sollte. Papin hatte eine doppelwandige Luftpumpe erfunden, die besonders effektiv war. Er arbeitete mit Boyle, bis er Hookes Assistent wurde. Papin wurde 1680 zum Fellow der Royal Society gewählt.

[56] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 501 – 506., Hunter M., *Establishing the New Science*, 1989, S. 255 – 276

30. November 1680 wurde bestätigt, dass er weiterhin ein Ratsmitglied und Sekretär der Royal Society bleibt, aber dass er diese Position des Sekretärs diesmal mit Thomas Gale[57] teilen sollte. Beim selben Treffen wurde Robert Boyle zum Präsidenten gewählt, aber Boyle war krank und körperlich schwach, weswegen er im Brief an Hooke, vom 18. Dezember, die Position des Präsidenten ablehnte. Die Society hatte im Anschluss die Stelle Wren angeboten, welche Wren auch im Januar 1681 angetreten hat. Die Tatsache das Wren der Präsident der Society war, brachte Hooke ein Gefühl der Zuversicht, dass seine Position als Sekretär gesichert war.[58]

Trotz seiner erfolgreichen Vorträge über Licht, später auch Kometen und Gravitation, die zeigten, dass Hooke auch weiterhin ein eifriger und origineller Naturphilosoph war, war es für die Royal Society dennoch nicht genug, ihn als einen guten Sekretär anzuerkennen. Die Society war unzufrieden, wie Hooke Korrespondenzen führte und ebenso mit der von ihm herausgegebenen *Philosophical Transaction*. Die von der Society kritisierte Korrespondenz kann vermutlich etwas damit zu tun haben, dass sich Hooke mit vielen der Korrespondenten und auch einigen Mitgliedern der Society in einem Disput befand.[59] Wird das zweiseitig betrachtet, könnte das auch etwas damit zu tun haben, dass Hooke von einigen dieser Korrespondenten, die eventuell einen besseren Status in der Society hatten als Hooke, kritisiert worden war. Bereits Jahre davor kann aus dem Briefwechsel zwischen Oldenburg und Huygens eindeutig entnommen werden, dass Hooke als der Rivale gesehen wurde, der das Potential hatte, eine neue Form von Uhren zu entwerfen.[60] Bei der jährlichen Wahl am 30. November 1682 verlor Hooke seine Position als Sekretär und als Ratsmitglied. Die fünf Jahre als einflussreiches Mitglied der Royal Society waren kein großer Erfolg. Es scheint, dass Hooke zu sehr beschäftigt und selbst fixiert gewesen war, der nächste Oldenburg zu werden. Auch trotz der Tatsache, dass Wren der Präsident der Royal Society war, konnte dieser ihm die Position des Sekretärs nicht garantieren, denn viele Mitglieder hatten Einfluss auf die Entscheidung zur Besetzung der Führungspositionen in der Society.

Aus der bisherigen Darstellung von Hookes Werdegang, wird einerseits ersichtlich, dass Hooke viele Forschungsprojekte auf einmal bewältigen wollte. Andererseits wird deutlich, dass er sehr bestrebt war, durch seine Arbeit in der Royal Society seinen Status als aner-

[57] Thomas Gale (geboren 1637 in Yorkshire, gestorben 1702 in York) befasste sich hauptsächlich mit griechischen Schriften. Er veröffentlichte eine Sammlung *Opuscula mythologica, ethica, et physica* und Ausgaben mehrerer griechischer und lateinischer Autoren, aber sein Ruhm beruht vor allem auf seiner Sammlung alter Werke, die die frühe englische Geschichte betreffen, mit dem Titel *Historiae Anglicanae scriptures and Historiae Britannicae, Saxonicae, Anglo-Danicae scriptores X V.*

[58] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 292, Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VII*, 1930, S. 565

[59] z. B. mit Hevelius, Huygens, Newton vgl. Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, S. 36, 387 – 393, Huygens C., *Œuvres complètes. Tome VII. Correspondance 1670 – 1675*, La Haye, Martinus Njihoff, 1897, Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. II – VIII*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University of Wisconsin Press, 1965

[60] Huygens C., *Œuvres complètes. Tome VII. Correspondance 1670 – 1675*, 1897

kannter Wissenschaftler und als Autorität zu etablieren und zu festigen. Beides führte ihn mehrfach in eine Situation, in der er Konflikte austragen musste. Diese Konflikte schien Hooke so wahrgenommen zu haben, dass er ganz allein auf der einen Seite stand und seine Gegner, die die Unterstützung der Society genossen, auf der anderen Seite. Hierbei spielt es auch eine Rolle, dass er nach seiner Wahrnehmung wegen seiner Herkunft und seines sozialen Status von den übrigen Mitgliedern der Society nicht anerkannt und somit für weniger glaubwürdig gehalten wurde. Wenn also ein Mitglied wie Hooke mit einem, in der Society sehr angesehenen, Isaac Newton in Konflikt geriet, erscheint es nur nachvollziehbar, dass Hooke in seiner Wahrnehmung nicht unbedingt gerecht behandelt wurde. Hooke scheint mehrere Konflikte dementsprechend wahrgenommen zu haben und sah sich vermutlich daher als ein Opfer innerhalb der Society. Dies mag dazu beigetragen haben, dass Hooke bei sich anbahnenden Konflikten zu paranoid erscheinenden Aussagen neigte.

Bei der Beurteilung von Hookes Äußerungen zu einigen der Mitglieder der Society und deren Verhalten in Konfliktsituationen kann die Frage gestellt werden, wie berechtigt Hookes Wahrnehmung war. Auf der einen Seite erhebt Hooke Ansprüche, die aus heutiger Sicht und nach Lage der Quellen nicht nachvollziehbar sind. Auf der anderen Seite ist die Society, eine Organisation, für deren Mitglieder der soziale Status als Gentlemen of Science bedeutsam war. Das bedeutet, dass die Akzeptanz von Äußerungen zur Wahrnehmung und Erkenntnissen offenbar mit dem sozialen Status der Person verbunden war. Das führte etwa dazu, dass Aussagen von der Society mehr Anerkennung bekamen als die, die Hooke zuvor für die inhaltlich gleiche Aussage erhalten hatte. Aus dem Briefwechsel zwischen Huygens und Oldenburg, bzw. Huygens und Moray[61], wird deutlich, dass einige Ideen und Erkenntnisse, die Hooke in der Society vorgestellt hatte, ohne dessen Einwilligung weitergegeben wurden. Als Huygens dann später eigene Arbeiten, die die Ergebnisse von Hooke beinhalteten an die Society kommunizierte, interpretierte Hooke dies, nachvollziehbarerweise, als Ergebnis eines Vertrauensbruchs. Demnach gibt es durchaus Ereignisse, die Hookes Wahrnehmung bezüglich des Verhaltens der Society ihm gegenüber bestätigen. Es bleibt aber festzuhalten, auch wenn Hooke es manchmal nicht so empfunden haben mag, dass er bezüglich seiner experimentellen Fähigkeiten und Fachkenntnissen ein, auch von der Society, hoch angesehener und respektierter Naturphilosoph war.

Nach seinem Misserfolg als Sekretär wurde auch Hookes Position als Kurator infrage gestellt. Egal wie sehr er sich auch bemühte, seine Position in der Royal Society wurde immer schwächer. Mittlerweile war er einer von vier Kuratoren und verdiente sein Geld als Handelsmann. Am 2. April 1684 wurde Denis Papin als vorübergehender Kurator eingestellt, für ein jährliches Einkommen von £30. Für die nächsten drei Jahre machte Papin die Arbeit, die einst Hooke gemacht hatte. Zwei Gehälter bekam Hooke noch, im April und nach Weihnachten 1684, danach wurde er entlassen.

[61] vgl. Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. II – VIII*, 1965, Huygens C., *Œuvres complètes Tome VII*, 1897

## 1.4 Die letzten Jahre

In der Welt der Naturphilosophen war Hooke immer noch eine angesehene Figur. Er verteidigte seine Reputation als Erfinder und Architekt. Er hatte jedoch nicht mehr die Kraft oder die Originalität, um das Programm der Experimente der Society zu leiten. Doch trotz seiner Altersschwäche und seiner Kommunikation, die sich als rechthaberisch beschreiben lässt, wurde er immer wieder von der Royal Society als Ratsmitglied gewählt (November von 1689 bis 1695 und dann wieder 1697, 1698 und 1700). Hooke hielt seinen letzten Vortrag am 19. Mai 1697. Die darauffolgenden nächsten zwei Wochen dokumentierte er die jüngsten Entdeckungen der Überreste von unbekannten oder seltsamen Säugetieren, sowie die Geschichte von einem voll besetzten römischen Seeschiff, das in einem Schweizer Berg begraben lag.[62]

Hookes Gesundheit war jahrelang im schlechten Zustand, aber im Sommer 1697, nach der Aussage von Richard Waller, wurde es deutlich schlimmer:

> *About July 1697, he began to complain of the swelling and soreness of his Legs, and was much over-run with Scurvy, and about the same time being taken with a giddiness he fell down Stairs and cut his Head, bruis'd his Shoulder, and hurt his Ribbs, of which he complain'd often to the last. About September he thought himself (as indeed all others did that saw him) that he could not last out a Mounth.*[63]

Für einen Moment machte Hooke wohl den Eindruck, als würde sich sein Zustand verbessern, aber seine Füße schwollen immer mehr an, bis er sich kaum noch bewegen konnte. Den Protokollen der Royal Society nach zu urteilen, hatte Hooke bis Ende 1701 auch weiterhin Bücher und Berichte an die Society geschickt oder bot sie ihnen für ihre Bibliothek an. Da sich die Royal Society immer noch im Gresham College traf, ließ sich Hooke von seiner beschränkten Beweglichkeit nicht davon abhalten, bei den regulären Treffen anwesend zu sein. Trotz seines Alters und seiner Altersschwächen verließ sich die Society auf Hookes Fähigkeiten und Erfahrungen. Anfang 1700 wurde er gebeten, einige Experimente zu entwickeln, und wurde auch als Mitglied eines Ausschusses ernannt, dass einige alte Schriften prüfen sollte. Hooke war sehr passiv in den Treffen zwischen April und Oktober 1700, aber er wurde trotzdem zum Ratsmitglied ernannt. Seine letzte dokumentierte Teilnahme am Treffen der Royal Society fand am 10. Juni 1702 statt.

Richard Waller, der Hooke sehr gut kannte, sah, dass sich Hookes Zustand immer mehr verschlechterte:

> *Thus he liv'd a dying Life for a considerable time, being more than a Year very infirm, and such as might be call'd Bed-rid but kept in his Cloaths, and*

[62] vgl. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 395 – 410
[63] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. xxvi

> *when over tir'd, lay down upon his Bed in them, which doubtless brought several Inconveniences upon him, so that at last his Distempers of shortness of Breath, Swelling, partly of his Body, but mostly of his Legs, increasing, and at last Mortifying, as was observed after his Death by their looking very black, being emaciated to the utmost, his Strength wholly worn out, he dy'd on the third of March 1702/3, being 67 Years, 7 Months, and 13 Days Old.*[64]

Als Hooke fühlte, dass seine letzten Momente gekommen waren, bat er seinen alten Freund Captain Knox[65], zu kommen. Knox kam zu spät, um Hooke noch lebend vorzufinden. In Knox Memoiren kann folgender Bericht zu dem Ereignis gefunden werden:

> *The 2th March 1702/3 This night aboute 11 or 12 of the Clock my Esteemed Friend Dr Robert Hooke Professor of Geometry & Naturall Philosophy in Gresham College Died there, onely present a Girle that wayted one him who by his order (just before he died) came to my Lodging & called me. I went with her to the Colledge where, with Mr Hunt the Repository Keeper, we layed out his body in his Cloaths, Goune & Shooes as he Died, & sealed up all the Doores of his appartment with my Seale & so left them.*[66]

Der Tod wurde in der Royal Society am 3. März bekannt gegeben und seine Beerdigung fand drei Tage später in der St. Helen Church statt. Er wurde ansehnlich und anständig bestattet. Robert Hooke wurde von jedem Mitglied der Society zu seinem Grab begleitet. Im 19. Jahrhundert wurde sein Grab, so wird vermutet, nach London auf den Friedhof in Wanstead verlegt. Heute kann lediglich einen Gedenkstein in der Westminster Abbey gefunden werden (*Abbildung 1.8*).

Es ist schwer, ein Bild von Hookes Persönlichkeit so darzustellen, dass es ihm gerecht wird. Hookes Persönlichkeit, so scheint es zumindest aus seinen Arbeiten hervorzugehen, war es, ein Opfer seines Antriebs zu sein, da er sich anderen gegenüber beweisen wollte. Allerdings fällt es schwer, zu glauben, dass seine Arbeit immer durch Streben nach Anerkennung motiviert war. Seine Begabungen für die Aufstellung von Problemlösungen und die Entwicklung von mechanischen Geräten und die Durchführung von verschiedenen Experimenten bleibt unbestritten. Seine Motivation hingegen bleibt unklar. Aus den Protokollen der Society ist es eindeutig, dass Hooke zu vielen dieser aktuellen Forschungsprobleme gearbeitet hatte. Sei es Astronomie, Untersuchungen der Luft, Elastizität oder

[64] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. xxvi

[65] Robert Knox (geboren 1641 in London, gestorben 1720 in London) war ein britischer Seefahrer, der der British East Indian Trade Company diente. Während seiner Reisen schrieb Knox *An Historical Relation of the Island Ceylon*, worin er über seine Erfahrungen auf Ceylon berichtet. Diese wurde 1681 veröffentlicht. Das Buch erregte damals großes Interesse und machte Knox international bekannt.

[66] Knox R., *An Historical Relation of Ceylon. Together with Somewhat Concerning Severall Remarkeable Passages of my Life*, Ryan J., Hrsg., James Maclehose & Sons, Glasgow, 1911, S. 382

Abbildung 1.8: *Gedenkstein in der Westminister Abbey*[67]

die immer wiederkehrende Frage: *Wie kann eine Bewegung quantitativ beschrieben werden?* Hooke sah alles als eine Herausforderung, die überwunden werden wollte. Er hatte zu allen Fachgebieten etwas veröffentlicht und dementsprechend Untersuchungen durchgeführt. Einige dieser Forschungsfragen brachte er zwar nie zu Ende, da er vieles auf einmal bearbeitete, aber er hat sie immer in seinen Veröffentlichungen erwähnt, beschrieben und seine Sicht dazu geäußert.

[67] Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inscription-to-Hooke-in-Westminster-Abbey.jpg

# Kapitel 2

# Die Harmonie der Natur

*...for particles that are similar, will, like so many equal musical strings equally stretcht, vibrate together in a kind of Harmony or unison; whereas others that are dissimilar, upon what account soever, unless the disproportion be otherwise counter-ballanc'd, will, like so many strings out of tune to those unisons, though they have the same agitating pulse, yet make quite differing kinds of vibrations and repercussions, so that though they may be both mov'd, yet are their vibrations so different, and so untun'd, as 'twere to each other, that they cross and jar against each other, and consequently, cannot agree together, but fly back from each other to their similar particles.*[1]

Die Begeisterung über die *Harmonie* der Naturkräfte entwickelte Hooke schon in seinen Jugendjahren. Doch, was steckt hinter dieser Idee und gibt es eine Verbindung zur Formulierung seines Gesetzes der Elastizität? Um den chronologischen Verlauf, der zur Veröffentlichung des Hookeschen Gesetzes geführt hat, wiederzugeben, sollte von der Tatsache ausgegangen werden, dass Hooke in der Veröffentlichung selbst (also in *Lectures de Potentia Restitutiva*) darauf hingewiesen hat, dass er das *Gesetz der Natur* bereits in der *Micrographia* veröffentlicht hatte. Nachdem er das Ausdehnen eines Drahtes beschrieben hat, wies er darauf hin, dass ein ähnliches Verhalten bei der Luft zu beobachten sei.

> *The manner of trying the same thing upon a body of Air, whether it be for the rarefaction or for the compression thereof I did about fourteen years since publish in my Micrographia, and therefore I shall not need to add any further description thereof.*[2]

Zuerst erscheint das etwas fremd und es führt zu der Frage – in welchem Zusammenhang die Eigenschaften der Luft mit dem Elastizitätsgesetz stehen kann? Hat Hooke versucht,

[1] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 15
[2] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 3

ein allgemeines Gesetz zu formulieren, das für alle Formen von Körper gelten würde? Dem geht das kommende Kapitel auf den Grund. Die Inspiration, die Motivation und die Hintergründe neuer Erfindungen, die hinter der Erforschung von Luft und dessen Eigenschaften liegen, sowie die Ereignisse, die dazu geführt haben, dass Hooke seine Versuche zur Luft in der *Micrographia* veröffentlichte, werden hier genauer betrachtet.

Hookes Arbeit an der Erforschung von den Eigenschaften der Luft, lässt sich zu seiner Zusammenarbeit mit Boyle zurückführen. Um ein gewisses Verständnis für Hookes Versuche aus der *Micrographia* zu entwickeln, ist das kommende Kapitel so aufgebaut, dass es vorerst wesentlich Ereignisse beschreibt, die zu Boyles Versuchen führten. Alle Eigenschaften der Luft, die erforscht und beobachtet worden sind, werden schrittweise erläutert, um dadurch ein besseres Verständnis von Hookes Vorgehensweise zu gewährleisten. Dieser Schritt ist deshalb relevant, weil die Versuche, die in der *Micrographia* beschrieben sind, eher schwerer nachzuvollziehen sind.

## 2.1 Die Elastizität der Luft

Hookes Experimente, die in der *Micrographia* beschrieben sind, können in enger Verbindung mit Boyles Experimenten (die sich auf das Gasgesetz beziehen) betrachtet werden. Aus anderen Texten der 60er Jahre des 17. Jahrhunderts wird klar, dass die Hypothese (Druck ist umgekehrt proportional zum Volumen), die Boyle formuliert hatte und die Hooke in der *Micrographia* experimentell bestätigte, von Hooke als eine Art Vorläufer seines *Federgesetzes* gesehen wurde. In welchem Zusammenhang diese Versuche und die darauffolgenden Formulierungen mit dem Federgesetz und mit dem Begriff Elastizität stehen, wird im Folgenden dargestellt.

Die ersten erfolgreichen Schritte zu den Untersuchungen der Eigenschaften von Luft können zum Brief von Evangelista Torricelli zurückgeführt werden, der am 11. Juni 1644 an seinen Freund Michelangelo Ricci[3] schrieb:

> *We live submerged at the bottom of an ocean of the element air, which by unquestioned experiments is known to have weight.* [...] *the cause for the resistance which is felt when one needs to produce a vacuum ... is the weight of the air.*[4]

Torricelli fuhr in seiner Beschreibung fort, indem er darstellte, wie er das Barometer entwickelt hatte. Dabei erkannte er auch, dass es das Gewicht der Luft war, dass die Quecksilbersäule trug. Er nahm eine Glasröhre von 2 *cubits*[5] und füllte sie mit Quecksilber

[3] Michelangelo Ricci (geboren 30. Januar 1619 in Rom, gestorben 12. Mai 1682 in Rom) war ein Mathematiker. Torricelli unterrichtete Ricci. Riccis wichtigste mathematische Arbeit war *Exercitatio geometrica, De maximis et minimis* (1666). In dieser Arbeit findet er das Maximum von $x^m(a-x)^n$ und die Tangente $y^m = kx^n$.

[4] Applebaum W., Hrsg., *Encyclopedia of the Scientific Revolution: From Copernicus to Newton*, Garland Publishing Inc., New York & London, 2000, S. 115

[5] 2 cubits entsprechen $\sim 110 - 120\ cm$

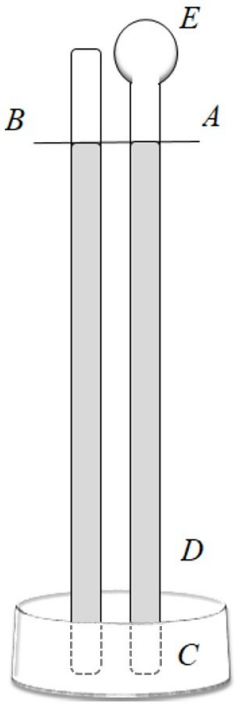



Abbildung 2.1: *Visualisierung von Torricellis Experiment mit einer Quecksilbersäule.*[6]

(*Abbildung 2.1*). Dann legte er einen Finger über das geöffnete Ende und drehte das Glasrohr um und setzte es in ein mit Quecksilber gefülltes Becken. Er sah, dass sich die Höhe der Quecksilbersäule im Glasrohr veränderte. Bei dem Versuch benutzte er zwei verschiedene Glasrohre. Das eine Glasrohr hatte die Form einer Kugel an einem Ende $E$ (*Abbildung 2.1*). Damit wollte er sehen, ob sich die Höhe des Quecksilbers mit der Form des Rohres veränderte. Wie es auf der *Abbildung 2.1* visualisiert ist, änderte sich die Höhe für das besagte Glasrohr nicht. Weiterhin hatte er formuliert, dass es sich um den Luftdruck handelt, der diese Höhe verursachte.

Dieses Experiment hatte großes Interesse in Frankreich verursacht. Viele bekannte Forscher führten dieses Experiment durch und entwickelten ihre eigenen Hypothesen dies-

[6]Eigene Darstellung nach Torricelli.

bezüglich. Forscher wie Roberval[7] und Mersenne[8] beschäftigten sich damit, doch einen wirklichen Fortschritt und Weiterentwicklung können erst bei Jean Pecquet nachgewiesen werden.

Jean Pecquet war ein französischer Mediziner, der auch Versuche mit diversen Glasrohren durchführte, weil er vermutet hatte, dass der Atmosphärendruck einen Einfluss auf die Blutzirkulation haben könnte. Er war derjenige, der nicht nur zeigte, dass die Luft die Eigenschaft *Gewicht* besaß, sondern auch eine zusätzliche Eigenschaft, die er *Elater* nannte.

> *Roberval had maintained the Aristotelian terminology in explaining the expansion of air, although he inferred that the condensation and rarefaction was a "spontaneous" or active property...Pecquet now adopted the terms "elater" and "elastic" to describe the same phenomenon. Neither term had been used in classical Latin, and Pecquet took them from the Greek noun ελατηρ (elater; that which or one who drives).*[9]

Dieser Begriff wurde von einigen englischen Autoren übernommen und auf das Englische mit *elatery* oder *spring* übersetzt. Pecquet benutzte für seinen Versuch ein Glasrohr $AB$, das ungefähr vier *Fuß* lang war und ein paar *Linien* Durchmesser hatte. Das Ende $B$ war hermetisch abgedichtet, das andere Ende $A$ war offen.

Ein Rohr wurde im Bereich $BC$ (*Abbildung 2.2)* mit Quecksilber gefüllt, der restliche Teil $CA$ mit Wasser – und das ist der Punkt, worin der Unterschied zwischen Pecquets und Torricellis Experimenten lag. Hierbei ist zu vermuten, dass Pecquet mit diesem Versuch näher die Eigenschaften der Luft beschreiben wollte, indem er durch das Füllen mit Wasser näher das Verhalten des Quecksilbers betrachten konnte. Das beobachtete Verhalten und die dazugehörigen Messungen ermöglichten ihm, einen Vergleich mit den Beobachtungen von Torricelli anzustellen.

Als das Glasrohr voll war, hielt er den Finger über das offene Ende und drehte es um. Diese Position des Rohres hielt er so lange, bis das Wasser mit dem Quecksilber die

[7]Gilles Personne de Roberval (geboren 1602 in Roberval, Senlis, gestorben 1675 in Paris) war ein angesehener und wichtiger französischer Mathematiker. Er entwickelte eine Methode zur Berechnung von Tangenten während seiner Arbeit an der Zykloide einige Zeit vor 1636. Roberval schrieb eine Abhandlung über Algebra und eine der analytischen Geometrie, die erst in einer posthumen Veröffentlichung von 1693 erschien.

[8]Marin Mersenne (1588 in Sountière bei Bourg d'Oizé, Maine, gestorben 1648 in Paris) war ein französischer Mathematiker und Musiktheoretiker. Er war Sekretär der französischen Academie und verbrachte viel Zeit mit der Erforschung der Akustik und der Schallgeschwindigkeit. Im Jahr 1627 veröffentlichte er eines seiner berühmtesten Werke, *L'harmonie universelle*. In diesem Werk veröffentlichte er als erster die Gesetze, die sich auf die schwingende Saite beziehen: Die Frequenz ist proportional zur Quadratwurzel der Spannung und umgekehrt proportional zur Länge, zum Durchmesser und zur Quadratwurzel des spezifischen Gewichts der Saite, vorausgesetzt, dass alle anderen Bedingungen gleich bleiben, wenn eine dieser Größen verändert wird.

[9]Webster C., *The Discovery of Boyle's Law, and the Concept of the Elasticity of Air in the seventeenth Century*, Archive for History of Exact Sciences Vol. 2, Issue 6, 1965, S. 453

Position im Rohr getauscht hatte. Das Rohr wurde dann in ein Becken mit Quecksilber eingetaucht (*Abbildung 2.2*). Die neue Höhe des Quecksilbers war $AE$. Dabei erschien es für Pecquet offensichtlich, dass das Wasser eine Kraft auf das Quecksilber ausgeübt hatte – und zwar mit dem Gewicht und nicht mit dem *Elater*. Wenn nun der gleiche Versuch mit der Luft, statt mit Wasser durchgeführt wird, wird ersichtlich, dass das Quecksilber mehr als 27 *Inch* gesunken ist. Also hat es den Anschein, dass das Quecksilber weniger durch die Wirkung vom Gewicht der Luft, sondern mehr vom *Elater* verschoben wird.

> *Water only compresses the Terraquaecous Globe by virtue of its weight, but air not only by virtue of its weight but also by Elater.*[10]

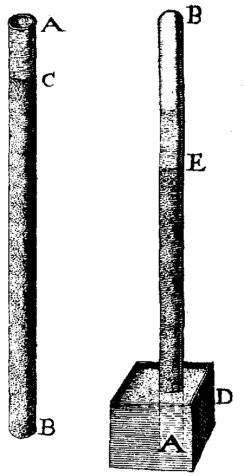



Abbildung 2.2: *Pecquets Darstellung von der Wirkung des Wassers auf eine Quecksilbersäule in seinem Experimenta Nova Anatomica, Paris, 1651*[11]

Die Relevanz von Pecquets Beobachtungen ist die Erkenntnis, dass die Luft eine weitere Eigenschaft besitzt, die er *Elater* nannte. Was sich aus Pecquet's Untersuchungen entnehmen lässt, ist, dass das Wasser hauptsächlich mit ihrem Gewicht einen Druck auf die Erdoberfläche ausübt, während die Luft es mehr mit ihrem *Elater* tut.

In England war Henry Power einer der ersten Forscher, die sich mit den Eigenschaften der Luft befassten. 1653 führte er einige Versuche durch. Seine Vermutung war, dass

[10] Webster C., *The Discovery of Boyle's Law, and the Concept of the Elasticity of Air in the seventeenth Century*, 1965, S. 499 Hier weist der Autor auf Pecquet Nova Anatomica, Amsterdam, 1661, pp. 106 – 109

[11] Pecqvet Ioannis, *Diepæi Experimenta Nova Anatomica*, Parisiis, 1651, S. 59

die Luft aus unendlich teilbaren *Teilchen* oder *Atomen* besteht. Die Hypothese, die er unterstützte, war die von Pecquet, dessen Konzept es war, dass die Luftmasse eine *spontane* oder natürliche Ausdehnung (*Elater*) in sich trägt und damit den *Teilchen* ermöglicht, sich unendlich frei zu bewegen.

Im Grunde wiederholte Power die Versuche, die Pecquet beschrieben hatte. Seine Ergebnisse waren mit einer Reihe von Messungen dargestellt, die zu einem besseren Verständnis von Pecquets Hypothese führten. Power beobachtete, wie sich das *Elater* der Luft mit verschiedenen Volumenmengen veränderte. Das, was er dabei schlussfolgerte, war:

> *The descent or fall of the Quicksilver or Water, was most notable about midst of the Tube, viz. when it was equally fill'd with Ayr and Quicksilver, or Ayr and Water.*[12]

In seiner Veröffentlichung *Experimental Philosophy* schrieb Power über die Ergebnisse, die Pecquet beobachtet hatte, und diesbezüglich äußert er sich über die Elastizität folgendermaßen:

> *Just like the Spring of Watch (which if the String be broke, presently flyes out into its fullest expansion which Elastick motion in the Ayr then ceases, when it comes to an aequlibration with those circumljacent* [ sic ] *Bodies that resisted it.*[13]

Power verglich das Ausdehnen (Ausbreiten) der Luft mit einer Uhrfeder, die, nachdem sie nicht mehr unter Druck gewesen war, wie *befreit* erschien und sich zurück zu ihrem Gleichgewichtszustand ausdehnte.

Im Gegensatz zu Pecquet sah Power dieses *Elater* auch als eine Form von Kraft. Seine Hypothese entwickelte er durch weitere Experimente, die er zusammen mit Richard Towneley[14] durchgeführt hatte. Diese Experimente waren die Ersten, die die *direkte* Messung vom *Elater* beinhalteten.

Am 27. April 1661, führten Power und Towneley Versuche durch, in denen sie die Elastizität der Luft untersucht hatten. Bei diesen Versuchen wurde die Ausdehnung der Luft auf verschiedenen Höhen gemessen. Der erste Schritt, den sie vornahmen, war den sogenannten *Mercury Standard* zu messen. Um einen nahezu richtigen Wert zu bekommen, führten sie die Messungen in verschiedenen Uhrzeiten und Orten durch.

Das, was sie vorerst taten, war Quecksilber in ein 42 *Inch* langes Glasrohr einzugießen. Sie taten dies im Tal von New Church gegen 10 Uhr vormittags. Das, was sie im Grunde

[12] Power H., *Experimental Philosophy*, London, 1663 S. 116

[13] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 101 – 102

[14] Richard Towneley (geboren 1629, gestorben Januar 1707) war ein englischer Mathematiker und Naturphilosoph. Durch seine Zusammenarbeit mit Power folgte eine Korrespondenz mit Boyle über das Verhalten von Gasen in geschlossenen Systemen sowie über die Verbindung von Druck und Volumen von Gasen. Dieses Verhältnis von Druck und Volumen nannten Boyle und viele andere die *Towneley Hypothese*.

hierbei umsetzten, war die Durchführung von Torricellis Experiment. Der *Mercury Standard* den sie bestimmt hatten, war $28,4$ *Inch*. Am selben Tag auf dem Hügel Pendle Hill gegen 12 und 13 Uhr führten sie denselben Versuch durch. Dort betrug der Wert vom *Mercury Standard* $27,4$ *Inch*. Den Versuch führten sie gegen 15 Uhr wieder durch, nur taten sie das in einem Tal von Barlow. Dabei betrug der *Mercury Standard* wieder $28,4$ *Inch*.

Anhand von ihren Experimenten wird deutlich, dass es sich bei dem *Mercury Standard* um den Atmosphärendruck auf verschiedenen Höhen handelt. Dies ergibt sich aus den Versuchen, die Power und Towneley an den kommenden Tagen durchgeführt hatten. Diese Versuche wurden mit zwei unterschiedlich langen Glasröhren durchgeführt. Das erste Glasrohr, war dasselbe, dass sie für das Bestimmen vom *Mercury Standard* verwendet hatten, also 42 *Inch* lang (das lange Rohr) und das andere war 26 *Inch* lang (das kurze Rohr). Zuerst führten sie den Versuch mit dem langen Rohr durch. Sie markierten das Rohr mit 102 gleichen Einheiten (im Original *divisions*), um die Veränderung besser beobachten zu können.

> *At the top of the said Hill* [Pendle Hill], *we put into the same Tube* [42 *Inch*] *(which was divided into 102. equal divisions of space) as much Quicksilver, as being stop'd and inversed, the Ayr remaining in the top of the Tube, fill'd* 50|15*, or thereabout, of the forementioned divisions, and the Quicksilver, the remaining part of the Tube. The Tube being thus immers'd, and the finger withdrawn, the internal Ayr dilated so as to fill of the abovementioned parts* 84|75*., and there remain'd in the Tube a Cylinder of Quicksilver containing in length* 11|26 *inches. We tried the same Experiment at the bottom of the said Hill, the Tubes being fill'd, as above, and the Ayr* 50|15*. dilated to* 83|8*. and the Cylinder was in height* 11|78*. inches.*[15]

Der Versuch, der hier beschrieben wurde, ähnelt Torricellis Versuchen. Auf der *Abbildung 2.3* ist die benutzte Vorrichtung dargestellt. Sie verwendeten ein Glasrohr, das an einem Ende offen war. Sie gossen vorerst eine bestimmte Menge Quecksilber ein, wodurch bei Umdrehen, der *Raum* den die Luft ausfüllte $50,15$ Einheiten (*divisions*) war und der Rest war Quecksilber. Danach wurde das Glasrohr in ein mit Quecksilber gefülltes Becken eingetaucht. Die Luftsäule füllte nun $84,75$ Einheiten des Rohres. Dabei hatte die Quecksilbersäule die Höhe von $11,26$ *Inch*. Dasselbe wurde im Tal gemacht, wobei die Luftsäule nun $83,8$ Einheiten ausfüllte und die Höhe der Quecksilbersäule $11,78$ *Inch* betrug.

Hierbei sollte erst klargestellt werden, dass es ein Unterschied zwischen den *quantitativen Größen*, die hier anscheinend gemessen worden sind, gibt. Die Werte für den *Raum*, den die Luftsäule einnimmt, werden mit einer *Einheit* bzw. *Division* gemessen. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um eine arbiträre Einheit für das *Volumen*, das die Luft in dem Glasrohr einnimmt. Die Höhe der Quecksilbersäule ist immer in Inch angegeben. Diese

[15] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 127

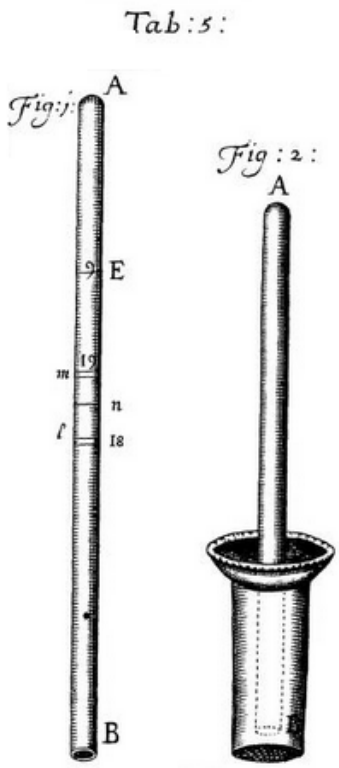



Abbildung 2.3: *Mit diesem Glasrohr wurden die Versuche von Power und Towneley auf Pendle Hill 1661 durchgeführt.*[16]

Werte stellen höchstwahrscheinlich die Differenz zwischen dem Außen- und Innendruck dar.

Als sie Messungen für das lange Glasrohr hatten, führten sie weitere Versuche mit dem kurzen Glasrohr durch. Jedoch wurde bei diesen Versuchen darauf geachtet, ob es sich dabei um *Talluft* oder *Bergluft* handelte, als sie den *Mercury Standard* bestimmten.

> *We took another Tube* [...] *about 26 Inches, containing equal divisions of space, 31. and about an half, represented here by AB, which we fill'd so with Quicksilver, that being revers'd and stop'd at B, there remain'd 9. divisions fill'd with Ayr from A to E: then the Quicksilver being left at liberty to fall down into a*

[16]Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, Tafel 5, am Ende des Buches

> *dish underneath, it fell near to the mark 18 to l. So that the Ayr dilated, fill'd the Space Al, containing of these divisions* 17|8*, and then the Cylinder lB was in perpendicular height* 13|86. *inches.*[17]

Aus dieser Beschreibung kann der Verlauf mithilfe der *Abbildung 2.3* nachvollzogen werden. Sie verwendeten also ein Glasrohr $AB$, dass die Länge 26 *Inch* hatte. Das Rohr war mit 31 gleichen Einheiten markiert (beim näheren Hinsehen auf *Abbildung 2.3* kann die Markierungen erkannt werden). Sie gossen wieder Quecksilber in das Rohr ein, sodass die Luftsäule beim Umdrehen das *Volumen* von 9 Einheiten einnahm. Diese Position, bis zur welcher die Höhe der Quecksilbersäule beim Umdrehen hinkam, wurde mit $E$ gekennzeichnet. Beim Eintauchen in das Becken fiel die Höhe der Quecksilberhöhe auf 18 bis $l$[18]. Hier kann vermutet werden, dass Power für die weitere Beobachtung eher die Markierung $l$ bevorzugte. Diese Vermutung beruht auf der Tatsache, dass in der weiteren Beschreibung die Luftsäule (*Volumen*) mit der Markierung $Al$ gegeben ist. Der Wert, den dieses *Volumen* hatte, war $17,8$ Einheiten. Bei einem solchen Wert des *Volumens* (bzw. *Space filled by the Ayr dilated*), war die Höhe der Quecksilbersäule $13,86$ *Inch*.

> *We brought this Tube, with the same Mountain Ayr in it, by the help of the long Tube of wood, having dish fastned to the open end of it, and both full of Quicksilver, into which we put our Tube, AB,*[...]*and at the bottom of the Hill the Quicksilver rose up unto the mark m, under the 17. division. So that the Ayr dilated, fill'd of the equal parts* 17|35*, and the Quicksilver in B was in height* 14|31. *inches.*[19]

Ähnlich wie beim langen Rohr nahmen sie das komplette System, so wie es war (also umgedrehtes Rohr im Becken eingetaucht), in das Tal runter. Dabei gaben sie auch explizit an, dass es sich dabei um *Bergluft* im Rohr gehandelt hatte. Was hierbei vermutet werden kann, es handelt sich um die Bedingungen, in der sich das Rohr befand, als es in das Becken eingetaucht wurde. Da es auf dem Hügel eingetaucht wurde, hatte es auch einen anderen *Mercury Standard*, also einen anderen Atmosphärendruck. Der Werte für das *Volumen*, den die Luft dabei ausfüllte, war $17,35$ Einheiten und die Höhe der Quecksilbersäule war $14,31$ *Inch*.

Nachdem sie die Messungen mit der *Bergluft* durchgeführt hatten, machten sie Messungen mit der *Talluft*. Also ließen sie die *Bergluft* raus und führten nun das Eingießen des Quecksilbers ins Glasrohr im Tal durch.

[17] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 128

[18] Der Wissenschaftshistoriker C. Webster argumentierte, dass Power die Messungen nie präzise genug nahm wie z. B. Hooke. Dies wird auch aus Powers Werk *Experimental Philosophy* deutlich z. B. [...]*the Quicksilver, in all probability, would have fallen lower than the inch we observed* auf S. 127

[19] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 128

*Then we put out this Mountain-Ayr, and let into the Tube the same quantity of Valley-Ayr, which fill'd the part AE, containing also 9. of the equal divisions aforesaid; and then the end of the Tube B opened the Ayr dilated to the mark n. So that it contain'd* 17|58. *parts, and the Quicksilver in perpendicular height,* 14|2.[20]

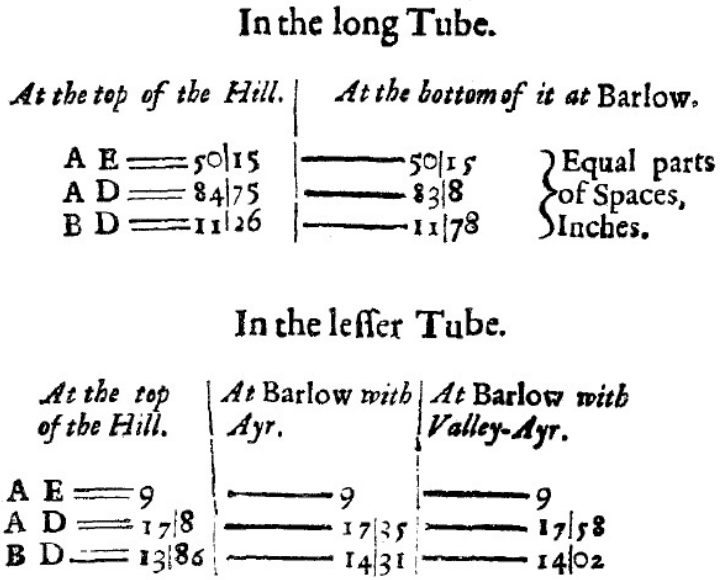



Abbildung 2.4: *Tabellarische Darstellung der Messungen auf Pendle Hill*[21]

Sie füllten das Rohr bis zu derselben Markierung ein wie auf dem Hügel mit Quecksilber. Dabei war das *Volumen* der Luftsäule im Glasrohr wieder 9 Einheiten (bzw. $AE$). Beim Eintauchen in das Becken fiel die Quecksilberhöhe auf die Markierung $n$. Der Wert des *Volumens* war nun $17,58$ Einheiten und die Höhe der Quecksilbersäule betrug $14,2$ *Inch*. Die gemessenen (oder beobachteten) Werte dieser Versuche wurden tabellarisch dargestellt (*Abbildung 2.4*).

Die Tabelle auf der *Abbildung 2.4* gibt sowohl die Werte für die Messung mit dem kurzen als auch mit dem langen Rohr wieder. Hierbei wies Power darauf hin, dass die

[20] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 128

[21] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 129
Hierzu sollte noch zusätzlich erwähnt werden, auch wenn in der Tabelle der Wert 14|02 gegeben ist, verwendet Power in der Beschreibung der Versuche 14|2

verwendeten Markierungen in der Tabelle, also bspw. $AB$, sowohl für das kurze als auch für das lange Rohr gleich genommen wurden und, dass in den beiden Fällen $AB$ einmal 42 und dann 26 *Inch* entsprochen hatte.

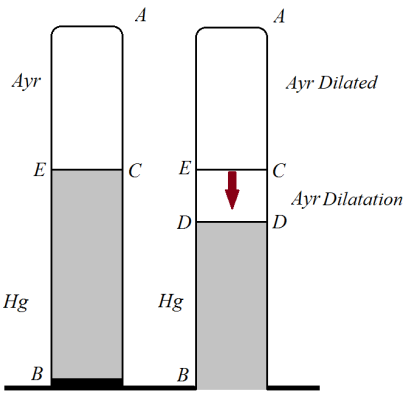



Abbildung 2.5: *Die Darstellung des Glasrohres, das vorerst an einem Ende (B) abgedichtet ist (links) und danach geöffnet wurde (rechts).*[22]

Die Tabelle wurde von Power folgendermaßen erklärt: $AE$ repräsentierte *Ayr*, $AD$ war *Ayr Dilated* und $BD$ wurde als *Mercury* bezeichnet.[23] Um es etwas übersichtlicher darzustellen:

$$
\begin{aligned}
BC &= Hg - Standard \\
BD &= Mercury \\
CD &= Hg - Complement \\
AE &= Ayr \\
ED &= AyrDilatation \\
AD &= AyrDilated
\end{aligned}
$$

wobei gelten soll

$$ED = AE - AD \;\; und \;\; CD = BC - BD \tag{2.1}$$

Die Vermutung liegt nahe, dass es sich bei $C$ und $E$ um denselben Punkt gehandelt hat (*Abbildung 2.5*).

[22] Eigene Darstellung nach Power.
[23] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 130

Die Tabelle von Power und Towneley zeigt im Grunde ein Ergebnis, dass sich aus heutiger Sicht mit Boyles Gesetz erklären lässt. Beim Beobachten des ersten (oberen) Teils der *Abbildung 2.4*, wo die Ergebnisse der Versuche mit dem langen Glasrohr wiedergegeben sind, ist auf den ersten Blick relativ klar, dass die linke Seite die Messungen darstellt, die auf dem Hügel durchgeführt wurden und die rechte Seite die Messungen, die im Tal durchgeführt wurden. Die Tabelle kann so interpretiert werden: Der im ersten Experiment beschriebene Atmosphärendruck von $p_0 = 27,4$ wird für die Messungen auf dem Hügel genommen und für das Tal $p_0 = 28,4$ (wurde bereits auf S. 49 – 50 beschrieben). Bei beiden Messungen wurde die gleiche Menge an Quecksilber eingegossen, sodass das *Volumen* der Luftsäule bei dem besagten Atmosphärendruck gleich ist – also $50,15$. Wenn das Glasrohr in das Becken eintaucht wird, beträgt das *Luftvolumen* $84,75$ (auf dem Hügel) oder $83,8$. Diese Werte entsprechen nun einem Luftdruck von $p_0 - 11,26$ oder $p_0 - 11,78$. Um diese Interpretation etwas übersichtlicher zu machen (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: *Die Ergebnisse der Beobachtungen in Pendle Hill 1661 für das Glasrohr der Länge* 42 *Inch (Long Tube).*

| Höhe | Im Tal | Am Hügel |
|---|---|---|
| $p_0$ | $28,4$ | $27,4$ |
| $V_0$ | $50,15$ | $50,15$ |
| $V_1$ | $83,8$ | $84,75$ |
| $p_1$ | $p_0 - 11,78$ | $p_0 - 11,26$ |

Mit der Anwendung von Boyles Gleichung

$$p_0 \cdot V_0 = p_1 \cdot V_1 \tag{2.2}$$

können die von Power und Towneley benutzten Begriffe näher erläutert werden. Da die Werte in der Tabelle nahezu Bolyes Gleichung entsprechen, kann entnommen werden, dass gilt: *Hg-Standard* $= p_0$, *Hg-Complement* $= p_1$, *Ayr* $= V_0$ und *Ayr Dilated* $= V_2$. Weiterhin wies Power darauf hin, dass durch die Messung von drei dieser *Größen* die Vierte ausgerechnet werden könnte:

> *So that here is now four Proportionals, and by any three given, you may strike out the fourth, by conversion, Transposition and Division of them.*[24]

Diese Aussage ist im Einklang mit der Interpretation, dass die von Power gegebenen *quantitativen Größen* in einer ähnlichen Verbindung stehen müssen, wie Druck und Volumen in Boyles Gleichung.

[24] Power H., *Experimental Philosophy*, 1663, S. 130

Der untere Teil der von Power veröffentlichten Tabelle, also der Teil mit dem kurzen Rohr, lässt sich ähnlich interpretieren. Der einzige Unterschied, der hier ersichtlich gemacht worden war, ist, dass die Messung einmal mit der *Bergluft* und einmal mit der *Talluft* dargestellt wurde. Das, was hier vermutet werden kann, ist, dass Power und Towneley das Verhalten der Luftsäule mit dem Atmosphärendruck der Bergluft einmal auf dem Hügel selbst und einmal im Tal gemacht hatten. Nachdem sie das getan hatten, führten sie dieselbe Beobachtung mit dem Atmosphärendruck der Luft im Tal. Eine bessere Übersicht ist in der Tabelle 2.2 gegeben.

Tabelle 2.2: *Die Ergebnisse der Beobachtungen in Pendle Hill 1661 für das Glasrohr der Länge* 26 *Inch (the lesser Tube).*

| Höhe | Am Hügel | Im Tal mit Bergluft | Im Tal mit Talluft |
|---|---|---|---|
| $p_0$ | $28,4$ | $28,4$ | $27,4$ |
| $V_0$ | $9$ | $9$ | $9$ |
| $V_1$ | $17,8$ | $17,35$ | $17,58$ |
| $p_1$ | $p_0 - 13,86$ | $p_0 - 14,31$ | $p_0 - 14,2$ |

Beim Beobachten der Ergebnisse aus der Perspektive der durchgeführten Interpretation, sieht die Hypothese von Power vor, dass sich die Luft durch die Veränderung des Außendrucks von (bei dem langen Rohr) $50,15$ auf fast $84,75$ (nahezu 90) ausdehnen würde. Sie stellten durch diese Versuche fest, dass sich der *Elater* der Luft mehr verringerte, je mehr sie vom Gipfel runtergingen. Das würde bedeuten, dass im Grunde dieser *Elater* nichts weiter als der Luftdruck im Glasrohr ist. Der wichtigste Fortschritt dieser Versuche war der, dass die bereits bestehende Hypothese nicht mehr nur das Ergebnis vom Vergleich des Luftvolumens und der Quecksilberhöhe war, sondern des Luftvolumens und einem Maß seiner Elastizität. Dieses Maß der Elastizität wird demnach aus der Differenz des besagten Atmosphärendrucks und der Quecksilberhöhe im Glasrohr erhalten, nachdem es in ein Quecksilber gefülltes Becken eingetaucht wurde.

Hierbei kann interessanterweise erkannt werden, dass bei diesen Versuchen eine andere Sichtweise der Messungen vorzufinden ist. Aus heutiger Sicht ist es klar, dass bei diesen Messungen sich ursächlich der Außendruck ändert und nicht der Luftdruck in der Säule selbst. Bei den damaligen Messungen wurde vor allem die Luftsäule im Inneren der Röhre betrachtet. Die Abweichungen der Messungen zwischen Röhren, die mit Bergluft oder Talluft gefüllt waren, ist nach heutigen Maßstäben auf die Dichte der eingefüllten Luft zurückzuführen. Da die mittlere Luftdichte in einer Tallage höher ist als auf einem Berg, musste sich bei einer Messung, die auf einem Berg durchgeführt wurde, die eingeschlossene Talluft stärker ausdehnen als die Bergluft im Tal sich bei der Vergleichsmessung zusammenzieht. Dies haben Power und Towneley nicht bedacht.

Im ersten Kapitel wurde bereits Boyles Arbeit zum Vakuum und der Entwicklung der

Luftpumpe erwähnt. Hooke und Boyle arbeiteten zusätzlich an der Forschung der Luft und führten zahlreiche Versuche, die zu der Formulierung von Boyles Gesetz führten. Robert Boyle war sehr interessiert an den Experimenten von Power und Towneley, was auch aus der Korrespondenz zwischen Boyle und William Croune[25] evident ist. In der zweiten Auflage der *New Experiments Physico-Mechanicall*, die 1662 veröffentlicht wurde, bezog sich Boyle direkt an Power und Towneley. Diese Proportionalität von Dichte der Luft und ihrem Druck wurde als die *Towneley Hypothese* bekannt und auch weiter unter diesem Namen von Forschern wie Hooke und Newton verwendet.[26]

Eine wichtige Tatsache, die sich auf Boyles und Hookes Versuche bezog, wird durch den Brief von Towneley an Oldenburg, vom 29. Januar 1672/73, verdeutlicht:

> [...] *Sir it was some satisfaction to me to find in ye transactions of July* [...] *hypotheses (which Mr. Boile* [sic] *was pleased to owne as mine) about ye forc of aire condenst and rarefied doth succede as well in deepe immersions, as in those I made triall of, and that is doth administer now to ye learned matter of further speculation, as formerlie it did to me of writing some few things (of which I then shewed unto Mr. Boile)* [...][27]

Es ist diesbezüglich wichtig zu erwähnen, dass Boyle im September 1661 angab, dass die *Elastizität* (original *Spring of Air*), also die Resistenz der Luft zur Kompression, proportional zu der Dichte ist. Diese Formulierung der Hypothese kommt eher seltener in der Sekundärliteratur vor. Was der Grund dafür ist, ist relativ unklar. Wird das jedoch auf Bezug zum Federgesetz (Hooke) betrachtet, hat Boyles Formulierung damit eine gewisse Ähnlichkeit.[28]

> *Now that this observation does both very well agree and confirm our hypothesis, will be easily discerned by him that takes notice what we teach* [...] *that the greater the weight is that leans upon the air, the more forcible is its endeavour of dilatation, and consequently its power of resistance (as other springs are stronger when bent by greater weights). For this being considered, it will appear to aggree rarely-well with the hypothesis, that as according to it the air that degree of density and correspondent measure of resistance to which the weight*

[25] William Croune (geboren 15. September 1633 London, gestorben 12. Oktober 1684 London) war ein britischer Arzt, Naturphilosoph und ein Mitglied der Royal Society. In seinem Werk *De ratione motus musculorum* entwickelt er eine Theorie zu der Muskelwirkung. In der Wissenschaftsgeschichte ist er auch als *William Croone* bekannt.

[26] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665 und Cohen I.B. *Newton, Hooke and Boyle's Law (Discovered by Power and Towneley*, Nature, 1964, S. 618 – 621

[27] Dieser Brief ist im Archiv der Royal Society unter der Nummer EL/T/28 *Richard Towneley to Oldenburg.* zu finden. Es sei hierbei hingewiesen, dass der Brief schwer leserlich ist.

[28] Boyles Formulierung ist zum einen mit $p \sim \frac{1}{V}$ dargestellt, zum anderen auch mit $p \sim \rho$. Da $p$ direkt proportional zur Kraft ist und die Dichte zur Masse, so ist die Kraft abhängig von der Masse.

> *of the incumbent atmosphere had brought it, was able to counterbalance and resist the pressure of a mercurial cylinder of about 29 inches, as we are taught by the Torricellian experiment; so here the same air being brought to a degree of density about twice as great as that it had before obtains a spring twice as strong as formerly.*[29]

Aus dieser Beschreibung von Boyle geht die Vermutung hervor, dass es eine Ähnlichkeit zwischen der Eigenschaft von Luft (Elater) und der Eigenschaft der Feder (Elastizität) gibt. Das ist genau die Vermutung, die Hooke womöglich auch in *Lectures de Potentia* angesprochen hatte. Jedoch erscheint es weiterhin unklar, ob Towneley und Boyle unterschiedliche oder gleiche Phänomene betrachtet (beschrieben) haben. Gibt es Unterschiede zwischen dem, was Boyle in seinen Arbeiten beschrieben hatte und dem, was Towneley in seinen Arbeiten beschrieben hatte?

Boyles Modell beschreibt jedes Luftteilchen als eine Feder und eine Feder kann sowohl komprimiert oder ausgedehnt werden, als auch in beiden Fällen gespannt werden. Aus der heutigen Sicht gibt es einen Unterschied zwischen *strain* und *stress*. In der heutigen Mechanik wird die wirkende Kraft pro Flächeneinheit als Spannung (*stress*) bezeichnet. Das Ergebnis der Verformung, die entsteht, wenn das Material auf Spannung (*stress*) reagiert, wird als Dehnung (*strain)* bezeichnet. Also kann interpretiert werden, dass in Boyles Hypothese das Konzept *stress* benutzt wird und in Towneleys *strained*. Es sei aber hier bedacht, dass zu dieser Zeit das Hookesche Gesetz, wie es heute bekannt ist, noch nicht veröffentlicht war, bei dem: *strain equals stress*.[30]

Aus der heutigen Sicht wissen wir, dass der Unterschied zwischen Spannung und Dehnung der ist, dass die Spannung die Verformungskraft pro Flächeneinheit darstellt. Die Dehnung aber eine Veränderung der Form, des Volumens oder der Länge eines Objekts ist, die durch die Spannung verursacht wird. Mit der Veröffentlichung *Lectures de Potentia* wurden die Begriffe *stress* und *strain* verbunden. In seiner Veröffentlichung hat Hooke die Verformung als *flexure* beschrieben, wobei diese *flexure* proportional zur *Power of Spring* ist. Laut Hooke ist diese *Power of Spring* proportional zur *tension*, was der Spannung aus heutiger Sicht entspricht. Hierbei sei erwähnt, dass Hooke die Verbindung bereits vor der Veröffentlichung *Lectures de Potentia* erkannt hatte. Er wies in *Lectures de Potentia* darauf hin, dass er ein ähnliches Phänomen wie die *flexure* oder *tension* der Feder in der *Micrographia* bereits beschrieben hatte.

Zum Abschluss von diesem Abschnitt kann von der Annahme ausgegangen werden, dass Boyle und Towneley von zwei verschiedenen Quantitäten geschrieben hatten. Die verwendeten Quantitäten beschreiben ein Phänomen – die Eigenschaft *Elastizität* – aus verschiedenen Perspektiven. Diese Quantitäten, *stress* und *strain*, werden mit dem Hookeschen Gesetz vereint. Die von Hooke beschriebenen Versuche aus der *Micrographia*, die im

[29] Boyle R., *New Experiments Physico-Mechanicall*, 1662, S. 4

[30] vgl. Agassi J., *Science and its History. A Reassessment of the Historiography of Science*, Springer, 2008, S. 431

Abbildung 2.6: *Boyles Darstellung vom U-Rohr, mit dem er, zusammen mit Hooke, Experimente durchführte, die ihn zu der Formulierung seines Gesetzes brachte.*[31]

Anschluss näher beschrieben werden, zeigen eine gewisse Ähnlichkeit mit den Versuchen von Boyle und Towneley. Es erscheint offensichtlich, dass Hooke eine Verbindung zwischen den Begriffen *strain* und *stress* gesehen hatte und, dass das in seinem *Gesetz der Natur* wiederzufinden ist. Wenn in Betracht gezogen wird, dass Hooke mit diesem *Gesetz der Natur* das Verhalten von Federn beschrieben hatte, hat er durch die Vereinigung von *stress* und *strain* für eine Verallgemeinerung der Elastizitätseigenschaften der Luft gesorgt.

Betrachten wir die Werke von Hooke, können wir feststellen, dass er die Sprungkraft der Luft in achtzehn Jahre langer Arbeit immer wieder erwähnte oder diskutierte. Vieler seiner Versuche zur Luft wurden von der Royal Society dokumentiert.[32] Im kommenden

[31] Boyle R., *New Experiments Physico-Mechanicall*, 1662, Endplate, Fig. 10

[32] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I*, 1756, z. B. S. 125, 127, 141, 168, *The History of the Royal Society, Vol. II*, 1756 – 1757, z. B. S. 26, 49, 53, 128, *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, z. B. S. 8, 55, 61, 72

Abschnitt werden die Versuche aus der *Micrographia* beschrieben und näher erläutert. Dabei wird der Zusammenhang der beobachteten Eigenschaft der Luft und der Eigenschaften der Federbewegung, den Hooke möglicherweise erkannte, etwas verständlicher dargestellt.

### 2.1.1 Beobachtungen der *neuen* Eigenschaften der Luft

Dass Robert Boyle einen starken Einfluss auf seine weitere Arbeit hatte, kann aus Hookes eigenen Veröffentlichungen und aus seiner Korrespondenz mit Boyle herausgelesen werden. Die Experimente, die hinter den Beschreibungen der *neuen* Eigenschaften der Luft liegen, sind in seiner *Micrographia* genau beschrieben.

Um verschiedene Eigenschaften der Luft zu beschreiben, gibt es nach Hooke keinen besseren Weg, als ein Experiment durchzuführen.[33] Er hat seine Vorgehensweise bei der Bestimmung des Verhältnisses von Druck und Dichte in der *Micrographia* genau beschrieben. Die Geräte, die er für diese Messungen benutzte, sind auf der *Abbildung 2.7 mit Fig.3* und *Fig.4* dargestellt.

Die beschriebenen Versuche aus der *Micrographia*, stellen nichts weiter dar als das, was Boyle bei seinem Versuch zur Luft gemacht hatte, nur hatten die beiden Versuche einen anderen Zweck. In ihren Versuchen benutzten Boyle und Hooke ein Glasrohr, das eine Länge von 3 $m$ hatte, welches sie zu einem U-Rohr geformt hatten. Der kürzere Teil war ungefähr $0,3$ $m$ lang. Das Ende des langen Teiles des U-Rohres war vorerst offen. Sie füllten das U-Rohr mit Quecksilber, wobei eine Luftsäule im kürzeren Teil des Rohres erzeugt wurde. Vorerst wurde eine solche Menge an Quecksilber eingegossen, dass sowohl im kürzeren als auch im längeren Teil des U-Rohres die gleiche Quecksilberhöhe zu sehen war. Dieser Zustand, der eigentlich einen Gleichgewichtszustand darstellt, beschreibt im Grunde einen Zustand, in welchem der Luftdruck der Luftsäule im kürzeren Teil gleich dem Atmosphärendruck ist. Nachdem sie diesen Zustand eingestellt hatten, dichteten sie den kürzeren Teil des Rohres ab. Durch das weitere Eingießen von Quecksilber in den längeren Teil des U-Rohres stellte Boyle fest, dass sich die Änderung der Höhe der Luftsäule umgekehrt proportional zur eingegossenen Quecksilbersäule veränderte.

Im Gegensatz zu den Versuchen, die er mit Boyle durchgeführt hatte, war der kürzere Teil des Rohres, das in der *Micrographia* beschrieben wurde, schon abgedichtet. Bei dem Versuch, dass er gemeinsam mit Boyle gemacht hatte, waren beide Enden des Rohres offen.

Zu der Zeit war es, durch die Torricellischen Experimente und den Experimenten von Power und Towneley bekannt, dass der Luftdruck auf verschiedenen Höhen unterschiedlich war. Angetrieben von der Idee, Verbesserungen in Boyles Experimenten vorzunehmen, hatte Hooke in der *Micrographia* eine Methode beschrieben, wie es gezeigt werden konnte, dass der Luftdruck auf verschiedenen Höhen andere Werte hatte. Die Versuche wurden mit Quecksilber durchgeführt. Er benutzt ein Glasrohr, auf der *Abbildung 2.7, Fig 3.* mit

[33] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 15

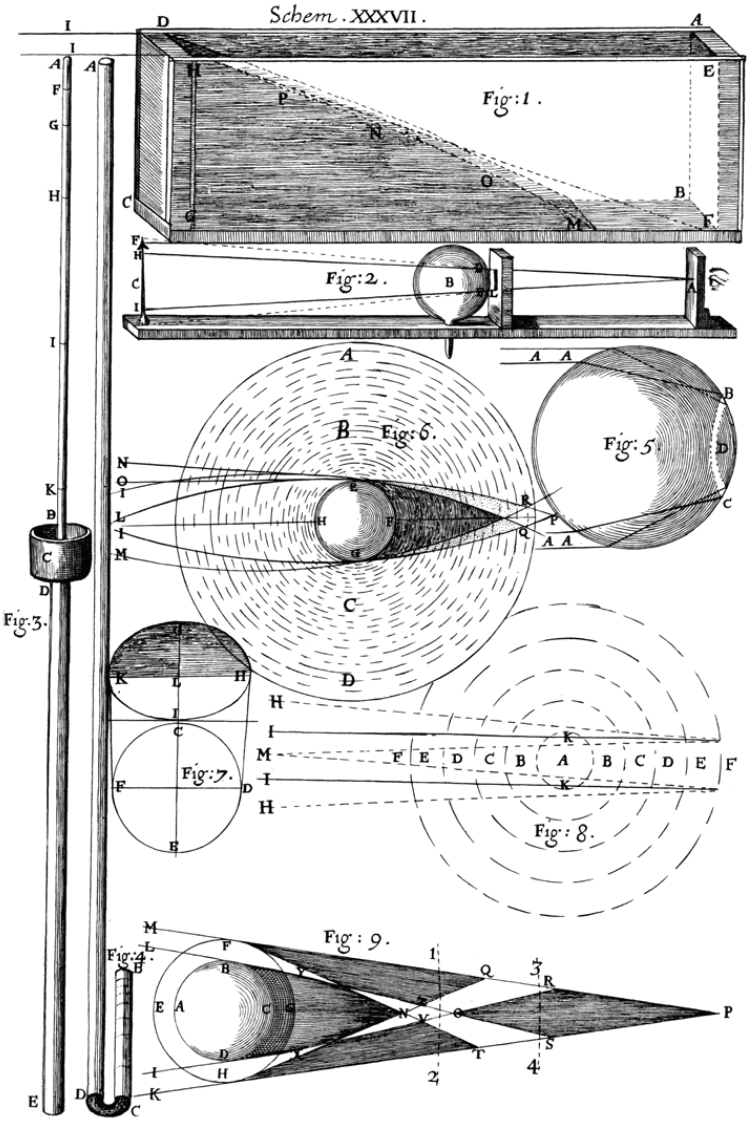



Abbildung 2.7: *Schem XXXVII aus der Micrographia*[34]

[34]Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 220/1

$AB$ gekennzeichnet, mit einer ziemlich schmalen Durchschnittsfläche[35] und einer Länge von etwa 4 $Fuß$. Dieses Rohr $AB$ war an beiden Enden offen. Er verwendete ein weiteres Rohr $DE$, das groß genug war, dass das Rohr $AB$ hineinpassen konnte. Das Rohr $DE$ war an einem Ende geschlossen und am anderen Ende befestigte Hooke eine Holzbox $C$. Die Holzbox befestigte er mit Kitt. Dadurch konnte er das Quecksilber so eingießen, dass er das Rohr $DE$ und teilweise auch die Holzbox $C$ damit füllen konnte.

Nachdem er das Rohr $DE$ mit Quecksilber gefüllt hatte, tauchte er das Glasrohr $AB$ in das mit Quecksilber gefüllte Rohr $DE$ ein. Er befestigte das gesamte System an die Wand, damit es stabil bleiben konnte. Das Rohr $AB$, das nun vollständig in der Holzbox $C$ eingetaucht war, dichtete er am Ende $A$ mit Kitt ab. Dann zog er das Rohr $AB$ langsam aus dem Rohr $DE$ raus. Das tat er mithilfe eines Seiles, das wahrscheinlich mithilfe einer an der Decke befestigten Umlenkrolle bedient wurde. Er zog das Rohr $AB$ soweit hoch, bis die Quecksilbersäule ungefähr 29 $Inch$ war. Er ließ das Rohr $AB$ wieder runter und öffnete wieder das obere Ende $A$. Nachdem das obere Ende wieder geöffnet war, tauchte er das Rohr $AB$ in das Rohr $DE$ ein, aber diesmal so weit, dass es 1 $Inch$ über der Quecksilberoberfläche in der Holzbox $C$ war. Als er diese Position erreicht hatte, dichtete er wieder das obere Ende des Rohres $AB$ ab. Er zog das Rohr $AB$ wieder hoch, bis sich die Oberfläche des Quecksilbers im Rohr $AB$ auf 2 $Inch$ über der Quecksilberoberfläche der Holzbox $C$ befand. Dabei stellte Hooke fest, dass sich die Luft 1/16 $Inch$ ausgedehnt hatte. Er zog das Rohr $AB$ immer weiter raus, bis dann der Wert von 4 $Inch$ über der Quecksilbersäule der Holzbox $C$ gemessen wurde. Dabei dehnte sich die Luft 1/7 $Inch$ aus.

Hooke fuhr mit den Messungen fort, dabei entstand eine Tabelle (*Abbildung 2.8*). In der ersten Spalte befindet sich die Höhe der Quecksilbersäule, in der zweiten die Höhe der ausgedehnten Luftsäule und in der dritten die Höhe der Quecksilbersäule bei Atmosphärendruck.[36] Die Eintragungen in der letzten Spalte erklärte Hooke in eigenen Worten:

> *The last* [row] *signifies the force of the air expanded, which is found by substracting the first row of numbers out of the third; for having found that the outward air would then keep up the Quicksilver to thirty inches, look whatever of that height is wanting must be attributed to the Elater of the Air depressing. And therefore having an Expansion in the second row, and the height of the subjacent cylinder of mercury in the first and the greatest height of the cylinder of mercury which itself counterballances the whole pressure of the atmosphere; by substracting the numbers of the third, you will have measure of the cylinders so deprest, and consequently the force of the Air in the several Expansion registred.*[37]

[35] Im Originaltext schrieb Hooke, dass die Breite ungefähr der Breite einer *Schwanenfeder* entsprach. Vermutlich handelt es sich um eine Feder, die zu der Zeit als Schreibfeder verwendet wurde.

[36] In der Tabelle (*Abbildung 2.8*) ist der Wert der Höhe der Quecksilbersäule bei Atmosphärendruck 30 $Inch$ und nicht 29 $Inch$ wie in der Beschreibung. Grund dafür kann sein, dass er die Messungen, die er in die Tabelle notierte, an einem anderen Tag durchgeführt hatte.

[37] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 223

| The height of the Cylinder of *Mercury*, that, together with the Elater of the included Air, ballanced the preſſure of the Atmoſphere. | The Expanſion of the Air. | The height of the *Mercury* that counterballanc'd the Atmoſphere | The ſtrength of the Elater of the expanded Air. |
|---|---|---|---|
| 00 | 01 | 30 | 30 |
| 02 | 01 1/16 | 30 | 28 |
| 04 | 01 1/7 | 30 | 26 |
| 06 | 01 1/9 | 30 | 24 |
| 08 | 01 1/11 | 30 | 22 |
| 10 | 01 1/13 | 30 | 20 |
| 12 | 01 1/13 | 30 | 18 |
| 14 | 01 1/6 | 30 | 16 |
| 16 | 02 1/27 | 30 | 14 |
| 18 | 02 4/9 | 30 | 12 |
| 20 | 03 | 30 | 10 |
| 22 | 03 7/9 | 30 | 8 |
| 24 | 05 7/18 | 30 | 6 |
| 25 | 06 1/3 | 30 | 5 |
| 26 | 08 1/2 | 30 | 4 |
| 26 1/4 | 09 1/2 | 30 | 3 1/4 |
| 26 1/2 | 10 3/4 | 30 | 3 1/2 |
| 26 1/4 | 13 | 30 | 3 1/4 |
| 27 | 15 1/2 | 30 | 3 |

Abbildung 2.8: *Die erste Tabelle zu den Experimenten aus der Micrographia*[38]

[38] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 224

Die letzte Spalte stellt hiermit berechnete Werte dar, die durch die Differenz zwischen den Werten der dritten und zweiten Spalte entstanden sind. In der ersten Spalte ist die Höhe der Quecksilbersäule, die zusammen mit dem *Elater* der eingeschlossenen Luft, dem Atmosphärendruck entspricht. Er startet mit der Position 0, die er mit dem ersten Ziehen gesetzt hatte. In diesem Augenblick entspricht der Druck auf die Luftsäule, dem Atmosphärendruck, also 30 $Inch$. Diese Bedingungen sind mit einer Höhe der Luftsäule von 1 $Inch$ gegeben. Da in diesem Augenblick der Atmosphärendruck gegeben ist, kann der *Elater* folgendermaßen berechnet werden:

$$Elater = 30 - 0 = 30 \tag{2.3}$$

Das entspricht im Grunde der Höhe der Quecksilbersäule im Glasrohr $AB$, die abnimmt, je höher das Rohr herausgezogen wird. Aus heutiger Sicht bedeutet das nichts weiter, als – *wenn das Volumen der Luft steigt, sinkt die Differenz zwischen dem Atmosphärendruck und dem durch das Dazugeben von Quecksilber entstandenem Druck*, bzw. die Höhe der Quecksilbersäule – also $Hg_{normal} - Hg$. Die darauffolgenden Werte können auf dieselbe Art und Weise berechnet werden. Auch hier lässt sich ein konzeptuelles Problem erkennen wie bei den Beobachtungen von Power und Towneley. Hooke betrachtete auch die Veränderung des Luftdrucks als die Konsequenz des Widerstands der Luftsäule im Glasrohr.

Hooke hat seine Messungen und seine Experimente in der *Micrographia* sehr detailliert beschrieben. Nicht nur werden die genaue Prozedur und die benutzten Geräte im Detail beschrieben, zusätzlich stellte Hooke seine Ergebnisse und die darauffolgenden Kommentare dar, die auch eine Erläuterung von möglichen Fehlern beinhalten. Auch wenn er unzufrieden mit seinen Ergebnissen war, veröffentlichte er sie trotzdem mit.

> [...] *after having tryed it over and over again; and being not well satisfied of some particulars, I, at least, having put all things in very good order, and being as attentive, and observant, as possibly I could, of every circumstance requisite to be taken notice of*[39]

Im August 1661 wiederholte Hooke diese Versuche. Bei der Entstehung dieser Messungen ging Hooke diesmal einen anderen Weg. Er benutzte nicht dieselbe Methode wie die von vor 12 Monaten.

> [...] *in this following Table* [*Abbildung 2.9*]. *In the making of which, I did not exactly follow the method that I had used at first; but, having lately heard of Mr. Townly's Hypothesis, I shap'd my course in such sort, as would be most convenient for the examination of that Hypothesis; the event of which you have in the latter part of the last Table.*[40]

[39] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 225
[40] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 225

## *A Table of the Elaſtick power of the Air, both Experimentally and Hypothetically calculated, according to its various Dimenſions.*

| The dimenſions of the included Air. | The height of the *Mercurial Cylinder* counterpois'd, by the *Atmoſphere.* | The *Mercurial Cylinder* added, or taken from the former. | The ſum or difference of theſe two *Cylinders.* | What they ought to be according to the *Hypotheſis.* |
|---|---|---|---|---|
| 12 | 29 + | 29= | 58 | 58 |
| 13 | 29 + | $24\frac{11}{16}$= | $53\frac{11}{16}$ | $53\frac{7}{13}$ |
| 14 | 29 + | $20\frac{3}{16}$= | $49\frac{3}{16}$ | $49\frac{5}{7}$ |
| 16 | 29 + | 14= | 43 | $43\frac{1}{4}$ |
| 18 | 29 + | $9\frac{1}{8}$= | $38\frac{1}{8}$ | $38\frac{2}{3}$ |
| 20 | 29 + | $5\frac{3}{16}$= | $34\frac{3}{16}$ | $34\frac{4}{5}$ |
| 24 | 29 | 0= | 29 | 29 |
| 48 | 29— | $14\frac{5}{8}$= | $14\frac{3}{8}$ | $14\frac{1}{2}$ |
| 96 | 29— | $22\frac{1}{8}$= | $6\frac{7}{8}$ | $7\frac{1}{8}$ |
| 192 | 20— | $25\frac{5}{8}$= | $3\frac{3}{8}$ | $3\frac{5}{8}$ |
| 384 | 29— | $27\frac{3}{8}$= | $1\frac{6}{8}$ | $1\frac{7}{16}$ |
| 576 | 29— | $27\frac{7}{8}$= | $1\frac{1}{8}$ | $1\frac{5}{24}$ |
| 768 | 29— | $28\frac{1}{8}$= | $0\frac{7}{8}$ | $0\frac{11}{12}$ |
| 960 | 29— | $28\frac{1}{8}$= | $0\frac{5}{8}$ | $0\frac{11}{18}$ |
| 1152 | 29— | $28\frac{7}{16}$= | $0\frac{9}{16}$ | $0\frac{10}{16}$ |

Abbildung 2.9: *Die zweite Tabelle zu den Experimenten zum Luftdruck, Messresultate vom 2. August 1661, übernommen von Micrographia*[41]

[41] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 226

Bei diesem zweiten Experiment wollte Hooke die *degree of force* bestimmen, die nötig war, um die Luft bis zu einem gewissen *Bulk* (Menge) zu komprimieren. Er benutzte ein Glasrohr, dass 4 $Fu\ss$ lang war, dass er zu einem U-Rohr geformt hatte. Dabei entstand eine längere Seite $AD$ die 50 $Inch$ lang war. Diese längere Seite $AD$ war an einem Ende $A$ geöffnet. Die kürzere Seite $BC$ war nicht länger als 7 $Inch$ und sie war an einem Ende $B$ geschlossen. Er goss etwas Quecksilber in das Rohr ein, bis die Luftsäule in $BC$ etwa $6\frac{7}{8}$ $Inch$ war. Hooke fuhr damit fort Quecksilber einzugießen, bis die Luftsäule bis zur Hälfte (also $3\frac{7}{16}$) komprimiert war.

Er hatte diesbezüglich weitere Experimente durchgeführt, wobei die Tabelle (*Abbildung 2.9*) entstand.[42] In der *Micrographia* wird zuerst die Reihe beschrieben, die in der mittleren Spalte (die dem Wert der dazugegebenen Höhe der Quecksilbersäule entspricht) den Wert 0 hat. In diesem Augenblick hat die Luftsäule den Wert 24, worüber Hooke keine weiteren Angaben gemacht hatte. Es kann hierbei vermutet werden, dass das der Wert des Volumens ist (der wahrscheinlich berechnet worden ist). Dieser Wert des *Volumens* der Luftsäule entspricht Bedingungen, in der die Höhe der Quecksilbersäule den Wert 29 $Inch$ hat. Dann aber beschrieb Hooke die Reihe darüber, in welcher der Wert für die Luftsäule 20 beträgt. Dieser Wert wird so ermittelt, dass dem Wert der Quecksilbersäule (also 29 $Inch$) die zusätzliche Höhe der Quecksilbersäule von $5\frac{3}{16}$ dazugegeben wird.

$$Elastic\ \ strength = 29 + 5\frac{3}{16} = 34\frac{3}{16} \tag{2.4}$$

Also ist die *elastic strength* der komprimierten Luft $34\frac{3}{16}$. Der obere Teil über dem *Nullpunkt* (also der Teil, den Hooke auch beschrieben hat) scheint klar – sie befinden sich in dem Originaltext. Zum unteren Teil gibt es keine Angaben. Wenn die Höhenwerte der Quecksilbersäule verringert werden, wie es aus der Tabelle (*Abbildung 2.8*) zu entnehmen ist, bedeutet das, dass sich das Luftvolumen vergrößert. Also wird durch das halbieren der Quecksilbermenge, das Luftvolumen verdoppelt. Es erscheint aber, dass die beschriebene Apparatur offensichtlich nicht für die angegebenen Messungen hätte verwendet werden können, da die Länge $BC$ zu kurz für die angegebenen Werte war. Das, was Hooke aus dem oben beschriebenen Versuch schlussfolgerte, fasste er wie folgt zusammen:

> *From which Experiments, I think, we may safely conclude, that the Elater of the Air is reciprocal to its extension, or at least very neer* [sic][43]

Dieses Ergebnis, das Hooke bei diesen Beobachtungen schlussfolgern konnte, erinnert sehr wohl an etwas, was wir als Federgesetz kennen. Der *Elater* der Luft ist umgekehrt proportional zur Ausdehnung der Luft. Anbetracht der Tatsache, dass das Volumen der Luft

[42] Diese Tabelle ist vorerst schwer zu erschließen, weil er diese Tabelle mit den mittleren Werten beginnt zu beschreiben.

[43] Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 227

umgekehrt proportional zum darauf wirkenden Druck ist, lässt sich eine Analogie zur Federkraft und der Ausdehnung herleiten. Dies wird im kommenden Kapitel näher ausgeführt werden.

Im Jahr 1678 stellte Hooke seine Experimente den Mitgliedern der Royal Society vor, womit er zeigte, dass zweifache *Condensation* der Luft einen zweifachen Druck bräuchte, eine dreifache *Condensation* einen dreifachen Druck, usw. Des Weiteren gilt auch das Umgekehrte – die Sprungkraft der Luft nimmt proportional mit der Ausdehnung der Luft ab, sodass die Hälfte der Quantität, die Hälfte der *Strength* hat.

> [...] *the force necessary to condens the air was always proportionate to the condensation. Which was verified by several trials of several degrees of condensation; that is, to condense the air twice, required twice the strength, and thrice,* [sic] *three times the strength, &c. that is, if the same quantity be condensed, then the force or weight of the power, that makes condensation, shall always be reciprocal to the dimension: but if the dimension be the same, then the force shall be always proportional to the quantity of air contained in the space.*[44]

Allgemein betrachtet waren diese Experimente methodologisch gleich. Nach Hooke selber soll seine Arbeit zu dem Luftdruck hilfreich in der Erklärung von verschiedenen Eigenschaften sein, die die Luft in ihrem Verhalten zeigte.[45] Durch die Zusammenarbeit mit Boyle und den Erfahrungen, die Hooke mit den Versuchen zur Luft gesammelt hatte, ist es nachvollziehbar, wieso er in *Lectures de Potentia* angemerkt hat, dass er bereits zur *Elastizität* eine Hypothese aufgestellt hatte. Offen bleibt nur die Frage, ob sein, in der *Lectures de Potentia* formuliertes *Gesetz der Natur*, als eine Verallgemeinerung des Elastizitätsgesetzes interpretiert werden kann.

## 2.2 Die Elastizität von Festkörpern

Methodologisch betrachtet war Hooke ein Fürsprecher der Baconianischen Herangehensweise, die im ersten Kapitel erwähnt wurde. Nach der Aussage von Waller war Descartes ein Wissenschaftler, von dem Hooke schon als junger Mann begeistert war. Das bezog sich hauptsächlich auf Descartes Werk *The Principles of Philosophy*, in dem er über die Philosophie der Natur geschrieben hatte. Laut Descartes Konzept besteht das Universum aus Bewegung und Materie. Er interpretierte Materie als Konzept nicht über Gewicht oder Härte, Farbe oder Ähnliches, sondern aus Ausdehnung.

[44] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 385
[45] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 217 – 227

> [...] *Descartes supposes that Extension and Body is one and the same thing, and that there is no where Extension but there is Body, and no Body but is extended* [...][46]

Hooke war entschlossen, Descartes Konzept von Materie und Bewegung zu folgen. Bewegung sah Descartes als eine Aktivität an, bei der sich ein Körper von einem Ort zum anderen bewegt. Er führte drei Gesetze der Bewegung ein. Die ersten beiden Gesetze umfassen das Trägheitsgesetz. Jeder Körper, der sich bewegt, bleibt in Bewegung. Diese Bewegung ist dabei als geradlinig zu betrachten. Das dritte Gesetz besagt, dass wenn ein Körper sich bewegt, und er einen anderen Körper, der im Ruhezustand ist, stößt, diesen entweder in Bewegung setzen wird und sich dabei selbst weiterbewegt, oder stehen bleibt und den anderen Körper in Bewegung setzt, oder sich vom anderen Körper abstößt, ohne den anderen dabei in Bewegung zu versetzen. Im letzten Fall wird dieser Körper ebenso in gleichmäßige Bewegung gesetzt werden (in Abhängigkeit von der Resistenz des Körpers). Das kann als relativ großer Fortschritt in der Naturphilosophie des 17. Jahrhunderts angesehen werden, da geglaubt wurde, dass es eine Ursache erfordert, um einen ruhenden Körper in Bewegung zu setzen. Interessant ist jedoch, dass Newton in keinem seiner Werke erwähnte, dass das Trägheitsgesetz eine Formulierung von Descartes war.[47]

Für Hooke war Bewegung im Grunde eine *lokale Bewegung*. Es sei nichts weiter als eine *Deplacierung* eines Körpers relativ zu einem anderen Körper. Hooke erklärte das folgendermaßen:

> *By motion I understand nothing but an Alteration, or power of Alteration, of the Minims of a Whole, in respect of one another, which Power may be increased or diminished in any assignable quantity; but the natural Ballance of the Universe is reciprocal to the Bulk of Extension, or of the quantity of the other Power, Body.*[48]

Diese Sicht von *Motion* (damit auch der *Power*) behielt Hooke bei allen mechanischen Hypothesen.[49]

Was die Bewegung *nahe der Erdoberfläche* betrifft, hatten die Denker des 17. Jahrhunderts einige Hindernisse zu überwinden. Anhand der Werke von Galileo Galilei, Descartes, Huygens usw., kann vermutet werden, dass eins dieser Hindernisse die Beschreibung von gleichförmig beschleunigter Bewegung war. Das ist auch ein möglicher Grund, der auch

[46] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. 74

[47] vgl. Jammer M., *Concepts of Force. A Study in the Foundations of Dynamics*, New York, 1962, S. 81 – 116

[48] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. 172

[49] Hierbei sei bedacht, dass Hooke Begriffe wie *power, force, strength &c*, als ein und dasselbe verwendete. Es erscheint auch plausibel unter dieser *Power of alteration* das Konzept von Energie zu sehen. Das wird etwas deutlicher in den kommenden Kapiteln dargestellt. Aus diesem Grund wird im darauffolgenden Text immer explizit das Wort benutzt, was Hooke in englischen Originaltexten verwendete.

Hooke dazu brachte, den Freien Fall zu untersuchen. Die Verbindung zwischen *Motion* und *Body* war aus Hookes Sicht so stark, dass sie nicht auseinandergehalten werden konnten.

> *By Body I mean somewhat receptive and communicative of motion or progression*[...]*By Motion I understand nothing but a power or tendency progressive of body according to several degrees of velocity*[...] *These two do always counterbalance each other in all the effects, appearances, and operations of nature, and thereof it is not impossible but that they may be one and the same*[...] *I do further suppose then that all things in the Universe that become the objects of our sense are compounded of these two namely Body and motion.*[50]

Im Jahr 1662 berichtete Hooke der Royal Society, wie sich die Wirkung von *Force* durch einen fallenden Körper interpretieren ließe. Dazu stellte er auch ein Gerät vor (*Abbildung 2.10*). Das Gerät wurde folgendermaßen beschrieben:

> *ABC the pedestal of the scales, DE a double beam, between the two cheeks of which the steel ball F falls from a determinate height upon the steel plate G; and if by that fall it moves the double beam and the counterpoise H, lying in the scale IK, it gives the small spring L a free passage to slip between the end of the double beam and the stay M, by which means there is given a certain sign, whether the falling body has moved the scale and counterpoise so far, as to admit the very thin edge of the spring. The rest of the contrivance is obvious enough from the scheme itself.*[51]

Im Grunde hat Hooke hier eine Waage mit einem Doppelbalken beschrieben. Aus einer bestimmten Höhe, die gemessen werden konnte, ließ er eine Stahlkugel $F$ fallen, die auf die Stahlplatte $G$ aufprallte. Wenn sich nun durch diesen Fall das Gegengewicht $H$ bewegte, sorgte eine kleine Feder $L$ dafür, dass ein Zeichen gegeben werden konnte. Das, was eigentlich passierte, ist, dass die Feder leicht (durch den Aufprall der Kugel auf das System $DE$) zuckte.

Die Versuche zu diesem Gerät wurden so durchgeführt, dass Gewichtsstücke auf die Schale $I$ gestellt worden sind. Er beobachte, ob sich die Schale $G$ bewegen würde, wenn die Kugel $F$ von einer gewissen Höhe fallen gelassen wurde.

> [...] *I put into the opposite scale four ounces, that is four times the weight of the steel bullet, and letting fall the bullet an inch above the steel plate, I found it to have moved it, and admitted the small spring. I repeated the trials so long, till I found, that letting this ball fall but 4/21 of an inch above the plate, it would move the beam so as to admit the spring; but if I let it fall from a less*

[50] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 7
[51] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S.107

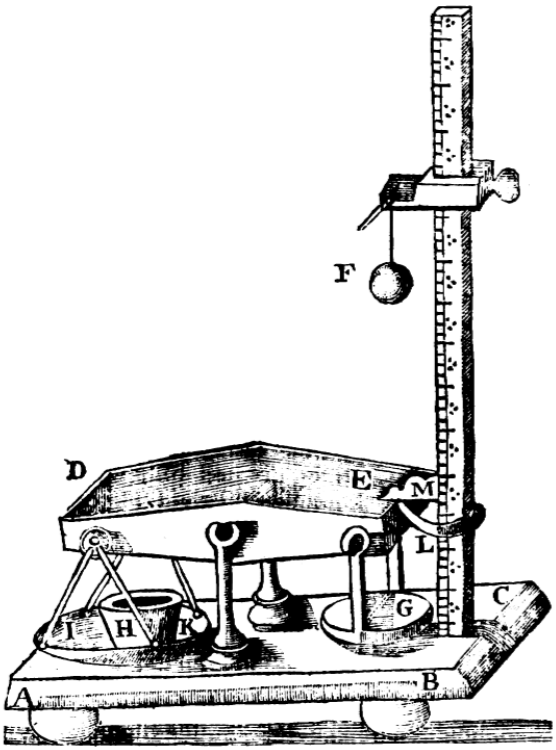



Abbildung 2.10: *Hookes Messgerät zur Bestimmung von Force beim freien Fall.*[52]

> *height, it would not. Then I put in eight ounces counterpoise, and by several repeated trials, I found 2/3 of an inch to be the height requisite for the falling bullet to pass before it would move eight times its own weight.*[53]

Er hatte zuerst ein Gewichtsstück von vier *Unzen*[54] genommen, das dem Vierfachen der *Masse* der Metallkugel entsprach. Die Metallkugel ließ er von einer Höhe von 1 *Inch* fallen. Bei diesem Versuch bewegte sich die Feder. Er wiederholte den Versuch mit verschiedenen Höhen, bis er herausfand, dass, wenn die Metallkugel noch von 4/21 *Inch* fallen gelassen wurde, würde sich die Feder noch bewegen. Wenn aber die Höhe geringer war, bewegte sie sich nicht mehr.

[52] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I*, 1765, S. 195
[53] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 108
[54] $1\ oz = 0,0283495\ kg$

Danach verwendete er ein Gewichtsstück von 8 *Unzen*. Bei diesen Bedingungen war eine Höhe von 2/3 *Inch* erforderlich, um das Gewichtsstück zu bewegen. Dabei ist die Tabelle A (*Abbildung 2.11*) entstanden. Nachdem er eine Reihe von Messungen mit der Metallkugel durchgeführt hatte, machte er denselben Versuch nochmals mit einer kleineren Kugel aus Ton (im Originaltext *small ball of clay*). Er notierte für die Kugel aus Ton die Werte in der Tabelle B (*Abbildung 2.11*). Wesentlich aus heutiger Sicht sind bei diesen Versuchen die Endgeschwindigkeit und der Impuls. Es sei dabei angemerkt, dass Hooke die Geschwindigkeit nicht direkt messen konnte. Er schrieb:

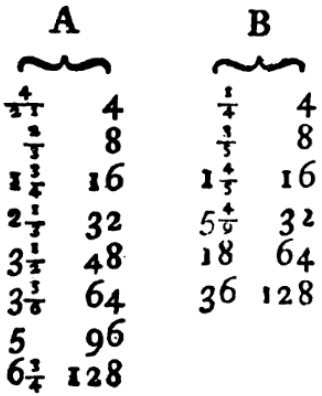



Abbildung 2.11: *Hookes tabellarische Darstellung der Messungen zum freien Fall.*[55]

> *Which trials, though they do not answer our expectation as to the accurate exhibiting the strength of a moved body, yet seem to prove, that a body moved with twice the celerity acquires twice the strength, and is able to move a body as big again.* [...] *when it is let fall from a less height than is requisite to produce the same effect at another.*[56]

Hooke kam zu der Schlussfolgerung, dass eine vierfache Höhe des Fallens die Geschwindigkeit verdoppelte, wobei das Zweifache der *Masse* auf der Waage gehoben wurde. Mit anderen Worten, wenn eine *Masse* $m$ von einer gewissen Höhe $h$ fällt, kann eine andere *Masse* $M$ auf der Waage gehoben werden, also würde dieselbe *Masse* $m$, die von einer Höhe $4h$ fällt, eine *Masse* von $2M$ heben können.[57] Diese Versuche, die er mit diesem

[55] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I*, 1756, S. 195 – 196
[56] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 108
[57] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 222.

Gerät vorgenommen hatte, ließen ihn feststellen, dass die *Geschwindigkeit* von der Höhe, von der die Kugel losgelassen wurde, abhängig war. Es erscheint, das *celerity* etwas wie Wucht ist.

Galileo Galilei sagte aus, dass die *Antriebskraft* oder *Impetus* eines Körpers direkt proportional zur Geschwindigkeit des Körpers vor dem Aufprall ist. In dem Werk *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) hatte Galileo Galilei beschrieben, dass fallende Körper ihre größte Geschwindigkeit vor dem Aufprall haben. Um eine Geschwindigkeit zu verdoppeln, muss der Körper von einer vierfachen Höhe fallen gelassen werden. Zum Beispiel, am Ende eines 16 *Fuß* hohen Fallens wird die Geschwindigkeit 32 *Fuß* pro Sekunde sein.[58] Das schien der Hintergrund zu sein, den Hooke vermutlich zu untersuchen versuchte. Hookes Versuche zeigten das Verhalten von Geschwindigkeit in Abhängigkeit von Strecke, sowie die Abhängigkeit der *Power* von der Geschwindigkeit. Kurz gesagt: zu einer bestimmten Geschwindigkeit $v_0$ gibt es eine entsprechende Strecke $s_0$; dann gibt es für eine Geschwindigkeit, die $n$ mal gestiegen ist, $nv_0$, auch die entsprechende Strecke $n^2 s_0$. Das bedeutet bspw., um eine zweifache Geschwindigkeit zu erreichen, muss der Körper eine vierfache Strecke zurücklegen.[59]

Hooke vermutete, dass die *Masse* hierbei eine große Rolle spielte. Die Verbindung zwischen der Bewegung eines Körpers und dem Körper selbst sah Hooke als eine Proportionalität:

> *According to the bigness of the bodies the motions are, but in reciprocal proportion: That is, the bigger or more powerful the body is, the slower is its motion with which it compounds the particles; and less the body is, the swifter is its motion.*[60]

Aus dieser Aussage kann vermutet werden, dass es sich nicht um die Art von Geschwindigkeit handelt, die wir als physikalische Größe kennen. Es ist offensichtlich eine Wahrnehmung der Bewegung. Dadurch kann durchaus vermutet werden, dass es sich hierbei um etwas handelt, dass wir heute als Impuls kennen. Im Jahr 1669 änderte Hooke in seinem zweiten Anlauf seine Herangehensweise und benutze für die Beobachtung verschiedene Formen von Waagen. Damit wollte er nämlich zeigen, dass eine vierfache *Masse* eine zweifache *celerity* benötigte, wenn dabei die Strecke konstant gehalten wird. Er konzentrierte sich hier auf das Verhältnis von *Masse* und dem, was er als *celerity* bezeichnete. Dabei kam er zur folgenden Schlussfolgerung:

> [...] *the force in moving bodies is in a duplicate proportion to their celerities, so that there is required a quadruple weight to double the velocity.*[61]

[58] vgl. Centore F.F., *Robert Hooke's Contributions to Mechanics. A Study in Seventeenth Century Natural Philosophy*, Martinus Nijhoff/The Hague, 1970, S. 51.

[59] vgl. Centore F.F., *Robert Hooke's Contributions to Mechanics*, 1970, S. 51.

[60] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 10

[61] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 347 – 348

Hier ist *Force* direkt proportional zum Quadrat der *celerity*. Je *schneller* sich ein Körper bewegt, desto härter wird es auf den Boden aufschlagen. Also wusste Hooke, wie er die *Masse* verändern musste, um eine größere Geschwindigkeit zu erreichen.[62] Hooke schrieb hier explizit *...the force IN moving bodies...*, was bedeuten würden, dass diese *Force* etwas ist, dass der Körper bereits in sich hat – eine Eigenschaft.

Offensichtlich herrscht hier ein immer wieder kehrendes Problem, dass das Verständnis von Hookes Äußerungen erschwert. Hookes Schlussfolgerung könnte folgendermaßen interpretiert werden: Mit der Anwendung der vorher genannte Interpretation von *celerity* und betrachtet es als Impuls, könnte, aus heutiger Sicht, *Force* als eine Form von *Energie* interpretiert werden. Aus heutiger Sicht ist bekannt, dass die Geschwindigkeit beim freien Fall unabhängig von der Masse ist. Wenn das Verhältnis zwischen Höhe, von der der Körper fallen gelassen wurde, und der Geschwindigkeit betrachtet wird, die der Körper vor dem Aufprall erreicht, gilt $h \sim v^2$. Laut Hookes vorherigen Behauptungen gilt, dass wenn ein Körper der Masse $m$, der von einer Höhe $h$ fällt, einen Körper von der Masse $M$ heben kann, muss die gleiche Masse $m$ von einer Höhe $4h$ fallen gelassen werden, um einen Körper der Masse $2M$ zu heben. Also steht die Masse in einem linearen Verhältnis zur Fallhöhe. Wenn also gilt:

$$f(v) \sim \sqrt{h} \tag{2.5}$$

muss unter der Wurzel $4h$ stehen, damit sich der Wert der Funktion $f(v)$ verdoppelt. Das, was Hooke womöglich beobachtet hatte, war etwas, das wir mit dem Energieerhaltungssatz beschreiben können. Zum einen gilt, dass die Energie proportional zum Quadrat des Impulses ist, zum anderen, dass die maximale kinetische Energie der maximalen potentiellen Energie entspricht.

Diese Versuche ermöglichten Hooke zu analysieren, ob auch die Eigenschaften des Körpers, also auch die Masse und das Material, aus dem der betrachtete Körper besteht, Einfluss auf die Bewegung hatten. In *Lampas* schrieb Hooke Bemerkungen über die Aktivität von Pendeln, Saiten, schwingenden Körpern und fallenden Körpern, die sich genau nach der oben erwähnten Proportionalität verhalten.

> *Now this is exactly according to the General Rule of Mechanicks. Which is, that the proportion of the strength or power of moving Body is always in a duplicate proportion of the Velocity it receives from it* [...] *This is certainly true in motion of Bullets shot out of Cannons, Muskets, Pistols, Wind-guns, Crossbows, Spitting-Trunks, and the like; as likewise in the motion of Arrows shot with Bows or Ballistae; of Stones thrown by the hand, or with Slings; of Pendulums moved by Gravity or Weights; of Musical Strings; of Sprins, and all other vibrating Bodies, of the motion of Wheels, Flies, &c. drawn and turned by*

[62] vgl. Patterson L.D., *Robert Hooke and the Conservation of Energy*, Isis, Vol. 38, 1948, S. 151 – 156

> *Weights or Springs* [...] *in a word, of all other Mechanical and Local motions, allowance only being made for the impediment of Air or other Fluid Medium through which the Body is moved.*[63]

Aus dieser Beschreibung geht hervor, dass die *force or power* etwas darstellt, was in Verbindung mit der Geschwindigkeit gebracht werden kann. Unabhängig davon, um was für eine (Form von) Bewegung es sich handelt, jede kann über die Geschwindigkeit beschrieben werden. Hooke führte auch weitere Versuche mit Körpern aus verschiedenen Materialien, Form und Dichte durch. Seiner Ansicht nach war es unmöglich, einen *perfekt harten* oder festen Körper zu finden. Auch hierzu führte Hooke Experimente durch. Der Grund von den obengenannten Beobachtungen und Untersuchungen von Bewegungen verschiedener Körper (Körper mit verschiedenen Eigenschaften, wie z. B. das Material, aus dem sie bestehen, die Masse, die *Trägheit* oder *Bulk* bzw. Menge) könnte der sein, dass Hooke dadurch zeigen konnte, wie gewisse Bewegungen von der Art des Körpers beeinflusst werden konnten. Auf diese Art und Weise konnte er die Verbindung zwischen *Body* und *Motion* ersichtlicher darstellen. Eine weitere Vermutung ist, dass er diese Proportionalität zwischen *Body* und *Motion* quantitativ darstellen wollte. Dadurch wäre es für Hooke möglich gewesen, ein Gesetz zu formulieren, das die Veränderung der einzelnen Quantitäten beschreibt, die eine Veränderung der Bewegung hervorruft.

Andererseits gibt es Vermutungen[64], dass einige von Hookes Manuskripten zur Gravitation auf mysteriöse Weise verschwunden seien. Daher kann zusätzlich spekuliert werden, dass Hooke auch hiermit eine Idee zur Wirkung der Schwerkraft verfolgte. Ob er nun auf dem richtigen Weg war, sogar Newton zu übertrumpfen, bleibt fraglich. Dass es einen Disput zwischen den beiden diesbezüglich gab, ist durch den Briefwechsel ihrer Korrespondenz nachweisbar.[65] Auch wenn der Tatsache Glauben geschenkt werden mag, dass in diesen angeblich *mysteriös verschwundenen* Manuskripten eine Theorie über Himmel und Erde, sowie den Wechselwirkungen zwischen Körper und Erde geschrieben steht, muss nicht explizit angenommen werden, dass darin auch die, aus heutiger Sicht betrachtet, akzeptierte Theorie zur Schwerkraft formuliert ist. Unabhängig welcher Interpretation Glauben geschenkt werden mag, es bleibt die Tatsache, dass Hooke sehr wohl einen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften von Körpern und derer Bewegung sehen konnte.

Das breite Spektrum verschiedener Forschungsfragen, an denen Hooke gearbeitet hatte, kann ein unterstützendes Argument darstellen, dass Hooke versucht hat ein allgemeines

[63] Hooke R., *Lampas: or, Descriptions of some Mechanical Improvements of Lamps & Waterpoises*, London, 1677, S. 32 – 33

[64] vgl. Patterson L.D., *Hooke's Gravitation Theory and Its Influence on Newton. I: Hooke's Gravitation Theory*, Isis, Vol. 40, No. 4, 1949, S. 327 – 341, Adams R., Jardine L., *The Return of the Hooke Folio*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 60, No. 3, 2006, S. 235 – 239, Waller R., The Posthumous Works, 1705

[65] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 10 – 15, Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. X*, 1930, S.52 – 61, Koyré A., *An Unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton*, Isis, Vol. 43, No. 4, 1952, S. 312 – 337

Gesetz zu formulieren. Ein Gesetz, das für alle Körper gelten würde, die die Fähigkeit haben auf andere Körper zu wirken, wobei das Ergebnis oder die Folge dieser Wirkung sichtbar ist. Aus heutiger Sicht wären das die Erhaltungssätze. Ist das die Harmonie, die Hooke vielleicht in allem, was die *Natur* darstellt, sah? Diese Annahme würde auch die Verbindung zwischen *Body* und *Motion* erklären, die Hooke beschrieben hatte. Jeder *Body* hat eine eigene *Power* in sich als Eigenschaft, unabhängig, ob sich der besagte *Body in Motion* befindet oder nicht. Eine Eigenschaft wodurch die Fähigkeit eines *Body* beschrieben ist und wodurch der *Body* die Möglichkeit hat, sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu bewegen, wobei die Wirkung dieser Geschwindigkeit den *Impulse* von diesem *Body* darstellt. Die Schwierigkeit hierbei ist, dass Hooke keine klaren Begriffe verwendet hat, wie es später Newton in der *Principia* tat.

Inwiefern dies relevant für die Interpretation der Veröffentlichung seines Federgesetzes ist, wird in den kommenden Kapiteln näher ausgeführt werden.

# Kapitel 3

# Die Veröffentlichung des Gesetzes

Hookes Arbeit mit Federn, welche hauptsächlich in *Lectures De Potentia Restitutiva; or of Spring* veröffentlicht wurde, war mehr als nur eine Beschreibung von Verhältnissen verschiedener Eigenschaften einer Feder. Es war zudem vielmehr ein Vorhaben, die fundamentalen Ursachen der Elastizität zu erforschen. Des Weiteren übermittelte Hooke durch seine Veröffentlichung Erkenntnisse zu den Eigenschaften der Schwingung von Federn bei verschiedenen Bedingungen. Das Federgesetz an sich bringt soweit keine Unklarheiten, die eventuell durch diese Analyse geklärt werden könnten. Jedoch hat die Analyse der Veröffentlichung *Lectures de Potentia* eine andere Perspektive der Herangehensweise der Interpretation des Gesetzes ergeben.

Um zu erklären, wie sich Federn unter verschiedenen Bedingungen verhalten, stellte Hooke eine neue Theorie zur Natur der Materie dar. Aus Hookes Sicht bestand das Universum aus *Body*[1] und *Motion*. Dabei befanden sich *das Universum und alle Teilchen in einer kontinuierlichen Motion*. Das Verhältnis von *Body* und *Motion* war, laut dieser Theorie, so eng verbunden, dass es nicht so ganz unmöglich erschien, dass es ein und dasselbe wäre. Hooke war der Ansicht, dass ein *Body* nichts weiter war, als der *Empfänger* der Wirkung von *Power*. Übereinstimmende oder ähnliche *Bodies* bestanden damit aus *vibrative* Teilchen, die dieselbe oder zueinander *harmonierende* Größe und Geschwindigkeit haben. Aus diesem Grund hingen sie aneinander, wobei sie den Raum (wenn es um Festkörper geht), ihre Form und den Widerstand sich in den Außenraum zu zerstreuen, definierten. Die Form und die Größe des *Body* sind durch die *vibrative motion* dieser Teilchen bestimmt.

[1] In diesem Absatz wird der Originalbegriff *Body* benutzt, da es in Hookes Beschreibungen sowohl für Festkörper, als auch für Flüssigkeiten und andere Formen von Substanzen steht. vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665, *Lectures de Potentia*, 1678

Weiterhin übte auch der Druck durch die um den *Body* bestehenden Fluide – wie z. B. die Luft – einen Einfluss auf den *Body* aus. In einem teilweise festen Körper oder *Fluid* waren diese *vibrative* Teilchen in ständiger Kollision miteinander und diese Kollisionen bestimmten auch die Geschwindigkeit dieser Teilchen. Der nach außen gerichtete Druck, der durch die *vibrative* Teilchen verursacht wurde, war mit dem durch den nach innen gerichteten Druck der umgebenden *Fluid* ausgeglichen, dabei behielt der *Body* seine ursprüngliche Form. Wenn ein elastischer Körper zusammengepresst wurde, z. B. bis zur Hälfte seiner Größe, war der Abstand von schwingenden Teilchen zur Hälfte geringer und damit stieg auch die Anzahl der Zusammenstöße zwischen den Teilchen. Der Anstieg der Anzahl von Stößen verursachte bei dem zusammengepressten *Body*, die Tendenz sich zu seiner *natürlichen* Größe zu dehnen, als ob eine entgegengesetzte *Power* von außerhalb wirken würde, die direkt zur Kompression proportional sein musste.Das Ausdehnen eines elastischen *Body* hatte genau den umgekehrten Effekt gezeigt, was wegen der Verringerung der Zusammenstöße verursacht wurde. Der Druck vom außen liegenden *Fluid* brachte den Körper wieder auf seine natürliche Größe. Je länger z. B. die Feder ausgelenkt wurde, desto größer das Gewicht, das benötigt wurde, um zu verhindern, dass diese in ihre ursprüngliche Form zurückkehren würde. So auch beim Komprimieren eines *Fluid*: je größer der Druck auf den Behälter war, desto größer auch die Spannung, die ausgeübt wurde.[2]

Diese Ansicht lässt vermuten, dass Hooke das Biegen von Körpern als eine Eigenschaft gesehen hatte, die der Kompression und der Ausdehnung ähnelte. Bei einer gebogenen Stange ist eine Seite ausgedehnt und die andere zusammengepresst, wobei das gleiche Verhältnis von Steigerung und Verringerung der Zusammenstöße zwischen Teilchen vorliegen muss.[3] Die Idee, dass sich unter bestimmten Umständen die Teilchen bewegen, hatte bereits Galileo Galilei und die Theorie, dass die Teilchen in ständiger Bewegung sind, wurde von Descartes im *Principles of Philosophy* erwähnt, aber nicht weiter entwickelt. In Hookes Theorie bewegen sich *weiche* und *federleichte* Teilchen wie ein winziger Wirbel. Die *harten* Teilchen befinden sich eher in einer zufälligen Bewegung. Dabei würden sie bei relativ großen Entfernungen miteinander kollidierten ohne Verluste von *Power* und ohne das Ausüben eines größeren Drucks nach außen.

In der Veröffentlichung über die Eigenschaften der Feder sah es Hooke wahrscheinlich nicht als relevant, die Wärme als eines der Faktoren zu sehen, die eventuell das Verhalten der Feder beeinflusste. Als er aber *Micrographia* geschrieben hatte, war er sich sicher, dass die Hitze nichts anderes ist als eine sehr lebhafte und heftige Bewegung der Teilchen eines Körpers.[4]

[2] vgl. Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678
[3] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665 und *Lectures de Potentia*, 1678
[4] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 12

## 3.1 Die Vorläufer des Gesetzes

[...] *it was a desireable thing to have a good theory of the springiness in bodies.*[5]

Das ist ein Zitat aus dem Protokoll eines Treffens der Royal Society im Jahr 1673. Sir William Petty war derjenige, von dem diese Worte stammen. In einem Diskurs mit dem Titel *Concerning the use of duplicate proportion in sundry important particulars: together with a new Hypothesis of springing or elastique Motions* hatte Petty erläutert, dass die elastischen Eigenschaften von Körpern die Stärke der Struktur des Körpers bestimmen. Er hat dabei die Verformung und Schwingung von elastischen Körpern beschrieben. Weiterhin erläuterte er im *Appendix of Elasticity* Folgendes:

> *First, Supposing every Body to have a Figure or Positure of its own, out of which it may disturbed by External Force; I say, that Elasticity is the power of recovering that Figure, upon removal of such Force.*
>
> 2. *I think it easiest to consider Elastic, Springing, or Resilient Bodies, as Laminae, Laths, or Lines; so as a streight Lath, being by force bent circularly, doth upon the removal of that Force, return to be streight again by its Elasticity; and a Circular Hoop being forced streight, leaps back into its own crookedness by its Elasticity.*
> 3. *Elastic Bodies in their returns do overshoot their own Natural Positure, and vibrate cis citra the Point they seek, as doth a Pendulum, or Magnetic Needle, till at length they rest; the one in his Perpendicular, and the other in his Merdian.*
> 4. *An Elastic Body is a gross Tangible Body, which is made of Corpuscles, or the smallest Bodies that can possibly be seen; and these Corpuscles are made of Atoms, or the smallest bodies in Nature (such as whereof a Million doth not perhaps make one of the Corpuscles last mentioned.)*[...][6]

Dieser Appendix von Petty beinhaltet acht weitere Propositionen. Diese Propositionen jedoch beschrieben mehr die Teilchen und Atome von Körpern, die magnetische Eigenschaften besitzen. Petty hatte eine klare Vorstellung davon, was einen elastischen Körper ausmachte. Im Grunde hatte er die elastischen Eigenschaften eines Körpers als die *Power* des Wiederherstellens von der Form eines Körpers beschrieben, nachdem die Wirkung der externen *Force* aufgehört hatte. Er beschrieb es als Eigenschaft, die den Widerstand eines Körpers gegenüber äußeren Wirkungen darstellte.

[5] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 109

[6] Petty W., *The Discourse Made before the Royal Society. The 26. November 1674 concerning the use of duplicate proportion in sundry important particulars together with a new hypothesis of springing or elastique motions*, Kt. Fellow of the said Society, London, 1674, S. 121 – 132

Einige Jahre zuvor veröffentlichte Mersenne sein *Books on harmonic matters*, in dem er eine Liste an Propositionen angegeben hatte, die die Eigenschaften von *schwingenden* Körpern beschreibt. Diese Liste hatte er als eine Verallgemeinerung der Ergebnisse seiner Experimente mit Saiten dargestellt. Interessanterweise geht aus den Propositionen und aus seiner späteren Veröffentlichung *Universal Harmony* hervor, dass Saiten und alle anderen Arten von Körpern, drei oder vier verschiedene Töne geben, die harmonisch sind. Weiterhin ergab sich daraus auch eine quantitative Verbindung:

> [...] *frequency is proportional to the square root of string tension, and inversely proportional to string length as wall to the square root of the string's thickness*[7]

Diese quantitative Verbindung wird im Kapitel *die Diagramme* und der dazugehörigen Interpretation in einer Form wiederkehren. Das hat etwas damit zu tun, dass die *Frequenz* auch als eine Zeitgröße interpretiert werden kann und *string tension* als Form von Wirkung einer *Power*.

Ungefähr zur gleichen Zeit beschäftigte sich Galileo Galilei in seinen Arbeiten mit Schwingen von Saiten und dem Biegen vom Gewicht belasteten Balken. Dabei schlug er Lösungen vor, wie ein Festkörper resistenter gemacht werden könnte. Galileo Galilei hatte es folgendermaßen beschrieben: Ein Gewicht $E$ wurde im Punkt $C$ eines Hebels aufgehängt. Da es im Punkt $C$ hing, wirkte ein zweimal größeres Drehmoment als es in der Mitte von $BC$ sein würde (*Abbildung 3.1.a)*). Damit erscheint es klar, dass bei konstanter Dicke des Körpers (hier im Fall Hebel) das Drehmoment mit dem Quadrat der Länge variiert. Etwas Ähnliches hatte er auch mit einem Seil gezeigt (*Abbildung 3.1.b)*).

*Simp.* [...] *weil an dieser Stelle der Strick die 100 Pfund nicht tragen konnte, d.h. die Strecke DB mitsamt der Last.*

*Salv. Nun, dann wird der Strick stets an dieser Stelle D reißen, sobald er mit 100 Pfund gespannt wird.*

*Simp. Ich denke ja.*

*Salv. Aber sagt, wenn man nun dasselbe Gewicht nicht am Ende B, sondern dicht unter D, etwa in E, anbrächte, oder wenn der Strick nicht in A, sondern tiefer über D, etwa in F, befestigt würde, würde der Punkt D nicht demselben Zuge angesetzt sein?*

*Simp. Allerdings, wenn man nur das Stück EB der Last C hinzugefügt hat.*

*Salv. Gut; wenn nun der Strick in D mit 100 Pfund gezerrt wird, so wird er reißen; FE aber ist ein kleines Stück im Vergleich mit AB, wie wollt Ihr noch den langen Strick für schwächer halten, als den kurzen?*[8]

[7] Mersenne M., *Quantifying Music: The Science of Music at the First Stage of Scientific Revolution 1580 – 1650*, Cohen H.F., Hrsg., Springer Science & Business Media, 1984, S. 101

[8] Galileo G., *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, Zweiter Tag*, Oettingen A., Hrsg., Leipzig, 1890, S. 102

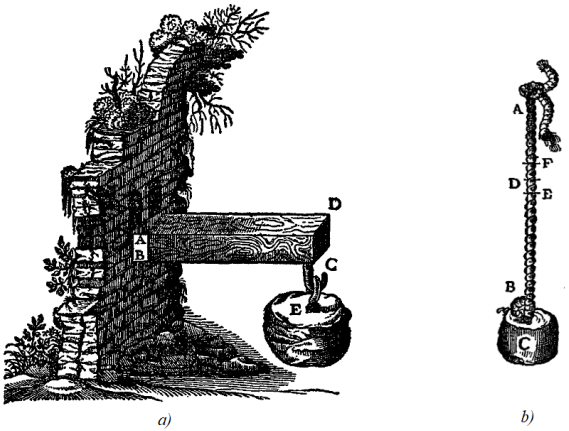



Abbildung 3.1: *Galileo Galileis Skizzen, womit er a) ein Hebel zum Brechen brachte, nachdem er Gewichte dranhing und b) argumentierte, dass ein langes Seil genauso stark wäre wie ein kurzes.*[9]

Diese Beobachtungen haben gezeigt, dass Körper mit einer bestimmten Länge und einer Dicke (oder einer bestimmten Durchschnittsfläche) in beiden Dimensionen eine gewisse Resistenz mit sich tragen. Diese Resistenz ist direkt proportional zur dritten Potenz des Durchmessers der Basis und umgekehrt proportional zu der Länge des Körpers (hierbei sollte zur Kenntnis genommen werden, dass Galileo Galilei über geometrische Körper gesprochen hatte).[10]

Ende der 1640er beschäftigte sich auch Huygens mit Saiten, die mit Gewichten gespannt wurden. Er gab dafür eine Zeichnung von zwei verschiedenen statischen Prinzipien. Dabei führte er auch einen Vergleich zwischen dem Schwingen einer Saite und eines Pendels. Als Modell für eine Saite nahm er eine schwerelose Schnur (*Chord*) mit einem einzigen Gewicht, das die Mitte der Saite belastete (*Abbildung 3.2)*. Zuerst beobachtet er eine horizontal gelegte Saite in kreisförmiger Schwingung, das seiner Meinung nach isochron war, wenn der Radius der Schwingung dabei klein genug war.

Danach beobachtete er eine vertikal angespannte Saite. Er stellte einen Unterschied fest, dass von dem Gewicht in beiden Fällen verursacht wurde. Eigentlich hatte er damit ein

[9]Galileo G., *Dialogues concerning two new science*, translated by H. Crew & A. de Salvio, New York The MacMillan Company, 1914, S. 116 & 122.

[10]Galileo G., *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige*, 1890, S. 123

Zykloidenpendel konstruiert, wobei die Rückstellkraft der Spannung, die darauf wirkte, entsprach. Da ihm die Schwingungsdauer eines Zykloidenpendels bekannt war, konnte er die Schwingungsdauer des Systems auf der *Abbildung 3.2.b)* bestimmen, die von der Wurzel der Spannung und der Länge abhängig ist. Zum Schluss betrachtet er die Saite mit mehreren Gewichten (*Abbildung 3.2.c)*).

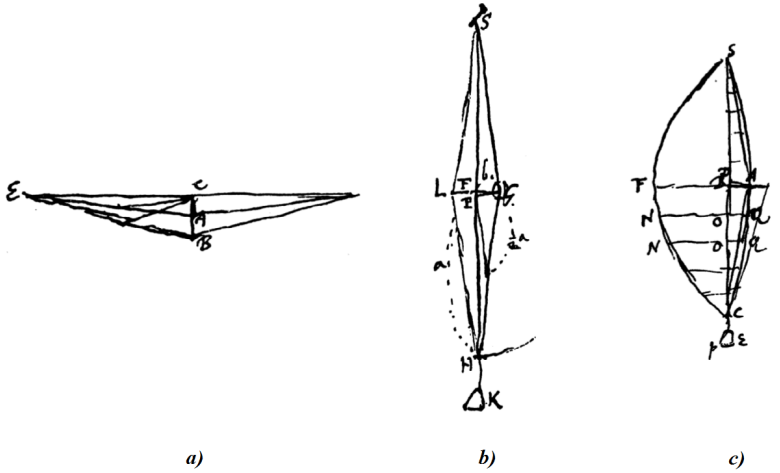



Abbildung 3.2: *Huygens' Modell einer schwingenden Saite.*[11]

Hierbei hatte er vermutet, dass der Verlauf der Geschwindigkeiten nicht möglich zu beobachten ist, außer wenn alle Massen (Gewichte) harmonisch schwingen, mit gleicher Periode und Phase.[12]

Die Entwicklung einer *allgemeinen Elastizitätstheorie* war ein langjähriger Prozess, der von vielen Akteuren durchgeführt wurde. Diese Elastizitätstheorie sollte elastische Eigenschaften von verschiedenen Körpern erklären. Aus den Aufzeichnungen der ersten Jahre des Bestehens der Royal Society kann gelesen werden, dass Experimente mit der Luft und dem Quecksilber ein häufiges Thema waren, das auch in Verbindung mit der Elastizität gebracht wurde.[13] Es ist deshalb auch nicht besonders ungewöhnlich, dass Hooke, als Kurator der Royal Society, auch in diesen Experimenten involviert war.

Unabhängig davon, dass er Robert Boyles Assistent war, machte Hooke seine eigenen

[11] Huygens C., *Œuvres complètes. Tome XVIII. L'Horologe à pendule ou à balancier de 1666 à 1695 Anecdota*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1934, S. 489 – 494

[12] vgl. Euler L., *The Rational Mechanics of flexible or elastic bodies 1638 – 1788. Introduction to Leonhardi Euleri Pera Omnia. Vol. X et XI seriei secundae*, Truesdell C., (Hrsg.), Springer Science & Business Media, 1960, S. 48 – 49

[13] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I – II*, 1756 – 1657, durchgehend

Experimente mit der Luft und dem Quecksilber. In *An Attempt for the Explication of the Phænomena* (1661) hatte Hooke bereits diverse Beobachtungen zu dem Verhalten verschiedener Fluide gemacht.

Diese Versuche und Ergebnisse oder Erkenntnisse, welche Hooke dabei erlangt hatte, sollten eine wichtige Rolle in seinem Konzept der Gravitation spielen. Er hatte das Verhalten von Wasser in verschiedenen Glasrohren bei verschiedenen Drücken beschrieben - die laut ihm schmal sein sollten, um den Effekt besser erkennen zu können. Laut Hooke brachten diese Beobachtungen ihn zur Erkenntnis, dass das Steigen des Wassers in diesen Rohren eine Wirkung der Verringerung des Luftdrucks ist. Entsprechend war diese Verringerung eine Folge der *Inkongruenz* von Luft und Glas. Davon war bereits im Kapitel 1 die Rede (ab Seite 24).

Um seine Aussage bestätigen zu können, hatte Hooke untersucht, wie Fluide, wie z. B. Wasser, Öl, Quecksilber usw. aufeinander wirken. Diese konnten sich laut Hooke vermischen, ineinander sinken oder auf der Oberfläche des anderen schwimmen. Er erklärte dieses Phänomen mit der *Vibrative motion* der Bestandteilchen. Die Teilchen, die im *Einklang* schwingen, waren *kongruent* und die, die mit verschiedener Frequenz schwingen, *inkongruent*.[14] Diese Interpretation wird weiterhin in Hookes Arbeiten immer wieder auftreten. Auf diese Art und Weise sah Hooke eine Gleichheit (oder Harmonie) der Festkörper (aber auch Fluide) und ihrer Wirkung auf andere Körper. Später behauptete Hooke, dass er bei dieser Veröffentlichung noch nicht Willens war, diese Theorie zu verschriftlichen und behauptete darüber hinaus, dass eine Andeutung zu seinem Elastizitätsgesetz auf der Seite 31 niedergeschrieben sei (oder das, was sich darauf bezieht). Das Einzige, was jedoch diesbezüglich in *An Attempt for Explication of the Phænomena* gefunden werden kann, ist

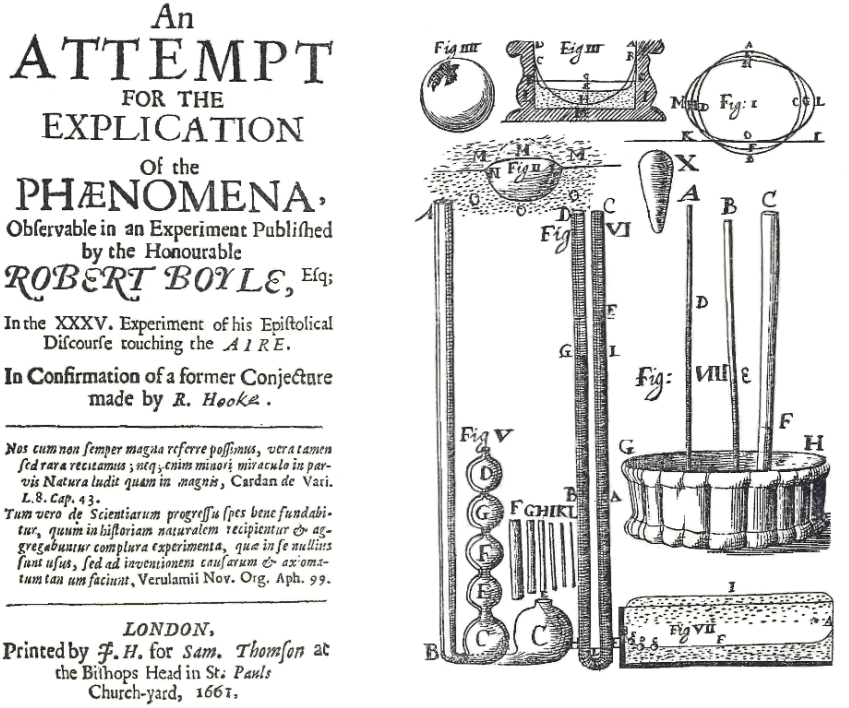
> [...] *whether the motion of all kinds of Springs might not be produc'd the principle whereby the included heterogeneous fluid seems to be moved; or to that whereby fluid seems to be moved; or to that whereby two solids as Marbles or the like, are thrust and kept together by the Ambient fluid.*[15]

Es ist daher offensichtlich, dass auch Hooke die Untersuchungen von Luft (und anderen *Fluids*) als wichtig in der Entwicklung der Elastizitätstheorie angesehen hatte.

### 3.1.1 Hookes Versuche mit der Luft

Während der sechziger Jahre des 17. Jahrhunderts führte Hooke eine Reihe von Versuchen durch, die von Torricellis Versuchen und Boyles Arbeit inspiriert waren. Diese Versuche, die an Boyles Versuche mit dem U-Rohr erinnern, hatte Hooke mit verschiedenen Glasrohren durchgeführt. Ein Versuch, den er am 10. Dezember 1662 durchgeführt hatte, zeigte das

[14] vgl. Hooke R., *Micrographia*, 1665, S. 15 – 16
[15] Hooke R., *An Attempt for the Explication of the Phænomena*, 1661, S. 31



An
ATTEMPT
FOR THE
EXPLICATION
Of the
PHÆNOMENA,
Obſervable in an Experiment Publiſhed
by the Honourable
ROBERT BOYLE, Eſq;
In the XXXV. Experiment of his Epiſtolical
Diſcourſe touching the AIRE.
In Confirmation of a former Conjecture
made by R. Hooke.

Nos tum non ſemper magna reperre poſſimus, vera tamen ſed rara reperiamus; neq; enim minori miraculo in parvis Natura ludit quam in magnis, Cardan de Vari. L. 8. Cap. 43.
Tum vero de Scientiarum progreſſu ſpes bene fundabitur, quum in hiſtoriam naturalem recipientur & aggregabuntur complura experimenta, quæ in ſe nullius ſunt uſus, ſed ad inventionem cauſarum & axiomatum tanquam facinunt, Verulamii Nov. Org. Aph. 99.

LONDON,
Printed by F. H. for Sam. Thomſon at
the Bithops Head in St. Pauls
Church-yard, 1661.

Abbildung 3.3: *Die Veröffentlichung aus dem Jahr 1661, in der Hooke diverse Versuche zur Kapillarwirkung beschreibt.*[16]

Verhältnis von *Power* und Ausdehnung der Luft. Dabei lässt sich ein Zusammenhang mit dem Elastizitätsgesetz erkennen:

> *I took a small and indifferently even-drawn tube of glass, about six foot long and less than $\frac{1}{4}$ of an inch in the hollow, that was open at both ends; and having by a small lift of paper, that was pasted upon it, divided it into inches, halfs and quarters, I put it into a bigger glass-tube, that was hermetically sealed at one end, and big enough to contain the former. Then I fastened them perpendicularly against the side of the wall, and filled them together to the top with*

[16]Hooke R., *An Attempt for Explication of the Phænomena*, 1661, Titelseite und die darauffolgende Seite

*quicksilver; then letting he small one rise, till it ascended somewhat more than four inches above the surface of the mercury in the greater, I carefully sealed up the upper end of it with hard sealing-wax, and letting it cool for about half an hour, I lifted up the smaller tube, till the air was expanded so as to fill six inches, and observed the subjacent pillar of mercury* $10\frac{1}{8}$ *inches. Then I lifted it higher, till the air filled full eight inches, and found the* ☿$15\frac{1}{4}$ *inches. And so proceeding, I collected this table; which by reason the tube (as I afterwards found) was somewhat bigger toward the middle than near the upper end, does not exactly agree with the hypothesis, which supposes the degrees of rarefaction and force to be in reciprocal proportion; though in other experiments of the same kind, that I have formerly tried with a much more exact tube, I have found it to come very near.*[17]

Tabelle 3.1: *Die Werte die Hooke am 10. Dezember 1662 während seiner Durchführung aufgezeichnet hat.*

| The Air's Expansion | The ☿ Height |
|---|---|
| 4 | 00 |
| 6 | $10\frac{1}{8}$ |
| 8 | $15\frac{1}{4}$ |
| 12 | $20\frac{1}{4}$ |
| 16 | $23\frac{1}{8}$ |
| 20 | $24\frac{5}{8}$ |
| 24 | $25\frac{5}{8}$ |
| 32 | $26\frac{5}{8}$ |

Dieser Versuch wurde bei einem Treffen der Royal Society durchgeführt.[18] Er benutzte ein uniformes, langes Rohr, das an beiden Enden offen war. Um die Veränderung der Quecksilberhöhe beobachten und messen zu können, entwarf er eine Skala, die ihm das erleichtern sollte. Ein kürzeres Rohr, das am oberen Ende offen war, war so schmal, dass es in das lange Rohr reinpassen konnte. Da das kleinere Rohr am oberen Ende offen war, konnte das System mit Quecksilber so gefüllt werden, dass es auch in das lange Rohr durchfloss. Er ließ das kürzere Rohr so weit aufsteigen, bis es sich bei etwa mehr als 4 *Inch* über der Oberfläche des Quecksilbers im langen Rohr befand. Hooke dichtete danach

[17] Dieser Text ist in dem Archiv der Royal Society zu finden unter der Nummer RB/1/20/19 *An account of the Rarefaraction of the Aire by Mr. Hooke 10 December 1662*. Das Symbol ☿ steht für Quecksilber. Hooke benutzte häufig Symbole in seinen Veröffentlichungen und Notizen. In seinem Tagebuch kann auch eine Liste mit der Bedeutung der Symbole gefunden werden. Eine Liste dieser Symbole kann in seinem Tagebuch gefunden werden.

[18] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I*, 1756, S. 141

das obere Ende des kürzeren Rohres mit Siegelwachs ab. Er hob das kürzere Rohr so weit hoch, bis sich die Luft im Inneren auf 6 *Inch* ausdehnte, dabei beobachtete er, dass das Quecksilber nun auf $10\frac{1}{8}$ *Inch* war. Beim weiteren Heben, bis die Luft auf ganze 8 *Inch* ausgedehnt war, sah er, dass sich das Quecksilber auf $15\frac{1}{4}$ befand. Die Messungen setzte er fort. Dabei ist die *Tabelle 3.1* entstanden.

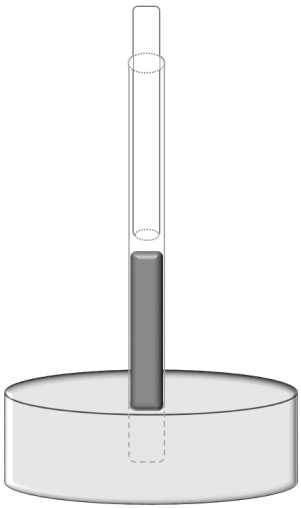


Abbildung 3.4: *Zu den Messungen aus 1662 gab es keine Abbildung zum benutzten Rohr. Das ist lediglich eine Darstellung der gegebenen Beschreibung.*[19]

Hooke stieß auf einen Fehler bei den Messungen. Diesen Fehler schrieb er dem verwendeten Rohr zu. Durch den entstandenen Fehler gäbe es auch keine genaue Übereinstimmung mit der Hypothese[20], welche das gegenseitige Verhältnis vom Grad der Verdünnung und der *force* voraussetzte. Jedoch betonte Hooke in diesem Zusammenhang, dass er mehrere Versuche der gleichen Art, mit präziseren Rohren durchgeführt hätte, die diese Hypothese unterstützen oder ihr nah kamen.[21] Hierbei bezieht sich Hooke vermutlich auf Towneleys Hypothese, wobei Hooke in dieser Beschreibung explizit den Begriff *force* benutzte und nicht den Druck.

[19] Eigene Darstellung des von Hooke beschriebenen Systems.

[20] Diese Hypothese bezieht sich auf die oben genannte Beschreibung des Versuches in der Hooke schrieb: [...] *"which supposes the degrees of rarefaction and force to be in reciprocal proportion"*

[21] Da dieser Versuch sehr dem ähnelt, der in der *Micrographia* beschrieben ist, kann ein Bezug auf diese Versuche genommen werden.

Wenn auf die Erkenntnisse des vorherigen Kapitels zurückgegriffen wird, kann hiermit zusätzlich argumentiert werden, dass die Versuche die Hooke in der *Micrographia* beschrieben hatte, tatsächlich eine Form des *Elastizitätsgesetzes* darstellen. Mit der Verwendung des Begriffes *force* taucht wieder dieses konzeptuelle Problem auf. Aus heutiger Sicht ist klar, wieso Hooke eine direkte Verbindung zwischen dem Druck und der *force* sah. Da jedoch diese Begriffe nicht klar definiert waren, ist es verständlich, dass *pressure, force, strength, power* usw. aus der damaligen Sicht des Betrachters etwas darstellen mussten, dass irgendwie direkt zusammenhängt. Hooke hatte in *Lampas* explizit geschrieben:

> [...]*they have both the same weight or gravity downwards, and do communicate continually the same force, pressure, indeavour, impetus, strength, gravity, power, motion, or whatever else you will call it*[...][22]

Diese Begriffe sind offensichtlich im Verständnis von Hooke gleich (oder zumindest miteinander verknüpft). Das kann in vielen seinen Veröffentlichungen wiedergefunden werden. Das macht Hookes Veröffentlichung weniger verständlich. Es kann nicht immer leicht entschlüsselt werden, worauf sich Hooke (aus heutigem Verständnis der Mechanik) in der Beschreibung genau bezogen hatte. Das wird sich durch die kommenden Kapitel bemerkbar machen. Durch diese Schwierigkeit wird auch deutlich, was für einen großen Schritt Newton mit der *Principia* gemacht hatte. Nicht nur wegen der Formulierung der Kraft als physikalische Größe, sondern auch wegen der klaren und konsequenten Verwendung des Begriffes *Kraft*.

Hooke schrieb weiter in der Beschreibung des Versuches, dass diese durchgeführten Beobachtung die Hypothese unterstützen würden, gäbe es nicht, als Erstes, einen großen Temperaturunterschied in den oberen und unteren Regionen der Luft, was auch einen Dichteunterschied miteinbezieht; und zweitens, einen großen Unterschied in der Konstitution der Luft durch Dämpfe, wie sie durch Vermischen mit Teilchen der Luft, die Schwerkraft verstärken könnten, so ändern sie den *Elater oder die Ausdehnungskraft der Luft*. Würde es diese Schwierigkeiten nicht geben, wäre es eine weitere Hilfestellung, um genauere Messungen auf größeren Höhen leisten zu können. Hierbei bezog sich Hooke auf die Versuche von Torricelli, die auf einem Gipfel eines Bergs durchgeführt wurden.

Aus heutiger Perspektive kann vermutet werden, dass Hooke hier über verschiedene Druckzonen der Atmosphäre geschrieben hat. Es kann keine allgemeine Betrachtung des *Elaters* bestehen, wenn verschiedene Bedingungen in der Atmosphäre herrschen. Da Hooke darin ein Problem gesehen hatte, kann vermutet werden, dass er sehr wohl eine Verallgemeinerung suchte, die die Wirkung von *Elater* für alle Bedingungen und Körperformen beschreiben könnte. Durch die verschiedenen Bedingungen, die in der Luft herrschten, verhält sich der *Elater* nicht überall gleich, also entsprachen die Messergebnisse nicht seiner Vermutung.

[22]Hooke R., *Lampas*, 1677, S. 30

Das war der erste Versuch von Hooke, in dem er das Wort *Elater* in Verbindung mit der *force* gebracht hatte. Hierbei ist vermutlich die Elastizitätskraft der Luft gemeint, da schon aus Boyles Versuchen bekannt war, dass die Luft eine Eigenschaft besaß, die *Elater* hieß. In dem Kontext wurde eine Eigenschaft dargestellt, die es der Luft ermöglicht, trotz der äußeren Wirkungen wieder in ihre erstmalige Position zurückzukehren.

## 3.2 Die Feder

Hooke hat in seiner Veröffentlichung *Lectures de Potentia Restitutiva; or, of Spring* (1678) verschiedene Formen von *Federn* beschrieben und sein *Gesetz der Natur* formuliert. Dieses Gesetz trägt heute seinen Namen – das Hookesche Gesetz. Die Formulierung gab Hooke wie folgt:

> [...] *the Rule or Law of Nature in every springing body is, that the force or power thereof to restore itself to its natural position is always proportionate to the Distance or space it is removed therefrom, whether it be by rarefaction, or separation of its parts the one from the other, or by a Condensation, or crowding of those parts nearer together.*[23]

Zusätzlich gab Hooke eine ausführliche Erklärung und Anleitungen zu seinen Zeichnungen (*Abbildung 3.5*). Auf der Darstellung befinden sich verschiedene Federn aus Eisen oder Messing oder Stahl: eine Spiralfeder (*Fig. 1*), eine Uhrfeder (*Fig. 2*) und ein langer Draht (*Fig. 3*).

Auf der Abbildung sind weiterhin *Gewichte* dargestellt, die mit *F, G, H, I, K, L, M* und *N* gekennzeichnet sind. Mit diesen Gewichten ließ sich die Veränderung der Länge von der Feder beobachten. Ein ähnliches Verfahren konnte auch bei einem Draht *Fig. 3* beobachtet werden. Dieser Draht war zehn Fuß lang, an einem Nagel aufgehängt, jedoch brauchte es bei diesem Verfahren, im Gegensatz zu der Spiral- und Uhrfeder, größere Gewichte, um eine Veränderung beobachten zu können. Als Ergebnis dieser Beobachtung formulierte Hooke:

> *The same will be found, if trial be made, with a piece of dry wood that will bend and return, if one end thereof be fixt in a horizontal posture, and to the other end be hanged weights to make it bend downwards. The same manner of trying the same thing upon a body of Air, whether it be for the rarefaction or for the compression thereof I did about fourteen years since publish in my Micrographia, and therefore I shall not need to add any further description thereof.*[24]

[23] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 4
[24] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 3

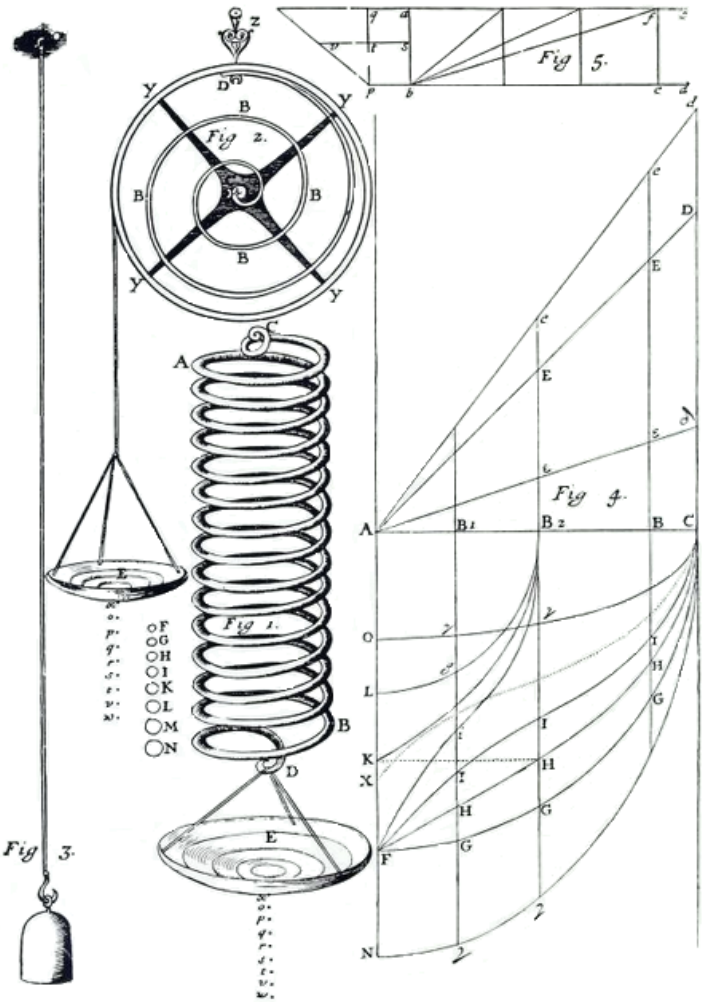



Abbildung 3.5: *Hookes Darstellung von verschiedenen Formen von Federn die zur seiner Beschreibung in Lectures Potentia de Restitutiva, or, of Spring gehört*[25]

[25]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678.
Hier ist die Seite als *Page 1* angegeben. Die Abbildung befindet sich vor dem Text.

Die experimentelle Arbeit hinter dem Gesetz war, laut Hooke, sehr einfach. Es bestand aus zwei einfachen Verfahren. Ein Verfahren war, einfach einen Draht zu nehmen, diesen um einen Zylinder wickeln, um dadurch eine Spirale zu bekommen, danach wurde es an einem Ende fixiert und am anderen wurde ein Haken angebracht, woran verschiedene Gewichte aufgehängt werden konnten.

Die Ausdehnungen, zu denen die Feder heruntergezogen wurde, wurden jedes Mal notiert. Er bemerkte, dass da eine direkte Proportionalität zwischen dem aufgehängten Gewicht und der Verlängerung der Feder bestand. *Und dies sei das Gesetz der Natur, das für alle möglichen Widerstände oder gefederte Bewegungen standhalten konnte.* Das andere Verfahren war, einen zwanzig bis zu vierzig Fuß langen Draht aufzuhängen (an einem Ende fixiert) und am anderen Ende Gewichte auf den Draht wirken zu lassen. Die Gewichte sollten relativ schwer sein, um eine Veränderung bemerken zu können.

Hooke sah vielfältige Anwendungen für sein Prinzip. Seine vorherige Arbeit zur Kompression der Luft war demnach nur ein Spezialfall von seinem bereits formulierten Prinzip. Für Hooke galt bei jeder Wirkung, die einen federnden Körper involviert, dass jeder Grad von mechanischem Druck (Drücken oder Ziehen) eine Veränderung bewirken würde. Diese resultierende Wirkung (Veränderung) würde jeweils vom Material des gefederten Körpers abhängen.

Die Unterscheidung zwischen Elastizität und Plastizität fand bei Hooke nicht statt. Soweit es ihn anging, würden alle Körper, nach seinem Gesetz, auf Druck durch plastische Veränderungen reagieren, bis ein gewisser Bruchpunkt erreicht wurde. In seinem Gesetz ist jedoch der Unterschied zwischen Elastizität und Plastizität nicht als Grenze erwähnt.[26]

## 3.3 Die *Elastizität* von Körpern

*Lectures de Potentia* könnte auch als die Verallgemeinerung der *Elastizitätstheorie* von Hooke interpretiert werden. Nachdem er das Gesetz formuliert hatte und entsprechende Beschreibungen zu seinen Beobachtungen der Federbewegung gegeben hatte, wurde auch eine ausführliche Interpretation von der Struktur von Körpern und Bewegung gegeben.

Laut Hooke besteht ein Festkörper aus Teilchen, die eng beieinanderliegen - die Teilchen *berühren sich gegenseitig.*

> *The Particles of all solid bodies do immediately touch each others; that is, the Vibrative motions of the bodies do every one touch each other at every Vibration.*[27]

Damit meinte Hooke womöglich, dass Festkörper eine große Dichte haben. Die Anzahl der Teilchen in einem Festkörper, also das, was heute als *Massenkonzentration* bekannt

[26] vgl. Williams E., *Hooke's Law and the Concept of the Elastic Limit*, Annals of Science, Vol. 12, 1956, S. 74 – 83

[27] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 11

ist, in einem bestimmten Volumen ist hoch. Diese Vermutung ließ ihn schließen, dass sich durch die *Vibrative Motion* in Körpern, die Teilchen *gegenseitig berühren*. Da zu dieser Zeit ein konzeptuelles Problem herrschte, wie eine Bewegung beschrieben werden konnte[28], kann nur schwer interpretiert werden, was Hooke konkret unter dieser *Vibrative Motion* verstanden hatte. Eine Möglichkeit, es zu interpretieren, ist, dass ein Körper zum Schwingen angeregt werden kann, indem diese Bewegung und Energie von Teilchen zu Teilchen übertragen wird.

Um seine Beschreibung zu erklären, stellte Hooke eine Abbildung (*Abbildung 3.6*) dar, die drei Körper $ABC$ repräsentieren sollte. Seiner Ansicht nach hat jeder Körper seine *Vibrative Motion* von jeder Seite. In $D$ und $E$ befinden sich die *Vibrative Motion* von $A$, in $E$ und $F$ von $B$ und in $F$ und $G$ die vom Körper $C$. Seine Beschreibung setzte er weiterhin fort, indem er vorgab, dass sich die jeweiligen *Vibrative Motion* der Körper $A$ und $B$ im Punkt $E$ treffen würden und in dem Punkt auch wechselwirken würden. Zum Teil wirkt diese *Vibrative Motion* als Eigenschaft der Körper $ABC$, zum anderen müsste es eine Art von *Power* darstellen, um diese Wechselwirkungen in den Punkten $E$ und $F$ auch erklären zu können. Diese Wechselwirkung hatte Hooke folgendermaßen beschrieben:

> *That is, B communicates its motion to A at E, and A at the same time and place communicates its motion to B, which returning to F meets there with C, and communicates its received motion to C which at the same instant and place communicates its own motion to B, which returns it back to E: So that the velocity of these bodies is always the same, and each body impresseth on the contiguous bodies such a determinate number of pulses within a certain space of time.*[29]

Aus diesem Absatz wird deutlich, dass es sich um eine Quantität handeln muss, die sich mit der Geschwindigkeit beschreiben lässt. Es handelt sich also um eine Art Bewegungsform. Jedoch muss in dem Sinne dann, ohne zusätzliche Angaben, vermutet werden, dass die Körper sich bis zu den jeweiligen Punkten bewegen. Das erscheint aber eher widersprüchlich, da sich die Körper auch in verschiedenen Richtungen und in drei Dimensionen bewegen können. Weiterhin schrieb Hooke:

> *Suppose for instance, in every second of time B communicates to A and to C one million of pulses, and hath received as many from each of them, by which means each of them doth perserve its own space of Vibration, according to the power of its own space of vibration, according to the power of it vibration, that neither of the contguous bodies can enter into it.*[30]

[28] Es war nicht klar, ob eine Bewegung quantitativ mit $mv$ oder $mv^2$ beschrieben werden kann.
[29] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 11
[30] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 11

Abbildung 3.6: *Hookes Darstellung von Festkörpern und ihrer Wechselwirkungen.*[31]

Im Fall des Empfangens und Übertragen von *Power* ist es schwer zu erkennen, worauf Hooke eigentlich hinauswollte. Sollte ein Körper einen Schwingungsbereich besitzen, der durch seine Eigenschaften definiert wird, könnte behauptet werden, dass diesem eine mögliche Form der potentiellen Energie zugeschrieben werden kann. Diese Vermutung stimmt aber nicht mit der Tatsache überein, dass diese *Vibrative Motion* in den Enden dieser Felder (wenn es sie gibt) wechselwirkt. Hooke hatte weiterhin behauptet, dass die externen Teilchen, $A$ und $C$, durch die Bewegung eines heterogenen Fluids aus der Umgebung beeinflusst werden könnten, weswegen verschiedene Amplituden der Wirkung im Körper auftreten würden. Hier stellt sich die Frage, wieso in dem Teil des Textes Hooke $A$ und $C$ nun als Teilchen beschreibt und nicht als ganzen Körper, wie zu Beginn der Beschreibung. Um für seine Behauptungen argumentieren zu können, erklärte er, dass auch Körper, die sich nicht in der Umgebung von anderen Körpern befinden, von irgendeinem Fluid beeinflusst werden müsste, sodass diese *Vibrative Motion* immer anwesend sein muss. Hooke hatte dabei erkannt:

> [...] *yet the body and the motion of the one are equivalent to the body and motion of the other, so that whatever the body be less, the motion is quicker, and where the body is bigger, the motion is less.*[32]

Mit dieser Aussage, die sich als eine Art des konzeptuellen Begriffes Impuls verstehen lässt, vollendete er vorerst seine Beschreibung von der Elastizität von Festkörpern. Wenn das alles nun in Betracht gezogen wird, hat Hooke womöglich einen Festkörper als einen Körper wahrgenommen, der eine größere Dichte hat, dessen Bestandteilchen nur, eventuell, genug *Power* haben, um eine Bewegung übertragen zu können, und deshalb in der eigenen Bewegung, konkret Schwingung, begrenzt sind. Das bedeutet, dass ein Festkörper nur begrenzt ausgelenkt oder deformiert werden kann, damit der Körper zum Schwingen

[31] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 11
[32] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 11

gebracht wird. Das würde auch zusätzlich den kleineren Bewegungsraum seines Beispiels erklären.

Um eine gewisse Analogie zu schaffen und, womöglich, damit ein besseres Verständnis zu bewirken, hatte Hooke eine ähnliche Interpretation zu einer Körperform beschrieben, die er *Fluid* nannte. Der Unterschied war, dass sich bei diesem *Fluid* die Teilchen nicht *berühren*. Das bedeutet vermutlich eine geringere *Massenkonzentration*. Jedoch soll genau eine solche Konsistenz eine leichtere Wechselwirkung des heterogenen Fluids mit der Umgebung ermöglichen, was wiederum die Übertragung von der *Vibration Motion* von Teilchen zu Teilchen verursachte. Das, was auch hier unklar bleibt, ist die Bedeutung dieses heterogenen Fluids. Die schon vorhandenen Eigenschaften der Festkörper erleichtern es, den von Hooke gemachten Unterschied zwischen Festkörpern und *Fluids* zu erkennen.

> *All solid Bodies retain their solidity till by other extraordinary motions their natural or proper motions become intermixed with other differing motions and so they become a bulk of compounded motions, which weaken each others Vibrative motions. So that though the similar parts do participate of each others motions, whereby they indeavour to joyn or keep together, yet do they also participate of a Heterogeneous motion which endeavours to separate or keep them asunder. And according to the prevalency of the one or the other is the body more or less fluid or solid.*[33]

Mit diesem Zitat beschrieb Hooke den Übergang eines Festkörpers in einen Mischzustand aus *solid* und *fluid*, etwas, was wir heute mit modernen Worten als einen beginnenden Phasenübergang beschreiben würden. In seiner Beschreibung einer Verformung mischen sich die *Vibrative motions* des festen und des fluiden Anteils. Hierbei bewirkt der Austausch der *Vibrative motions* innerhalb der *fluids* und der *solids* eine Annäherung der Teilchen, während die unterschiedlichen *motions* von *fluid* und *solid* der Grund für die Trennung der verschiedenen Phasen bewirken sollte. Ab welchem Ungleichgewicht zwischen *solid* und *fluid* ein Übergang von elastischer zur plastischen Verformung beginnt, erklärt Hooke nicht ausdrücklich. Ohne diesen Mischzustand schien ihm aber eine Verformung nicht möglich zu sein.

> *The parts of all springy bodies would recede and fly from each other were they not kept together by the heterogeneous compression motions of the ambient whether fluid or solid.*[34]

Also kann vermutet werden, dass dieses heterogene Fluid die Bestandteilchen, bei elastischer Bewegung, zusammenhält. Alle diese Eigenschaften dienten offensichtlich Hooke zur Erklärung – was eigentlich einen Körper elastisch macht, unabhängig davon, ob es sich bei

[33] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 12
[34] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 13

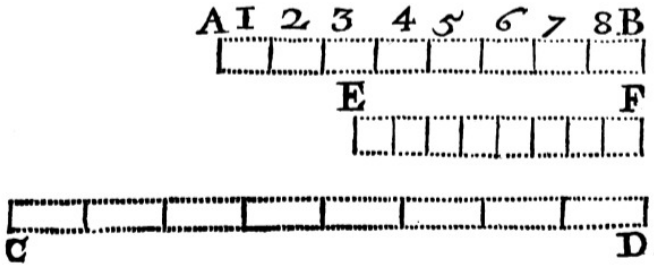



Abbildung 3.7: *Die Ausdehnung und Kompression eines Festkörpers.*[35]

dem Körper um einen Festkörper oder ein *Fluid* handelt. Die Tatsache, dass er auch in diesem Zusammenhang die Elastizität der *Fluids* erwähnte, weist darauf hin, dass Hooke sein *Gesetz der Natur* so allgemein wie möglich formulieren wollte. Mit diesen Beschreibungen wollte Hooke womöglich darstellen, was im Körper passiert, wenn von außen die Eigenschaft *Elater*, bzw. die Elastizität, wahrgenommen wird. Aus dem Hookeschen Gesetz für Festkörper ist bekannt, dass die Elastizitätskraft (Dehnung oder Spannung) von dem Elastizitätsmodul abhängt. Dieses Modul ist der mechanische Widerstand des Körpers gegen eine Verformung. Im Grunde ist es etwas, was von dem Material abhängig ist, aus dem der Körper besteht. Diese *Verteilung* der Teilchen (vermutlich kann das in Verbindung mit der Homogenität des Körpers stehen) könnte sehr wohl mit der Eigenschaft des Körpers zu tun haben, sich der Wirkung von außen zu widersetzen. In seiner Beschreibung folgt eine ähnliche Darstellung der Ausdehnung und Kompression von einem Festkörper. Hooke hatte damit einen Körper $AB$ beschrieben, der aus acht Teilchen bestand, die er jeweils mit den Zahlen 1 bis 8 gekennzeichnet hatte. Diese Teilchen verrichteten, laut Hooke, viele kleine einzelne Schwingungen, die begrenzt wurden durch die Wirkung der Umgebung an den äußersten Teilchen 1 und 8. Daraufhin hatte er zwei Extremfälle betrachtet: erstens, was mit den Teilchen passierte, wenn der Körper ausgedehnt wurde und zweitens, was passierte, wenn der Körper komprimiert wurde. Laut Hookes Beschreibung befanden sich die äußersten Teilchen, 1 und 8, bei der Ausdehnung jeweils in den Positionen $C$ und $D$. Dementsprechend waren die Teilchen weiter auseinander gelagert, weswegen die Schwingungen verringert wurden. Diesbezüglich hatte er geschrieben:

> *For supposing this second Dimension of Length be to the first as 3 to 2, the length of the Vibrations, and consequently of occursions, be reciprocally diminished. For whereas I supposed* 1 000 000 *in a second of the former, here can be*

[35]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 13

> *but* 666 666 *in this, and consequently the Spring inward must be in proportion to the Extension beyond its natural length.*[36]

Im zweiten Fall, also beim Komprimieren, passierte genau das Gegenteil.

> [...] *the vibrations shall be proportionably diminished, and the number of them, and consequently of the occursions be reciprocally augmented, and instead of* 1 000 000 *there shall be* 1 500 000.[37]

Um seine Aussage zu verallgemeinern, hatte er auch beschrieben, was passieren würde, wenn ein elastischer Festkörper verbogen wird, wofür er auch eine entsprechende Abbildung bereitstellte (*Abbildung 3.8*). Beim Verbiegen von einem Festkörper $GHIK$, bekommt dieser eine neue Form, bei der die Seite $LM$ ausgedehnt und die Seite $NO$ zusammengedrückt wird. Das Ausdehnen und das Zusammendrücken stehen dabei proportional zu der Verbiegung (Verformung), also gilt hier weiter die Regel des Wiederherstellens. Damit wird eigentlich klar, dass sich das Hookesche Gesetz, in der Form, in der es Hooke selbst formuliert hatte, auch auf das Elastizitätsgesetz der Verformung bezieht.

Für die Beschreibung der Elastizität der *Fluids* nahm er die Luft als Beispiel, da sie sich gleich verhält wie alle anderen *Fluids*. Hier hat Hooke wahrscheinlich sein erworbenes Wissen und seine Erkenntnisse aus seinen Untersuchungen zu der Eigenschaft der Luft ausgenutzt. Es ist also verständlich, wieso er sich gerade für die Luft entschieden hatte, um diese Beschreibung zu *Fluids* zu vervollständigen. Interessanterweise hat er in dem Kontext nichts weiter als das Boylesche Gesetz beschrieben:

> *If therefore the quantity of this body be inclosed by a solid body, and that be so contrived as to compress it into less room, the motion thereof (supposing the heat the same) will continue the same, and consequently the Vibrations and Occurisions will be increased in reciprocal proportion, that is, if it be condensed into half the space the vibrations and occurisons will be double in number: If into a quarter the vibrations and occurisions will be quadruple; &c*[38]

Damit gab er zusätzlich auch vor, alle Einzelheiten gegeben zu haben, die die Elastizität (*Spring*) von jeder Körperform erklärt. Weiterhin sollte diese Erklärung zeigen, dass die *Power* proportional zur Verformung des Körpers ist. Jedes Teil von diesem Körper hat demnach eine partielle *Power*, was bedeutet, dass die Summe dieser partiellen *Power* proportional zu dem Quadrat der Auslenkung (*space of flexure*) ist. Das ist ein weiteres Argument dafür, dass es kein klares Bild von dem gab, was *Power* physikalisch eigentlich dargestellt hat. Zusätzlich kann aus diesem Zitat entnommen werden, dass Hooke eine Idee davon hatte, dass die Bedingung einer konstanten Temperatur gegeben sein muss, damit die Proportionalität gewährleistet werden konnte.

[36] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 14
[37] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 14
[38] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 16

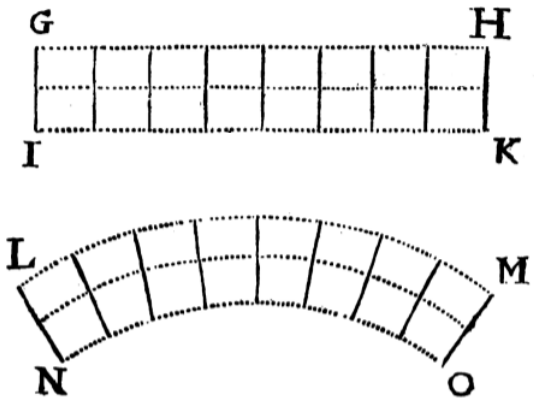



Abbildung 3.8: *Die Verformung eines Festkörpers.*[39]

> *The Spring therefore in returning from any degree of flexure, to which it hath been bent by any power receiveth at every point of the space returned an impulse equal to the power of the Spring in that point of Tension, and in returning the whole it receiveth the whole aggregate of all the forces belonging to the greatest degree of that Tension from which it returned; so a Spring bent two spaces in its return receiveth four degrees of impulse*[...][40]

Wenn also eine Feder (oder ein Körper, der ähnlich einer Feder ist) in ihre Anfangsposition zurückkehrt, erhält sie bei jedem Grad der Ausdehnung (Biegung), zu dem sie durch die Wirkung irgendeiner *Power* gebogen wurde, in jedem Punkt der Bewegungsstrecke, einen *Impulse* zurück. Dieser *Impulse* entspricht der *Power* in diesem besagten Punkt der Spannung. Beim Wiedereintreffen der Feder in die Anfangsposition erhält sie die gesamte Summe aller *Power*, die sie zu einer (vermutlich maximalen) Ausgangsposition gebracht haben. Bei einer bspw. *zweifachen* Ausdehnung der Feder (eventuell bedeutet das zur doppelten Länge), erhält sie bei der Rückkehr den vierfachen Grad des *Impulse*. Hier lässt sich etwas, was heute als Energieerhaltung gelten würde, erkennen. Wenn jedem *Grad der Ausdehnung* ein *Impulse* zugeteilt ist, der wiederum der *Power* entspricht, entspricht auch jeder *Grad der Ausdehnung* der *Power*. Ist aber, laut Hooke, eine zweifache Ausdehnung vorhanden, so enthält es *four degrees of impulse*, dementsprechend auch *four degrees of power*. Das entspricht der potentiellen Energie bei einer Federbewegung. Offensichtlich kann hier auch ein konzeptuelles Problem erkannt werden. Hookes Begriff *Impulse* stellt

[39] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 15
[40] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 17

offensichtlich eine im Körper gespeicherte Eigenschaft dar, während *Power* die resultierende Wirkung des Körpers ist. Hooke hatte zusätzlich behauptet, dass in den *Endpositionen* die Feder *aggregate of all the forces belonging to the greatest degree* besitzt. Das könnte heute als die maximale Energie bezeichnet werden, die ja der Summe von allen *forces*, die auf die Feder in den einzelnen Positionen der Bewegung wirken, entspricht. Also nichts anderes als:

$$power_{max} \sim \sum_i (force)_i \implies power \sim \int (force)(in\ space) \tag{3.1}$$

Den Protokollen der Royal Society zufolge, kann entnommen werden, dass immer wieder eine Fragestellung auftauchte: Wie kann eine Bewegungsgleichung formuliert werden? Dementsprechend lässt dieses vermuten, dass sich Hooke offensichtlich bemühte die richtige *Bewegungsgleichung* zu formulieren und zu erklären. Zu diesem Zeitpunkt war nicht ganz klar, ob eine Bewegung mit $v$ oder $v^2$ beschrieben werden konnte. Vermutlich ist das der Grund, wieso sich in vielen seiner Veröffentlichungen *power, force, strength* usw. als etwas lesen lässt, das entweder direkt proportional zur *velocity* oder zur *duplicate velocity* ist.

Auch wenn Hookes Erklärungen der einzelnen Quantitäten der Bewegung unklar oder schwer verständlich erscheinen, ist es dennoch teilweise schon nachvollziehbar, wie sie zustande kamen. Bevor Newton im 17. Jahrhundert seine *Prinicipia* veröffentlicht hatte, gab es keine klaren Formulierungen von Gesetzen, die der Mechanik, so wie wir sie heute kennen, ein Fundament verliehen. Es gab also keine klare Formulierung von Kraft, Energie, Arbeit, Impuls und keine Erhaltungsgesetze. Wie formuliert können diese Größen rein aus Beobachtungen formuliert werden? Dem ging auch Hooke wahrscheinlich nach. Der Grund, wieso das so ungewohnt erscheint, ist der, dass er nicht die Begriffe so verwendet hatte, wie sie heute bekannt sind. Dazu wird jedoch mehr im Kapitel *die Diagramme* die Rede sein.

Zu den Beobachtungen des Verhaltens von Festkörpern und Fluiden kann nur schlussgefolgert werden, dass Hooke wahrscheinlich hiermit ein allgemeines Gesetz formulieren wollte und es mit diesen Beobachtungen argumentativ stützen wollte. Zusätzlich dazu schrieb er in *Lectures de Potentia*, dass seine Erkenntnisse, die er durch die in der *Micrographia* beschriebenen Versuche machte, eine spezielle Form seines *Gesetzes der Natur* sei. Was bedeuten würde, dass Boyles Gesetz nichts weiter ist, als ein Spezialfall des *Gesetzes der Natur*, dass Hooke in *Lectures de Potentia* formuliert hatte. Im kommenden Abschnitt wird seine Aussage dadurch unterstützt, dass es physikalisch interpretiert werden kann, dass es eine klare Verbindung zwischen Hookes und Boyles Gesetz gibt.

## 3.4 Physikalische Interpretation des Zusammenhangs von Boyles und Hookes Gesetz

Boyles Experimente hatten einen wichtigen Fortschritt der Notation der Elastizität dargestellt, der weitere Errungenschaften in der quantitativen und experimentellen Forschung der Natur ermöglichte. 1665 hatte Hooke in seiner *Micrographia* die Messungen beschrieben, die er zu Boyles Hypothese machte, wobei er gezeigt hatte, dass die Messungen mit der *Hypothese* übereinstimmten. Dass Hooke eine Analogie zwischen Boyles Hypothese und seinem *Gesetz der Natur* sah, wurde im vorherigen Kapitel mehrfach erwähnt.

Robert Hooke war an dem Verhalten und der Konstitution von Körpern hinsichtlich der Elastizität offensichtlich sehr interessiert. Aber kann auch angenommen werden, dass Boyles Gesetz nichts weiter ist als ein Spezialfall von Hookes Gesetz? Immerhin kann genau das in Hookes Veröffentlichung *Lectures de Potentia Restitutiva* gelesen werden. Nachdem er die Federn beschrieben hatte, erklärte er, der Reihe nach, die Eigenschaften diverser *Federformen*. Als er dann zum Draht kam, wies er auf Folgendes hin:

> *The manner of trying the same thing upon a body of Air, whether it be for the rarefaction or for the compression thereof I did about fourteen years since publish in my Micrographia, and therefore I shall not need to add any further description thereof.*[41]

Um es auf eine einfache Art zu interpretieren, kann im ersten Schritt der Zusammenhang zwischen den Proportionalitäten

$$F \sim x \tag{3.2}$$

und

$$p \sim \frac{1}{V} \tag{3.3}$$

beobachtet werden. Phänomenologisch betrachtet, können die beiden Gesetze relativ einfach miteinander verglichen werden. Auf der *Abbildung 3.9* ist die zusammengepresste (komprimiert) Luft als eine Feder visualisiert. Durch das Beobachten des Verhaltens des Quecksilbers in einem U-Rohr wird schnell klar, dass die Luft mit einer entgegengesetzten Kraft wirken muss. Das kann z. B. auch bei einer Injektionsspritze beobachtet werden. Durch einen Zug am Kolben wird die Spritze mit etwas Luft befüllt. Danach kann die Düse abgedichtet werden und durch den Druck oder Zug auf den Kolben lässt sich bemerken, dass der wieder in die Anfangsposition zurückstößt – genau, wie eine Feder, die zusammengepresst (ausgedehnt) ist. Dabei sollte die Wirkung der Luft betrachtet werden,

[41] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 3

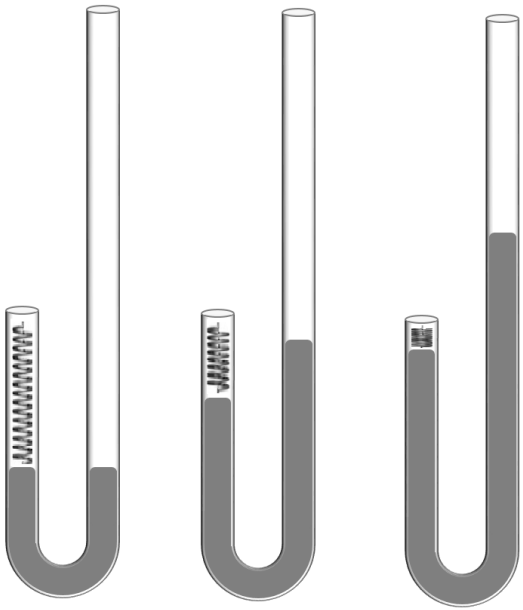


Abbildung 3.9: *Analogie zwischen dem Versuch mit dem U-Rohr, also der zusammengepressten Luft und der zusammengepressten Feder.*[42]

die eine gewisse Eigenschaft besitzt, sich dem Druck des Kolbens zu widersetzen. Ähnlich kann die Wirkung der Feder betrachtet werden, die sich einer äußeren Wirkung mit ihrer elastischen Kraft widersetzt. Die Luft zeigt ähnliche Eigenschaften wie eine elastische Feder.

Durch die Interpretation der beiden Phänomene kann auch die Äquivalenz zwischen den Gleichungen (3.2) und (3.3) ermittelt werden. Eine Möglichkeit wäre bspw. anzunehmen, dass die Gewichtskraft vom Quecksilber, dass sich im Rohr befindet, umgekehrt proportional zum Volumen der Luft sein muss. Wenn Quecksilber dazugegeben wird, vergrößert sich die Gewichtskraft und das Volumen der Luftsäule wird dementsprechend verringert. Dasselbe kann auch bei einer Feder beobachtet werden. Wird auf die Feder ein bestimmtes Gewichtsstück draufgesetzt, wird ihre Länge, um einen bestimmten Wert kürzer. Im Zusammenhang damit wird das Volumen $V_{Hg}$ betrachtet, *Abbildung 3.10*.

Dieses Volumen kann vom Initialpunkt gemessen werden (mit dem Initialpunkt wird

[42]Eigene Darstellung mit Kombination der Abbildungen von Federn
(Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hookes-law-springs.png)

der Punkt in der Säule gemeint, in welchem der Luftdruck im kürzeren Abschnitt des U-Rohres dem Atmosphärendruck gleicht – $V_{Hg}$). Bei genauerem Betrachten des *Berührungspunktes* vom Quecksilber und der Luft, wie auf der rechten Darstellung von *Abbildung 3.10*, kann anhand von Newtons drittem Axiom gesagt werden, dass die Intensität der Kraft, mit der die Luft auf das Quecksilber wirkt, $F_{Air}$, der Intensität der Kraft, mit der das Quecksilber auf Luft wirkt, $F_{Hg}$, entspricht. Die Kräfte wirken in entgegengesetzter Richtung. Der Wert der Kraft $F_{Air}$ kann in der Form

$$F_{Air} = p_{Air} \cdot A \tag{3.4}$$

dargestellt werden. In dieser Gleichung steht $p_{Air}$ für den Luftdruck und $A$ für die Querschnittsfläche des U-Rohrs. Diese Fläche hat während des Verlaufes der Versuche einen unveränderlichen Wert. Wird hierbei vermutet, dass es sich um einen idealen Fall handelt, gilt:

$$p_{Air}V_{Air} = nRT \tag{3.5}$$

Diese Vermutung ist hier gerechtfertigt, da hier lediglich Bezug auf die Veröffentlichungen von Boyle und Hooke genommen wird. Während ihrer Versuche erwähnte weder Boyle noch Hooke die explizite Veränderung von Temperatur. Das bedeutet, die Gleichung (3.5) kann auch in der Form:

$$p_{Air}V_{Air} = const \tag{3.6}$$

geschrieben werden. Dementsprechend verringert sich das Volumen, je größer der Druck auf die Luftsäule ist. Diese Gleichung (3.6) würde für eine kleine Veränderung des Drucks $p + dp$ und dementsprechend für eine kleine Veränderung des Volumens $V + dV$ erhalten bleiben, also gilt

$$(p_{Air} + dp)(V_{Air} + dV) = const \tag{3.7}$$

Ausmultiplizieren der Gleichung (3.7) ergibt:

$$p_{Air}V_{Air} + p_{Air}dV + V_{Air}dp + dpdV = const \tag{3.8}$$

Nehmen wir weiterhin an, dass die Veränderungen infinitesimal klein sind, das bedeutet, es gilt $dp \cdot dV \to 0$ und, dass dabei auch die Gleichung (3.6) gilt, kann die Gleichung (3.8) folgendermaßen dargestellt werden:

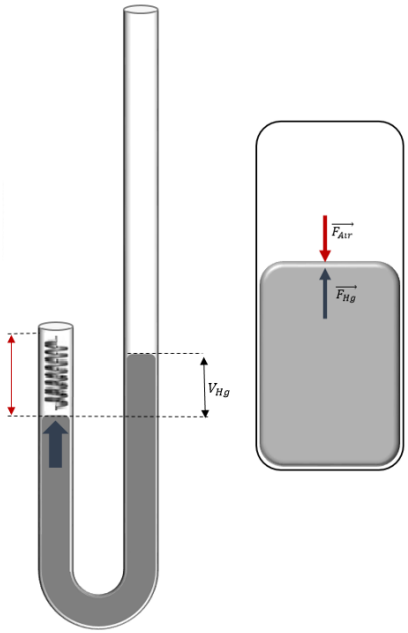



Abbildung 3.10: *Um eine Analogie zwischen den Gleichungen von Boyles und Hookes Gesetz zu finden, wird das Volumen des dazugegebenen Quecksilber betrachtet,* $V_{Hg}$.[43]

$$p_{Air}dV + V_{Air}dp = 0 \tag{3.9}$$

Um eine Verbindung zu der Kraft herzustellen, die die Luft ausübt, kann $p_{Air}$ mit der Gleichung (3.4) ausgetauscht werden. Dabei bekommt die Gleichung (3.9) die Form:

$$\frac{F_{Air}}{A}d(A \cdot x) + A \cdot xd(\frac{F_{Air}}{A}) = 0 \tag{3.10}$$

Wie bereits erwähnt, ändert sich während der Messungen das Rohr nicht und damit auch nicht die Querschnittsfläche des Rohres. Durch die Eliminierung von $A$ in Gleichung (3.10) wird Folgendes erhalten:

[43] Die linke Abbdildung ist eigene Darstellung mit der Kombination der Abbildungen von Federn (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hookes-law-springs.png)
Die rechte Abbildung ist eine eigene Darstellung.

$$F_{Air}dx + xdF = 0 \implies \frac{dF}{F_{Air}} = -\frac{dx}{x} \tag{3.11}$$

Das Integrieren der Gleichung (3.11) führt zu einer logarithmischen Gleichung:

$$ln(F_{Air}) = -ln(x) \tag{3.12}$$

oder in Form einer Exponentialgleichung

$$e^{ln(F_{Air})} = e^{-ln(x)} \tag{3.13}$$

Letztlich wird durch das Lösen der Gleichung (3.13) das Ergebnis erhalten, das die Form des Hookeschen Gesetzes hat, wie es auch heute bekannt ist:

$$F_{Air} \sim -x \tag{3.14}$$

Es ist nun auch physikalisch nachvollziehbar, dass Boyles Gesetz als ein Spezialfall von Hookes Gesetz interpretiert werden kann. Hierbei sei bedacht, dass dies nur für Randbedingungen gilt, bei denen die Veränderung von Druck und Volumen (bzw. Auslenkung) gering ist.

Wenn die Werte aus Boyles Messungen aus seinem Werk *New Experiments: Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air* beobachtet werden, und dann später Hookes Messungen in der *Micrographia*, führt das zur Schlussfolgerung, dass das Verhältnis der Höhe vom dazugegebenen Quecksilber und der Höhe der Luftsäule einer gleichen Gesetzesmäßigkeit entspricht, wie die Auslenkung bei dem Federversuch und der verwendeten Gewichtsstücke. So ein Phänomen wird bei Boyles Versuch auch beschrieben. Je höher die Quecksilbersäule ist, desto mehr ist die Luft komprimiert. Das bedeutet, das Volumen der Luft wird kleiner.

Quantitativ betrachtet, ist es auch nachvollziehbar zu behaupten, dass je mehr Quecksilber (also Masse) in das U-Rohr eingegossen wurde, desto mehr wurde die Luft komprimiert. Das Volumen der Luftsäule wird geringer. Der Druck, der dabei entsteht, ist größer. Dieser Druck entspricht der elastischen Kraft, mit der die Luft hinstrebt, zum Gleichgewicht zu gelangen. Also ist die elastische Kraft (die laut Hookes Gesetz proportional zur Auslenkung ist) größer, je mehr Quecksilber (also Masse) eingegossen wurde. Dementsprechend ist dann diese Masse direkt proportional zur elastischen Kraft (bzw. Auslenkung).

Hierbei sollte zusätzlich nochmals erwähnt werden, dass diese Äquivalenz, für die oben genannten Randbedingungen gegeben ist. Aus Hookes Veröffentlichung geht sein *Gesetz*

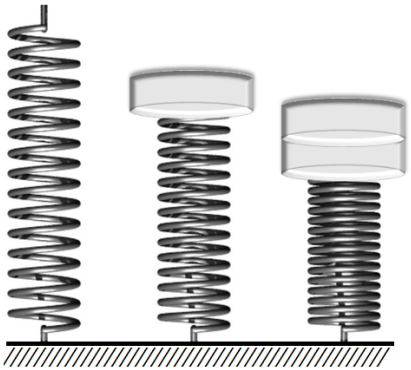


Abbildung 3.11: *Das Komprimieren einer Feder mit unterschiedlichen Gewichten, dabei wird das „Volumen“ der Feder ähnlich verändert wie das Volumen der Luft im U-Rohr, wenn Quecksilber eingegossen wird.*[44]

*der Natur* hervor, das *Power* proportional zur Auslenkung ist. Aus heutiger Sicht ist bekannt, dass dieses Gesetz nur für kleine Veränderungen gilt. Wenn bspw. eine Spiralfeder mit einem so großen Gewicht ausgelenkt wird, dass sie dabei an ihre Grenze der Elastizität kommt, verliert sie ihre elastische Eigenschaft oder bricht sogar – das Gesetz ist nicht mehr gewährleistet. Die von Hooke beschriebenen Veränderungen sind klein und er hat auch keine Grenzwerte für die beobachteten Veränderungen beschrieben. Deswegen ist es auch hierbei gerechtfertigt, die Analogie von Boyles und Hookes Gesetz mit den oben verwendeten Randbedingungen zu betrachten.

Es ist offensichtlich, dass Hooke diese Äquivalenz gesehen hatte und damit schlussgefolgert, dass Boyles Gesetz nichts weiter ist, als sein *Gesetz der Natur* aber für Fluide – also ein Spezialfall.

[44] Eigene Darstellung mit Kombination der Abbildung von Federn
(Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hookes-law-springs.png)

# Kapitel 4

# Eigene Experimente

Bevor Hooke in der *Lectures de Potentia* sein *Gesetz der Natur* ausführlich formulierte, hatte er drei Beispiele von Versuchen beschrieben. Diese Beispiele ließen ihn schlussfolgern, dass sich das Verhalten einer Feder mit dem *Gesetz der Natur* beschreiben lässt. Wobei auch die Annahme nicht falsch wäre, dass er schon früher (*Micrographia* und *Helioscopes*) darauf gekommen war. Um eine Vorstellung zu bekommen, was Hooke bei seinen Versuchen beobachtet haben könnte, ist es sinnvoll, seine Beschreibung dieser Beobachtungen nachzuvollziehen.

## 4.1 Quellenlage

Die Zielsetzung dieses Abschnitts ist es, genaue Angaben von Hooke darzustellen, um ein Bild von Hookes Beobachtungen zu entwickeln. Das Erste, was Hooke in *Lectures de Potentia* beschrieben hat, ist eine nähere Erklärung zu seinen Versuchen und Beobachtungen einer Spiralfeder.

> *The first whereof doth represent by AB the coyl or helix of Wire, C the end of it, by which it is suspended, D the other end of it, by which a small Scale E is hanged, into which putting, Weights as F G H I K L M N, singly and seperately they being in proportion to one another as 1 2 3 4 5 6 7 8, the Spring will be thereby equally stretcht to o, p, q, r, s, t, u, w, that is, if F stretch so as the bottom of the Scale descend to o, then G will make it descend to p, H to q, I to r, K to s, M to u and N to w, &c. So that xo shall be one space, xp, 2, xq, 3, xr, 4, xs, 5, xt, 6, xu, 7, xw, 8.*[1]

[1] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 3 – 4

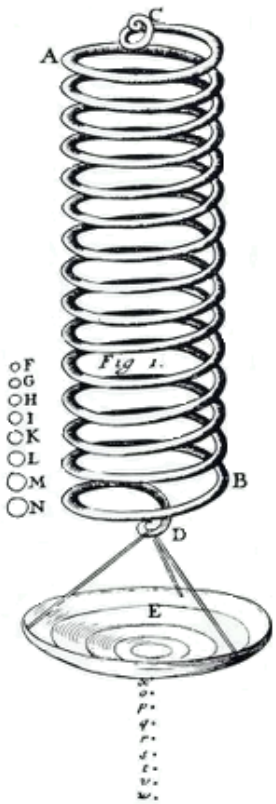



Abbildung 4.1: *Die Spiralfeder, die Gewichte, die hier mit großen Buchstaben gekennzeichnet sind und die jeweiligen Positionen, mit kleinen Buchstaben, zu denen die Feder mit entsprechendem Gewicht ausgelenkt wird.*[2]

Hier handelt es sich um eine einfache Spiralfeder, die nach Hooke, mithilfe eines Drahtes z. B. aus Messing oder Eisen, und eines Zylinders zur einer Spirale gewickelt werden kann. Die Anzahl der Spiralen (Drehungen) ist dabei unwichtig. An den beiden entstandenen Endpunkten sollte jeweils eine Schlinge gemacht werden. Die dienen dazu, dass das eine Ende an einen Fixpunkt aufgehängt werden kann und am anderen eine Schale, in die später die Gewichtsstücke eingesetzt werden.

[2]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678.
Keine Seite angegeben, jedoch von Hooke mit *Page 1.* gekennzeichnet, auch wenn der dazugehörige Text wieder mit der Seitenzahl [*1*] beginnt. Ausschnitt von Hookes Abbildung.

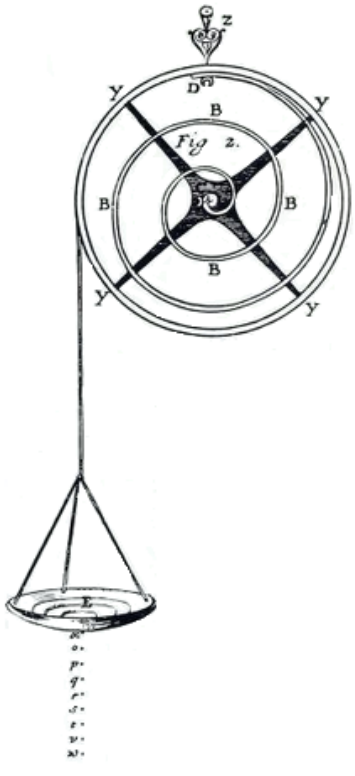



Abbildung 4.2: *Die Uhrfeder und die jeweiligen Positionen, mit kleinen Buchstaben, zu denen die Feder mit entsprechendem Gewicht ausgelenkt wird.*[3]

Er setzte seine Beschreibung fort, indem er das Verhalten einer Uhrfeder näher erläuterte.

> *The second figure represents a Watch Spring coyled in a Spiral by CABBBD, whose end C is fixed to a pin or Axis immovable, into the end of which the Axis of a small light Wheel is inserted, upon which it moves; the end D is fixed to a pin in the Rim of the Wheel yyyy, upon which is coyled a small silk, to the end of which is fixed a Scale to receive the weights. To the frame in which these are contained is fixed the hand or Index z; then trying with the former weights put into the Scale E, you will find that if F put into the Scale E sinks*

[3]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt von Hookes Abbildung.

> *the bottom of it x to o, then G will sink it to p, and H to q, I to r, K to S, L to t, and z will point at 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 on the Wheel.*[4]

In diesem Fall kann auch eine Spirale selbst gewickelt werden, jedoch soll dabei bedacht werden, dass sich die einzelnen Spiralen dehnen (*Abbildung 4.2*). Mithilfe eines leichten Messingrades könnte eine Verankerung gemacht werden, die es ermöglichen soll, einen fixierten Aufhänger anbringen zu können, der die Feder nicht berührt und sie frei schwingen lässt. Um das Federrad (die größte und äußerste Spirale der Feder) wird ein Seil angebracht (mehrfach auf das Rad *yyyy* gewickelt). Das andere Ende vom Seil soll mit einer Schale verbunden werden, worauf die Gewichtsstücke angebracht werden, die die Uhrfeder durch Drehung verformen.[5]

Den Inhalt von *Lectures de Potentia* setzte Hooke mit der Beschreibung seiner Beobachtungen zum Verhalten eines Drahtes fort:

> [...] *take a Wire string of twenty, or thirty, or forty foot long, and fasten the upper part thereof to a nail, and to the other end fasten a Scale to receive the weights: Then with a pair of Compasses take the distance of the bottom of the scale from the ground or floor underneath, and set down the said distance, then put in weights into the said scale in the same manner as in the former trials, and measure the several stretchings of the said string, and set them down. Then compare the several stretchings of the said string, and you will find that they will always bear the same proportions one to the other that the weights do that made them.*[6]

Im Zusammenhang mit dieser Beschreibung gab es keine weiteren Angaben. Dieser Versuch soll ein ähnliches Verfahren darstellen, wie das Verfahren mit der Luft, das in der *Micrographia* beschrieben ist.

> *The trials with a straight wire, or a straight piece of wood laid Horizontal arc so plain they need not an explication by figure, and the way of trying upon Air I have long since explained in my Micrographia by figures.*[8]

Die Aussage darüber, dass bei einem Bogen ein ähnliches Phänomen beobachtet werden kann, wird auf seine *Teilchentheorie* aus dem Kapitel 3 zurückzuführen sein. Damit im Zusammenhang könnte seine Erläuterung zu der Verformung von Festkörpern stehen (*Abbildung 3.8*). Im August 1678 stellte Hooke seine *Ergebnisse*, die er auch teilweise in *Lectures de Potentia* präsentierte, beim Treffen der Royal Society vor.

[4] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 4

[5] Die Uhrfeder wird in einem späteren Kapitel eine wichtige Rolle spielen, womit über die möglichen Motive von Hookes Veröffentlichung argumentiert wird.

[6] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 3

[8] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 3

Abbildung 4.3: *Die lange Draht. Hier ist mit einer anderen Abbildung vom Gewicht demonstriert, dass zu den Versuchen mit dem Draht die Gewichte größer sein müssen, damit eine Veränderung gemessen werden kann.*[8]

> *Mr. Hooke read a discourse of his, concerning the nature and power of springs and electrical* [sic] *bodies, giving not only an account of the nature and power of all sorts of springy bodies, and the several phaenomena thereof, but likewise of the reasons and grounds of those phaenomena; as would more at large appear in the discourse itself, which he designed speedily to publish* [*Lectures de Potentia*] *He then exhibited two experiments in order to prove his said theory; the one with a tubical spring of brass-wire, and the other with a spiral spring of steel being the spring of a watch.* [...] *Mr. Hooke shewed the experiment of the springing of a string of brass-wire, about thirty-six or thirty-seven feet long, extended by*

[8]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt von Hookes Abbildung.

> *weights hung at the lower end thereof; and he made it evident, that the said string extended proportionably to the weight, that was hung to it at the bottom: that is, that one weight extended it one length, two extended it two, and three extended it three spaces or lengths.*[9]

Aus diesem Protokolleintrag der Royal Society und der Beschreibung, die Hooke in *Lectures de Potentia* formulierte, kann ein Bild von möglichen Versuchen mit Federn entwickelt werden. Jedoch erscheint es ungewöhnlich, dass im Gegensatz zu den Versuchen, die z. B. in der *Micrographia* beschrieben sind, Hooke hier keine tabellarischen Angaben gab. In der Hinsicht kann nur vermutet werden, dass die beobachteten Veränderungen *konkret* und *offensichtlich* waren, sodass Hooke dafür keinen Anlass sah, die auch zu veröffentlichen. Weiterhin kann nicht mit Sicherheit behauptet werden, dass Hooke bei der Beschreibung in *Lectures de Potentia* denselben Draht verwendet hatte, wie in der Vorführung beim Treffen der Royal Society, dass aus dem Protokoll zu lesen ist. Das bedeutet, dass es sich in der Beschreibung in *Lectures de Potentia* nicht unbedingt um einen *Messingdraht* handelt. Der Draht scheint auch für Hooke keine größere Bedeutung zu haben, da er sich relativ früh auf die Versuche aus der *Micrographia* bezogen hatte. Natürlich kann auch behauptet werden, dass durch die Beschreibung von elastischen Eigenschaften der Festkörper, Hooke indirekt genug Erklärung zum Verhalten des Drahtes gab.

Unabhängig davon, dass Hooke keine näheren Angaben zu den Dimensionen der verwendeten Federn gab, lieferte Hooke genug Informationen, um eine ähnliche Beobachtung mit der Spiral- und Uhrfeder durchführen zu können.

## 4.2 Quellenlage und eigene Beobachtungen

In diesem Abschnitt des Kapitels werden sowohl Hookes beschriebene Prozedur wie auch die eigenen Beobachtungen wiedergegeben. Die Durchführung der Versuche und deren Beobachtungen fand in den Räumen der Europa-Universität Flensburg statt. Hierbei werden eigene Beobachtungen analysiert und eventuell in Verbindung mit dem gebracht, was Hooke in seiner Veröffentlichung wiedergegeben hatte. Diese Vorgehensweise ist nützlich, um eine vollständige Interpretation zu geben, die erklären könnte, wieso bei dieser Veröffentlichung zum Federgesetz die Ermittlung der Zeit eine so wichtige Rolle spielte.

Das Federgesetz in der Form, wie es auch heute bekannt ist, wirft soweit keine ungeklärten Fragen auf. Für Hooke selbst schien das Verhalten von Federn so offensichtlich, dass er keine Messungen mitveröffentlichte, um seine Aussagen argumentativ zu präsentieren. Die Beobachtungen, die er aber diesbezüglich vorgenommen hatte, könnten andere Hintergründe gehabt haben, als nur das Beweisen einer Schlussfolgerung. Es sei hierbei vorab darauf hingewiesen, dass die kommende Analyse den Fall des langen Drahtes auslässt, da

[9] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. III*, 1757, S. 430

es in Hookes Beschreibung keine Hinweise darauf gibt, welche Veränderungen im Kontext des *Gesetzes der Natur* relevant wären.

### 4.2.1 Die Spiralfeder

Für die in diesem Abschnitt beschriebenen Messungen wird eine Spiralfeder benötigt. Es kann eine fertige Feder benutzt werden, da es sich nicht um exakte Messungen handelt. Wie auch in der Beschreibung von Hooke wurde zunächst eine eigene Spiralfeder angefertigt. Hierzu wurde ein Messingdraht des Durchmessers $0,6$ *cm* verwendet. Von der Verwendung eines dünneren Drahtes wurde Abstand genommen, weil dieser ein zu geringes Elastizitätsmodul gehabt hätte. Um aus dem Draht zu einer Spiralfeder zu formen, wurde dieser um einen Holzzylinder gewickelt. Die Anzahl der Windungen war willkürlich gewählt, da es auch in Hookes Beschreibung heißt, dass die Anzahl keine wichtige Rolle spielt. Deswegen wurden mehrere Federn mit den Windungszahlen 20, 30 und 40 angefertigt. Hierbei sollte erwähnt werden, dass die Anzahl der Windungen, wie auch erwartet werden kann, nicht viel Einfluss auf das Ergebnis machte. Die Enden der Spiralfeder wurden zu Schlingen geformt, wodurch sich das obere Ende an einem Haken befestigen und am anderen eine Schale einhängen ließ.

Beim Wickeln der Feder erfuhr ich keine Schwierigkeiten. Abhängig davon, welche Querschnittsfläche der verwendete Draht hat, bedarf es eventuell mehr Kraft für das Wickeln. Worauf geachtet werden sollte, wenn die Feder gewickelt wird, ist, den Draht beim Drehen des Zylinders so gespannt zu halten, dass eine gleichmäßige Spirale entstehen kann. Das bedeutet, dass der Draht so stramm gezogen werden sollte, um damit jede Windung der Feder nahezu gleich zu halten.

Um einen offensichtlichen Zusammenhang zwischen der Auslenkung und dem benutzten Gewichtsstücken, die diese Auslenkungen verursachten, sehen zu können, rät Hooke die Gewichtsstücke in einer

$$1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8$$

Proportionalität zu wählen. Also wurden die Gewichtsstücke von $50 - 400$ *g* und $10 - 80$ *g* benutzt. Einen konkreten Grund für gerade diese Werte gibt es nicht. Am unteren Ende der Feder hängt eine Schale (*Abbildung 4.5*). Um die Punkte $o$, $p$, $q$, $r$, $s$, $t$, $u$ und $v$ kennzeichnen zu können, wurde ein hölzerner Stab benutzt, worauf Markierungen aufgetragen werden konnten. Die Versuchsreihe wurde mit dem schwersten Gewichtsstück begonnen. Dieser Punkt wird als *Initialpunkt* angesehen. In Hookes Beschreibung ist die maximale Auslenkung der Startpunkt der Beobachtung. Aus dem, was wir aus diversen Ausbildungsanstalten kennen, ist es üblicherweise Gewohnheit, Messungen zum Hookeschen Gesetz der Feder mit dem Gleichgewichtszustand anzufangen. Bei Hookes Untersuchungen wird die maximale Auslenkung als Anfangsposition betrachtet. Nachdem acht verschiedene Gewichtsstücke auf die Feder nacheinander gewirkt haben und die jeweiligen Punkte markiert

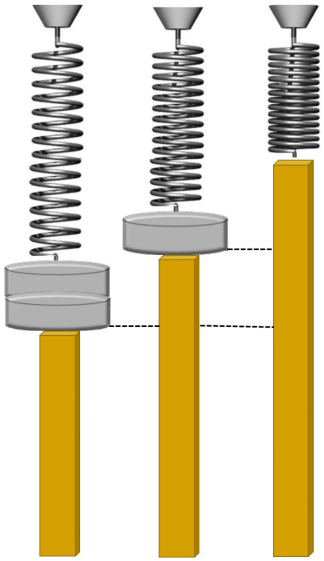


Abbildung 4.4: *Die Markierung der Position der Feder für die jeweiligen Verformungen durch verschiedene Gewichtsstücke.*[10]

waren, konnte auf dem Stab ein klares Muster erkannt werden. Die Markierungen, die für die Auswirkung der acht verschiedenen Gewichtsstücke auf die Feder darstellen, waren im gleichen Abstand zueinander.

Wie auch jeder vermuten kann, wird die Feder am meisten dann ausgedehnt, wenn das schwerste Gewichtsstück dranhängt. Wird das Gewicht um jeweils 50 $g$ verkleinert, kann bemerkt werden, dass die Markierungen sich immer um denselben Wert verändern. Das resultierende Muster auf dem Stab entspricht der Skala eines *Kraftmessers*, dessen Werte genau mit der Auslenkung der benutzten Feder übereinstimmen. Beim Fortsetzen der gleichen Prozedur mit der selbst gemachten Feder, wird ein vergleichbares Ergebnis erhalten. Es ist offensichtlich, dass für die gleiche Proportionalität von Gewichten das gleiche proportionale Verhalten von Abständen zwischen den Markierungen erhalten wird. Also gilt *Ut pondus sic tensio.*

Diese Beobachtungen ergaben keine signifikanten Erkenntnisse, was das Verhalten von der Feder betrifft. Jedoch sind diese vorgenommenen Beobachtungen äußerst wichtig für das kommende Kapitel. Dieses Kapitel befasst sich mehr mit der Schwingung der Feder

[10]Eigene Bearbeitung der Abbildung von Federn mit zusätzlichem Hinzufügen von Gewichten und Stäben (Quelle der Abbildung von Federn: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hookes-law-springs.png

Abbildung 4.5: *Der durchgeführte Versuch mit einer Spiralfeder.*[11]

und den quantitativen Größen, die diese Schwingung beschreiben. Das könnte auch als eins der Gründe interpretiert werden, wieso Hooke keine konkreten Messungen in *Lectures de Potentia* mitveröffentlichte. Hierbei handelt sich lediglich darum, eine Feder zu bauen, die die *elastischen* Eigenschaften besitzt, die Hooke offensichtlich bekannt waren, um mithilfe der Beobachtung der Schwingung oder der Anwendung der Schwingung der Feder ein anderes Phänomen zu erklären.

### 4.2.2 Die Uhrfeder

Der zweite Versuch und die dementsprechende Beobachtung wurden mit einer Uhrfeder durchgeführt. Da diesbezüglich von Hooke keine Angaben zu dem Material oder der Größe oder Härte existieren, kann zu Beobachtungszwecken eine Uhrfeder genommen werden, die nicht so hart ist. Der Grund dafür ist, dass harte Uhrfedern nicht so offensichtlich verformt werden, bzw. die Verformung ist nur schwer zu beobachten. Hier kann aber jede beliebige Uhrfeder genommen werden, die zur Verfügung steht.

Es ist interessant, dass Hooke viel mehr über die Uhrfeder geschrieben hatte als über den langen Draht. Der Draht wird sozusagen fast übersprungen. Wieso ist die Beobachtung des Verhaltens einer Uhrfeder für Hooke wichtiger als der Draht? Es erscheint, als wäre es für Hooke sehr wichtig gewesen, zu zeigen, dass die Uhrfeder die gleichen Eigenschaften hatte wie eine Spiralfeder. Das könnte etwas mit den Hintergründen seiner Veröffentlichung zu tun haben, die später im Kapitel der *Kontextualisierung* explizit diskutiert werden.

[11] Eigene Aufnahme der durchgeführten Versuche.

Das Ziel der eigenen Beobachtungen war zu erkennen, was Hooke bei den Experimenten mit der Uhrfeder wahrgenommen haben könnte, dass er auch in seinen folgenden Arbeiten bei der Entwicklung des Uhrmechanismus hätte verwenden können.

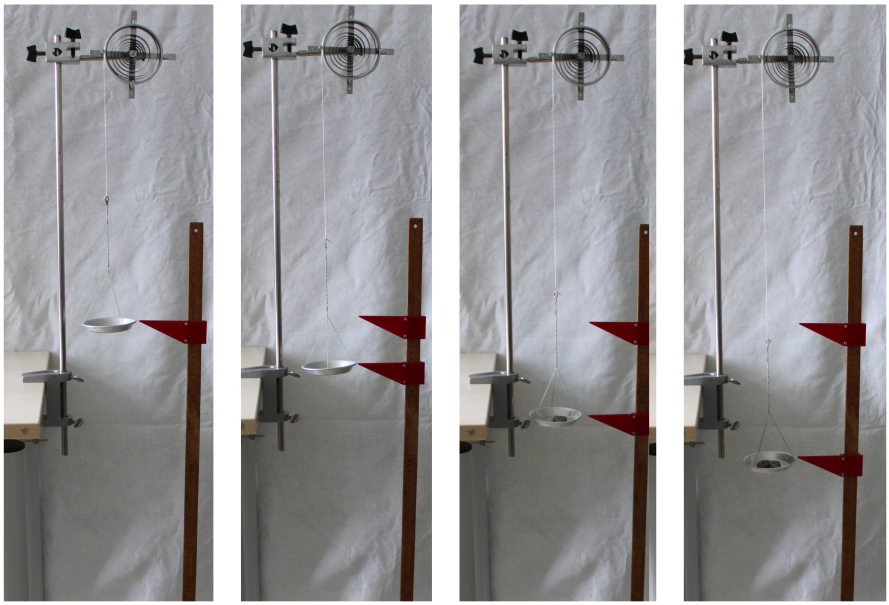


Abbildung 4.6: *Der durchgeführte Versuch mit einer Uhrfeder.*[12]

Ein Ende der Uhrfeder wurde an der Drehachse befestigt, das andere Ende wurde mit einer Schraube an einen Metallring befestigt, der eine enge Spalte hatte, worauf ein Faden aufgerollt werden konnte (*Abbildung 4.6)*. Der Ring dreht sich um seine Achse zusammen mit der Uhrfeder, abhängig von dem verwendeten Gewichtsstück, um einen bestimmten Winkel.

Hierbei können zwei Arten der Veränderung beobachtet werden. Zum einen, wie bei der Spiralfeder, kann in der Vertikale die gleiche Veränderung von Auslenkung der Schale zusammen mit den Gewichtsstücken beobachtet werden. Für die Markierung dieser Veränderungen wurde wieder ein Stab verwendet. Jede Veränderung von Gewichtsstücken verursachte auch Veränderung der Position der Schale auf der Skala auf dem Stab. Die Veränderung der Markierungen ist auch hier in gleichen Abschnitten zu beobachten. Zum anderen kann die Drehung beobachtet werden. Um beobachten zu können, um welchen

[12]Eigene Aufnahme der durchgeführten Versuche.

Winkel sich die Position des Rades ändert, wurde der Initialpunkt mit einem orangenen Pfeil gekennzeichnet (*Abbildung 4.7*). Das bedeutet, hier wird die Veränderung nicht in der Vertikale beobachtet, sondern die Drehung der Uhrfeder. Um die genauen Werte der Winkel zu beobachten, kann ein Winkelmesser an die Drehachse angebracht werden. Die Schraube, die zur Verbindung vom Metallring und der Uhrfeder dient, wurde gleichzeitig für die Markierung vom Nullpunkt verwendet (und damit wird auch die Veränderung des Winkels sichtbar).

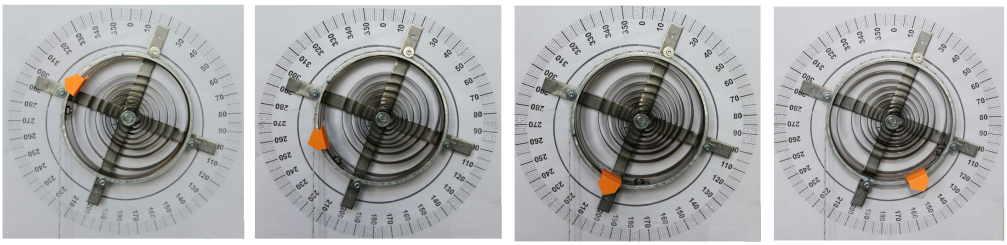


Abbildung 4.7: *Beobachtete Veränderung durch Drehung der Uhrfeder.*[13]

Es wurde beobachtet, dass die Veränderungen des Winkels der Drehung zum Nullpunkt im gleichen Verhältnis stehen, wie die Proportionalitäten der verwendeten Gewichte. Also konnte für die Drehung der Uhrfeder auch ein Muster erkannt werden, das die jeweiligen Auslenkungen (in Grad) in gleichen Abständen zeigte. Das ist eher nichts Unerwartetes, aber die jeweiligen Abweichungen sind so gering, dass es durchaus möglich ist, dass Hooke in einer solchen Uhrfeder Potential für einen Periodenmechanismus gesehen hatte, dass für die Entwicklung einer genauen Uhr auf See nützlich sein könnte. Es ist so vorzustellen: Durch das gleichmäßige Ziehen (was bedeuteten würde, dass immer dasselbe Gewichtsstück darauf wirkt) und das wieder Zurückkehren in die *Gleichgewichtsposition* könnte bspw. ein Zahnrad für jeweils einen Schritt (Zahn) gedreht werden. Ob das der Zusammenhang ist, den auch Hooke gesehen hat, ist unklar. Jedoch ist anhand von Hookes Einträgen in seinem Tagebuch klar, dass er einen Zusammenhang zwischen dieser *Elastizitätstheorie* aus dem Jahr 1678 und einer Uhr mit Federmechanismus sah.

## 4.3 Reflexion der eigenen Beobachtungen

Physikalisch betrachtet, ergeben die durchgeführten Beobachtungen keine große Überraschung. Jedoch stellte sich mir durch diese Verfahren immer wieder die Frage, was die Motivation war, die hinter Hookes Arbeit mit Federn steht. Im Postscript von *Helioscopes*

[13] Eigene Aufnahme der durchgeführten Versuche.

erscheint es so, als sehe Hooke eine bestimmte Relevanz in den Eigenschaften von Federn und kündigte bereits 1676 an, dass er seine Theorie dazu auch veröffentlichen wird.

> [...] *I there shewed ground and reason of the application of Springs to the Ballance of a Watch, for regulating its motion, and explained briefly the true nature and principle of Springs, to shew* [sic] *the Physical and Geometrical ground of them. And I explained above twenty several ways by which Springs might be applied to do the same thing, and how the Vibrations might be so regulated, as to make their Durations either equal, or the greater slower or quicker than the less, and that in any proportion assigned.* [...] *some of the said Watches to be made, though I was unwilling to add any of the better applications of the Spring to them, as waiting a better opportunity for my advantage. Of all these things the Publisher of the Transactions was not ignorant, and I doubt not but Mr. Hugens* [sic] *hath had an account, at least he might have read so much of it in the History of the Royal Society as was enough to have given him notice of it, for page 247 of that History, amongst other Experimented Inventions, there are recounted several new ways of Pendulum Watches for the Pocket, wherein the motion is regulated by Springs, &c.* [14]

Aus dieser Passage lässt sich vermuten, dass seine Beobachtungen von dem Verhalten der Federn, wie bereits ein wenig erläutert wurde, eine *Uhr* als Hintergrund haben. Unabhängig davon, dass er auch das Verhalten der Luft, des Drahtes und der Verformung von Körpern als Eigenschaften bearbeitet hatte, laut dieser Aussage aus *Helioscopes*, ging es ihm um die Zeitmessung. Das zieht sofort mit sich die Frage: Inwiefern dienten diese Beobachtungen mit der Feder zum Nachweis, dass eine Feder genauso geeignet ist, Zeit zu messen wie bspw. ein Fadenpendel. Dies erschien als ein guter Ansatz, die Erkenntnisse mit der Spiral- und Uhrfeder ein weiteres Mal umzusetzen, nur diesmal wurde die *Zeit* des Schwingens beobachtet.

Der erste Schritt bestand darin, erstmals das Fadenpendel und die Feder beim Schwingen zu beobachten. Das Pendel wurde im 17. Jahrhundert als eines der häufigsten Methoden für Zeitmessung benutzt. Die erste Frage, die sich mir hier stellte, war: Wie lang sollte das Pendel am besten sein? Es gibt viele Möglichkeiten, die hier schlüssig erschienen. Doch nachdem Hooke sein Gesetz formuliert hatte, erwähnte er ein paar Ideen, wie es zu verwenden sei und zu welchen anderen Erkenntnissen es dienen könnte.

> *From these Principles also it will be easie to calculate the proportionate strength of the Spring of a Watch upon the Fusey thereof, and consequently of adjusting the Fusey to the Spring so as to make it draw or move the Watch always with an equal force.*

[14] Hooke R., *Helioscopes*, 1676, S. 29 – 31

> *From the same also it will be easie to give the reason of the Isochrone motion of a Spring or extended string*[...][15]

Der *Isochronismus* war etwas, das Hooke immer wieder mit *der perfekten* Uhr in Verbindung brachte. Wird der *Weg* verfolgt, dass die Uhr seine größte Motivation war, war die Idee von der isochronen Bewegung des Pendels und der Feder der nächste Schritt in den eigenen Beobachtungen. Um dafür zu sorgen, dass die Schwingungen (damit wird die Anzahl der Schwingungen in einem Zeitabschnitt gemeint) der Feder und des Fadenpendels gleich sind, gab es zwei Möglichkeiten: Es wird entweder die Länge des Fadenpendels oder die *Kraft* (Gewichtsstücke), mit der die Feder zum Schwingen gebracht wird, geändert.[16] Dadurch ist es möglich, ein Muster im Verhalten der Feder und des Pendels zu erkennen, und diese auch zu verknüpfen.

Da in der Versuchsdurchführung die Federhärte als konstant angenommen wird, verbleiben als Variablen die Änderungen der Masse (Gewichtsstücke) beim Federpendel und der Fadenlänge des Fadenpendels. Letztere wird für den Versuch so angepasst, dass die beiden Pendel isochron schwingen. Damit es leichter wird, ein Muster zu erkennen, empfiehlt es sich hier, wieder Gewichtsstücke zu nehmen, die in einem proportionalen Verhältnis zueinander liegen, genauso wie Hooke es auch beschrieben hatte (z. B. $50 - 400\ g$ wie in den vorher beschriebenen Verfahren). Zuerst wurde das größte Gewichtsstück an die Feder gehängt. Die Position, in der sich die Feder dabei befindet, wurde markiert. Danach wurde immer jeweils ein $50\ g$ Gewichtsstück entnommen. Nun wurde die Feder mit dem Gewicht von $350\ g$ zu der markierten Position ausgedehnt und losgelassen. Um für ein synchrones Schwingen der Feder und des Pendels zu sorgen, ist es am besten einen konstanten Wert der Schwingungsanzahl der Feder $n_{Feder}$ zu nehmen. Dadurch lässt sich leichter ein Musterverhalten nachvollziehen. Der nächste Schritt ist, die Länge des Fadenpendels so zu ermitteln, dass seine Schwingungsanzahl, der Schwingungsanzahl der Feder entspricht. Wenn für die Beobachtung z. B. 10 Schwingungen der Feder genommen wurden, muss das Fadenpendel genauso 10 Schwingungen machen in der gleichen Zeit. Um die Länge des Fadenpendels zu wählen, kann beobachtet werden, wie viele Schwingungen das Fadenpendel macht, während die Feder eine Schwingung macht. Dadurch kann genau bestimmt werden, wie lang das Fadenpendel für mehrere Schwingungen ungefähr sein muss. Die Länge des Fadenpendels, die hierfür verwendet wurde, war $14\ cm$. Diese Länge hängt davon ab, welche Eigenschaften die Feder hat, mit der das Pendel isochron schwingen soll.

Wenn die erste Länge des Pendels ermittelt wurde (für das Gewichtsstück von $350\ g$), wurde der Prozess weiter durchgeführt. Es wurden wieder jeweils $50\ g$ runtergenommen und die Länge des Pendels so bestimmt, dass wieder ein Isochronismus zu beobachten war.

[15] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 5

[16] Die Periodendauer für das Federpendel ist mit $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$ gegeben, wobei $m$ die Masse des Gewichtsstückes ist und $D$ die Federhärte der verwendeten Feder. Die Periodendauer des Fadenpendels ist mit $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ gegeben, wobei $l$ die Länge des Fadenpendels darstellt und $g$ die Erdbeschleunigung.

Dabei kann ein Muster der Längenveränderung des Pendels beobachtet werden. Nachdem 4 solcher Schritte gemacht worden sind, konnte bei der Längenveränderung des Fadenpendels erkannt werden, dass es sich in gleichen Abschnitten verkürzte. Je geringer das angehängte Gewicht an der Feder war, desto kürzer die Länge des Fadenpendels. Während sich das verwendete Gewichtsstück um jeweils 50 $g$ änderte, veränderte sich die Länge des Fadenpendels jeweils um 2 $cm$.

Diese Tatsache, dass sich die Längen des Fadenpendels in gleichen Werten verändern, ist in dem Sinne interessant, dass auch Hooke womöglich einen Zusammenhang zwischen dem Fadenpendel und der Feder erkannt haben könnte. Wenn Hooke ein ähnliches Verfahren der Beobachtung verwendet hat, ist es möglich, dass er diese Erkenntnis so wahrgenommen hat, dass die Periodendauer einer Feder eine ähnliche Eigenschaft zeigt wie die Periodendauer des Fadenpendels. Dass die Periodendauer eines Fadenpendels proportional zur Wurzel der Länge ist, war zur Zeit der Veröffentlichung von *Lectures de Potentia* bekannt. Das hätte ihn vielleicht dazu bringen können, zu sagen, dass die Periodendauer der Feder proportional zur Wurzel des *Gewichts* (bzw. der *Masse* des Gewichtsstückes) ist. Aus Hookes Beschreibung geht hervor, dass die Zeit proportional zur Wurzel der Auslenkung (*space*) ist. Weiterhin behauptete er mit seinem *Gesetz der Natur*, dass die *Power* proportional zur Auslenkung (*space*) ist. Das würde bedeuten, dass die Zeit proportional zur Wurzel der *Power* ist – was im Fall der durchgeführten Beobachtungen auch dem *Gewicht* entsprechen würde, da hierbei die verwendeten Gewichtsstücke die Auslenkung bewirkt haben.

Wenn also ein Federpendel ähnliche Eigenschaften zeigt wie ein Fadenpendel, ist es durchaus möglich, dass Hooke dadurch beweisen wollte, dass ein Federpendel besser geeignet für den Uhrmechanismus ist. Ein Federpendel ist etwas robuster und könnte eventuell mehr Vorteile mit sich tragen als ein Fadenpendel. Diese Eigenschaften könnte Hooke als Vorteil gesehen haben, wenn ein Federmechanismus bspw. bei einer Uhr benutzt werden könnte, die der Wirkung der See ausgesetzt wird. Die Verwendung von Federn in einer Uhr zeigte Hooke bereits 1675 zusammen mit Tompion bei einer Vorführung in der Royal Society. Hooke hatte Tompion offenbart, dass *jede Feder die Fähigkeit besitzt, sich für gleiche Strecken zu verbiegen, bei gleichen Erhöhungen von Gewicht.* Hiervon wird in den kommenden Kapiteln ausführlicher die Rede sein.

# Kapitel 5

# Die Diagramme

## 5.1 Einführung in das Kapitel

Im Kapitel *die Diagramme* wird Hookes Interpretation des Verhaltens von diversen Federn erläutert. Die Diagramme, die Hooke in seiner Veröffentlichung *Lectures de Potentia* veröffentlichte, stellen die nähere Erläuterung von physikalischen Quantitäten, die eine Feder beschreiben, dar. Auf den ersten Blick erscheinen die Diagramme nicht ganz übersichtlich und verständlich. Um die Diagramme näherzubringen, wird in diesem Kapitel vorerst ein Einblick in Hookes Beschreibung gegeben. Dabei sollte bedacht werden, dass zu dem Zeitpunkt, als diese Diagramme entstanden sind, die Newtonsche Mechanik noch nicht publiziert war. Erst mit der Veröffentlichung von Newtons *Principia* wird ein klares Konzept von Begriffen wie Kraft und Beschleunigung gegeben. Vor diesem Hintergrund ist ersichtlich, dass Hooke auf keine eindeutige Terminologie zurückgreifen konnte. Hooke hatte sehr wohl eine Vorstellung davon, wie er die Schwingung einer Feder und die entsprechenden Bewegungsquantitäten beschreiben konnte. In seiner Veröffentlichung gab er aber keine Definitionen der Quantitäten an oder welchen klaren Begriffen sie entsprachen. Dadurch wird aus heutiger Sicht das Verständnis vom Konzept der Begriffe *force, power, strength...* erschwert.

Beim Lesen von *Birch's The History of the Royal Society*, wird schnell deutlich, dass einige Fragen der damaligen Wissenschaft fundamentale Probleme darstellten. Eine Schwierigkeit war es, dass Quantitäten nicht analytisch beschrieben wurden. Hooke und seine Zeitgenossen verwendeten entweder geometrische Methoden oder Beobachtungen, um die Quantitäten relational beschreiben zu können. Das führte manchmal zur einer Begrenzung ihrer Arbeit. Es ist möglich, drei eng verbundene geometrische Sprachen zu erkennen, die

in diesem Sinne verwendet wurden.[1] Zum einen war das die euklidische Geometrie, die damals oft in Bereichen wie geometrische Optik und Gravitation verwendet wurde. Das, was z. B. in Newtons Untersuchungen von Umlaufbahnen häufiger gefunden werden kann, ist die geometrische Interpretation von Viètes Algebra.[2] Andere Autoren wie z. B. Huygens bevorzugten kartesische Geometrie. Abhängig vom bearbeiteten Problem nutzten die Naturwissenschaftler der damaligen Zeit von ihnen bevorzugte Methoden. Im 17. Jahrhundert entwickelten sich stark quantitative Konzepte wie Beschleunigung, Kraft, Masse usw. Der Beginn der klassischen Mechanik wird als der Augenblick bezeichnet, in dem Newton mit der *Principia* eine klare Formulierung von Begriffen wie Kraft und Impuls veröffentlichte. Die Weiterentwicklung der Darstellung von physikalischen Gesetzen nahm die heutige Form an, als Newton und Leibniz die bis dahin verwendete geometrische Methode durch den analytischen Apparat (Calculus) ersetzt hatten.

Die Form, die am häufigsten benutzt wurde, um Verbindungen zwischen kinematischen und dynamischen Quantitäten, wie z. B. Kraft, Geschwindigkeit und Zeit darstellen zu können, war eindeutig die Verwendung von Proportionalitäten der euklidischen Geometrie. Diese Methode ermöglichte es, das Verhalten von Quantitäten in Abhängigkeit von anderen Quantitäten darzustellen.[3] Das Verhältnis von Quantitäten und deren Verlauf wurde häufiger in geometrischer als in nummerischer Form dargestellt. Diese Darstellungen basierten hauptsächlich auf Beobachtungen der besagten Eigenschaften von Bewegungen. Hierbei sollte bedacht werden, dass die Anwendung von Messungen nicht mit der heutigen Anwendung von Messmethoden verglichen werden kann. Meistens handelt es sich um Beobachtungen einer gewissen Veränderung im betrachteten System. Das bedeutet, es müssen nicht explizit nummerisch Werte gegeben sein, um eine Darstellung von Verhältnissen gewisser Quantitäten darzustellen. Der Wissenschaftshistoriker John J. Roche schrieb in *The Mathematics of Measurement* Folgendes über Oresme, der eine relevante Figur in diesem Kapitel sein wird:

> *For Oresme's configurations, for example, measure does not mean absolute measurement in terms of standard unit, it means the notional comparison of two intensities or quantities by means of lines or areas.*[4]

[1] vgl. Roche John J., *The Mathematics of Measurement. A critical History.*, The Athlone Press, London, Springer, 1998, S. 86

[2] François Viète (geboren 1540 in Fontenay-le-Comte, gestorben 1603 in Paris), war ein französischer Mathematiker. Er gilt als der Begründer der neuzeitlichen Algebra in Europa. Er stellte die Lehre von Gleichungen auf, indem er das Verhältnis zwischen Koeffizienten und den Wurzeln einer Gleichung formulierte. Weiterhin schrieb er auch Bücher über Trigonometrie und Geometrie wie *Supplementum geometriae* (1593).

[3] vgl. Roche John J., *The Mathematics of Measurement*, 1998, S. 87

[4] Roche John J., *The Mathematics of Measurement*, 1998, S. 87
Der Autor wies hier auf *Mémoire générale de déterminer les forces, les vitesses, les espaces et les temps…dans toutes sortes de mouvementes rectilignes varier a discretion*, P. Varignon, Mem. Acad. R. Scie., 1700, S. 40 – 41 hin.

Wie jedoch diese Proportionalitäten hergeleitet werden, wurde in den Veröffentlichungen des 17. Jahrhunderts nicht explizit angegeben. Messungen in Form des Vergleichens war eine bewährte Methode bei kinematischen Größen. Wallis behauptete, es sei leicht, Geschwindigkeiten mit zurückgelegten Strecken in der Zeit zu vergleichen.[5] Als Geometrieprofessor wusste Hooke sehr wohl über diese Praktiken Bescheid. Die Tatsache, dass er von vielen Akteuren der Geometrie beeinflusst war, kann aus seinen eigenen Veröffentlichungen, Manuskripten und Notizen lesen.[6] Das Diagramm zu der Schwingung der Feder beschreibt zu einem Teil die kinematischen Größen wie Geschwindigkeit, Strecke und Zeit, zum anderen die Größe *force, pressure, indeavour, impetus, strength, gravity, power, motion or whatever else you will call it...*[7]

Die geometrische Darstellung von mechanischen Bewegungen waren im Mittelpunkt der Arbeiten der Protagonisten des 17. Jahrhunderts. In diesem Kapitel wird auf Hookes Diagramme eingegangen, wobei die Beschreibung seiner Herleitung und der dafür entsprechenden Kurven näher ausgeführt werden. Mit der historischen Kontextualisierung werden andere Bewegungsdiagramme analysiert, mithilfe welcher eine klare Differenzierung von Hookes Darstellung von einem Bewegungsdiagramm hervorgehoben wird. Dadurch wird ersichtlich, dass Hooke trotz oder sogar wegen der Kenntnisse der damaligen Methoden einen anderen Weg gegangen ist als seine Zeitgenossen, um die Schwingung der Feder quantitativ zu beschreiben.

## 5.2 Hookes Beschreibung der Diagramme

Das Hookesche Gesetz wurde von vielen Wissenschaftshistorikern diskutiert. Selbst das Bild von den diversen Federn aus *Lectures de Potentia* wurde ein weiteres Symbol von Hookes Arbeiten, neben dem Mikroskop und dem Floh. Beim Betrachten des Bildes, das Hooke veröffentlicht hatte, ist bislang ein Teil der Abbildung relativ ungeklärt geblieben - die Diagramme. Es ist wahrscheinlich der Einfachheit des Gesetzes selbst geschuldet, dass gerade deswegen diese Diagramme, bzw. die Geometrie der einzelnen Kurven, eine Reihe an Fragestellungen aufwerfen. In diesem Teil des Kapitels wird Hookes Beschreibung der Diagramme dargestellt. Schrittweise wird erläutert, wie Hooke die Diagramme beschrieben hat und wie er in seiner Darstellung vorgegangen ist, um dabei die Veränderungen von verschiedenen Quantitäten der Federschwingung zu visualisieren.

Ähnlich wie seine Zeitgenossen verwendete auch Hooke die Geometrie, um die Eigenschaften von einer Federschwingung zu beschreiben. Er beschrieb in *Lectures de Potentia* sämtliche Kurven. Diese Kurven, die die Schwingung einer Feder beschreiben, sollten

[5] Wallis J., *A summary account given by Dr John Wallis of the general law of motion*, London, 1668, S. 864

[6] vgl. z. B. Hooke R., *Helioscopes*, 1676, *Lampas*, 1677, *Lectures de Potentia*, 1678 und Waller R., *The Posthumous Works*, 1705

[7] Hooke R., *Lampas*, 1677, S. 30

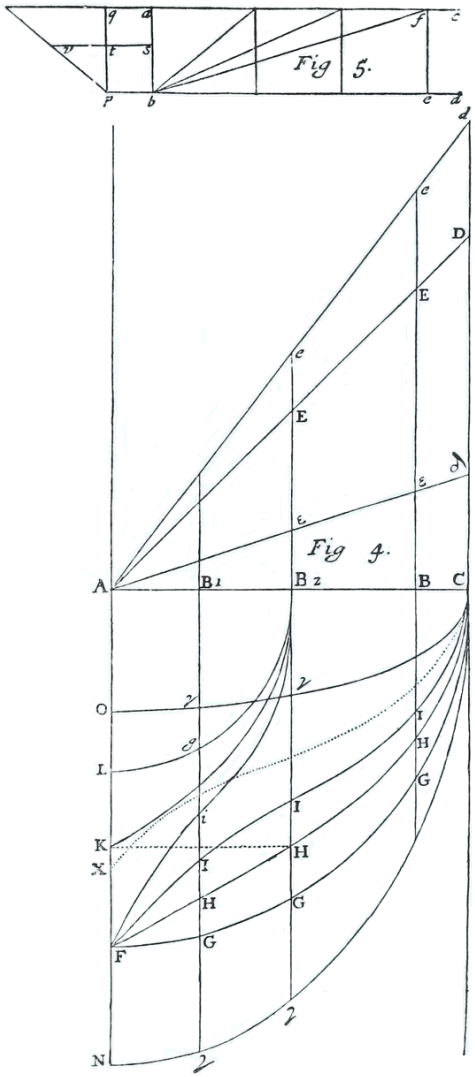



Abbildung 5.1: *Hookes Diagramm aus Lectures de Potentia Restitutiva*[8]

[8]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678

das Verhalten von mechanischen Quantitäten darstellen. Um diese Kurven zu ermitteln, betrachtete Hooke lediglich die Spiralfeder. Nachdem er diverse Quantitäten grafisch dargestellt hatte, erläuterte er, wie sich diese einzelnen Kurven verhalten würden, wenn es sich um Spiralfedern mit verschiedener Härte handeln würde. Es wird in diesem Teil des Kapitels schrittweise auf die Beschreibung und die Bedeutung der entsprechenden Kurven eingegangen, ohne beides in irgendeiner Form zu interpretieren. Dementsprechend werden ausgewählte Begriffe in der Originalsprache verwendet, um damit ein breites Spektrum einer Interpretation zu ermöglichen. Zusätzlich soll auch deutlich werden, was bereits mehrfach erwähnt wurde, dass die Verwendung der Begriffe *force, strength, power...* nicht immer schlüssig mit dem heutigen Wissen ist.

Hooke ging in seiner Beschreibung der Diagramme folgendermaßen vor: Als Erstes stellte er das Ende der Feder, die in einem Gleichgewichtszustand war, mit dem Punkt $A$ dar (*Abbildung 5.1*). Die *Power*, womit die Feder nach rechts zum Punkt $C$ gezogen werden konnte, stellte er mit der senkrecht auf die Feder gerichteten Strecke $CD$ dar. Um in jedem Punkt der Bewegung die entsprechende *Power* bestimmen zu können, gab er die Punkte $B_1$, $B_2$ und $B$ an, auf denen die *Power* $B_1E$, $B_2E$ und $BE$ liegen.[9] Die Strecken der jeweiligen *Power* sind parallel zueinander und sie bilden rechtwinklige Dreiecke $ACD$, $AB_2E$ und $ABE$, deren Fläche die *aggregate of Powers* darstellen soll, die auf die Feder im jeweiligen Punkt wirken. Das bedeutet z. B. das $ACD$ die *aggregate of Powers* ist, die die Feder hat, wenn sie zum Punkt $C$ ausgelenkt ist.

Nachdem er die *Power* dargestellt hatte, nutzte er diese Darstellung, um die Geschwindigkeiten, die die Feder in den von ihm ausgewählten Punkten haben müsste, wenn die *Power* $CD$ auf die besagte Feder wirkt. Das bedeutet, wenn die *Power* $CD$ auf das Ende der Feder wirkt, wirken, laut Hooke, in den Punkten $B$, $B_2$ und $B_1$ die entsprechenden *Powers* $BE$, $B_2E$ und $B_1E$... Jedem einzelnen Punkt entspricht eine entsprechende Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeiten in den jeweiligen Punkten sind mit $BG$, $B_2G$ und $B_1G$ gekennzeichnet. Diese Geschwindigkeiten können, laut Hooke, mit der Wurzel der *aggregate of Powers* bestimmt werden.

> [...] *velocieties of any body moved are in subduplicate proportion to the aggregates of the powers impressed of these spaces;*[...]*velocities of the parts of the space returned they will be always proportionate to the roots of the aggregates of the powers* [...][10]

Im Grunde gibt er folgendes Verhältnis an:

$$velocity \sim \sqrt{aggregate\ \ of\ \ Powers} \tag{5.1}$$

[9] Hier sei hinweisen, dass Hooke im Originaltext die Punkte nicht mit $B_1$ und $B_2$ betitelte, sondern ausschließlich mit $B$, obwohl auf der Abbildung, die zu der Beschreibung gehört, die Kennzeichnung mit $B_1$ und $B_2$ gegeben ist.

[10] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678 S. 18

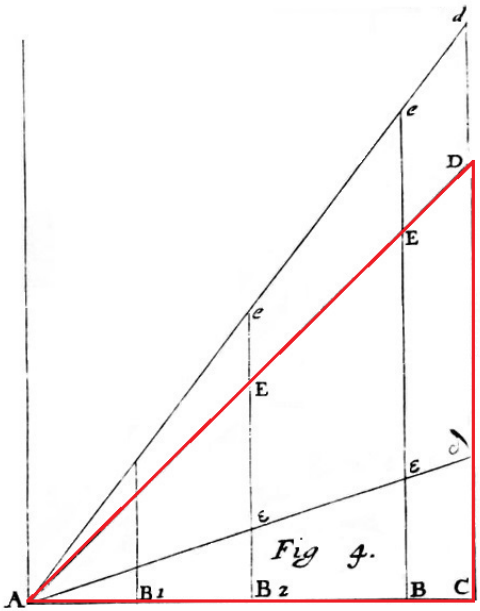



Abbildung 5.2: *Hookes Darstellung von aggregate of Powers.*[11]

Das würde bedeuten, dass die Geschwindigkeit, die die Feder von $C$ nach $A$ erreicht, der Wurzel der Summe aller einzelnen *Power* von $C$ nach $A$ entspricht. Diese Geschwindigkeiten müssen, laut Hooke, die Wurzel der entsprechenden *aggregate of Powers* sein. Der nächste Schritt in der Erstellung des Diagramms besteht darin, ein Viertel eines Kreises zu zeichnen, dessen Zentrum sich in $A$ befindet und dessen Radius $AC$ entspricht, sodass der Kreis die Strecke $AF$ im Punkt $F$ schneidet. Die Strecken, die entstehen, wenn senkrechte Linien aus den Punkten $B_1$, $B_2$ und $B$ den Viertelkreis in den Punkten $G$, $G$ und $G$ schneiden, sind parallel zu $AF$, *Abbildung 5.3.*[12] Die Strecken $B_1G$, $B_2G$ und $BG$ repräsentieren die Geschwindigkeiten, die die Feder bei der Rückbewegung von $C$ nach $A$ in den entsprechenden Punkten (also $B_1$, $B_2$ und $B$) haben sollte. Die besagten Geschwindigkeiten müssten immer in der gleichen Proportionalität zur Fläche des ihnen entsprechenden Trapezes sein. Im Grunde bedeutet das, wenn z. B. die Geschwindigkeit $B_1G$ bestimmt werden soll, wird die Fläche vom Trapez betrachtet, dessen vertikale Seiten die *Power* in $B_1$ und im Punkt $C$ darstellen. Also kurz gesagt, die Wurzel der Fläche des

[11] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt von Hookes Abbildung
[12] Die Punkte sind sowohl auf der Abbildung als auch im Originaltext mit $G$ gekennzeichnet.

Trapez $CDEB_1$ soll proportional zu der Geschwindigkeit $B_1G$ sein. Wenn in der Gleichung für die Notation $AC = a$ und $AB = b$ verwendet wird, wie in Hookes Beschreibung, ist die besagte Geschwindigkeit

$$BG = \sqrt{aa - bb} \tag{5.2}$$

Die Form dieser Gleichung ist dem Viertelkreis geschuldet, der die Geschwindigkeitskurve darstellt. Das bedeutet, dass $AF$ dem Wert $AC$ entspricht. Die Gleichung (5.2) ist dementsprechend das Ergebnis der Anwendung der pythagoreischen Gleichung für rechtwinklige Dreiecke.

> [...] *these Lines BG, BG will represent the velocity of the Spring returning from C to B ... the said ordinates being always in the same proportion with the roots of the trapezium CDEB* [...][13]

Hooke setzte seine Interpretation der Bewegung weiter fort. Dabei nutzte er das bisher Hergeleitete aus, um die Zeit zu bestimmen, die die Feder vom Punkt $C$ bis zu den Punkten $B_1$, $B_2$ und $B$ braucht. Um die entsprechende Kurve der Zeit zu bestimmen, zeichnete Hooke eine Kurve $CHHHF$, die er selbst *Parabola* nannte. Der Wendepunkt dieser *Parabola* ist dabei $C$ und sie läuft durch den Punkt $F$, *Abbildung 5.4a)*. Da in seiner Interpretation sowohl die Geschwindigkeit, als auch die *aggregate of Powers*, proportional zu der Wurzel der Strecke ist, war es für ihn womöglich geometrisch leichter, die Verhältnisse mit dieser *Parabola* herzustellen, als mit der Strecke selbst. Also stellte Hooke diese *Parabola* so dar, als hätte sie nur die Funktion eines Hilfsmittels, um die Zeit zu bestimmen. Das wird aus dem folgenden Zitat ersichtlich:

> [...] *since the velocity is the same proportion to the root of the space, as the root of the space is to time ... lines BE, BE, CD will be in the same proportion with the length of the spring AB, AB, AC ... the ordinates of this parabola BH, BH, AF are in the same proportion of the roots of the spaces CB, CB, CA*[14]

Hooke verwendet offensichtlich den geometrischen Weg, um an die Zeitkurve zu gelangen. Er zeichnete die *Parabola* in das Diagramm ein, was er wahrscheinlich deswegen tat, weil ihm die oben genannte Proportionalität bekannt war. Nachdem diese *Parabola* im Diagramm eingetragen war, war die Zeitkurve nur ein Ergebnis von der bereits bekannten Proportionalität.

In Hookes Beschreibung heißt es, dass die Ordinaten $BH$, $B_2H$ und $B_1H$ den Wurzeln der Strecken $BC$, $B_2C$ und $B_1C$ respektive entsprechen. Das bedeutet, hierbei wird die

[13] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 19
[14] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 19

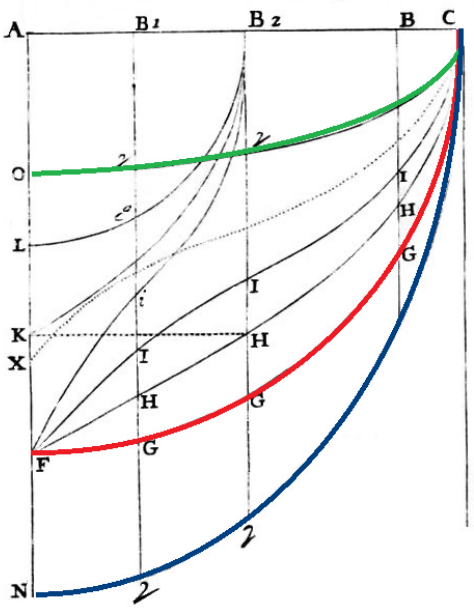



Abbildung 5.3: *Die Darstellung der Geschwindigkeitskurve, die die aggregate of Powers ACD bewirkt.*[15]

Funktion der Wurzel der Strecke in Abhängigkeit von der Strecke dargestellt. Damit wäre $AF$ für diese *Parabola* so skaliert, dass $AF = \sqrt{CA}$. Um nun die Zeit zu bestimmen, wird die Proportionalität

$$GB : HB = HB : IB \tag{5.3}$$

verwendet. Dabei können die Ordinaten der Zeit ermittelt werden. Die Kurve $CIIIF$ stellt die Zeitkurve dar und $IB$, $IB_2$ und $IB_1$ die jeweiligen Ordinaten der Zeit für die entsprechenden Punkte (*Abbildung 5.4 b)*). Das soll die Zeit darstellen, die die Feder für das Zurücklegen der Strecken $CB$, $CB_2$, $CB_1$ und $CA$ braucht.

$$velocity : \sqrt{space} = \sqrt{space} : time \tag{5.4}$$

[15]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

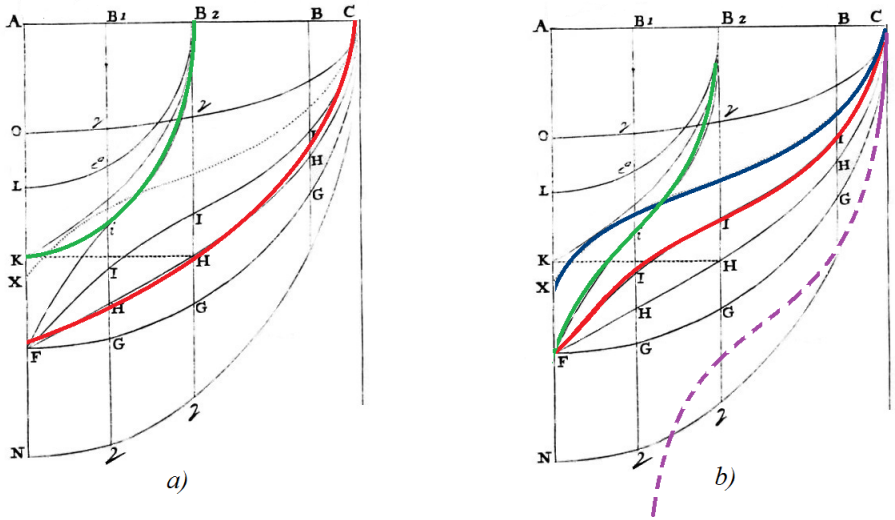



Abbildung 5.4: *a) Die Darstellung der Hilfsparabeln bzw. die Kurve, die die Wurzel der entsprechenden Strecken beschreibt. b) Die S-Kurve die durch die Proportionalität (3) entsteht.*[16]

Um die Art seiner geometrischen Interpretation von *Power*, Geschwindigkeit und Zeit näher zu erläutern, hat Hooke in seiner Veröffentlichung noch weiter Kurven beschreiben und erklärt: Sollte die *Power* größer sein als $CD$ (mit $Cd$ dargestellt), dann werden die Ordinaten der Geschwindigkeit eine Ellipse $C\gamma\gamma N$ ergeben.

Die Fläche, die diese Ellipse mit $AC$ und $AF$ bildet, ist größer als die Fläche des Viertelkreises $CGGF$. Dementsprechend schneidet die S-Kurve die Strecke $AN$ im Punkt $X$ (*Abbildung 5.4 b) mit blau gekennzeichnet*). Ist die *Power* jedoch kleiner als die *Power* $CD$, wie z. B. die *Power* $C\delta$, bilden die Ordinaten der Geschwindigkeit eine Ellipse $C\gamma\gamma O$ (*Abbildung 5.5 mit blau gekennzeichnet*). Interessanterweise soll die S-Kurve, die die Zeit darstellt, weit über $N$ hinauslaufen (*Abbildung 5.4 b)* mit Violett markiert.)

Zuletzt gab Hooke eine geometrische Darstellung von Kurven für den Fall, wenn die Feder im Punkt $B_2$ losgelassen wurde. Der *Power*, die in diesem Fall wirkt, $B_2E$, entspricht die Geschwindigkeitskurve $B_2gL$. Die Kurve $B_2K$ entspricht demnach der Kurve, die die Wurzel der Strecke darstellt. Den Punkt $K$ setzte Hooke mit dem Punkt $H$ in Verbindung. Diese Verbindung stellte er in Form einer gestrichelten Linie dar. Zu dieser Strecke $KH$ gab Hooke keine nähere Erläuterung.

[16] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

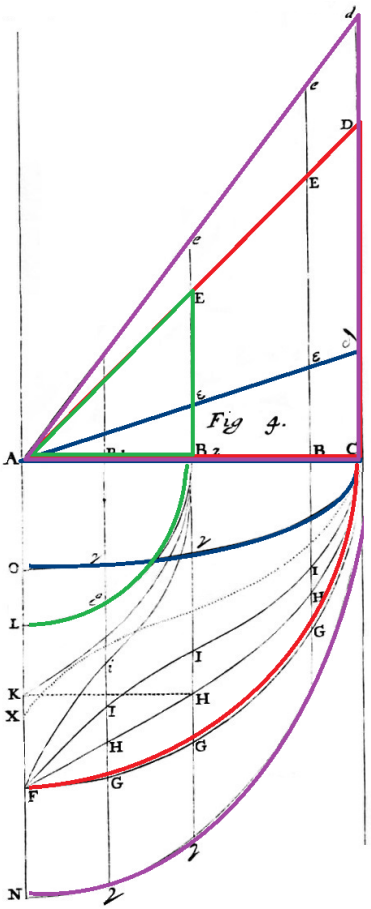



Abbildung 5.5: *Die Darstellung von verschiedenen Powers und der dann entsprechenden Geschwindigkeiten.*[17]

Hiermit stellte Hooke verschiedene Bedingungen vor, unter denen eine Federschwingung beobachtet werden kann. Dabei stellte er dar, wie sich dadurch die Quantitäten veränderten. Er zeigte die Wirkung von *Power* auf verschiedene Federn, die nötig war, um die besagten Federn bis zum Punkt $C$ auszulenken. Damit wird wahrscheinlich gezeigt, dass die angewendete *Power* von der Federhärte abhängen muss, da die Auslenkung ja gleich bleibt (bis

[17]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbbildung.

zum Punkt $C$). Im Anschluss erklärte er, was passieren würde, wenn sich die Auslenkung ändert und die verwendete Feder (also die Federhärte) gleich bleibt. Dafür nahm Hooke den Punkt $B_2$. Die entsprechenden Kurven beziehen sich dabei auf die Quantitäten der Schwingung, wenn eine gleiche Feder (wie im ersten Fall, wo die *Power CD* wirkte) nur bis zur Hälfte der Strecke $AC$ ausgelenkt wird. Damit beendete Hooke auch die Beschreibung des großen Diagramms.

Nachdem er ausgiebig gezeigt hatte, wie die Zeit einer Federbewegung zu bestimmen sei, diskutierte Hooke ein Diagramm (auf der originalen Abbildung entspricht das *Fig. 5.*), das die quantitativen Eigenschaften einer Wurfbewegung darstellen soll.

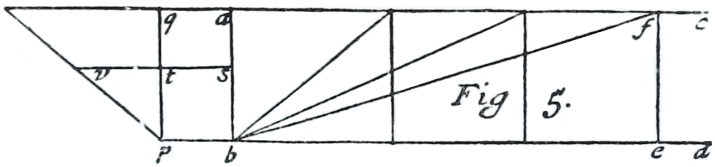



Abbildung 5.6: *Darstellung von Größen, die die Eigenschaften einer Wurfbewegung geben.*[18]

Der einzige Zusammenhang, der zwischen diesem Wurfbewegungsdiagramm und dem Federbewegungsdiagramm erkannt werden kann, ist, dass der Körper im Wurfbewegungsdiagramm von einer Feder angetrieben wurde. Durch das Vergleichen der Geschwindigkeiten des Fallens und Steigens können die Eigenschaften der Bewegung ermittelt werden. Um es näher zu erläutern, nahm Hooke ein konkretes Beispiel und schrieb:

> *For instance, suppose a Bow or Spring at 16 foot above a Horizontal floor, which is near the space that a heavy body from rest will descend perpendicularly in a second of time. If a Spring deliver the body in the Horizontal line with a Velocity that moves it 16 foot in a second of time, then shall it fall at 16 foot from the perpendicular point on the floor over which it was delivered with such Velocity, and by its motion shall describe in the Air of space through with it passes, a Parabola.*[19]

Seine Beschreibung setzte er fort, indem er schrieb, dass bei einer zweifach gespannten Feder (zweifacher *Power*), der Körper eine zweifache Geschwindigkeit erfahren würde, also 32 *Fuß* in einer Sekunde. Das bezieht sich nur auf eine Bewegung, bei der vorausgesetzt wurde, dass sich der Körper eine Sekunde lang bewegt.

[18] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678
[19] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 21

Hooke nahm auch den Fall in Betracht, wenn eine Feder einen Körper unter einem bestimmten Winkel abschießt. In diesem Fall kann die Wurfweite durch die bekannte Anfangsgeschwindigkeit bestimmt werden. Das sollte einfach durch den Vergleich der Zeit des Fallens und Steigens möglich sein. Um das zu erklären, benutzte Hooke das kleine Diagramm, das er folgendermaßen beschrieb:

> *Let ab then in the fifth Figure represent 16 foot, or the space descended by a heavy body in a second minute of time. If a body be shot from b, in the Line bf with a Velocity as much swifter than that equal motion of 16 foot in a second, as this Line bf is longer than ab the body shall fall at e; for in the same space of time that the oblique equal motion would make it ascend from bd to ac, will the accelerated direct motion downward move it from ac to bd, and therefore at the end of the space of one second, when the motions do equal and balance each other, the body must be in the same Horizontal Line in which it was at first, but removed asunder by the space be, and for the points it passeth* [sic] *through in all the intermediate spaces this method will determine it. pbst signifies the space ascended, and ptu the space descended, so that subtracting the descent from the ascent you have the height above the line bd, the consideration of this, and the equal progress forwards will give the intermediate Velocities, and determine the points of the Parabola.*[20]

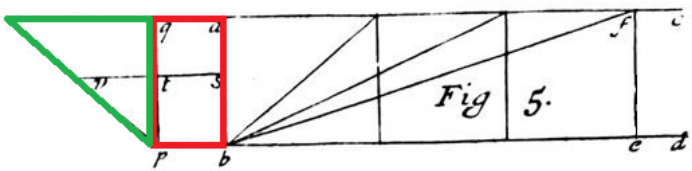



Abbildung 5.7: *Der Vergleich von einer gleichförmigen und beschleunigten Bewegung.*[21]

Mit diesem Diagramm sollen für jede Form von Wurfbewegung, die Geschwindigkeiten und die Wurfweite zu bestimmen sein, unabhängig davon, wie der Wurfwinkel zur Ebene ist. Zu der Wurfparabel gab er keine weiteren Erklärungen. Die Wurfparabel wurde bereits von vielen anderen erklärt, also gab es, laut Hooke, keinen Anlass für weitere Erklärungen diesbezüglich.

> *I shall not need to shew the reason why it is moved in a Parabola, it having been sufficiently demonstrated long since by many others.*[22]

[20] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 22 – 23
[21] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.
[22] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 23

Damit beendete Hooke seine Beschreibung der Diagramme und fügte hinzu, dass es nicht nötig sei, die vielen Anwendungen von Federn aufzuzählen und zu beschreiben.

## 5.3 Die Interpretation der Diagramme

Dieser Teil des Kapitels beinhaltet eine detaillierte Analyse und eine mögliche Interpretation der Diagramme. Hierbei werden bestimmte Inhalte wegen der Übersichtlichkeit wiederholt. Die Interpretation beinhaltet eine theoretische und eine praktische Analyse. In der theoretischen Analyse wird sowohl eine genauere Untersuchung der Geometrie des 17. Jahrhunderts vorgenommen, als auch deren Verwendung zur Beschreibung von diversen mechanischen Bewegungen. Die praktisch durchgeführte Untersuchung ist auf der Basis einer Annahme entstanden und nicht als exakt von Hooke beschriebene Durchführung zu interpretieren.

### 5.3.1 Historischer Hintergrund

Um eine möglichst plausible Interpretation von Hookes Diagrammen zu liefern, wird vorerst die Entwicklung der Darstellungen von Bewegungsformen präsentiert. Dabei werden mögliche Einflüsse genannt und analysiert. Es kann hierbei vermutet werden, dass Hooke als renommierter Geometrieprofessor des Gresham Colleges über jegliche Entwicklungen der Geometrie seiner Zeit gut informiert war.

> [...] *the strict and direct relation between power and motion avails Hooke of a well-respected mathematical tool for calculating the "aggregate of powers", namely; the traditional Merton-style formula for the accumulation of "degrees of motion". Indeed, in an almost identical way to Galileo and O'resme before him, Hooke uses perpendicular lines to represent acceleration as a change in a quality over time. What was "intensity" for O'resme and "degrees of speed" for Galileo, is mediated through the operation of "power" for Hooke, but since power has been accounted for as nothing but qualification of motion, this mediation does not jeopardize his use of the construction.*[23]

Nicole Oresme war ein Naturphilosoph aus dem 14. Jahrhundert, der einen großen Einfluss auf die Entwicklung von Mathematik hatte. Oresme erfand eine Art von Koordinatengeometrie, indem er die logische Äquivalenz zwischen der tabellarischen Darstellung von Werten und ihrer grafischen Darstellung in *De configurationibus qualitatum et motuum*

[23] Gal O., *Meanest Foundation and Nobler Superstructures. Hooke, Newton and the "Compounding of the Celestial Motions of the Planets"*, 2002 Kluwer Academic Publishers, S. 97
Hier wies der Autor auf Folgendes: *Hooke's acquaintance with it was probably via Galileos writing, in which he clerly was versed. One reason to believe that he has learned of O'resme's diagram from Galileo is that, like the latter, he treats the areas as sums of the ordinates.*, S. 97

fand. Er schlug die Verwendung eines Graphen zur Darstellung einer variablen Größe vor, deren Wert von einer anderen Variable abhängt. Seine Interessen lagen aber in der Struktur der Materie und der Kinematik. Er war ein Befürworter der Impetustheorie, aber am bekanntesten ist er für sein Konzept der *form latitudes* und deren Konfigurationen. Das ist ein wichtiges Konzept, was in diesem Teil des Kapitels näher dargestellt wird.

*Tractus de configurationibus intensonum* beschreibt etwas, was „Figuration" genannt wird und die „Kraft" der Uniformität und Difformität bei zeitlich konstanten Qualitäten (und Geschwindigkeiten) darstellt. Im Mittelpunkt steht die sogenannte *linea intensionis*. Es ist eine grafische Darstellung einer Größe und der Proportionalitäten zwischen Intensitäten und Linien – die als gleich vermutet werden. Es ist hierbei zu erwähnen, dass die Möglichkeit der Messungen dieser Intensitäten nicht besteht, es geht nur um die Überprüfung dieser Verhältnisse, die als gleich vorgegeben (angenommen) sind.[24] Diese *linea intensionis* soll nach Oresme nicht nur zur Darstellung von Nutzen sein, sondern auch zur Vorstellung. Diesbezüglich kann also gesagt werden, dass die Intensitäten durch Linien dargestellt werden, die zum *subiectum*[25] senkrecht aufgestellt sind.

> [...] *es sind untereinander gleiche Intensitäten durch gleiche Linien darzustellen, Intensitäten, von denen die Eine das doppelte der Anderen ist, durch Linien, die sich ebenso zueinander verhalten... semper proportionaliter procedendo...die so beschriebenen lineae intensionis sind aber nicht als Linien zu denken, die realiter aus dem subiectum herausragen, sie sind auf ihm nur per imaginationem errichtet, und sie können nach jeder beliebigen Richtung geführt werden; es ist lediglich eine Frage der Zweckmäßigkeit, wenn man sie sich senkrecht auf dem Qualitätsträger vorstellt.*[26]

Das, worauf diese Aussage deutet, ist, dass unabhängig davon, von welchen Größen die Rede ist, solange jeweils z. B. zwei Größen proportional zueinander sind, kann ihr Verhältnis mit Linien dargestellt werden, die senkrecht zueinander sind. Es wird also nicht eine einzelne Intensität dargestellt, sondern eine Art Verteilung auf dem *subiectum*. Oresme gab weitere Angaben zur näheren Darstellung von Größen, indem er die Begriffe *latitudo* und *qualitatis* einführte. Die Intensität soll in einem bestimmten Punkt so dargestellt werden, dass eine Linie, *latitudo*, die Qualität zeigen kann. *Latitudo* ist hier dasselbe wie Intensität, es stellt die intensive Größe oder die *quantitas qualitatis* in einem bestimmten Punkt dar, mit der entsprechenden *linea intensionis*. Es geht hierbei um eine räumliche Betrachtung, da *latitudo* auch eine *extensio* hat.[27] Die wurde von Oresme als *longitudo* bezeichnet. Es

[24] vgl. Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft. Studien zur Naturphilosophie des 14.Jahrhunderts*, Essener Verlagsanstalt, Essen, 1943, S. 288 – 289

[25] Das *subiectum* ist ein Ausdruck, der im 14. Jahrhundert für Begriffe wie Linie, Fläche oder Körper benutzt wurde, vgl. Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, 1943, S. 288 – 289.

[26] Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, 1943, S. 290

[27] vgl. Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, 1943, S. 290

ist hierbei zu erahnen, dass es sich um etwas handelt, dass einer $x$- und $y$-Darstellung ähnelt.

*Longitudo* bedeutet im Grunde eine „Ausdehnung“ in z. B. horizontaler Richtung (*Abbildung 5.8*). Es handelt sich also um eine Intensitätsverteilung, die jeweils eine *longitudo* hat und unendlich viele *latitudines*, da sie für jeden einzelnen Punkt zugeordnet sind.

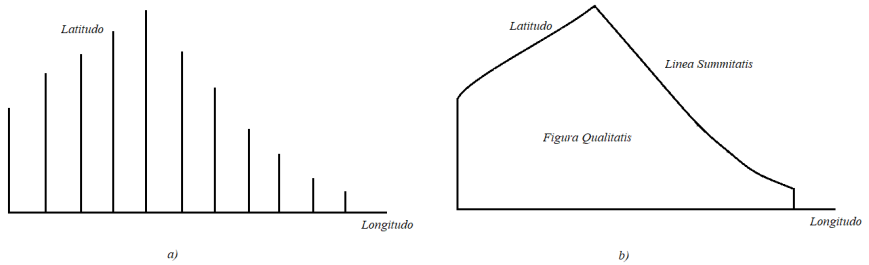



Abbildung 5.8: *Die Darstellung von Oresmes Hilfselementen zur grafischen Interpretation von Größen.*[28]

Abhängig davon, wie das *extensio* verläuft bzw. die Veränderung des Verlaufs des *longitudos*, werden Qualitäten verschieden bezeichnet. Dabei werden Folgende unterschieden: *qualitas punctualis*, *qualitas linearis*, *superficialis* und *corporalis*.[29] Diese Unterteilung hängt auch davon ab, wie das *subiectum* durch die Qualität hergegeben wird. Es ist zu erahnen, dass es sich hierbei um die Gruppierung von verschiedenen Funktionen handelt. So z. B. entspricht die *quantitas qualitatis* einer linearen Qualität einer Fläche, deren *longitudo* eine *linea in subiecto quali protracta* ist, was so viel bedeutet, dass das Subjekt selbst eine Linie ist. Hierbei kann jedoch ein gewisser Unterschied zwischen analytischer Geometrie und Oresmes Methode erkannt werden – er führte *longitudo* und *latido* so ein, dass damit nicht eine Lage in einem gewissen Punkt bestimmt werden konnte. Das, was für ihn hierbei einen Wert hatte, war die Summe der *latitudo* über dem *longitudo* (also die Fläche unter der Kurve).

Wichtig für diese Analyse ist genau dieses Darstellen von gewissen geometrischen Figuren, die in der Beschreibung von Bewegungsformen benutzt wurden. Jedoch muss hier erwähnt werden, dass Oresme nicht von geometrischen Figuren in dem Sinne geschrieben hatte, sondern von etwas, das er *uniformitas* und *difformitas* nannte. Jede uniforme

[28] Eigene Darstellung nach Oresme's *De latitudinibus formarum. Add: Blasius Pellecanus, Quaestiones super tractatus de latitudinibus formarum Nicolai Oresme (I, II)*, 1482

[29] Bei der *qualitas punctualis* beschränkt sich die Beschreibung auf einen Punkt, bei *qualitas linearis* auf eine Linie, bei *superficialis* auf eine Fläche und bei *corporalis* auf einen Körper.

Qualität kann mit einem beliebigen Rechteck dargestellt werden, während eine *uniformiter difforme* entweder mit einem Dreieck oder mit einem Trapez. Das bedeutet, wenn die Bewegung z. B. mit einer zeitlich unveränderlichen Größe beobachtet wird, verlaufen die *latitudo* parallel zueinander in einem bestimmten *longitudo*, wobei sie die gleiche Länge (Intensität) haben – was bedeutet der Verlauf von *latitudo* ist konstant in einem bestimmten *longitudo*. Jede andere Form von linearen Qualitäten nannte er *difformiter difform* und sie wurden von anderen Figuren dargestellt. Weiterhin gab er diesbezüglich diverse Möglichkeiten zur Anwendung:

> *Die erste Möglichkeit besteht in der Definition der qualitas uniformis als einer Qualität, die in allen Punkten des Subjekts gleiche Intensität hat*[...]*es sei eine Linie ab gegeben – die Betrachtung wird wieder auf die lineare Qualität beschränkt – und ein Punkt d, der sich regelmäßig, d. h. mit konstanter Geschwindigkeit, über diese Linie bewegt. Der Punkt sei Träger einer Qualität von konstanter oder wechselnder Intensität. Es soll weiter gelten, dass jeder Punkt (c) der Linie ab dieselbe Intensität derselben Qualität aufweist, die der Punkt d hat, wenn er bei seiner Bewegung mit e zusammenfällt.*[30]

Hierbei kann die Interpretation der Autorin Maier zugezogen werden, die behauptete, dass eine Linie durch die Bewegung von einem Punkt erzeugt wird. Ähnlich kann auch eine *qualitas linearis* durch die Bewegung einer *qualitas punctualis* entstehen. Wenn also $d$ während der gesamten Bewegung dieselbe Intensität hat, dann erzeugt es eine uniforme Qualität auf der Linie $ab$. Aber wenn sich die Intensität des Punktes $d$ regelmäßig ändert, dann entsteht eine *uniformiter difforme* Qualität. Sollte diese Veränderung jedoch unregelmäßig verlaufen, dann ist die Rede von *difformiter difforme*. Zusätzlich sollte noch erwähnt werden, dass diese unregelmäßige Veränderung mit einer veränderlichen Geschwindigkeit begleitet wird, sodass beide Unregelmäßigkeiten sich ausgleichen und eine *uniformiter difforme* Qualität entsteht.[31]

Mit anderen Worten und dem heutigen Verständnis von Bewegungsformen kann unter *uniformiter difforme* z. B. gleichförmig beschleunigte Bewegung und unter *difformiter difforme* ungleichförmig beschleunigte Bewegung verstanden werden.

Diese Differenzierung von Bewegung machte einen klaren Unterschied zwischen uniformer Bewegung (*qualitas uniformis*), uniform difformer Bewegung (*qualitas uniformiter difformis*) und difform difformer Bewegung (*qualitas difformiter difformis*). Genau das wird im zweiten Teil von Oresmes Traktat nähergebracht, wobei es um Bewegung im allgemeinen Sinn geht. Laut Oresme hat jede Bewegung in dreifacher Weise Qualität und

[30] Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, 1943, S. 297 – 298
Zur dieser Beschreibung gibt es keine Abbildung. Es handelt sich um eine sogenannte *ex imaginatione motus* (*die gedachte Bewegung*).

[31] Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, 1943, S. 298 – 299

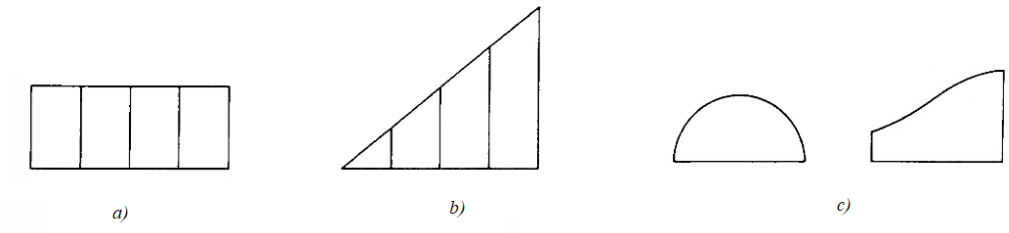



Abbildung 5.9: *Oresmes geometrische Darstellung von a) qualitas uniformis, b) qualitas uniformiter, c) qualitas difformiter difformis.*[32]

Kontinuität – nach der Ausdehnung (des *mobile*), der Ausdauer (*quantitas temporis*) und der Intensität der Geschwindigkeit.

Wie auch üblich für das 14. Jahrhundert, bezog sich auch Oresme in seiner Veröffentlichung auf die Formulierung der Geschwindigkeit:

> *Diejenige Geschwindigkeit ist grösser, durch die in derselben Zeit mehr von jener Vollkommenheit, d.h. von jener Kategorie erworben oder verloren wird, in der sich Bewegung vollzieht.* [Also bei der lokalen Bewegung würde das heißen:] *die Geschwindigkeit ist größer, durch die in der gleichen Zeit ein größerer Weg zurückgelegt wird; bei der Veränderung ist die Geschwindigkeit grösser, durch die in derselben Zeit mehr Intensität gewonnen oder verloren wird* [...][33]

Im Anschluss daraus folgte, dass die Summe aller Geschwindigkeiten in diesen unendlich kleinen Strecken, einer sogenannten *velocitas totalis* entspricht. Dies bezieht sich auf das sogenannte Theorem der Durchschnittsgeschwindigkeit, auch bekannt als die *Merton Regel*. Der Name *Merton* kommt von der Merton School, da die Mathematiker der Merton School die Ersten waren, die diese Regel angewendet hatten. Diese Regel wurde von Oresme geometrisch dargestellt und erklärt, deswegen findet kann es in der Literatur auch unter dem Namen Oresmes Regel gefunden werden.

> [...] *a uniformly difform quality is of the same or equal subject that is uniform according to the degree of the middle point of the same subject.*[...]*one should speak of velocity in completely the same fashion a linear quality, so long as the*

[32] Eigene Darstellung nach Oresme's *De latitudinibus formarum. Add: Blasius Pellecanus, Quaestiones super tractatus de latitudinibus formarum Nicolai Oresme (I, II)*, 1482

[33] Maier A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft*, 1943, S. 314
Aus diesem Zitat kann erkannt werden, dass die Begriffe Beschleunigung und Geschwindigkeit synonym gesetzt sind.

> *middle instant of the time measuring a velocity of this kind is taken in place of the middle point* [of the subject][34]

Oresmes Regel besagt, dass der Effekt einer dreieckigen Konfiguration einer rechteckigen Konfiguration entspricht, die die Intensität der Form (oder Qualität) im Mittelpunkt annimmt. Er zeigte, dass die Strecke, die ein Körper in einer konstanten Zeit bei gleichmäßiger Beschleunigung zurücklegt, der Strecke entspricht, die der Körper bei einer gleichmäßigen Geschwindigkeit zurücklegen würde. Dabei entspricht diese konstante Geschwindigkeit, der Geschwindigkeit, die der Körper nach der Hälfte der Zeit (bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung) hat. Das bedeutet, wenn die Geschwindigkeit bei der gleichförmigen Bewegung bspw. $v_0$ ist, würde bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung nach $t/2$ die Geschwindigkeit genau diesem Wert $v_0$ entsprechen. Das gilt unter der Voraussetzung, dass die Strecke, die in beiden Bewegungen zurückgelegt wurde, gleich ist und in gleicher Zeit zurückgelegt wurde. Aus heutiger Sicht könnte das mit einem Integral beschrieben werden. Die Momentangeschwindigkeit (wie es aus der heutigen Sicht ist) kann als Differentialquotient einer infinitesimalen Strecke, die der Körper in infinitesimal kleinen Zeit zurücklegt, betrachtet werden. Die Gesamtstrecke ist dann das Integral oder die Summe von unendlich vielen infinitesimalen Strecken, die der Körper in der Gesamtzeit zurücklegt. Der Beweis dieser Regel lautet folgendermaßen:

> *Let there be a quality imaginable by ABC, the quality being uniformly difform and terminated at no degree in point B. And let D be the middle point of the subject line. The degree of this point, or its intensity, is imagined by the line DE. Therefore, the quality which would be uniform throughout the whole subject at degree DE is imaginable by the rectangle AFGB... Therefore, it is evident by the 26th* [propositon] *of* [Book] *I* [of the Elements] *of Euclid that the two small triangles EFC and EGB are equal. Therefore the larger BAC, which designates the uniformly difform quality, and the rectangle AFGB, which designates the quality uniform of degree in the middle point, are equal. And this is what has been proposed.*[35]

Grafisch betrachtet, kann dieses Integral folgendermaßen gefunden werden: Beim Betrachten eines Koordinatensystems, in dem bspw. die Abszisse die Zeit und die Ordinate

[34] Damerow P., Freudenthal G., Mclaughlin P., Renn P.,*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*, 2004, Springer, S.19. Hier verweisen die Autoren auf: *De Configurationibus III.vii*, N. Oresme, 1968, 409f. *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft. Studien zur Naturphilosophie des 14. Jahrhunderts*, A. Maier, 1952, S. 334f and 347f, und *Introduction. Nicole Oresme and the de configurationibus qualitatum et motuum*, M. Clagett, Univ. of Wisconsin Press, 1968, p. 46

[35] Nicodemi O., *Galileo and Oresme: Who Is Modern? Who Is Medieval?*, Mathematics Magazine, Vol. 83, No. 1, 2010, S. 24 – 32

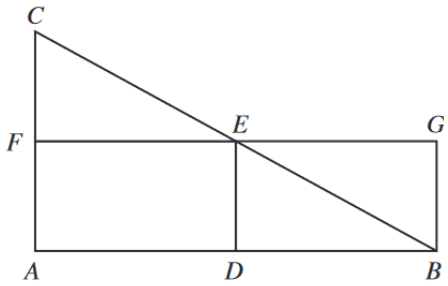



Abbildung 5.10: *Oresmes Regel.*[36]

die Geschwindigkeit darstellt. Wenn dabei für jeden beobachteten Augenblick eine entsprechende Geschwindigkeit aufgetragen wird, dann ist die Fläche, die dabei entsteht, die zurückgelegte Strecke. Genau das hat Oresme auch gemacht.[37] Es ist aus *Abbildung 5.10* offensichtlich, dass die Dreiecke $EFC$ und $EGB$ gleich sind. Dadurch ist es auch gewährleistet, dass die Fläche des Dreiecks $ABC$, was die gleichmäßig beschleunigte Bewegung darstellt, der Fläche des Rechtecks $AFGB$, was die gleichförmige Bewegung darstellt, entspricht.

1638 gab Galileo Galilei in seiner Veröffentlichung *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze* ein Theorem an, dass der Merton Regel ähnelt. Oresmes Darstellungen haben bei Galileo Galilei besondere Bewunderung hervorgebracht. Damit konnte relativ einfach das Prinzip hergeleitet werden, das Galileo Galilei in einem Brief an Sarpi als Schlüssel zum Verständnis der Bewegung formulierte. Die Distanz, die ein gleichförmig beschleunigter Körper zurücklegt, steigt mit der Bewegung mit dem Quadrat der Zeit an. Die Grundfläche der Figur muss dann nicht als grundlegende Qualität der Geschwindigkeit identifiziert werden, sondern als Ausdehnung in Abhängigkeit von der Zeit verstanden werden und als der Flächeninhalt, den die zurückgelegte Wegstrecke bildet.[38]

*Theorem I Proposition I*

> *Die Zeit, in welcher irgendeine Strecke von einem Körper von der Ruhelage aus mittels einer gleichförmig beschleunigten Bewegung zurückgelegt wird, ist gleich der Zeit, in welcher dieselbe Strecke von demselben Körper zurückgelegt würde*

[36] Eigene Darstellung nach Oresme.

[37] vgl. Maier A., *Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik, I.Band, Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert*, Edizioni di storia e letteratura, Roma, 1949, S. 131

[38] Bogen S., *Diagramm, Experiment und die Anschaulichkeit von Theorie: zur Schematisierung der Bewegung bei Galileo Galilei*, Das Mittelalter: Perspektiven mediävistischer Forschung, Das Mittelalter 2017; 22(2):431 – 455, S. 438

> *mittels einer gleichförmigen Bewegung, deren Geschwindigkeit gleich wäre dem halben Betrage des höchsten und letzten Geschwindigkeitswertes bei jener ersten gleichförmig beschleunigten Bewegung.*[39]

Dieses Theorem bezieht sich auf die *Abbildung 5.11 a)* und wurde von Galileo Galilei folgendermaßen beschrieben: Wenn ein Körper die Strecke $CD$ zurücklegt, mit der Annahme, dass der Punkt $C$ die Anfangsposition ist, aus der dieser Körper ohne Anfangsgeschwindigkeit beginnt, sich beschleunigt zu bewegen, wird die Zeit dieser Bewegung mit $AB$ gegeben. Der Zeitabschnitt wird in kleinere Abschnitte geteilt, die äquidistante Flächen darstellen, und dementsprechend die Zeitintervalle dieser Bewegung. Die Endgeschwindigkeit ist mit $EB$ gekennzeichnet. Wenn $A$ und $E$ verbindet werden, stellen die parallelen Linien (parallel zu $EB$) die Geschwindigkeitswerte dar. $EB$ soll halbiert werden (auf der Abbildung mit Punkt $F$ gekennzeichnet) und es soll eine Senkrechte gezogen werden, die bis zum Punkt $G$ geht, sodass die Fläche des Rechtecks $AGFB$ der Fläche des Dreiecks $AEB$ entspricht. Da die parallelen Linien auf $AB$ steigende Geschwindigkeitswerte darstellen, stellen die Werte im Rechteck konstante Geschwindigkeitsmomente dar.[40]

Um es näher zu beschreiben, innerhalb vom Dreieck $AEB$ kann die Veränderung der Geschwindigkeitswerte und im Parallelogramm $AGFB$ können die Geschwindigkeitswerte einer gleichförmigen Bewegung beobachtet werden (wie auf der *Abbildung 5.11 a)* gesehen werden kann, sind diese Linien gleich lang – also unverändert). Es ist auch zu erkennen, dass was an Bewegungsmomenten im ersten Zeitabschnitt gefehlt hat, wird durch die Parallelen in $IEF$ ersetzt. Das bedeutet, dass zwei Körper gleiche Strecken in gleicher Zeit zurücklegen, wenn angenommen wird, dass der erste Körper aus einem Ruhezustand gleichförmig beschleunigt wird (also freier Fall) und der andere sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt. Dabei hat die Geschwindigkeit der gleichförmigen Bewegung den halben Wert des Maximalwertes der Geschwindigkeit von der beschleunigten Bewegung.

*Theorem II Proposition II*

> *Wenn ein Körper von der Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrate der Zeiten.*[41]

Das entsprechende Diagramm für dieses Theorem ist auf der *Abbildung 5.11 b)* gegeben. Auf diesem Diagramm ist $HI$ die Strecke, die ein Körper bei einer gleichförmig beschleunigten Bewegung zurücklegt. Die Linie $AB$ ist der Verlauf der Zeit, die in Abschnitte $AD$, $AE$ usw. aufgeteilt ist. Die Strecke ist so aufgeteilt, dass die einzelnen Abschnitte dem jeweiligen Zeitabschnitt entsprechen (z. B. der Körper hinterlegt die Strecke $HL$

[39] Galileo G., *Galileo Galilei. Schriften–Briefe-Dokumente*, Mudry A., (Hrsg.), Albus VMA-Verlag Wiesbaden, 2005, S. 388

[40] vgl. Galileo G., *Galileo Galilei. Schriften–Briefe–Dokumente*, 2005, S. 388

[41] vgl. Galileo G., *Galileo Galilei. Schriften–Briefe–Dokumente*, 2005, S. 389

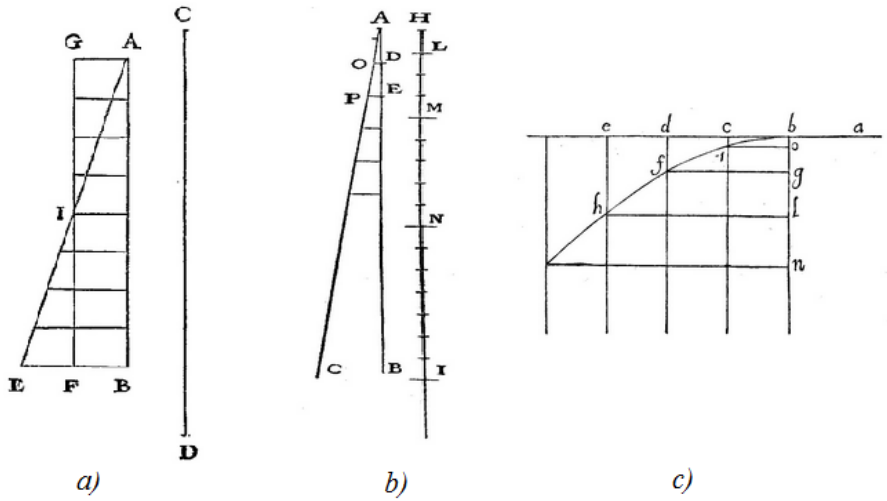



Abbildung 5.11: *Galileo Galileis Darstellung von Strecke, Zeit und Geschwindigkeit.*[42]

im Zeitabschnitt $AD$). Galileo Galilei behauptete, dass sich $MH$ zu $HL$ so verhält wie die Quadrate der Zeiten $EA$ und $AD$.[43] Wie schon im vorherigen Diagramm, wird unter einem gewissen Winkel[44] eine Linie $AC$ gezogen, womit die Endgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Mit dem Theorem I wurde schon gezeigt, dass die zurückgelegten Strecken bei gleichförmig beschleunigten Bewegungen und bei gleichförmigen Bewegungen gleich sind, wenn die Geschwindigkeit bei der beschleunigten Bewegung der halben Endgeschwindigkeit entspricht. Dies impliziert, dass $MH$ und $LH$ genauso groß sind, wie bei der gleichförmigen Bewegung der Körper mit den Geschwindigkeiten $\frac{1}{2}PE$ und $\frac{1}{2}OD$ in den Zeitabschnitten $EA$ und $DA$. Hierbei erscheint es relativ klar, dass Galileo Galilei Oresmes Regel verwendet hat. Galileo Galilei arbeitete Oresmes Konzept so weit aus, dass er weitere Anwendungsmöglichkeiten entwickelte.

Es gibt zahlreiche Zeitgenossen, die Hookes Arbeit an seiner geometrischen Interpretation der Federbewegung beeinflusst haben könnten (einige werden auch in der theoretischen Analyse erwähnt, da es sich womöglich auf konkrete Anwendungen von Methoden bezieht). Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die oben genannten geometrischen

[42] Galileo G., *Dialogues concerning two new science*, 1914 S. 173, 174, 249

[43] vgl. Galileo G., *Galileo Galilei. Schriften–Briefe–Dokumente*, 2005, S.389

[44] Galileo Galilei gibt hier keine konkreten Angaben zur Ermittlung des Winkels, aber anhand der Anwendung des Diagramms lässt sich vermuten, dass er von der Art des Skalierens der besagten Bewegung abhängt.

Interpretationen und Darstellungen von Bewegungsformen ein Grundstein für Hookes Arbeit repräsentierten.

### 5.3.2 Die theoretische Analyse

Aus seiner Biografie, seinen Arbeiten und seinem Tagebuch lässt sich entnehmen, dass Robert Hooke ehrgeizig die Forschung seiner Zeitgenossen nachverfolgte. Diese verwendete er für die Weiterentwicklung seiner eigenen Forschung. Ähnliches kann in *Lectures de Potentia* beobachtet werden. Die Diagramme, die die Quantitäten einer Federbewegung darstellen, sind offenbar durch die Anwendung der bereits bestehenden Geometriemethoden entstanden. In dieser Veröffentlichung wird aber auch ersichtlich, dass Hooke beim Schreiben von *Lectures de Potentia* auch gleichzeitig einen eigenen Weg in der Interpretation von Bewegung gegangen ist.

Im Gegensatz zu vielen anderen Zeitgenossen betrachtete Hooke, wie sich Quantitäten wie z. B. Geschwindigkeit und Strecke zueinander verhalten, um die Zeit als Quantität der Bewegung zu ermitteln. Auch aus heutiger Sicht ist es eher üblich, z. B. die Veränderung der Auslenkung in Abhängigkeit der Zeit darzustellen und nicht die Zeit in Abhängigkeit der Auslenkung.[45]

Mit der kommenden Interpretation wird nicht nur Hookes Methode analysiert, sondern auch mit dem heutigen Wissen verknüpft. Dadurch soll ein besseres Verständnis der Diagramme vermittelt werden. Zusätzlich wird mit historischen Einblicken und Einflüssen argumentiert. Es sei hier weiterhin erwähnt, dass es sich hierbei lediglich um eine mögliche Interpretation von Hookes Diagrammen handelt. Beim Beobachten des großen Diagramms und der darauf gekennzeichneten Strecke $AD$ (*Abbildung 5.12*), ist es offensichtlich, dass damit eine lineare Funktion von *Power* in Abhängigkeit von Auslenkung gegeben ist. Diese Funktion scheint nichts anderes zu sein, als die Form des Hookeschen Gesetzes, wie es heute bekannt ist. Das würde natürlich nicht weit von der Wahrheit entfernt sein, würde dieser Teil des Diagramms ein Koordinatensystem darstellen. Auf der Strecke $AC$ die x-Achse, die die Auslenkung darstellt und auf der zur Strecke $AC$ senkrechten Linie, die y-Achse, als die wirkende Kraft, die sich in diesem Fall wie die Funktion $AD$ verändert. Allerdings ist Hookes Beschreibung komplexer. Anhand von dem, was in der Veröffentlichung steht, kann nicht explizit von einem Koordinatensystem wie im heutigen Sinne die Rede sein. Hooke hat ausschließlich von Linien $CD$, $BE$, $BE$ &c geschrieben. Die Relevanz dieser Strecken ist die, dass sie bestimmte Flächen bilden. Das, was aus Hookes Beschreibung wichtig für die Interpretation erscheint, sind nicht diese Linien als Quantität, sondern die *aggregate of Powers*. Es ist nämlich genau diese *Quantität*, die er benutzt hat, um die Proportionalitäten zu anderen Größen herzuleiten.

[45] Um es deutlicher zu formulieren, Hooke hat in seiner Veröffentlichung die Funktionen $v(x)$ und $t(x)$ beschrieben. Das, was heute üblicherweise bei der Beobachtung der Schwingung dargestellt wird, sind die Funktionen $x(t)$ und $v(t)$.

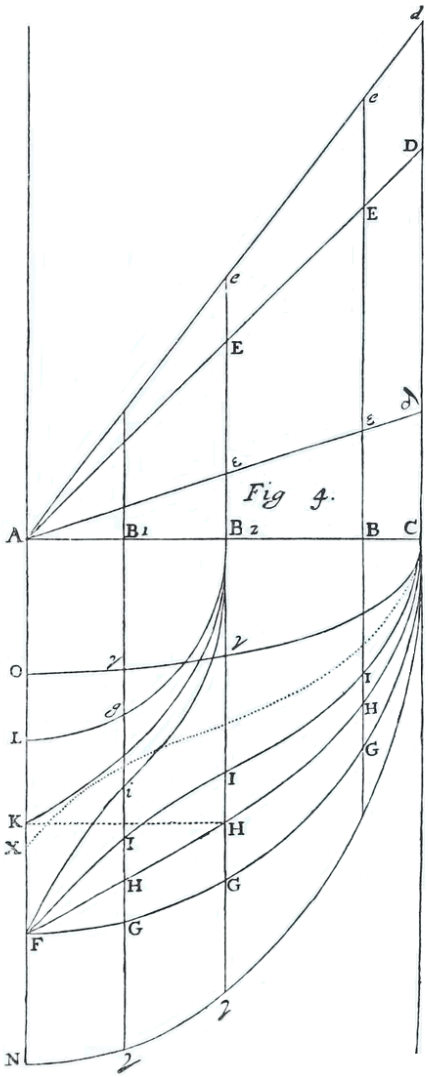



Abbildung 5.12: *Hookes großes Diagramm gekennzeichnet mit Fig.4.*[46]

[46]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678

> [...] *velocieties of any body moved are in subduplicate proportion to the aggregates of the powers impressed of these spaces; ...velocities of the parts of the space returned they will be always proportionate to the roots of the aggregates of the powers* [...][47]

Um es deutlicher darzustellen:

$$velocity \sim \sqrt{aggregate\ \ of\ \ Powers} \tag{5.5}$$

Das, was diese Gleichung darstellt, so scheint es, ist eher ein Verhältnis, das in Verbindung mit *Energiegrößen* gebracht werden kann, womit sich die *aggregate of Powers* und das dadurch entstandene Dreieck $ACD$ erklären lassen würden.

Der Inhalt der Protokolle der Royal Society zwischen 1662 und 1690 zeigt klar, dass sich nicht nur Hooke mit der Form einer *Bewegungsgleichung* beschäftigte, sondern auch seine Zeitgenossen. Zu der Zeit beschäftigten sich die Mitglieder der Royal Society ausgiebig mit der Frage, ob nun $mv$ oder $mv^2$ die Bewegung von Körpern beschreiben könnte. Aus heutiger Sicht ist es klar, dass beide eine Bewegungsgröße darstellen. Sei es nun die Energie oder der Impuls, beides gilt. Es ist bekannt, dass das Problem der Formulierung von quantitativen Größen im 17. Jahrhundert eine große Rolle gespielt hat. Es gab keine expliziten Vorstellungen von Konzepten wie Kraft, Arbeit oder Energie. In einem Brief vom 15. November 1638 schrieb Descartes an Mersenne:

> *I was so far from thinking of "force" as the power that we call a man's force when we say "This man has more force than that one etc." that it didn't enter my head that anyone would take it in that sense. And we say that one effect requires less force than another, this doesn't mean that less power is needed, for there would be no harm in having more power; it means merely that less action is required. In that paper, I was ... thinking only of the action that we call force that can raise a weight, whether the raising is done by a man, a spring, some other weight, or the like.*[48]

Aus diesem Teil des Briefes wird es ersichtlich, dass die damaligen Protagonisten eine vage Vorstellung davon hatten, dass es gewisse Unterschiede in den Bezeichnungen *force, power, action* usw. geben müsste. Verschiedene Quellen zu der Untersuchung von Bewegungsformen aus dem 17. Jahrhundert zeigen, dass die benutzten Begriffe kontextbezogen waren. Zwar war das Bewusstsein von bestimmten Größen vorhanden, doch war die Bedeutung der verwendeten Begriffe unklar.[49] Im Grunde bedeutet das, dass die historischen Forscher

[47] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 18

[48] Descartes R., *The Philosophical Writings of Descartes: Volume 3, The Correspondence*,translated by J. Cottingham, R. Stoothoff, D. Murdoch, A. Kenny, 1997, Cambridge University Press, S. 92

[49] Roche John J., *The Mathematics of Measurement*, 1998, S. 100

eine Vorahnung hatten, dass es etwas gibt, was die Bewegung bewirkt und etwas, was die Konsequenz davon ist. Zusätzlich war da noch etwas, was der Körper bereits in sich hatte, um Widerstand zu leisten. Das, was in ihren Interpretationen unklar bleibt, ist die Verwendung von den Begriffen *force, power, strength,...* Eine Möglichkeit der Interpretation kann durch Descartes Beschreibung der Proportionalität der Arbeit zur Fläche gewonnen werden:

> [...] *according to Descartes, it* [Action] *is proportional to the area of rectangle, one side of which represents the force and the perpendicular side represents the distance through which the force raises a body* [...] *he uses the concept of dimensions: action has two dimensions, while power has only one* [...] [50]

Diese Art von Interpretation der Größen könnte auch Hooke in seinem Diagramm der *Power* verwendet haben. Doch im Gegensatz zu Descartes nannte Hooke die Fläche nicht *Action*, sondern *aggregate of Powers*. Die *force* wäre in Hookes Diagramm mit *Power* zu vergleichen. Zumindest würde das eine plausible Erklärung geben, die auch mit dem heutigen Wissen verständlich wäre. Die Linien $CD$, $BE$, $B_2E$ und $B_1E$ stellte Hooke als *Powers* in gewissen Punkten der Auslenkung dar. Die Fläche des Dreiecks $ACD$, also das, was Hooke als *aggregate of Powers* beschrieben hat, ist die *Action* die diese *Powers* verursachen. Dass es sich in der Darstellung von *Power* und *aggregates of Powers* um zwei verschiedene Konzepte handelt, erklärte Hooke mit der folgenden Aussage:

> [...] *every point of the space of flexure hath a peculiar power, and consequently there being infinite points of the space, there must be infinite degrees of power* [...] *and consequently all those powers* [...] *added together into one sum, or aggregate, will be in a duplicate proportion to the space or degree of flexure.*[51]

Daraus würde sich herauslesen lassen, dass die *aggregate of Powers*, die proportional zum Quadrat der Auslenkung ist, eine dimensionale Form von *Spannenergie* darstellen könnte. Andererseits ist aber

> [...] *the force or power thereof to restore it self to its natural position is always proportionate to the Distance or Space it is removed therefrom* [...][52]

Das wiederum würde sich heute als das Hookesche Gesetz interpretieren lassen, in dem die Kraft zur Wiederherstellung vom Gleichgewicht proportional zu der Auslenkung ist. Es kann daher vermutet werden, dass Hooke bewusst die Begriffe differenzierte und einen physikalischen Unterschied zwischen diesen Begriffen sah.

[50] Bourdi J.C., *What was Mechanical about Mechanics. The Concept of Force between Metaphysics and Mechanics from Newton to Lagrange*, Springer, 2002, S. 41 – 59

[51] Hooke R.,*Lectures de Potentia*, 1678, S. 17

[52] Hooke R.,*Lectures de Potentia*, 1678, S. 4

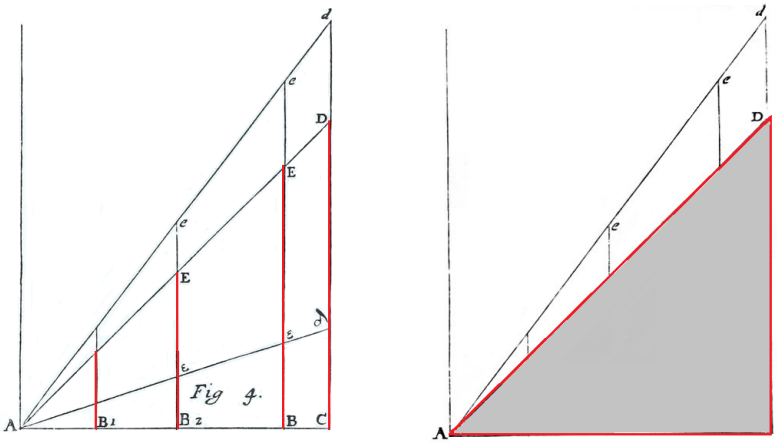



Abbildung 5.13: *Hookes Darstellung von Power und eigene Darstellung der Fläche die aggregate of Powers ist.*[53]

Aus dem ersten Teil des Diagramms kann schlussgefolgert werden, dass Hooke vermutlich, genau wie andere, den Merton Style der Darstellung verwendet hat. Wird es aus heutiger Perspektive betrachtet, kann erkannt werden, dass die *Power*, die mit Linien in gewissen Punkten dargestellt wurde, den Wert der *Power* in einer gewissen Position darstellt. Diese *Power* ist proportional zur Auslenkung. Wenn aber die Summe aller *Powers* betrachtet wird, wird im Grunde die Veränderung der *Power* durch die Veränderung der Position der Feder betrachtet, also

$$\sum powers \sim \int power \cdot ds \tag{5.6}$$

Das würde der *Qualitatis* von Oresmes Theorie entsprechen. Wenn Hooke tatsächlich Descartes so bewunderte, wie Waller es behauptet hat, lässt sich argumentieren, dass die *Power* die Kraft in der Form darstellt, wie sie später Newton formuliert hat. Die ist als *Linie* dargestellt und die *aggregate of Powers*, die eine Fläche bildet (*Abbildung 5.13*) als etwas, das eine Form einer *Energiegröße* hat. Das ermöglicht es einen Unterschied zwischen dem, was Hooke als *Force* oder *Power* und *aggregate of Powers* bezeichnete, zu erkennen. Mit dem zusätzlichen Bezug auf Oresmes Beschreibung der *Figura Qualitatis* und dem

[53]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

Vergleich dieser mit Hookes Beschreibung der *aggregate of Powers* kann vermutet werden, dass es sich bei er *aggregate of Powers* um eine *Figura Qualitatis* handelt.

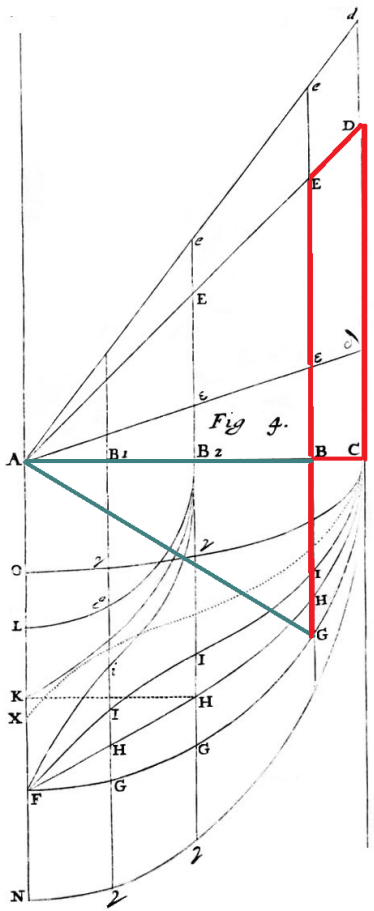



Abbildung 5.14: *Hookes Herleitung der Geschwindigkeit BG.*[54]

Mit der Entwicklung des Calculus ließe sich hier Folgendes herauslesen: Die Strecken $CD$, $B_1E$, $B_2E$ usw. stellen infinitesimale Kräfte dar, die auf die Feder in den entsprechenden Positionen ($B$, $B_1$, $B_2$ usw.) wirken. Die Summe dieser einzelnen Kräfte würde einem

[54]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

bestimmten Integral von z. B. Punkt $A$ bis $C$ entsprechen. Dieses bestimmte Integral entspricht der Fläche des Dreiecks $ACD$, die die einzelnen Kräfte bilden. Durch das Ermitteln dieser Fläche, wird die Arbeit bestimmt, die die Feder verrichtet hat.

Die Beschreibung der Diagramme setzte Hooke mit der Geschwindigkeit fort. Die Kurve, mit den Ordinaten, die die Geschwindigkeiten für einen besagten Punkt beschreiben, bekam er, indem er einen Viertelkreis zeichnete, dessen Radius $AC$ ist, *Abbildung 5.14*. Da $AC = AF$ ist, kann angenommen werden, dass das erste Set von Kurven eine Skalierung darstellt. Die Strecken, die dabei entstehen, also $B_1G$, $B_2G$ und $BG$, repräsentieren die Geschwindigkeiten, die die Feder in den jeweiligen Punkten auf der Strecke $CA$ hat. Diese Geschwindigkeiten müssen, so Hooke, immer in der gleichen Proportionalität zur Wurzel der Fläche des Trapezes $CDEB$ sein. Wenn zusätzlich für $AC = a$ und $AB = b$ genommen wird, soll gelten:

$$BG = \sqrt{aa - bb} \tag{5.7}$$

Aus der *Abbildung 5.14* ist zu erkennen, wie diese Gleichung (5.7) hergeleitet wurde. Beim genauen Hinsehen ist $AG = AC$, da die Kurve $CGGGF$ einem Viertelkreis entspricht. Mit der Anwendung von Pythagoras Theorem, kann für $BG$ die Gleichung (5.7) hergeleitet werden.

> [...] *these Lines BG, BG will represent the velocity of the Spring returning from C to B* [...] *the said ordinates being always in the same proportion with the roots of the trapezium CDEB...*[55]

Was Hooke hier angegeben hat, ist, dass eine *Fläche*, und zwar eine Fläche von einem Trapez, dem Quadrat der Geschwindigkeit entspricht. Wenn hierbei auf Descartes Prinzip zurückgegriffen wird und die Fläche als die Summe von gewissen Größen interpretiert, kann eine Äquivalenz erkannt werden. Demnach entspricht bspw. jeder Geschwindigkeit, in einem betrachteten Moment eines Intervalls der Schwingung der Feder, eine Wurzel der *aggregate of Powers*. Da die *aggregate of Powers* eine Fläche darstellt, entspricht die Geschwindigkeit der Wurzel einer Fläche. Laut dem Hookeschen Gesetz ist die *Power* proportional zur Auslenkung, das bedeutet, $CD \sim AC$ und dementsprechend auch $BE \sim AB$. Allgemein betrachtet, können hierfür die Gleichungen $BE = n \cdot AB$ und $CD = n \cdot AC$ verwendet werden. Dabei ist $n \in \Re^+$. Die Geschwindigkeit ist proportional zur Wurzel der Fläche $CDEB$. Durch die gegebenen Bedingungen für die Seiten $AC$ und $CD$ ist die Fläche leicht zu ermitteln.

Bei der Beobachtung der Darstellung auf der *Abbildung 5.15*, ist zu erkennen, dass

$$CDEB = BE \cdot BC + \frac{1}{2} \cdot BC(CD - BE) \tag{5.8}$$

[55] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 19

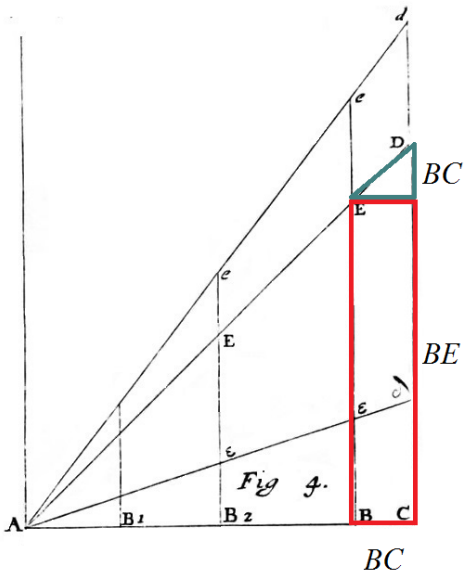



Abbildung 5.15: *Die Fläche des Trapezes CDEB, dessen Wurzel der Geschwindigkeit BG entspricht, siehe Abbildung 5.14.*[56]

oder

$$CDEB = BC(BE + \frac{1}{2}CD - \frac{1}{2}BE) = \frac{1}{2}BC(BE + CD) \tag{5.9}$$

gilt. Wird dabei die oben genannten Proportionalitäten $CD = n \cdot AC$ und $BE = n \cdot AB$ eingesetzt, ergibt sich mit $BC = AC - AD$:

$$CDEB = \frac{1}{2}nBC(AB + AC) = \frac{1}{2}n(AC - AB)(AB + AC) \tag{5.10}$$

bzw.

$$CDEB = \frac{1}{2}n(AC^2 - AB^2) \tag{5.11}$$

Da die Geschwindigkeit die Wurzel dieser Fläche ist, gilt

$$\sqrt{CDEB} = \sqrt{\frac{1}{2}n(AC^2 - AB^2)} \tag{5.12}$$

[56]Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

Wenn nun, wie auch Hooke vorgab, die Gleichungen $AC = a$ und $AB = b$ in (5.12) eingesetzt werden, kann erkannt werden, dass der Faktor $n$ den Wert 2 haben muss, damit die Gleichung (5.7) gewährleistet wird. Demnach ist die Aussage, grafisch betrachtet, in diesem speziellen Fall richtig. Dieses *aggregate of Powers* entspricht dem Quadrat der Geschwindigkeit.[57] Der hierbei eingefügte Faktor $n$ kann als die Härtekonstante (Federkonstante) interpretiert werden. Das lässt vermuten, dass Hookes Herleitung hauptsächlich auf geometrischen Methoden beruht, da aus der Gleichung (5.12) eindeutig die Relevanz des Faktors $n$ zu erkennen ist. Die Frage ist, war sich Hooke dessen bewusst, dass, physikalisch betrachtet, in seiner Gleichung (5.7) ein weiterer Faktor fehlt? Wenn auf der linken Seite der Gleichungen (5.7) und (5.12) die Geschwindigkeit ist, braucht es einen Faktor, der die Einheit $s^{-1}$ beinhaltet, andererseits wäre die Einheit für die Geschwindigkeit $m$. Die Analyse der anderen Größen wird zeigen, ob Hooke vielleicht einen Fehler gemacht hat, oder ob es sich hierbei lediglich um eine geometrische Darstellung handelt, die, physikalisch betrachtet, nicht ganz zulässig ist. Nach Hookes Beschreibung stellen die Strecken $Cd$ und $C\delta$ die *Power* dar, die auf andere Federn wirken müssten, um sie in den Punkt $C$ auszulenken. Das kann sich nur auf die Verwendung von Federn mit verschiedenen Härten beziehen. In dem Sinne kann der oben verwendete Faktor $n$, als ein Faktor gesehen werden, der die verwendete *Power* $CD$ verringert oder vergrößert, um verschieden harte Feder bis zum Punkt $C$ auslenken zu können. Zusätzlich kann noch hinzugefügt werden, dass geometrisch betrachtet, dieser Faktor $n$ genau die Länge dieser Strecken beeinflusst. Demnach würde die Interpretation der Geschwindigkeit und der *aggregate of Powers*, sowohl physikalisch als auch geometrisch betrachtet, Sinn ergeben.

Was sich weiter vermuten lässt, ist, dass die Kurven an sich nicht unbedingt relevant in der Analyse der Quantitäten sind, sondern tatsächlich nur die Verhältnisse von ähnlichen Dreiecken (*Abbildung 5.16*). Bei einer genauen Betrachtung von Hookes Beschreibung, kann erkannt werden, dass er hauptsächlich von Verhältnissen von Strecken geschrieben hat. Die Kurven könnten nur das Ergebnis der Zusammenstellung der erhaltenen Ordinaten sein. In der Beschreibung gab er lediglich an, dass er eine *Parabola* ($CHHHF$) zeichnet, dessen Wendepunkt in $C$ ist und durch den Punkt $F$ verlaufen soll. Die Bedingungen könnten auch eine Form von Skalierung bedeuten. Dadurch wird vermutlich gewährleistet, dass die *Parabola* durch die gleichen Endpunkte verläuft wie die Geschwindigkeitskurve.

In Hookes Interpretation sind die Geschwindigkeiten durch die *aggregate of Powers* bestimmt worden. Da er das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Auslenkung (Strecke) in einem quadratischen Verhältnis beschrieben hat, kann es sich bei der *Parabola* um eine Art Hilfsparabel handeln, durch die es leichter ist, ein Verhältnis zweier Quantitäten grafisch darzustellen. Hierbeisollte bedacht werden, dass Hooke durch die Geometrie etwas beschrieben hat, das heute mithilfe einer Differenzialgleichung dargestellt wird.

[57] Mit dem wissenschaftlichen Fortschritt des 20. Jahrhunderts würde das bedeuten, dass die Gleichung $v^2 \sim \int F ds$ gewährleistet ist.

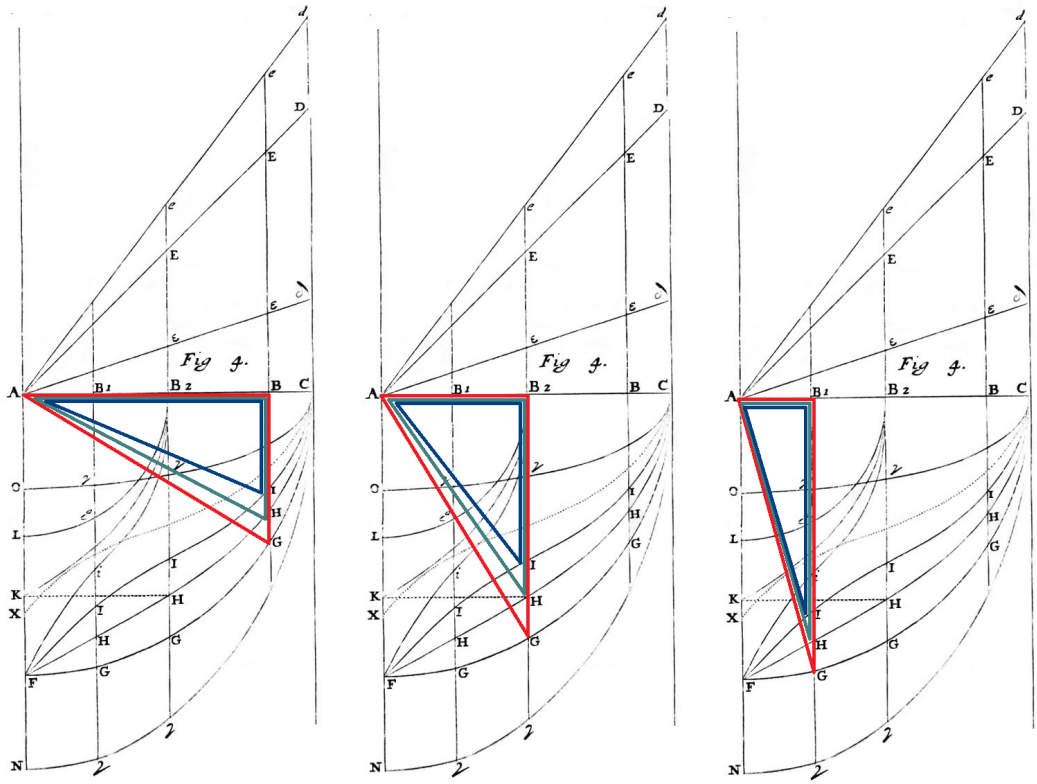



Abbildung 5.16: *Durch das Verhältnis von ähnlichen Dreiecken entstanden womöglich die Ordinaten der gegebenen Kurven.*[58]

> [...] *since the velocity is the same proportion to the root of the space, as the root of the space is to time* [...] *lines BE, BE, CD will be in the same proportion with the length of the spring AB, AB, AC* [...] *the ordinates of this parabola BH, BH, AF are in the same proportion of the roots of the spaces CB, CB, CA.*[59]

Es besteht hier die Möglichkeit, dass Hooke bewusst die Größen *Power* und *aggregate of Powers* außerhalb des unteren Teiles des Diagramms dargestellt hat. Im oberen Bereich

[58] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.
[59] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 19

kann das Federgesetz so interpretiert werden, wie es heute formuliert wird, also

$$F = const \cdot x \tag{5.13}$$

bzw. dass die *Power* proportional zum *space* ist. Das zeigte Hooke auch im oberen Teil des Diagramms, womit auch die Linearität offensichtlich gegeben ist. Das bedeutet, dass $AC$ eine lineare Funktion der *Power* darstellt, in Abhängigkeit von der Strecke (Auslenkung) $x$. Auf der anderen Seite ist es möglich, mit dem heutigen Wissen, die Gleichung

$$aggregate\ \ of\ \ Powers = \int_{x}^{x+\Delta x} power \cdot dx \sim x^2 \tag{5.14}$$

aus dem Diagramm zu lesen. Immerhin kann es als die Summe aller *Power* beobachtet werden. Diese Summe wurde auch vor dem *Calculus*, als die Summe von senkrechten Linien auf der veränderlichen Größe bezeichnet. Die besagte veränderliche Größe wurde oftmals in Form einer horizontalen Linie dargestellt. Demnach wäre die Summe im Grunde nichts weiter, als eine Vorstellung von etwas, das heute mit *Energiegrößen* bezeichnet werden kann, wobei die horizontale Linie $AC$ die Auslenkung (*space*) darstellt. Dabei ändert sich diese Summe mit $space^2$, womit Hooke auch argumentierte, bevor er das Diagramm beschrieben hatte.

> *And consequently all those powers beginning from nought, and ending at the last degree of tension or bending, added together into one sum, or aggregate, will be in duplicate proportion to the space bended or degree of flexure; that is, the aggregate of the powers of the Spring tended from its quiescent posture by all the intermediate points to one space (be it length you please) is equal, or in the same proportion to the square of one (supposing the said space infinitely divisible into the fractions of one;) to two, is equal, or in the same proportion of the square of two, that is four;* [...] *and so onwards in an Arithmetical proportion, being the degrees or excesses b which these aggregates exceed one another.*[60]

Das bedeutet nichts weiter als:

$$aggregate\ \ of\ \ Powers \sim space^2 \tag{5.15}$$

Interessanterweise wird eine vergleichbare Struktur erhalten, die heute als Energie einer Feder bezeichnet wird. Wenn mit dem heutigen Wissen bspw. die potentielle Energie berechnet werden soll, wobei die Auslenkung vom Punkt $C$ zu $B$ beschränkt ist, wird folgende Gleichung verwendet:

[60] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 17

$$E = -\int_{AC}^{AB} F dx = \frac{const \cdot x^2}{2}\Big|_{AB}^{AC} = \frac{const}{2}(AC^2 - AB^2) \tag{5.16}$$

Beim Betrachten der Gleichungen (5.11) und (5.16) kann erkannt werden, dass $E$ hiermit im Verhältnis zum Quadrat der Geschwindigkeit ist. Damit kann gesagt werden, dass die maximale kinetische Energie der maximalen potentiellen Energie entspricht:

$$E \sim \sqrt{\frac{const}{2}(AC^2 - AB^2)} \sim \frac{const}{2}v^2 \tag{5.17}$$

Es hat den Anschein, dass Hooke eine genaue Vorstellung von dem hatte, was er als *Power* und *aggregate of Powers* formulierte. Er hatte bspw. in der Formulierung seines Gesetzes nicht *aggregates of Power* verwendet, sondern *Power*. Unabhängig davon, dass die Entwicklung des Energie- und Arbeitskonzeptes in, damals, ferner Zukunft lag, hatten Hooke und seine Zeitgenossen gewiss eine Vorstellung von einer Quantität, die ein Körper besitzt, um sich z. B. fortzubewegen oder einer Wirkung Widerstand zu leisten. Allein die Tatsache, dass in den Protokollen der Royal Society immer wieder über die sogenannte *Bewegungsgleichung* geschrieben wurde, zeigt, dass sich die Mitglieder der Royal Society mit dem Problem dieser, noch nicht formulierten, *Quantität* beschäftigt hatten.

Das Diagramm scheint so konzipiert zu sein, dass oberhalb der Strecke $AC$ die dynamischen und unterhalb der Strecke die kinematischen Größen dargestellt worden sind.

Das, was noch unklar bleibt, ist die Bedeutung oder der Sinn der *Parabola*, die die Funktion $\sqrt{space}$ darstellen soll. In seiner Beschreibung sind sowohl die Geschwindigkeitskurve als auch die *Parabola* proportional zur Wurzel der Strecke. Die *Parabola* entsteht aus der Proportionalität

$$\frac{BH}{\sqrt{CB}} = \frac{B_2H}{\sqrt{CB_2}} = \frac{AF}{\sqrt{CA}} \tag{5.18}$$

Durch die Umstellung bspw. der Gleichung (5.18), mit der Voraussetzung, dass $AF = CA$ ist, gilt:

$$BH = \sqrt{CA} \cdot \sqrt{CB} \tag{5.19}$$

Analog gilt das für die anderen Ordinaten. Bei genauer Betrachtung von Hookes oben beschriebener Proportionalität und der Bedingung, dass die Kreiskurve und die *Parabola* durch die Punkte $C$ und $F$ verlaufen, lässt sich vermuten, dass hier lediglich eine Methode aus der Geometrie verwendet wurde. Die Bedingung, dass sich die Kreiskurve und die *Parabola* auf diese Art schneiden, wird durch die sogenannte *Menaechmus Regel*[61]

[61] Heath T., *A history of Greek Mathematics*, Oxford at the Clarendon press, 1921, S. 252

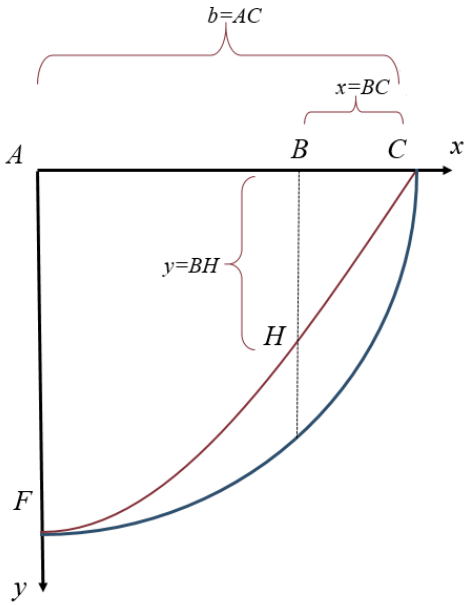



Abbildung 5.17: *Menaechmus Regel die Hooke möglicherweise benutzt hat um zu gewährleisten, dass sich seine Kreiskurve und die Parabel in den Punkten C und F schneiden.*[62]

gewährleistet. Diese Regel besagt, wenn zwei veränderliche Größen $x$ und $y$ in einer Form proportional zueinander sind und sie sich zwischen zwei Strecken $a$ und $b$ befinden, sodass

$$a : x = x : y = y : b \tag{5.20}$$

gilt, dann sind folgende Gleichungen gegeben

$$x^2 = ay \qquad y^2 = bx \qquad xy = ab \tag{5.21}$$

Dann wäre in Hookes Diagramm z. B. $a = AC$ und $b = AF$. Dabei haben hier $a$ und $b$ den

[62] Eigene Darstellung nach Menaechmus. Menaechmus (geboren 380 v. Chr, gestorben um 320 v. Chr.) war ein griechischer Mathematiker. Menaechmus ist berühmt für seine Entdeckung der Kegelschnitte, und er war der Erste, der zeigte, dass Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln durch das Schneiden eines Kegels eine nicht parallele Ebene bilden.

gleichen Wert. Die ersten beiden Funktionsformen in der Gleichung (5.21) sind identisch in ihrem Verlauf und beide sind direkt proportional zu $a$ und $b$. Beim Vergleichen z. B. der Funktion $y^2 = bx$ mit der Gleichung (5.19), kann Folgendes erkannt werden:

$$BH^2 = AC \cdot CB \iff y^2 = bx \tag{5.22}$$

Das wird dadurch unterstützt, dass $CB$ eine Auslenkung darstellt und in dem Sinne der Beobachtung die Veränderliche ist. Um eine *Parabola* für die im Diagramm gegebenen Punkten zu ermitteln, hätte Hooke z. B. für $x$ die Werte der beobachteten Auslenkungen nehmen können (z. B. $CB$, $CB_1$, $CB_2$ usw.). Angesichts der Tatsache, dass Hooke in seiner Beschreibung der Diagramme vorerst die Bedingung voraussetzte, dass $AC = AF$ ist und, dass die *Parabola* die Punkte $C$ und $F$ schneidet, kann vermutet werden, dass $b$ das Ergebnis solcher Bedingungen ist. Bei der Annahme, dass bspw. $AC = AF$ gelten muss, kann das nur dann gewährleistet sein, wenn $b = AC$ ist

$$AF^2 = b \cdot AC \implies b = AC \tag{5.23}$$

In seiner Beschreibung gibt es keine weiteren Angaben zu der Bedeutung der *Parabola*. Es ist fraglich, ob diese *Parabola* einen physikalischen Nutzen zeigen soll oder ob es nur als geometrisches Hilfsmittel zur Ermittlung der Zeitkurve dient. Durch die Gleichung (5.22) ist zwar der geometrische Aspekt durchaus gegeben, jedoch physikalisch und dementsprechend dimensional betrachtet, ist es falsch. Wenn $BH$ die Wurzel einer Strecke darstellt und $AC$ und $CB$ Streckenabschnitte, kann die Gleichung (5.22) physikalisch nicht gegeben sein. Die geometrische Methode, die Hooke offensichtlich verwendet hatte, stimmt vollkommen überein und kann nachvollzogen werden. Diese Tatsache erschwert die Interpretation, da aus Hookes Herleitung (Beschreibung) nicht nur von einer geometrischen Methode ausgegangen werden kann. Physikalisch betrachtet, stimmen die Größen *Power, Force, aggregate of Powers* relativ gut überein mit den Verhältnissen zu der Geschwindigkeit und der Auslenkung.

Anhand des Mangels von Informationen zu der *Parabola*, erscheint sie nur den Zweck zur Ermittlung der Zeitordinaten zu erfüllen. Ein weiteres Argument, für diese Vermutung, sind Hookes eigene Worte:

> *Now since the Velocity is in the same proportion to the root of the space, as the root of the space is to time, it is easy to determine the particular time in which every one of these spaces are passed for dividing the spaces by velocities corresponding the quotients give the particular times.*[63]

[63] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 17

Aus diesem Grund wird während der weiteren Interpretation, der *Parabola* keine physikalische Bedeutung für die Beschreibung der Federschwingung gegeben. Die Zeitordinaten ergeben sich lediglich aus der Proportionalität

$$GB : HB = HB : IB \tag{5.24}$$

Die Kurve $CIIIF$ stellt die Zeitkurve dar und die jeweiligen Ordinaten $IB$, $IB_2$ und $IB_1$ die Zeit, die die Feder benötigt, um vom Punkt $C$ bis zu den besagten Punkt $B$, $B_2$, $B_1$ zu gelangen. Es ist zu vermuten, dass durch die verwendete Skalierung und somit der Tatsache, dass jede Quantitätskurve sowohl durch $C$ als auch durch $F$ verläuft, die Kurve $CIIIF$ die Form des Buchstaben $S$ einnimmt. Die Ordinaten dieser S-Kurve bekam Hooke aus der Proportionalität

$$velocity : \sqrt{space} = \sqrt{space} : time \tag{5.25}$$

Nachdem er diese Zeitkurve bekommen hat, scheint es so, als hätte Hooke das bekommen, worauf er hinauswollte: die Zeit mithilfe einer Federbewegung ermitteln. Da Oresmes Interpretation von Bewegungsformen mit Hilfe von geometrischen Formen bekannt war, liegt die Vermutung darin, dass mit der Darstellung eines *Dreieck Verhältnis* der Größen *Power* und der Auslenkung, Hooke wusste, dass es sich hierbei um eine ungleichmäßige Bewegung handelt. Durch die Tatsache, dass diese S-Kurve mithilfe des Verhältnisses (5.25) ermittelt wurde, kann schwer erschlossen werden, welche *Zeit* diese Kurve überhaupt darstellt. Hooke hat zwar geschrieben, dass die Ordinaten jeweils die Zeit für die besagten Streckenabschnitte darstellen, aber so ganz offensichtlich erscheint es nicht, da sich bspw. ein Wendepunkt innerhalb der besagten Bewegung von $C$ nach $A$ befindet. Da Hooke eine viertel Schwingung beschrieben hat, müsste, aus heutiger Sicht, dieser Wendepunkt bspw. im Punkt $F$ sein. Ist Hooke hierbei ein Fehler unterlaufen oder gibt es eine physikalische Erklärung seiner Darstellung der Zeitkurve?

Im Folgenden wird versucht, Hookes Methode der Darstellung mithilfe vom heutigen Wissen und den heutigen Methoden der Darstellung zu verknüpfen. Die Darstellung der besagten Kurven aus Hookes Diagramm können heute mit folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$x(t) = x_0 \sin \omega t \tag{5.26}$$

für die Veränderung der Position $x(t)$, die von der maximalen Auslenkung (also der Amplitude) $x_0$ und der Zeit $t$ abhängig ist. Die Kreisfrequenz $\omega$ ist für eine besagte Schwingung konstant und entspricht

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{5.27}$$

wobei die Periodendauer $T$ von der Federhärte $D$ der verwendeten Feder abhängig ist. Die Gleichung für die Veränderung der Geschwindigkeit bei einer Schwingung ist mit

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = x_0 \omega \cos \omega t \tag{5.28}$$

gegeben. Sowohl die Gleichung (5.26) als auch die Gleichung (5.28) sind Funktionen, die sich mit der Zeit ändern. Hooke aber, hat in seiner Veröffentlichung nicht den Verlauf mit der Veränderung der Zeit beschrieben, sondern mit der Veränderung der Auslenkung, bzw. der Position der Feder. Das bedeutet, um zu verstehen, was in Hookes Diagramm tatsächlich die S-Kurve darstellen könnte, ist es nötig den Verlauf $v(x)$ und $t(x)$ zu ermitteln.

Nach Hookes Beschreibung war der erste Schritt, die Geschwindigkeit darzustellen. Durch die Umstellung der Gleichung (5.26) nach $t$, kann die Zeit $t$ als Funktion der Auslenkung $x$ dargestellt werden:

$$t(x) = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{x}{x_0} \tag{5.29}$$

Wird dieses $t$ nun in die Gleichung (5.28) eingesetzt, kann die Geschwindigkeit $v$ als eine Funktion der Auslenkung $x$ dargestellt werden:

$$v(x) = x_0 \omega \cos(\arcsin \frac{x}{x_0}) \tag{5.30}$$

Wenn dabei in Betracht gezogen wird, dass

$$\cos(\arcsin x) = \sqrt{1 - x^2} \tag{5.31}$$

gilt, kann die Gleichung (5.30) in folgender Form geschrieben werden

$$v(x) = \omega x_0 \sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2} \tag{5.32}$$

oder

$$v(x) = \omega \sqrt{{x_0}^2 - x^2} \tag{5.33}$$

Diese Gleichung ergibt die Kurve der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Auslenkung $x$. Beim genaueren Betrachten dieser Gleichung (5.33), kann die Ähnlichkeit mit der Gleichung, die Hooke für die Ordinaten der Geschwindigkeit gegeben hatte, bemerkt werden. Es gilt nämlich:

$$BG = \sqrt{AC^2 - AB^2} \tag{5.34}$$

Bei der weiteren Ausführung der Interpretation mithilfe heutiger Gleichungen, werden die Werte für die Variable $x$ so ausgewählt, dass sie den Werten einer *sin* Funktion entsprechen. Auf diese Art und Weise ergibt sich vielleicht die Möglichkeit, Hookes Kurven besser mit dem heutigen Wissen zu verknüpfen und damit zu verstehen, welche physikalische Bedeutung sich hinter Hookes Darstellung befindet. Zu diesem Zweck können die Werte aus der Tabelle 5.1 verwendet werden.

Tabelle 5.1: *Abhängigkeit der Geschwindigkeit nach der Auslenkung*

| $\boldsymbol{x}$ | 0 | $\frac{1}{2}x_0$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}x_0$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}x_0$ | $x_0$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $\boldsymbol{x^2}$ | 0 | $\frac{1}{4}x_0^2$ | $\frac{1}{2}x_0^2$ | $\frac{3}{4}x_0^2$ | $x_0^2$ |
| $\boldsymbol{v(x)}$ | $\omega x_0$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}\omega x_0$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}\omega x_0$ | $\frac{1}{2}\omega x_0$ | 0 |

Die Tatsache, das die Geschwindigkeit den maximalen Wert für $x = 0$ hat, soll nicht für Verwunderung sorgen. Der Grund dafür ist, dass der Startpunkt der beobachteten Bewegung im Punkt $C$ liegt und nicht in $A$. Die Strecke $CA$ ist die Amplitude. Wenn also der Wert für $x$ in null liegt, bedeutet das, dass die Feder eine Strecke $CA$ zurückgelegt hat, um in $A$ anzukommen. Deswegen ist beim Wert $x_0$ die Geschwindigkeit null, weil in $C$ die Schwingung beginnt. Außerdem ist das der Augenblick, in dem die Bewegung die Richtung ändert. Die Werte für $x$ sind über $x_0$ (Amplitude) dargestellt, damit die Darstellung leichter nachzuvollziehen ist. Außerdem wird die Veränderung der Position nicht mithilfe eines Koordinatensystems betrachtet, sondern mithilfe von Abschnitten der Strecke $CA$. Da $CA$ in Hookes Beschreibung die maximale Auslenkung darstellt, gilt $CA = x_0$. Anhand der Werte von $x^2$ ist zu erkennen, dass es sich linear verändert. Um die Kurve für die Zeit herzuleiten, wies Hooke darauf hin, eine *Parabola* $CHHHF$ auf das Diagramm so aufzutragen, dass sie die Strecke $AF$ im Punkt $F$ und die Strecke $CA$ im Punkt $C$

schneidet. Nachdem Hooke die Geschwindigkeitskurve und die Kurve, die er *Parabola* nannte, ermittelte, wies er darauf hin, dass es damit nur noch genügt, die Proportionalität (5.25) zu verwenden, um die Zeitkurve zu bekommen. Wenn nun diese Proportionalität verwendet wird, um die Zeit zu ermitteln, könnten die Werte, die in der Tabelle 5.2 gegeben sind, erhalten werden.

Tabelle 5.2: *Veränderung der Geschwindigkeit und der Zeit nach Auslenkung*

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $\boldsymbol{x}$ | 0 | $\frac{1}{2}x_0$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}x_0$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}x_0$ | $x_0$ |
| $\boldsymbol{x^2}$ | 0 | $\frac{1}{4}x_0^2$ | $\frac{1}{2}x_0^2$ | $\frac{3}{4}x_0^2$ | $x_0^2$ |
| $\boldsymbol{v(x)}$ | $\omega x_0$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}\omega x_0$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}\omega x_0$ | $\frac{1}{2}\omega x_0$ | 0 |
| $\boldsymbol{t(x)}$ | $\frac{1}{\omega}0$ | $\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{1}{\omega}$ | $\frac{1}{\omega}$ | $\sqrt{3}\frac{1}{\omega}$ | $\frac{1}{\omega}\infty$ |

In der Tabelle 5.2 wurde der Faktor $\frac{1}{\omega}$ bei den Werten 0 und $\infty$ mit Absicht stehen gelassen, um die weitere Interpretation deutlicher zu gestalten. Beim genauen Hinsehen der Werte, die in der Tabelle 5.2 gegeben sind, kann ein Muster erkannt werden. Die einzelnen Positionen von $x$ wurden mit Absicht so ausgewählt, dass sie jeweils den Werten einer *sin* Funktion im Intervall $[0, \frac{\pi}{2}]$ entsprechen. Demnach stellen die Werte für $v$ offensichtlich eine *cos* Funktion dar. Soweit nichts Ungewöhnliches. Beim Fortsetzen von Hookes Methode, werden für $t$ die Werte einer *tan* Funktion erhalten. Hierbei sollte der Gedanke festgehalten werden, dass Hookes Diagramm kein Koordinatensystem ist und, dass es sich hierbei, um eine Interpretation mithilfe von Verhältnissen handelt. Aus den Werten der Tabelle 5.2 lässt sich entnehmen, dass für den Wert $x = 0$, die Zeit $t$ auch 0 ist. Physikalisch ist es auch richtig, da das der Initialpunkt der Bewegung darstellt. Wenn die Feder aber losgelassen wurde und sie zum Punkt $A$ ankommt, hat $x$ den Wert $x_0$, da sie ja die Strecke $CA$ zurückgelegt hat. Die Zeit für diesen Punkt beträgt $\infty$. Das bedeutet, dass die Zeit immer zunimmt, während der beobachteten der Bewegung. Es wäre durchaus möglich, dass wegen der bereits bekannten Werte dieser Funktionen in den entsprechenden Winkeln, Hooke genau deswegen fünf signifikante Punkte benutzte. Es könnte sein, dass Hooke etwas darstellte, dass wir heute mit einer Projektion einer Schwingung auf einem Einheitskreis (*Abbildung 5.18*) verbinden könnten. Dieses Argument wird auch dadurch unterstützt, dass

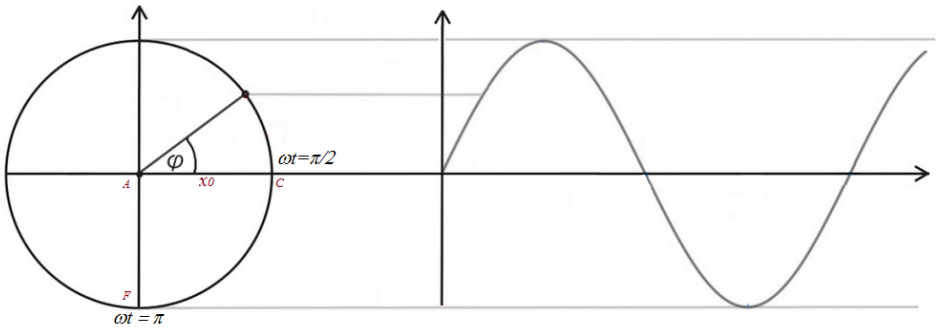



Abbildung 5.18: *Die Projektion einer harmonischen Schwingung auf einem Einheitskreis.*[64]

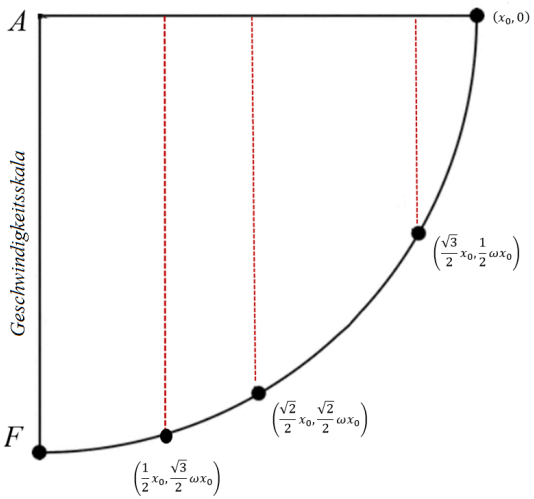



Abbildung 5.19: *Das Viertel eines Einheitskreises mit den Werten der Geschwindigkeit, wobei AF die Geschwindigkeitsskala darstellt, die direkt proportional zu ω ist.*[65]

die Gleichung (5.34), die auch Hooke als Geschwindigkeitskurve veröffentlicht hat, nichts weiter ist als die Funktion eines Kreises. Der Einheitskreis könnte auch eine mögliche

[64] Eigene Darstellung einer Projektion der harmonischen Schwingung.
[65] Eigene Darstellung der Geschwindigkeitskurve mithilfe der Tabelle 5.2.

Erklärung für Hookes Skalierung sein. Für den besagten Viertelkreis wären die Werte für die Geschwindigkeit im Intervall $[\frac{\pi}{2}, \pi]$. Wenn vermutet wird, dass Hooke die Größen, die er beschrieben hat, auf ein *Einheitskreis* projizierte, wäre mit einem Viertelkreis, die Geschwindigkeitskurve bereits gegeben. Durch die Auftragen der Punkte, die in der Tabelle 5.1 gegeben sind, auf ein *fiktives Koordinatensystem*, kann eine Kurve ermittelt werden, die eine Ähnlichkeit mit Hookes Kurve vorweist (*Abbildung 5.19*).

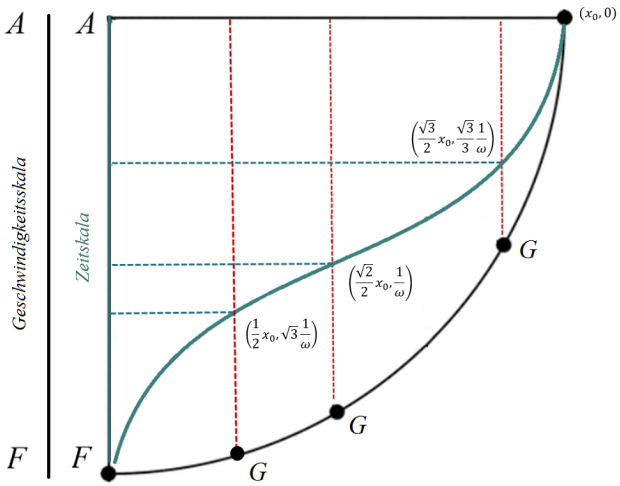



Abbildung 5.20: *Die Darstellung der S-Kurve, wobei AF die Zeitskala darstellt, die umgekehrt proportional zu $\omega$ ist, deshalb scheint sie im Vergleich zur Geschwindigkeitsskala einen anderen Verlauf der Werte zu haben.*[66]

Mithilfe dieser Darstellung (*Abbildung 5.19*), kann die Zeitkurve auch ermittelt werden. Es wird auch hier hingewiesen, dass es sich nicht um ein Koordinatensystem im heutigen Sinn handelt. Die Strecke $AF$ stellt in Hookes Diagramm eindeutig mehrere Skalen dar. Das bedeutet, die Werte der besagten Größen werden auf diesen einzelnen Skalen betrachtet und stehen nicht im physikalischen Vergleich zueinander. Aus den Werten der Tabelle 5.2 kann entnommen werden, dass $x$ mit der Geschwindigkeit in einem Verhältnis steht, dass direkt proportional zu $\omega$ ist und zu der Zeit in einem $\frac{1}{\omega}$ Verhältnis. Hooke hat die Proportionalität folgendermaßen beschrieben:

> [...] *since the velocity is in the same proportion to the root of the space, as the root of the space is to the time, it is easie to determine the particular time*

[66] Eigene Darstellung der Zeitkurve mithilfe der Tabelle 5.2.

> *in which every one of these spaces are passed for dividing the spaces by the Velocities corresponding the quotients give the particular times.*[67]

Diese Beschreibung und die Ergebnisse aus der Tabelle 5.2 zeigen, dass dann gelten muss:

$$\frac{velocity}{\sqrt{space}} \sim \omega \tag{5.35}$$

Dadurch wäre

$$\frac{time}{\sqrt{space}} \sim \frac{1}{\omega} \tag{5.36}$$

Das könnte auch ein zusätzliches Argument dafür sein, dass die Skala der Strecke $AF$ im Grunde mehrere Skalen gleichzeitig darstellt. Im Grunde bedeutet das, dass es eine Form der *Verzerrung* geben muss, um zu der S-Kurve zu gelangen, die Hooke dargestellt hat.

Gehen wir zurück zu Hookes Beschreibung. Die Geschwindigkeitskurve bringt soweit keine großen Unklarheiten. Sie lässt sich auf dieselbe Art und Weise ermitteln, wie sie auch Hooke beschrieben hat. Nachdem Hooke die Geschwindigkeitskurve dargestellt hatte, führte er die *Parabola* ein. Die Ordinaten dieser *Parabola* verhalten sich, laut Hooke, gemäß der Proportionalität:

$$\frac{BH}{\sqrt{CB}} = \frac{B_2H}{\sqrt{CB_2}} = \frac{AF}{\sqrt{CA}} \tag{5.37}$$

Das stellt lediglich das Verhältnis von Strecke zu ihrem Wurzelwert dar. Dabei ist die Linearität der Auslenkung weiter gewährleistet. Die Bedingung, die Hooke hierbei offensichtlich annahm, ist, dass $AF$ so skaliert ist, dass es $\sqrt{CA}$ entspricht. Also gilt geometrisch:

$$\frac{BH}{\sqrt{CB}} = 1 \tag{5.38}$$

Was einem hierbei schwerfällt, ist nachzuvollziehen, dass das mit der von Hooke dargestellten Kurve übereinstimmt. Zusätzlich gibt es hierbei ein dimensionales Problem. Physikalisch betrachtet, kann die Gleichung (5.38) nicht stimmen. Wenn es aber geometrisch betrachtet wird, wäre damit eine Skalierung der Strecke $AF$ für die *Parabola* gegeben. Deshalb ist es wichtig, immer darauf zu achten, dass $AF$ gleichzeitig drei Skalen darstellt. Eine Strecke für drei verschiedene Skalen zu nutzen, hat die Konsequenz, dass die Kurven etwas verschoben erscheinen. Da die Geschwindigkeit bereits ermittelt wurde, können die Ordinaten $BG$ und $BH$ verwendet werden, um die Ordinaten der Zeitkurve zu bestimmen. Dafür gilt, laut Hooke, die Proportionalität:

[67] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 18

$$GB : HB = HB : IB \tag{5.39}$$

wobei in Hookes Beschreibung die Ordinate für die Geschwindigkeit mit der Gleichung (5.34) gegeben ist. Durch das Einsetzen der Werte für $BG$ (5.34) und $HB$ (5.38) in die Gleichung (5.39), kann Folgendes erhalten werden:

$$\frac{\sqrt{AC^2 - AB^2}}{\sqrt{CB}} = \frac{\sqrt{CB}}{IB} \tag{5.40}$$

Anhand des Diagramms ist $CB = CA - AB$, also gilt

$$\frac{\sqrt{AC^2 - AB^2}}{\sqrt{CA - AB}} = \frac{\sqrt{CA - AB}}{IB} \tag{5.41}$$

Um leichter einen Überblick zu haben, kann hierfür die Notation $CA = x_0$ und $AB = x$ eingeführt werden. Die Gleichung (5.41) bekommt nun die Form

$$IB = \frac{x_0 - x}{\sqrt{x_0^2 - x^2}} \tag{5.42}$$

oder

$$IB = \frac{x_0 - x}{x_0\sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.43}$$

Wird die Gleichung (5.43) weiter ausgeschrieben, bekommt sie die Form

$$IB = \frac{x_0}{x_0\sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2}} - \frac{x}{x_0\sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.44}$$

oder

$$IB = W_1 - W_2 \tag{5.45}$$

Aus der Gleichung (5.44) kann erkannt werden, dass physikalisch betrachtet, ein Faktor fehlt. Wenn mit der linken Seite der Gleichung (5.44) die Zeit dargestellt ist, fehlt auf der rechten Seite ein zeitlich abhängiger Faktor, damit die Dimension auf beiden Seiten gleich ist. Die mögliche Lösung wäre bspw. die Interpretation der Herleitung von der Geschwindigkeit, die bereits diskutiert wurde. Die Geschwindigkeit die mit der Gleichung

(5.12) gegeben ist, beinhaltet unter der Wurzel den Faktor $\frac{1}{2}n$. In dem Fall ließe sich die Gleichung (5.44) in folgender Form darstellen:

$$IB = \frac{x_0}{x_0\sqrt{\frac{1}{2}n}\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} - \frac{x}{x_0\sqrt{\frac{1}{2}n}\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.46}$$

Das würde bedeuten, dass dieser Faktor die Einheit $s^{-2}$ haben müsste, damit auf der linken Seite der Gleichung eine zeitliche Größe mit der Einheit $s$ gegeben ist. Da dieser Faktor bei der Herleitung der Geschwindigkeit (siehe Gleichung 5.12) dieselbe Einheit zugesprochen wurde, handelt es sich hierbei um eine physikalische Größe, die direkt proportional zur Geschwindigkeit und umgekehrt proportional zu der Zeit ist.

Doch betrachten wir im weiteren Verlauf das, was Hooke dargestellt hat. Betrachten wir die Faktoren $W_1$ und $W_2$ einzeln, um genauer zu analysieren, was sie darstellen könnten.

$$W_1 = \frac{x_0}{x_0\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.47}$$

Hier sollte klar erwähnt werden, dass diese Gleichung nur dann eine Bedeutung haben kann, wenn $x \neq x_0$. Im Gegensatz vom Faktor $W_2$ hat dieser Faktor $W_1$ im Zähler $x_0$. Einen Wert, der sich nicht ändert und der den maximalen Wert der Strecke darstellt, die die Feder zurücklegt. Nach Hookes Beschreibung müsste der untere Faktor der Geschwindigkeit entsprechen. Bis auf den Faktor $\omega$ hat der Nenner die gleiche Form, wie die Gleichung (5.32), also die Form, die heute verwendet wird. Wenn aber nach Hooke der Wert im Nenner der Gleichung (5.47) tatsächlich die Geschwindigkeit darstellt, müsste sie den maximalen Wert haben, da ja in dieser besagten Schwingung die maximale Strecke zurückgelegt wurde. Das würde in dem Fall bedeuten

$$W_{1max} = \frac{x_{max}}{v_{max}} \tag{5.48}$$

Es hierbei sei darauf hingewiesen, dass diese Gleichung gewährleistet werden könnte, wenn der Nenner in der Gleichung (5.47) ein $\omega$ hätte. Das heißt

$$W_1 = \omega W_{1max} \tag{5.49}$$

Mit der Anwendung des maximalen Wertes der Geschwindigkeit, der mit der Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 gegeben ist, bekommt der Faktor $W_{1max}$ die Form

$$W_{1max} = \frac{x_0}{x_0\omega} = \frac{1}{\omega} \tag{5.50}$$

Interessanterweise wird hiermit der mittlere Wert für $t$ aus der Tabelle 5.2 erhalten. Beim Betrachten von Hookes Diagramm, kann entnommen werden, dass sich der Wendepunkt der S-Kurve im Punkt $B_2$ befindet. Aus physikalischer Sicht, sollten genau diese maximalen Werte, den Wendepunkt der Kurve ergeben. Da sich Hookes Beschreibung auf eine viertel Schwingung bezieht, wäre der Wendepunkt für die Zeit auf der Strecke $AF$ und nicht auf $IB_2$. Dieser Wert (5.50) entspricht $tan\frac{\pi}{4}$. Hierbei kann es sich um einen Faktor handeln, der als Bezug genommen werden muss, um auf die Strecke $AF$ zusätzlich zu den *Parabola*werten und den Geschwindigkeitswerten noch die Zeitwerte auftragen zu können. Demnach müsste der zweite Faktor $W_2$ als Ergebnis *tan* Werte ergeben, damit die Werte der Tabelle 5.2 auch auf Hookes Diagramm angewendet werden können. Der zweite Faktor $W_2$ ist

$$W_2 = \frac{x}{x_0\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.51}$$

Die Werte für $t(x)$ aus der Tabelle 5.2 können auch über die *tan* Funktion dargestellt werden. Das bedeutet, die nummerischen Werte aus der Tabelle 5.2, die Ergebnisse einer *tan* Funktion in besagten Winkeln darstellen, werden mithilfe dieser Winkelwerte dargestellt (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: *Veränderung der Zeit dargestellt mit einer tan Funktion*

| $\boldsymbol{t(x)}$ | 0 | $\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{1}{\omega}$ | $\frac{1}{\omega}$ | $\sqrt{3}\frac{1}{\omega}$ | $\infty$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $\boldsymbol{t(x)_{tan}}$ | $\frac{1}{\omega}\tan\pi$ | $\frac{1}{\omega}tan\frac{\pi}{6}$ | $\frac{1}{\omega}\tan\frac{\pi}{4}$ | $\frac{1}{\omega}\tan\frac{\pi}{3}$ | $\frac{1}{\omega}\tan\frac{\pi}{2}$ |

Beim Vergleichen der Werte der Zeit, die über die *tan* Funktion dargestellt wurden und der Gleichung (5.51), müsste gelten

$$\tan\varphi = \frac{x}{x_0\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.52}$$

oder

$$\varphi = \arctan\frac{x}{x_0\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.53}$$

Damit könnte der Faktor $W_2$ mit einer *arctan* Funktion dargestellt werden

$$W_2 = \arctan \frac{x}{x_0\sqrt{1-(\frac{x}{x_0})^2}} \tag{5.54}$$

Nach der Definition einer *arcsin* Funktion gilt:

$$\arcsin x := \arctan \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} \tag{5.55}$$

Das bedeutet, die Gleichung (5.54) für den Faktor $W_2$ kann mit einer *arcsin* Funktion dargestellt werden, die die Form

$$W_2 = \arcsin \frac{x}{x_0} \tag{5.56}$$

hat. Diese Gleichung (5.56) entspricht fast der Gleichung (5.29). Auch hier fehlt der Faktor $\omega$ im Nenner, wie bei $W_1$. Demnach müsste mit der Gleichung (5.56) Folgendes gegeben sein, um der Gleichung (5.29) zu entsprechen

$$W_2 = \omega W_2' \tag{5.57}$$

wobei $W_2'$ der rechten Seide der Gleichung (5.29) entspricht. Demnach würde Hookes Ordinate $IB$ die Form

$$IB = \omega[W_{1max} - W_2'] = \omega IB' \tag{5.58}$$

haben. Das bedeutet, dass $IB'$ mit

$$IB' = \frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega}\arcsin \frac{x}{x_0} \tag{5.59}$$

dargestellt ist. Anhand von diesem Ergebnis kann vermutet werden, dass die Ordinate $IB$ im Grunde $\omega t$ darstellt. Zum einen gibt es hiermit den Wert für die Zeit für die einzelnen Streckenabschnitte und zum anderen, wird es durch die Periodendauer definiert, die die Skalierung verständlicher macht. Das wird mit den anderen Kurven, die Hooke für andere *Power* dargestellt hat, deutlich. Beim Betrachten der Gleichung (5.46), die diesen zusätzlichen Faktor im Nenner beinhaltet, und vergleicht diese Gleichung mit der Gleichung (5.58), kann angenommen werden, dass dieser Faktor etwas darstellen müsste, womit die Gleichung

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{2}n} \tag{5.60}$$

gewährleistet wäre. Bei der Herleitung der Geschwindigkeit und der *aggregate of Powers* wurde diskutiert, dass dieser Faktor etwas darstellt, was, aus heutiger Sicht, in Verbindung mit der Federkonstante gebracht werden könnte. Dabei bezog sich die Argumentation nur auf den Inhalt unter der Wurzel. Die Verbindung zwischen $\omega$ und der Federkonstante $D$ (für eine konstante Masse) wird heute mit

$$\omega \sim \sqrt{D} \tag{5.61}$$

dargestellt. Demnach könnte Hookes Herleitung sowohl geometrisch als auch physikalisch nachvollzogen werden. Das, was unklar bleibt, ist, ob Hooke eine geometrische Methode so angewendet hat, ohne dabei bewusst die Dimensionen in Betracht zu ziehen oder ob ihm ein Fehler unterlaufen ist, dass sich auf die Skalierung und den zusätzlichen Faktor in der Geschwindigkeit zurückführen lässt.

Es gibt eine Angabe in Wallers *Posthumous Works*, in welcher Hooke behauptete, dass ihm bei einer Zeitbestimmung ein Fehler unterlaufen sei. Im Abschnitt *Lectures concerning Navigation and Astronomy* hat er seine Beobachtungen des Sternenhimmels beschrieben. Nachdem er durch die Beobachtung der Sterne bemerkt hatte, dass die sich *periodisch* in einer bestimmten Position wiederfinden, kommt er zu der Erkenntnis, dass die Position der Sterne am Himmel mithilfe einer Kreisbewegung interpretiert werden könnte. Es ist zu vermuten, dass die Schwierigkeit die Zeit zu bestimmen, ihn erkennen ließ, dass seine vorherige Zeitbestimmung falsch war.

> *Tho', I say, these small moments of Time are not distinguishable by a Man's Thought* [...] *just at the very moment as the Star is passing the Point of the second Station; which denotes the precise moment of such Touch or Transit.* [...] *To this I could add the description of a second Instrument, which is made with a Pendulum also, but moving Circularly suspended by a round Steel Wire, and is to be let go, and to be stay'd in the same manner,* [...] *in which Instrument the circulating motion of the Pendoulus Weight doth describe a Spiral Line, which, by equal Angles from the Center, is divided into equal Space of Time, and thereby the number of the Spaces in that Spiral, past by the Pendulum between the two Transits of the Star, being computed, do give exact number of third Minutes of Time that have pass between the two observations;* [...] *And because I understood that the Demonstration I read of the true way of dividing the Arch of its motion, into parts of equal duration, or of equal Time, was not so fully comprehended by some then present* [...] *I have drawn some Schemes, by*

> *explaining of which I doubt not to make it evident, in every particular thereof, to any one that shall doubt of any part thereof, whereby the truth and certainty thereof will more plainly appear.*[68]

Links neben diesem Absatz kommentierte Waller: *These Schemes are lost.* Ob Hooke sich hierbei auf die Zeitbestimmung in *Lectures de Potentia* bezog, ist unklar. Wenn aber in Betracht gezogen wird, dass die oben genannte Behauptung von Hooke aus dem Jahr 1687 ist, wäre es schon möglich. Eine Anmerkung darüber was der Fehler war oder wie genau er beseitigt werden könnte, gab Hooke hier nicht an.

Auf dem großen Diagramm ist eine weitere Strecke $KH$ gestrichelt eingezeichnet. Zu der Bedeutung dieser Strecke $KH$ gab Hooke keine Erläuterung. Das einzige, was er in Verbindung damit offenbarte, war:

> [...] *supposing the power of the Spring the same as the first, bended only to* $B_2$*, and from thence let go* $B_2EA$ *is the Triangle of its powers, the Ordinates of the Circle* $BgL$ [sic] *are the Lines of its Velocity, and the Ordinates of the S-like Line* $BiF$ *are the Lines of time.*[69]

Der Punkt $H$ dieser Strecke $KH$ entspricht der Position, auf der *Parabola* $CHHHF$, wenn sich die Feder, die vorher zum Punkt $C$ ausgelenkt wurde, im Punkt $B_2$ befindet. Die *Parabola* stellt, laut Hooke, die Wurzel der Strecke dar. Die Länge dieser Wurzel der Strecke entspricht $B_2H$. Das, was Hooke vermutlich mit der gestrichelten Strecke $KH$ erreichen wollte, ist die gleiche Länge (die Länge von $B_2H$) auf die Strecke $AF$ aufzutragen. Da sich $B_2$ ungefähr auf der Hälfte der Strecke $CA$ befindet, wusste Hooke, dass die Länge $AK$ der Länge $B_2H$ entsprechen muss. Es ist zweifelhaft, dass diese Strecke $KH$ eine physikalische Bedeutung hat.

Die Geschwindigkeitskurven $C\gamma\gamma O$ und $C\gamma\gamma N$, die Hooke für die entsprechend wirkenden *Powers* $C\delta$ und $Cd$ erwähnte, seien Ellipsen.

> *If the powers or stiffness of the Spring be greater than what I before supposed, and therefore must be expressed by the Triangle* $CdeA$*. then the Velocities will be the Ordinates in an Ellipse as* $C\gamma\gamma N$*, greater than the Circle, as it will also if the power be the same, and the bulk moved by the Spring be less. Then will the S-like Line of times meet with the Line* $AF$ *at a point as* $X$ *within the point* $F$*. But if the powers of the Spring be weaker than I supposed, then will* $C\delta eeA$ *represent the powers, and* $C\gamma\gamma O$ *the Ellipse of Velocity, whose Ordinates* $B\gamma$*,* $B\gamma$*,* $AO$ *will give the particular Velocities, and the S-like Line of time will extend beyond* $N$*.*[70]

[68] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. 550
[69] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 21
[70] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 20 – 21

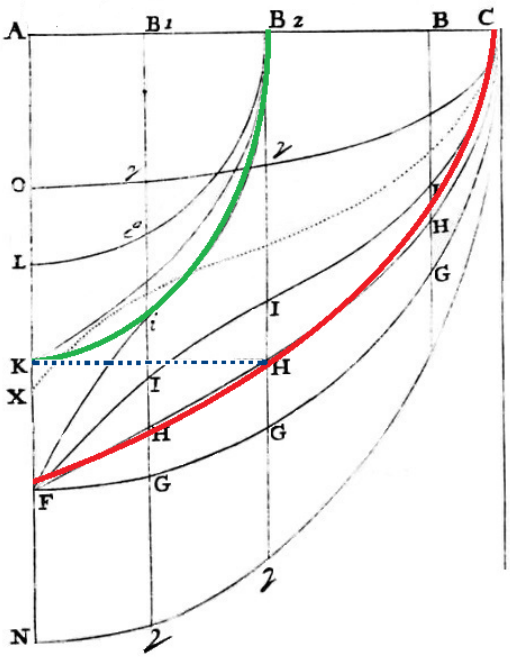



Abbildung 5.21: *Zur Ermittlung des Punktes, in dem die Parabola die Strecke AF schneidet, für den Fall, wenn die Feder im Punkt $B_2$ losgelassen wird.*[71]

Der erste Fall, den Hooke auch ausführlich beschrieben hatte, bezog sich auf einen Fall mit der Bedingung $CD = AC$. Er benutzt also hiermit eine Skalierung. Anhand von der ersten Geschwindigkeitskurve, die er ermittelt hatte, $CGGGF$, kann logischerweise sofort angenommen werden, dass bspw. für eine größere *Power* $Cd$, die maximale Geschwindigkeit weit über $F$ hinausgeht. Da aber auch mit dieser *Power* $Cd$, die Feder bis zum Punkt $C$ ausgelenkt wird, kann hierbei nicht die Rede von einer Kreiskurve sein, da $Cd \neq CA$ ist. In dem Fall muss die Geschwindigkeitskurve eine Ellipse sein. Bei einer geringeren *Power* $C\delta$ wird beim Auslenken der Feder zum Punkt $C$ eine geringere maximale Geschwindigkeit bewirkt, als mit der *Power* $CD$. Damit würde sich leicht eine Ellipsengleichung ermitteln.

Die oben beschriebene Methode zur Ermittlung der Zeitkurve kann auch hier angewendet werden. Für die *Power* $Cd$ endet die Zeitkurve im Punkt $X$, der sich auf dem Diagramm zwar über dem Punkt $F$ befindet, aber *within* $F$. Es kann hierbei vermutet werden, dass damit deutlich gemacht werden soll, dass zwar weiterhin die Rede von einer Viertelschwingung ist, aber die Strecke $AX$ selbst, einen geringeren Wert hat. Da diese

[71] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

Zeitkurve für eine größere *Power* oder *Federhärte* gegeben ist, stellt diese Strecke $AX$, die geringer als $AF$ ist, etwas dar, was umgekehrt proportional zur *Power* ist. Im Fall der geringeren *Power* $C\delta$ endet die Zeitkurve weit über den Punkt $N$. Hooke hat die Kurve womöglich deshalb nicht dargestellt, da es zu vermuten sein könnte, wie sie aussieht, nur eben im Vergleich zu $CIIIF$ nach weiter unten versetzt. Der Endpunkt der S-Kurve ist damit weit über $F$ hinaus. Was bedeutet, $\omega$ ist größer. In dem Sinne kann die Zeitkurve so interpretiert werden: Die Form der Zeitkurve ist das Ergebnis einer periodischen Bewegung und demnach kann sie mit einer Trigonometrischen Funktion dargestellt werden, die einen Wendepunkt in $B_2$ hat. Diese Form bleibt unabhängig der angewendeten *Power* gleich. Die Ordinaten dieser S-Kurve ändern sich zwar, aber sie bilden weiterhin die Form des Buchstaben S. Das, was sich ändert, ist die Periodendauer und damit das $\omega$, das, abhängig von der *Power*, größer oder geringer sein kann.

Hierbei sollte erwähnt werden, dass aus heutiger Sicht $\omega$, damit auch die Periodendauer, von der Federhärte und der Masse abhängig sind. Deshalb muss darauf geachtet werden, wie das Verhalten dieser beiden Größen zueinander ist, um $\omega$ bzw. die Periodendauer richtig zu bestimmen. Ein Beispiel dafür wird in der experimentellen Analyse beschrieben.

Eine wichtige Schlussfolgerung dieser Analyse ist, dass die Skalierung die Hooke verwendet hat, sehr viel ausmacht. Es ist fraglich, ob die einzelnen Kurven, die er beschrieben hat, für andere Randbedingungen herzuleiten wären. Die S-Kurve, die den, von Hooke gegebenen, Proportionalitäten entsprechen würde und auch physikalisch mit dem heutigen Wissen erklärt werden kann, ließe sich mit der oben genannten Interpretation und den gegebenen Randbedingungen wiedergeben. Dennoch bleibt es nur eine Interpretation.

Damit endet auch Hookes Beschreibung des großen Diagramms. Anhand der Interpretation von diesem Diagramm, kann eine Darstellung beobachtet werden, die das Hookesche Gesetz, als ein dynamisches Gesetz erscheinen lassen. Das, was Hookes Darstellung anders macht, als das, was heute Gewohnheit ist, ist seine Herangehensweise. Er beobachtet die Veränderung der Geschwindigkeit nach der Strecke und nicht nach der Zeit. Die Ermittlung dieser Geschwindigkeit ermöglichte es ihm, die Veränderung der Zeit nach der Strecke zu ermitteln. Das erscheint aus der Perspektive des 21. Jahrhunderts ungewohnt und daher fremd.

Das kleine Diagramm erscheint auf den ersten Blick fehl am Platz, da Hooke mit diesem Diagramm die Wurfweite bei einer Wurfbewegung bestimmt hat. Dieses Diagramm beinhaltet lediglich geometrische Figuren und keine Kurven, wobei er in der Beschreibung vorgab, dass damit eine Wurfparabel bestimmt werden könne. Durch die Analyse des kleinen Diagramms wird schnell klar, dass es auch aus zwei Teilen besteht, die unabhängig voneinander erscheinen. Auch hier kann eine Ähnlichkeit zum *Merton Style* der Darstellung von Bewegung erkannt werden. Wie auch Oresme, benutzte Hooke ein Viereck *pbqa* für gleichförmige Bewegung und ein Dreieck *pqr* für die Darstellung von gleichmäßig beschleunigter Bewegung.

In seiner Beschreibung schrieb Hooke, dass ein Körper dessen Anfangsgeschwindig-

keit mit *pb* gekennzeichnet war, eine sogenannte *whole velocity* hat, die der Summe aller Geschwindigkeiten während der ganzen Bewegung entsprechen soll. Diese *whole velocity* entspricht, laut Hooke, der Fläche des Dreiecks *pqr*. Die Flächen *pbaq* und *pqr*[72] stellen die jeweiligen Geschwindigkeiten dar, die der Körper bei den entsprechenden Bewegungen zurücklegt. Wobei angenommen werden kann, dass es sich bei *pqr* um die beschleunigte Fallgeschwindigkeit handelt und bei *pb* um die konstante Geschwindigkeit des Steigens. Da aus dem Diagramm zu entnehmen ist, dass $st = tu$ ist, kann behauptet werden, dass es sich hierbei um den Umkehrpunkt der Bewegung handelt. Dementsprechend bezieht sich der linke Teil des kleinen Diagramms auf die senkrechte Bewegung eines schiefen Wurfes.[73]

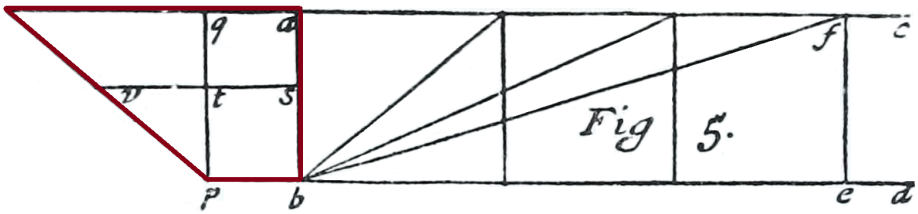



Abbildung 5.22: *Erkennbarer Merton Style in Hookes kleinem Diagramm zu unterschiedlichen Bewegungsformen.*[74]

Diese Flächen dienten Hooke zur Ermittlung der Höhe über *bd*. Hooke hat es als die Differenz zwischen den Flächen *ptu* und *ptsb* beschrieben, was nichts anderes bedeutet, als die Differenz der Strecken die der Körper beim Steigen, bzw. Fallen zurückgelegt hat. In seiner Beschreibung setzte Hooke Folgendes voraus:

> *If the body be delivered by the Spring at the floor, but shot by some Angle upwards, knowing with what Velocity the same is moved when delivered, and with what Inclination to the Perpendicular the same is directed, and the true Velocity of a falling body, you may easily know the length of the Jactus or shot, and the time it will spend in passing that length.*[75]

Das würde bedeuten, dass durch den vorgegebenen Wert der Inklination und der berechneten Geschwindigkeit, durch den Vergleich vom Steigen und Fallen, es möglich ist, die

[72] In der Originaldarstellung kann das $r$ nicht erkannt werden, aber es handelt sich vermutlich um die linke Ecke des Dreiecks.

[73] Bei der Wurfbewegung wird die senkrechte Bewegung (die Bewegung des Steigens) mit den $y$-Komponenten dargestellt und die horizontale Bewegung mit $x$-Komponenten. Es kann also behauptet werden, dass auf der linken Seite des kleinen Diagramms die Veränderung der $y$-Komponenten und auf der rechten Seite die Veränderung der $x$-Komponenten zu beobachten ist.

[74] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

[75] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 22

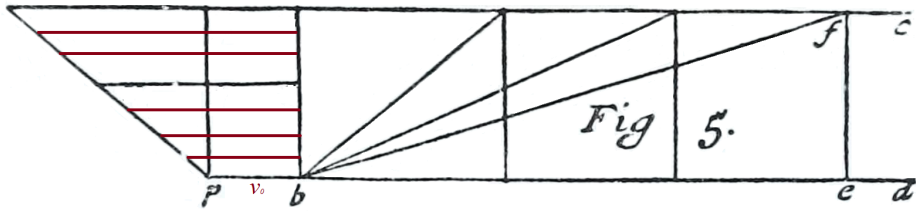



Abbildung 5.23: *Die Summe aller Geschwindigkeiten ergibt die whole velocity.*[76]

Wurfweite zu bestimmen. Auf dem großen Diagramm verwendete Hooke Parallelen, die auf dem ganzen Diagramm, durch dieselben Punkte verlaufen, also z. B. durch Punkte $B$, $B_1$ und $B_2$. Diese Parallelen nutzte er, um die Ordinaten jeweiliger Größen in diesen bestimmten Punkten grafisch zu ermitteln. Wenn Hooke auch in dem kleinen Diagramm nichts anderes machte, könnten vermutlich, auf dieselbe Art und Weise, die Punkte der Wurfparabel bestimmt werden. Wenn angenommen wird, dass innerhalb der Flächen *pbaq* und *pqr* die Komponenten der Geschwindigkeiten mit parallelen Linien gekennzeichnet sind (wie in der *Abbildung 5.23* mit roten Linien dargestellt), und wenn dabei in Betracht gezogen wird, wie bei dem großen Diagramm, dass die *Summe* ein Integral darstellt, kann vermutet werden, dass es sich beim kleinen Diagramm um etwas handelt, dass wir heute mit der folgenden Gleichung in Verbindung bringen würden:

$$s = \int v dt \tag{5.62}$$

Die Methode des Vergleichens der verschiedenen Formen von Bewegungen, die Hooke präsentierte, kann folgendermaßen interpretiert werden: Eine Wurfbewegung ist eine komplexe zusammengesetzte Bewegungsform, weswegen die mechanischen Größen, die eine Bewegung beschreiben, mit einer horizontalen und vertikalen Komponente beschrieben werden. Die Wurfbewegung unter einem gewissen Winkel $\alpha$ setzt sich aus einer vertikalen Komponente und einer horizontalen Komponente zusammen. Wenn die maximale Höhe erreicht ist, ist die vertikale Komponente der Geschwindigkeit gleich null gesetzt und da der Körper während der gesamten Bewegung durch die Wirkung der Schwerkraft nach unten beschleunigt wird, behält er weiterhin die horizontale Komponente. In Hookes Beschreibung kann etwas Ähnliches erkannt werden. Auf der linken Seite des Diagramms (damit wird der Bereich *baqrupb* gemeint), hat Hooke den vertikalen Verlauf der Bewegung beschrieben. Die rechte Seite (damit wird der Bereich $befa$ gemeint) jedoch, bezieht sich auf den horizontalen Verlauf. Im vertikalen Bereich teilte er die Bewegung in zwei Flächen

[76] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

auf. Die gleichförmige Bewegung stellte er mit der Fläche *pbaq* und die beschleunigte mit *pqr* dar.

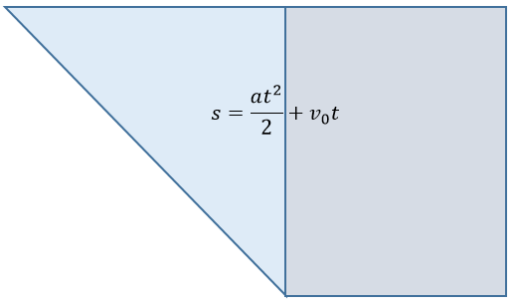



Abbildung 5.24: *Die Strecke, die ein Körper bei einer zusammengesetzten Bewegung zurücklegen würde.*[77]

Die Fläche des Parallelogramms *abpq* stellt dann die Strecke des Steigens bei einer solchen Bewegung dar. Hooke fügte gleich neben diesem Parallelogramm das Dreieck *pqr* hinzu, was die *whole velocity* der beschleunigten Bewegung darstellen soll. In seiner Beschreibung stellt *pb* die Anfangsgeschwindigkeit dar. Mit dieser Geschwindigkeit wurde der Körper abgeschossen. Der Punkt *p* stellt den Punkt dar, wo die Gravitation anfängt zu wirken und der Körper anfängt zu fallen. Die Zeit, die der Körper braucht, um zum Umkehrpunkt zu gelangen, ist *bs*. Die Differenz der Flächen *pbst* und *ptu* ergibt die Höhe über der Linie *bd*.

Hooke setzte weiter voraus, dass die Bewegung des Wurfes die gleiche Zeit zum Steigen und zum Fallen beansprucht, weswegen er die Strecke *ac* dargestellt hat. Dieser Teil *acbd* kann als der horizontale Teil der Bewegung interpretiert werden, der im gleichen Zeitintervall zu betrachten ist, wie der vertikale Teil. Wird der Körper unter einem gewissen Winkel geworfen, also bspw. in eine Richtung *bf* (wie in Hookes Beschreibung), landet der Körper nach der gleichen Zeit, die der Körper für die Bewegung *ba* brauchen würde, im Punkt *e*. Weiterhin gab Hooke an, dass genau in der Mitte dieser Strecke *ab*, der Augenblick wäre, wenn der Körper bei einer Wurfbewegung die Richtung ändert. Das würde für die Parabel bedeuten, dass auf diese Weise die maximale Höhe bestimmt wird. Da die Zeit vom Steigen und Fallen bei dieser zusammengesetzten Bewegung gleich ist, ist es nur nötig die Hälfte der Strecke *ab* zu nehmen, um die Flächen *pbst* und *ptu* zu bestimmen. Aus Hookes Aussage ist bekannt, dass *pb* die Anfangsgeschwindigkeit darstellt. Geometrisch gesehen, sind die Längen von *st* und *pt* identisch mit *pb*, was wiederum nur eine Form von einer Skalierung sein könnte.

[77] Eigene Darstellung nach Hooke.

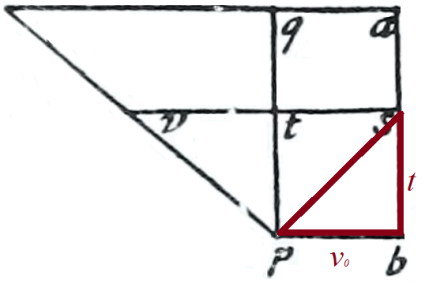



Abbildung 5.25: *Die Differenz der Flächen ptu und pbst ergibt die maximale Höhe der Wurfparabel.*[78]

Um die Höhe der Wurfparabel zu bestimmen, soll die Differenz zwischen den Flächen *ptu* und *pbst* ermittelt werden. Durch diese Differenz wird die Fläche *pbs* erhalten. Durch das Einführen der Bezeichnung $v_0$ für die Anfangsgeschwindigkeit *pb* und für *bs* die Bezeichnung $t$ (*Abbildung 5.25*), entspricht die Fläche *pbst* dem Wert $v_{0y}t$. Die Fläche *ptu* entspricht der Strecke des Fallens. Die Geschwindigkeit, die der Körper dabei hat, kann bspw. mit $v_y(t)$ gekennzeichnet werden. Da die Zeit, die der Körper für dieses Fallen braucht, auch *bs* ist, entspricht die Fläche *ptu* dem Wert $\frac{1}{2}v_{0y}t$. Dadurch ergeben Hookes Anweisungen eine Höhe des Steigens, die mit der Form:

$$h = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2}v_y(t) \cdot t \tag{5.63}$$

dargestellt werden kann. Das, was aus Hookes Beschreibung noch bekannt ist, ist, dass die Geschwindigkeiten *st* und *tu* gleich sind. Das beschreibt den Umkehrpunkt, womit auch die maximale Höhe der Bewegung gegeben ist. Wenn also die Geschwindigkeiten der gleichförmigen und beschleunigten Bewegungen gleich sind, ist die maximale Höhe nach Hookes Beschreibung

$$h_{max} = v_{0y}t - \frac{1}{2}v_{0y} \cdot t = \frac{1}{2}v_{0y} \cdot t \tag{5.64}$$

Diese Proportionalität ermöglicht natürlich für jeden einzelnen Augenblick der Zeit, die Position des Körpers zu bestimmen und damit auch die Punkte der Wurfparabel. Durch die vorgegebene Zeit der Gesamtbewegung kann auch die Wurfweite ermittelt werden. Die

[78] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

Richtung, die Hooke vorgab, also $bf$, kann vermutlich bedeuten, dass dies einen gewissen Winkel zu $bd$ darstellt. Weiterhin schrieb Hooke:

> *If a body shot from b, in the Line bf with a Velocity as much swifter than that equal motion of 16 foot in a second, as this Line bf is longer than ab the body shall fall at e; for in the same space of time that the oblique equal motion would make it ascend from bd to ac, will the accelerated direct motion downward move it from ac to bd, and therefore at the end of the space of one second, when the motions do equal and balance each other, the body must be in the same Horizontal Line in which it was at first, but removed asunder by the space be, and for the points it passeth through in all the intermediate spaces this method will determine it.*[79]

Die Gesamtzeit der horizontalen Bewegung entspricht der Gesamtzeit der vertikalen Bewegung. Da Hooke den Wurfwinkel (der Körper wird in die Richtung $bf$ geworfen) und die Zeit $ba$ vorgegeben hat, genügt es, die auf die Strecke $ac$ aufzutragen.[80] Dadurch wird genau der Punkt des Aufpralls $e$ ermittelt. Hooke wies darauf hin, dass sich die horizontale Bewegung wie die gleichförmige Bewegung verhält. Das bedeutet, dass die maximale Wurfweite mit $v_0 t$ gegeben ist. Aus heutiger Sicht wissen wir, dass das für den Winkel von 45° gilt. Das, was interessant hierbei ist, dass Hooke in seinem Diagramm zwei weitere Beispiele für den Wurfwinkel eingezeichnet hatte (*Abbildung 5.26*). Wenn das von ihm beschriebene Beispiel mit dem Wurf in Richtung $bf$ dem Wurfwinkel von 45° entspricht, dann sind die beiden anderen Beispiele für einen Winkel gegeben, der kleiner sein muss als 45°. Das, was hierbei interpretiert werden kann, ist, eine Änderung der Zeit Skalierung. Als Konsequenz verändert sich auch die Wurfweite. Bei dem großen Diagramm hat er auch nur einen Fall beschrieben, bei dem die *Power CD* proportional zu der Strecke $AC$ (Auslenkung) ist. Die anderen Beispiele werden nur als Veranschaulichung gegeben, für den Fall das Federn mit anderen Härten verwendet werden. Doch für das kleine Diagramm gab Hooke keine weiteren Angaben bezüglich der ungekennzeichneten Strecken.

Im kleinen Diagramm gab Hooke keine Kurven an, sondern nur geometrische Formen, die Verhältnisse von Größen darstellen. Auch wenn er angegeben hat, dass es möglich sei, mit diesem Diagramm jeden Punkt der Wurfparabel zu bestimmen, gab er aber diese Parabel nicht an. In seiner Veröffentlichung hat er vorerst die folgenden Proportionalitäten aufgeschrieben:

$$aggregate\ \ of\ \ Powers \sim velocity^2 \tag{5.65}$$

$$velocity : \sqrt{space} \sim \sqrt{space} : time \tag{5.66}$$

[79] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 21

[80] Wenn der Winkel gegeben ist, wie im Beispiel der *Abbildung 5.26* und die Gegenkathete $ab$ entspricht, wie in Hookes Beschreibung, dann ist $bc = bf \tan \alpha$.

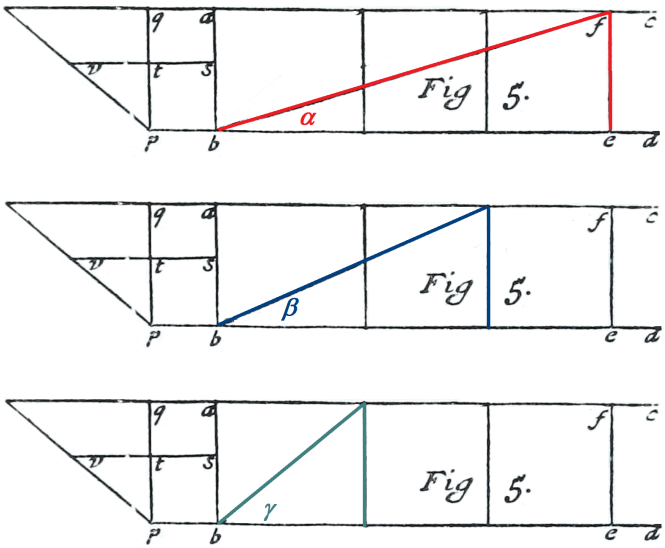



Abbildung 5.26: *Die Wurfweiten für verschiedene Winkel und der vorausgesetzten Zeit der Bewegungsdauer.*[81]

Daraus könnte sich erschließen, dass es für Hooke genug war, ganz im *Merton Style*, die Veränderung der *Power* in Abhängigkeit mit der Auslenkung darzustellen, um die Ordinaten der anderen Kurven zu bestimmen. Da laut seiner Formulierung des Gesetzes, die *Power* proportional zur Auslenkung ist, wäre damit die Bedingung für die Anwendung von Oresmes Diagramm gewährleistet. Da die Federbewegung eine ungleichförmige Bewegung ist, war es dann einfach, als *latitudo* die Auslenkung zu nehmen und als *longitudo* die *Power*. Die Fläche des Dreiecks war dann die *figura qualitatis* und damit ist die Summe der *latitudo*. Die anderen Größen sind dann die Ergebnisse von vorher vorausgesetzten Proportionalitäten.

Diese Vermutung ist anhand der vorliegenden Veröffentlichung *Lecture de Potentia* aufgebaut. Historisch betrachtet, erscheint diese Interpretation nachvollziehbar. Aus den Werken Galileo Galileis, Descartes, Mersenne, Oresme und vielen anderen ist ersichtlich, dass Proportionalitäten das Ergebnis von Beobachtungen sind. Die Geometrie ist dabei das Ergebnis der vorausgesetzten Proportionalitäten. Mit einer solchen Methode und der Anwendung einer solchen Geometrie wird ein besseres Verständnis von physikalischen Größen ermöglicht, ohne dabei ein klares Konzept von Begriffen zu haben.

[81] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, Ausschnitt und Bearbeitung von Hookes Abbildung.

### 5.3.3 Die experimentelle Analyse

Im 17. Jahrhundert war es üblich, die Zeit mit einem Fadenpendel zu messen. Bekanntlich hat Hooke viel über die Pendelbewegung geschrieben, doch ob er zur Beobachtung der Federbewegung ein Pendel benutzte, ist unklar. Wenn er diese Beobachtung tatsächlich durchführte, stellt sich die Frage: Welche Zeit hat er damit gemessen? Hierfür wird Bezug auf das Kapitel 4 genommen.

Bei der bereits beschriebene Methode aus dem Kapitel 4 wurde die Anzahl der Schwingungen sowohl der Feder als auch des Fadenpendels gemessen. In den ersten Versuchen wird einem schnell bewusst, dass es schwer ist, gleichzeitig das Schwingen des Fadenpendels und der Feder zu beobachten. Trotz diverser Ansätze, wie z. B. die Anzahl der Schwingungen der Feder bei einer Schwingung des Fadenpendels zu zählen, war es schwer, diese Messungen präzise durchzuführen und dabei auch Beobachtungen zu machen. Sollte Hooke tatsächlich in dieser Form Beobachtungen gemacht haben, ist es sehr wahrscheinlich, dass er einen Helfer hatte. Aus diesem Grund wurden auch die eigenen experimentellen Beobachtungen (Kapitel 4) von zwei Personen durchgeführt. Eine Person war zuständig für die Beobachtung der Schwingung der Feder und die andere für die Schwingungen des Fadenpendels.

Um einen Zusammenhang mit den Punkten $C, B, B_1$ und $B_2$ zu finden, ergab sich die Idee, dass diese Punkte, die verschiedene Positionen darstellen, die die Feder hat, wenn ein bestimmtes Gewichtsstück aufgehängt wurde. So wurde z. B. als Punkt $C$, der Punkt genommen, wenn das größte Gewichtsstück auf der Feder aufgehängt wurde (z. B. 400 $g$), wie auf der *Abbildung 5.27*. Der Grund liegt in Hookes Beschreibung. In seiner Beschreibung stellt der Punkt $A$ die Feder in der Ruhelage dar und wenn die *Power* $CD$ wirkt, um sie nach $C$ auszudehnen, entspricht dieser Punkt der maximalen Auslenkung. Die nächsten Punkte wurden so gewählt, dass die Position der Feder mit den jeweiligen Gewichtsstücken 350 $g$, 300 $g$, 250 $g$, 200 $g$, 150 $g$, 100 $g$ und 50 $g$ festgehalten wurde (*Abbildung 5.27*). Dadurch wurde Hookes vorgegebene Proportionalität gewährleistet. Diesbezüglich wurde aber auch eine gewisse Grenze gesetzt, da jede Feder ihre eigene *Schwingungsgrenze* hat. Damit ist vor allem ein extremes Hüpfen der Feder gemeint – was also keine gleichmäßige Schwingung ergibt. Deswegen wurde ein Gewichtsstück, das so etwas verursacht, nicht benutzt. Um diese Schwierigkeit zu beheben, wurden Feder mit verschiedenen Härten genommen und dementsprechend verschiedene Gewichtsstücke.

Als maximale Kraft wurde vorerst wieder das Gewichtsstück von 400 $g$ genommen. Im ersten Teil der Beschreibung von Hookes Diagramm, beziehen sich die Kurven auf genau diese maximale *Power*, also $CD$. Mit dieser *Power* bekam er das erste Set seiner Kurven. Das, was noch ein wichtiger Hinweis ist, ist die Tatsache, dass die Werte dieser besagten Größen immer wieder in selben Punkten beobachtet werden, unabhängig welche *Power* wirkt. Das führte den experimentellen Prozess dahin, dass dieser Punkt $C$ einen Bezugspunkt darstellt, bis wohin die Feder mit verschiedenen Gewichten ausgelenkt werden sollte. Abhängig davon, welches Gewichtsstück (also in welchem Ruhepunkt sich die

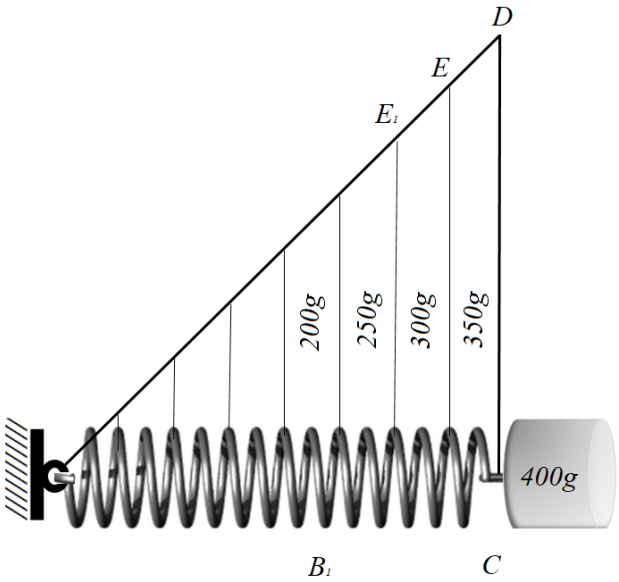



Abbildung 5.27: *Visuelle Darstellung der durchgeführten Beobachtungen. Die Positionen der Feder, die durch diverse Gewichte erreicht werden, wurden als die Punkte $C$, $B$, $B_1$ usw betrachtet.* [82]

Feder mit diesem Gewichtsstück befindet) auf der Feder hing, wurde die Feder mit diesem Gewichtsstück bis zum Punkt $C$ ausgelenkt.[83]

Bei der Anwendung von den *Powers* $Cd$ und $C\delta$ wird die Feder wieder zum Punkt $C$ ausgelenkt. Damit das erreicht werden kann, musste entweder eine geringere oder größere *Power* benutzt werden, um Federn verschiedener Härten zum Punkt $C$ auszulenken. Das ist auch in Hookes Diagramm zu erkennen, da die Strecke $Cd$ größer und $C\delta$ geringer als $CD$ ist. Also sollte dafür das Gewichtsstück ausgewählt werden, dass diese bestimmte Feder wieder zum Punkt $C$ auslenkt. Der Grund dafür ist, dass unabhängig davon, wie groß die *Power* ist, Hooke immer (vorerst) den Punkt $C$ als die maximale Auslenkung genommen hat.

[82] Eigene Darstellung mit Kombination der Abbildung von Federn
(Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hookes-law-springs.png

[83] Die anderen *Powers* (wie z. B. $Cd$ oder $C\delta$) können im Grunde als verschiedene Härten von Federn betrachtet werden. Das Argument dafür ist Hookes Beschreibung.

Nun kann gemessen werden, wie viele Schwingungen des Fadenpendels nötig sind, bis die Feder z. B. 10 Schwingungen macht. Die Auslenkung entspricht dabei der maximalen Auslenkung der Feder, wenn ein Gewichtsstück von 400 $g$ aufgehängt ist. Diese Beobachtungen führten zu einer Fragestellung, die sich nur schwer beantworten lässt. Auf welche Geschwindigkeit bezieht sich dann Hookes Veröffentlichung und damit auch sein Diagramm? Beziehen sich seine Proportionalitäten auf die Momentangeschwindigkeit, die die Feder in einem Punkt hat oder auf die Geschwindigkeit des Schwingens? Unabhängig von dieser Frage kann jedoch gesagt werden, dass es schwer vorstellbar ist, dass der Zusammenhang der physikalischen Größen, der mit den Proportionalitäten gegeben ist, in irgendeiner Form zu beobachten ist. Weder hätte er die eine noch die andere direkt messen können. Mathematisch lassen sich durch die bekannten Werte der Gewichtsstücke (*Power*) und der für diese *Powers* entsprechenden Auslenkungen die Flächen der Trapeze ausrechnen. Diese Flächen ergeben laut Hooke die Ordinaten der Geschwindigkeiten. Die Werte, die dabei erhalten wurden, ergaben eine ellipsenförmige (kreisförmige) Kurve. Eine so ermittelte Geschwindigkeit ist nach Hooke:

> [...] *the Lines BG, BG will represent the velocity of the spring returning from C to B, B &c*[84]

Also betrachtete er die Geschwindigkeit und die Zeit der Bewegung von $C$ nach $A$. Das bedeutet, die Geschwindigkeit, die die Feder durch die *Power* $CD$ erhalten hat, um in den Punkt $A$ zu gelangen. In einzelnen Punkten, würde das bedeuten, dass Hooke die Zeit betrachtet hat, die die Feder braucht, um von $C$ nach $A$ zu kommen (bzw. in einzelnen Punkten betrachtet, die Zeit in der die Feder die Strecken $CA$, $CB$, $CB_1$, $CB_2$ zurücklegt). Das entspricht der Zeit einer Viertelschwingung. Bei einer Durchführung von diesen Messungen ist es leicht zu beobachten, dass sich die Feder umso *schneller* bewegt, je kleiner das angewendete Gewichtsstück ist, bei der Bedingung, dass die Feder zum Punkt der maximalen Auslenkung $C$ (also 400 $g$) losgelassen wurde. Wenn also die Feder zu diesem Punkt $C$ ausgelenkt wird und dabei ein Gewichtsstück von bspw. 350 $g$ mitschwingt (also Punkt $B$), scheint die Schwingung *langsamer* als, wenn bei den gleichen Bedingungen ein Gewichtsstück von 50 $g$ (also Punkt $B_1$) mitschwingt.

Sollte Hooke wirklich Beobachtungen in dieser Form gemacht haben, ist es schwer nachzuvollziehen, dass die Geschwindigkeitskurve experimentell entstanden ist. Zwar ist es leicht nachzuvollziehen und zu beobachten, dass die *Geschwindigkeit* der Federbewegung größer wird, aber nicht unbedingt, dass sie sich aus den betrachteten Werten eine Kreiskurve oder elliptische Kurve verhält. Eine Darstellung, wie sie Hooke in seiner Veröffentlichung zeigte, konnte nur durch bereits bestehende theoretische Vermutungen die Form bekommen haben.

In Hookes Arbeiten kann immer wieder vorgefunden werden, dass er bei der Durchführung eines Experiments immer die Messungen tabellarisch dargestellt hat und auch

[84] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 14

das Experiment bis ins Detail beschrieben hat. Das ist aber nicht der Fall in *Lectures de Potentia*. Auch aus diesem Grund ist es schwer vorstellbar, dass Hooke zu seinen Diagrammen tatsächlich auch irgendwelche Messungen durchgeführt hat. Seine Beschreibung von verschiedenen Federpendelformen, mit denen er sein Gesetz formulierte, sind lediglich als Beobachtungen der Veränderungen der Auslenkung der Feder gegeben.

Unklar bleibt jedoch die Zeit. Hat er die Zeit wirklich gemessen oder lediglich aus schon bekannten Proportionalitäten hergeleitet? Interessant ist es auch, dass Hooke schon vor der Beschreibung der Diagramme als Ziel die Ermittlung der Zeit formuliert und nicht, wie so üblich in dem Zeitalter, die Ermittlung der Geschwindigkeit. Das könnte bedeuten, dass Hooke durch seine Analysen der Bewegung des Fadenpendels eine mögliche Analogie zu der Federbewegung gesehen hatte. Der Grund warum das interessant für diese Interpretation erscheint, ist die Tatsache, dass Hooke vorgab, dass es sehr leicht sei, zu zeigen, dass es sich bei einer Federbewegung um eine isochrone Bewegung handelt, wie bei einem Fadenpendel.

Für die Durchführung der Beobachtungen erwies es sich als wichtig, dass das Fadenpendel und das Federpendel synchron schwangen. Da es beim Messablauf erzwungen war das Gewicht zur Auslenkung des Federpendels kontinuierlich zu verändern, musste für jede neue Gewichtseinstellung eine Veränderung der Länge des Fadenpendels vorgenommen werden. Die Veränderung der Länge des Fadenpendels und der Gewichtsstücke war proportional zueinander. Das bedeutet, wenn z. B. die Gewichtsstücke jeweils um 50 $g$ verändert wurden, veränderte sich zur gleichen Zeit die Länge des Fadenpendels um 2 $cm$. Wenn Hooke eine Analogie zwischen Pendel- und Federbewegung in seinem Diagramm dargestellt hat, würde das die Interpretation der Zeit während der Schwingung erklären. Genau wie bei der Pendelbewegung stellt eine Kreiskurve den ersten Schritt zur Darstellung der Zeit dar. Das wäre dann durchführbar, wenn behauptet wird, dass die Ordinaten $IB, IB_2$ und $IB_1$ im Grunde eine Größe darstellen, die sich wie die Schwingungsdauer für die jeweiligen Gewichtsstücke (die in der experimentellen Beobachtung angewendet wurden) verhält. Die Periodendauer eines Federpendels ist mit

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}} \tag{5.67}$$

gegeben. Wenn also die jeweiligen Punkte (vom Diagramm), die Wirkung von den benutzten Gewichtsstücken darstellten, könnte vermutet werden, dass das genau die Ordinaten ergibt, die auch in Hookes Diagramm zu sehen sind. Dass die Periodendauer proportional zur Wurzel der *Masse* ist, hätte Hooke genau aus der Analogie zum Fadenpendel erkannt haben können. Die Periodendauer vom Fadenpendel war schon durch Huygens Arbeit bekannt, und es war auch bekannt, dass sie proportional zu der Wurzel der Länge des Fadenpendels ist.

In diesem Zusammenhang erscheint Huygens als wichtige Persönlichkeit, die einen großen Beitrag in der geometrischen Analyse von Bewegung gegeben hat. In seiner Veröf-

fentlichung beschäftigte sich Huygens intensiv mit der Bestimmung der Schwingungsdauer eines konischen Pendels. Die Bewegung dieses Pendels wurde zu der Zeit als komplexe Bewegung beschrieben, die aus zwei Bewegungen besteht: dem freien Fall und der Bewegung des einfachen mathematischen Pendels. Er hat die Schwingungsdauer so bestimmt, dass er sowohl den Auslenkungswinkel als auch die Länge des Pendels verkleinerte. Das ergab dann eine Strecke in Form eines Paraboloids.

Aus heutiger Perspektive betrachtet, kann interpretiert werden, dass Huygens annahm, dass die Strecke der Pendelbewegung einem Paraboliden entspricht. Dafür benutzte er die Parabel

$$py = x^2 \tag{5.68}$$

um die $y$-Achse. Das könnte auch der Grund sein, wieso Hooke eine Verbindung zum Verhältnis zur Wurzel der Strecke suchte und nicht die lineare Veränderung der Auslenkung (Strecke) selbst. Es ist bekannt, dass in dem Fall davon ausgegangen werden kann, wenn ein Massenpunkt stabil kreist, dass die Summe der Gravitations- und Zentrifugalkraft normal zu der Kreisfläche ist und, dass daher die Gleichung für das konische Pendel angewendet werden kann. In diesem Fall ist der Winkel $\alpha$ normal zur Achse, $l$ ist die Länge des Abschnitts der Normale zwischen Achse und Fläche (dabei wird die Strecke gemeint) und $u$ ist die Projektion dieses Segments auf der Achse. Die Gleichung der Schwingungsdauer des konischen Pendels ist dann:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}\cot\alpha} = 2\pi\sqrt{\frac{l\cos\alpha}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{u}{g}} \tag{5.69}$$

Huygens gab an, dass für die Parabel der Wert $u$ unabhängig von der Position des Massenpunktes ist. Wenn die Bewegung auf einem Paraboliden betrachtet wird, entspricht $u$ dem Wert $p/2$. Das Ergebnis hierbei ist, dass die Schwingungsdauer eines Massenpunktes auf einem Paraboliden gleich ist:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{p}{2g}} \tag{5.70}$$

Das ergab einen neuen Weg zur Bestimmung von isochroner Schwingung.[85]

Wenn Hooke davon wusste und es kann mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass er das tat (das wird sich in dem kommenden Kapitel klarstellen), hätte er relativ einfach, eine Analogie zwischen der Periodendauer eines Fadenpendels und einer Feder erkennen können. Vorausgesetzt, er hat ein ähnliches Verfahren vorgenommen, wie

[85] vgl. Gindikin S., *Tales of Mathematicians and Physicists*, Springer, 1988, S. 85 – 87

es oben beschrieben wurde. Doch anhand von seinen Beschreibungen will er nicht die Periodendauer bestimmen, sondern die Zeit in einzelnen Punkten. Würde Hooke doch die Zeit der gesamten Schwingung betrachten, würde für eine bestimmte Auslenkung in idealen Verhältnissen, die Proportionalität

$$velocity : \sqrt{space} = \sqrt{space} : time \tag{5.71}$$

gleich einer Konstanten sein. Wie bereits in der theoretischen Analyse zuvor gezeigt worden ist, kann es sich hierbei um das $\omega$ handeln. In dem Fall kann anhand von Hookes Proportionalitäten folgendes Verhältnis ermittelt werden:

$$\sqrt{space} : time \sim const \implies time \sim const\sqrt{Power} \tag{5.72}$$

Was im Zusammenhang mit den durchgeführten Beobachtungen bedeuten würde, dass die Periodendauer proportional zur Wurzel der verwendeten *Power* (also die Gewichtsstücke einer bestimmten Masse) ist. Wenn Bezug auf die Zeitkurven für andere *Power* genommen wird, ist es offensichtlich, dass sich die Form der Kurve an sich nicht viel ändert. Das, was sich ändert, ist der Punkt, wo die Kurve die Strecke $AF$ schneidet. Je größer die *Power*, desto kleiner die Zeitordinate im Punkt $A$. Das bedeutet, dass es sich um ein umgekehrt proportionales Verhältnis handeln muss. Dieses Verhältnis zwischen Zeit und der Masse eines, an die Feder angebrachten, Gewichtsstückes, kann auch mit dem heutigen Wissen leicht erklärt werden. Die Kreisfrequenz $\omega$ entspricht bei einer Federschwingung der Gleichung:

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}} \tag{5.73}$$

wobei $D$ die Federkonstante darstellt und $m$ die Masse. Damit wäre auch die umgekehrte Proportionalität gewährleistet, die die Kurven $CX$ und $CN$ offensichtlich darstellen.

Zusammengefasst ergaben die theoretische und experimentelle Analyse, dass Hooke mit den gegebenen Zeitordinaten der Kurve $CIIIF$ im Grunde $\omega t$ dargestellt haben muss. Wenn bedacht wird, dass er hiermit eine Bewegung beschrieben hat, die eine Differenzialgleichungen erfordert, hat er mit seiner Geometrie einen guten Weg gefunden. Es erfordert viel Zeit sich an eine solche Methode der Darstellung zu gewöhnen, da sie mit dem Wissen des 21. Jahrhunderts betrachtet, sehr verwirrend und fremd erscheint.

Unabhängig davon, ob Hooke zu diesem Diagramm durch experimentelle Beobachtungen gekommen ist, oder durch bereits bekannte Proportionalitäten und mit geometrischen Methoden, Tatsache ist, dass Hooke eine andere Herangehensweise zeigte, als zu der Zeit üblich war. Für ihn, so macht es den Anschein, war die Ermittlung der Zeit, als Größe,

von hoher Relevanz und nicht die Geschwindigkeit wie z. B. bei Galileo Galilei. Was die möglichen Gründe oder die mögliche Motivation dafür sind, wird im kommenden Kapitel diskutiert.

# Kapitel 6

# Historische Kontextualisierung

Nach einer ausführlichen Analyse der Veröffentlichung und der dementsprechenden Diagramme erscheint das *Hookesche Gesetz* in einem anderen Licht als zuvor. Heute wird das Hookesche Gesetz sehr häufig in Verbindung mit einem statischen Gesetz in Verbindung gebracht, wobei die Kraft proportional zur Auslenkung der Feder ist. Die Analyse im Kapitel 5 konnte jedoch zeigen, dass Hooke dieses Gesetz aus einer dynamischen Sicht betrachtete. Es gibt heute keine phänomenologischen oder physikalischen Unklarheiten zu diesem Gesetz. Jedoch erscheint es plausibel, dass die Interpretation des Bewegungsdiagramms der Feder Hinweise gibt, dass es bei dieser Veröffentlichung um das Ermitteln der Zeit geht. Diese Tatsache ist, im Gegensatz zu vielen anderen bekannten Veröffentlichungen des 17. Jahrhunderts, eher eine ungewöhnliche Methode. Im kommenden Kapitel werden sowohl die möglichen Motivationen der Veröffentlichung aufgegriffen, als auch die Hintergründe, die zu einer Veröffentlichung in dieser Form der Beschreibung geführt haben könnten.

Die bisherigen Kapitel konnten einen kleinen Einblick in die Darstellung von verschiedenen Formen von Bewegung geben. Die meisten Darstellungen beruhen auf geometrischen Methoden und Proportionalitäten von kinetischen Größen. In vielen dieser Darstellungen dienten die Strecke und die Zeit, als Werkzeug zur Ermittlung von Geschwindigkeit, die zu der Zeit nicht direkt ermittelt werden konnte. Das macht Hookes Darstellung von den kinetischen Größen bei der Federbewegung umso interessanter, da er die Geschwindigkeit als Werkzeug benutzte, um die Zeit zu ermitteln. Als Geometrieprofessor war er vertraut mit geometrischen Methoden. Mit diesen aktuell verfügbaren geometrischen Methoden wählte er eine ungewöhnliche Herangehensweise der grafischen Analyse einer Bewegung. Im 17. Jahrhundert folgten viele seiner Zeitgenossen Galileo Galileis Methode der Darstellung von diversen Bewegungsformen. Sie setzten, hauptsächlich, die Zeit und die Strecke voraus, um Größen wie die Geschwindigkeit zu ermitteln. Hooke dagegen verwendete in seinem *Gesetz der Natur* die Geschwindigkeit, um die Zeit zu ermitteln.

Im Kapitel zu den eigenen Beobachtungen wurde schon angedeutet, dass Hookes mögliche Motivation seiner Veröffentlichung und, dementsprechend, seiner Arbeit mit Federn, die Entwicklung einer Uhr sein könnte. Immer wieder können in Hookes Arbeiten und in den Protokollen der Royal Society Notizen über Uhren gefunden werden. Sowohl Hookes Veröffentlichungen, als auch die Protokolle der Society beinhalten diesbezüglich häufiger Anspielungen gegenüber Huygens und Oldenburg. Ein Beispiel von Hookes Empfinden gegenüber Huygens und Oldenburg lässt sich z. B. in *Helioscopes* finden, in dem Hooke folgende Aussage gemacht hatte:

> *The Invention indeed in it self was ingenious, and did much more than what Mr. Hugens did expect, as I was then informed by the Right Honourable the Earl of Kincardine* [sic] *the Author and perfecter of the part of the Invention. But wanting a little addition (which I concealted, and Mr. Hugens hath not got yet that I hear of) it failed of the effect that was expected.* [...] *Of all these things the Publisher of the Transactions* [*Oldenburg*] *was not ignorant, and I doubt not but Mr. Hugens hath had an account, at least he might have read so much of it in the History of the Royal Society as was enough to have given him notice of it* [...] *though he* [*Oldenburg*] *as judging it more proper to his design, was pleased to give only this summary account Mr. Hugens might therefore, if he had pleased, have mentioned the first Inventor* [...][1]

Doch was steckt wirklich dahinter? Welche Rolle spielen Oldenburg und Huygens tatsächlich in der Entwicklung von Hookes Uhr und welche Motivationen hinter Hookes oben genannten Bemerkung stehen, wird in den kommenden Abschnitten verdeutlicht.

## 6.1 Die Uhr und das Längengradproblem

Durch Entdeckungen von neuen Kontinenten wuchs die Relevanz der Seefahrt und der dafür nötigen Navigation. Motive dafür gab es viele. Wirtschaftliche und militärische Interessen standen meist im Vordergrund. Ob es nun kostbare Stoffe oder Gewürze waren, es war Grund genug, solche Reisen in Kauf zu nehmen. Natürlich gab es in diesem Zeitalter viele Länder, die an diesem Gebrauch wirtschaftliche Vorteile gesehen haben, weswegen, neben anderen Gründen, Kriege geführt worden sind. Das führte dazu, dass viel Zeit investiert wurde, die Navigation der Schiffe zu verbessern und mehr zu präzisieren.

Es wurden in diesem Zusammenhang verschiedene Geräte benutzt. Zum Beispiel waren Sonnenpeilscheiben und Sonnenschattenbretter bekannt, die zur Messung des Winkels zwischen der Horizontalen- und der Mittagssonne verwendet wurden. Damit konnte eine ungefähre Geschwindigkeit des Schiffes berechnet werden. Land- und Himmelskarten als Kombination, dienten oftmals zur Orientierung. Himmelskörper wie die Sonne z. B. halfen

[1] Hooke R., *Helioscopes*, 1676, S. 29 – 30

dabei den Breitengrad zu bestimmen, aber der Längengrad war eher schwieriger. Das lässt sich mit dem sogenannten *Längengradproblem* in Verbindung bringen. Mit diesem Problem haben sich viele Naturphilosophen des 17. Jahrhunderts beschäftigt. Relativ viele davon waren überzeugt, dass eine präzisere Uhr das Problem lösen könnte.[2] Die Idee, eine Uhr für die Bestimmung des Längengrades zu benutzen, wurde schon 1530 von Gemma Frisius[3] vorgeschlagen. Die Methode bestand darin, bei der Abfahrt eines Schiffes die Uhr präzise auf Ortszeit einzustellen. Das wichtigste dabei ist, dass sie während der Fahrt nicht stehen bleiben durfte und sie durfte keine Abweichungen zeigen. Da die Erde 24 Stunden für eine Umdrehung braucht, also 360°, sind das jeweils 15° pro Stunde. Das bedeutet, dass die Sonne in 24 Stunden über alle 360 Längengrade geht, was pro Stunde 15 Längengrade bedeuten würde. Da sich die Erde nach Osten dreht, ist es östlich von der aktuellen Position, eine Stunde früher und westlich, eine Stunde später. Diesbezüglich hatte Hooke drei mögliche Methoden klassifiziert.

> [...] *Hooke was led to his work in horology by a desire to solve the problem of finding a ship's longitude at sea. He divides the possible methods into three classes dependent respectively on (1) the declination of the compass (2) the measurement of the way of the ship and (3) the measurement of time.*[4]

Im Grunde war es hierfür nötig, die lokale Mittagszeit zu bestimmen, bzw. den Augenblick, in dem die Sonne am höchsten Punkt steht, und eine so genaue Uhr, die jede Schwingung von den heftigsten Wellen auf der See standhielt. Zur Bestimmung des Längengrads muss die Differenz der lokalen Mittagszeit und der Zeit auf der Uhr ermittelt werden.

Was eigentlich Hookes Motivation hinter der Entwicklung einer perfekten Uhr war, lässt sich nur vermuten. Laut der Aussage von Waller war Hooke sehr häufig in vielen verschiedenen Bereichen simultan tätig, was dann dazu führte, dass er mit einigen Projekten auch nicht unbedingt immer fertig wurde.[5] Ein Beispiel dafür ist eine federgesteuerte Uhr. Diese Uhr sollte nicht nur eine Revolution in der Uhrentwicklung darstellen, sondern auch das Längengradproblem lösen. Dementsprechend musste Hooke eine Uhr entwickeln, die keine Abweichungen zeigen würde. Eine Uhr, die an Land gut funktioniert zu entwickeln, sah Hooke nicht als Herausforderung. Wenn die Uhr an Land steht, ist sie keinen Bewegungen ausgesetzt wie auf der See. Deswegen musste ein Mechanismus entwickelt werden, der die Bewegung des Räderwerks der Uhr von den Schiffsbewegungen entkoppeln würde, sodass z. B. bei einer unruhigen See, die Zeitmessung nicht beeinflusst werden konnte.

[2] vgl. Sobel D., *Longitude. The Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time*, Walker and Company, New York, 1995, S. 21 – 40

[3] Gemma Frisius, eigentlich Jemme Reinersz (geboren 1508 in Dokkum, gestorben 1555 in Löwen) war ein Mediziner, Astronom, Mathematiker, Kartograf und Instrumentenbauer. Er benutzte die Mathematik zur Bestimmung von Navigation.

[4] Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 8. $N_o$2, April 1951, S. 167 – 177

[5] vgl. Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. v – vii

Hooke schloss die ersten beiden Methoden aus, mit der Begründung, dass es immer eine gewisse Unsicherheit geben musste. Diese Unsicherheit war die Konsequenz der Variation der Deklination und der Schwierigkeit der präzisen Messung der Position des Schiffes. Danach führte er Untersuchungen durch, die zeigen sollten, dass die Messung der Zeit mit astronomischen Beobachtungen auf See unpraktisch war. Es erschien zu der Zeit, als sei eine mechanische Uhr die vielversprechendste Methode.[6] Uhren unterlagen vielen Unregelmäßigkeiten, wenn sie sich in einem bewegten Objekt befanden. Im Grunde hängt die Schwingungsdauer einer Uhr von dem Trägheitsmoment der Unruh und der Eigenschaft der Spirale ab. Deren Materialeigenschaften waren abhängig von z. B. tagestypischen Temperaturveränderungen, wodurch die Ganggenauigkeit beeinflusst wurde. Aus dem Grund wurden häufig zu der Zeit Kompensationsunruhen in Uhren eingebaut.

> *I therefore first propounded to my self the scope of my inquiry, which was an instrument that should at all times and in all places whether it were transported from place to place or fixt equally & exactly divide y^e^ spaces or intervalls of time in to small determinate quantitys such as minutes or seconds of an houre. And the way I first pitcht upon was by wheelworke. In which way I examined what were the causes of the irregularity of the motion. And upon the whole I found two: first the Irregular or uneven force of the crown wheel against the ballance. And secondly the wing or swee of the Ballance it self which by the moving of the whole frame might easily be alter'd.*[7]

Es erscheint, als würde er behaupten, dass die einzige Lösung darin bestünde, der *Balance* einen gleichmäßigen und regelmäßigen Impuls zu geben, der wiederum vom Hauptantrieb abgeleitet werden solle. Das bedeutet, dass Hooke die Idee von einer konstanten Krafthemmung im Räderwerk der Uhr hätte entwickeln müssen. Es ist eine unbestrittene Tatsache, dass Hooke im Prozess einer Uhrentwicklung war. Das bezeugen sowohl seine Veröffentlichungen, als auch die Protokolle der Royal Society. Hooke soll bereits 1660 eine Feder – die *Unruh* – für den Mechanismus der Uhr vorgeschlagen haben.

> *The first Inventer hereof* [*Balance, which Spring is called the Regulator*]*, was the ingenious and learned member of our Royal-Society, Dr. Hook* [sic] *: who contrived various ways of Regulation. One way was with a Load-Stone: another was with a tender strait Spring, one end whereof played back ward, and forward, with the ballance: So that the ballance was to this Spring as the bob of a Pendulum, and the little Spring, as the Rod thereof.* [...] *But the Invention which best answered expectation, was at first, with two ballances: of which I*

[6] Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, 1951, S. 167 – 177

[7] Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, 1951, S. 167 – 177
Hier gibt der Autor die Originalquelle nicht an, behauptet jedoch dass es Hookes Verschriftlichung ist.

*have seen two sorts, altho there were several others. One way was without Spiral Springs, the other with. They both agreed in this, That the outward Rims of both the Ballances, had alike number of Teeth; which running in each other, caused each Ballance to vibrate alike.*[...][8]

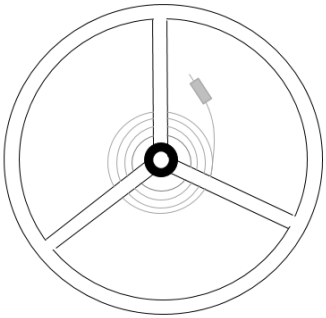


Abbildung 6.1: *Darstellung von einer Kreisfeder, später wurde auch eine Spiralfeder benutzt, die als Schwingungssystem bei der Hemmung verwendet wurde.*[9]

Der Mechanismus von so einer Kreisfeder ist eng verbunden mit der Hemmung der Uhr. Bei der Hemmung wird das Hemmungsrad, wie das ganze übrige Räderwerk, jedes Mal durch einen Gangregler (Schwinger) zur Rückdrehung angetrieben. Das Schwingungssystem zusammen mit der Feder wird so abgebremst. Dadurch entsteht eine Anomalie der Schwingung. Das erfolgt nicht während der gesamten Schwingung, sondern nur in den Rückführungsphasen. Die Abbremsung ist abhängig vom Drehmoment des Rades und der daraus resultierenden Antriebskraft. Auf diese Weise wird die Schwingungsdauer von der Antriebskraft beeinflusst. Wenn diese nicht konstant ist, entsteht ein Gangfehler.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, dass 1656 Hooke die Ankerhemmung bereits entwickelt hatte. Eine originale Aufzeichnung gibt es jedoch nicht.[10] Die folgende Beschreibung des Mechanismus kann mit der *Abbildung 6.1* dargestellt werden.

*(I framed a Clock $w^{th}$ all the wheels in nothing differing from a common clock save only that I made notches or teeth in the crown wheel and fixt a certain stay or catch $w^{th}$ a small spring to it by which meanes the motion of the whole*

[8]Derham W., *The artificial clock-maker: a treatise of watch and clock-work, wherein the art of calculating numbers for most sorts of movements is explained to the capacity of the unlearned : also the history of clock-work, both ancient and modern, with other useful matters never before published*, London, 1696, S. 99

[9]Eigene Darstellung nach Hooke

[10]Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, 1951, S. 167 – 177

*fabrick was stopt untill such time as the catch or stay being lift up the whole fabrick would move untill y$^e$ next tooth was met by the stay*[11]*... I made a small forcer AB which in a standing instrument may be mov'd by a Spring as C or by a weight as D this I contriv'd so as to move the ballance instead of the crowne wheele. Now this forcer or cock (as I may soe call it because it resembles the cock of a fire-lock) is bent by the saw-wheel EFG of the clock-work and as soon as bent stopt by the trigger H which trigger being by the returne of the ballance (or struck off from the end B by the elbow)* [sic] *is moved whereby the cock is lett goe, whose end O taking hold of the Ballance communicates all its motion to it which it has noe sooner Done but w$^{th}$ its arme NO it strikes against the trigger of the saw wheel and sets it at liberty presently to bend & trigg the forcer ready for the like return of the Ballance, which again by moving the trigger & letting fly the Cock upon it, is put into a new motion; And against its return back the Cock is again bent & triggd &c. Soe that be the work of those other wheeles never soe unaequall supposing that they will but goe and the weight never soe much or never soe little. Soe that it be but strong enough to make the saw wheel to bend the cock as soon as downe it is no matter.* [...] *I therefore pois'd* [sic] *a wheel soe exactly upon its two poles as sharp as needles, that the center of its motion & that of its gravity were both the same which being thus pois'd noe kind of shog either upwards or downwards forwards or backwards to y$^e$ right or left or any intermediate would alter its circular motion, And because naturall gravity could take noe hold of it as to its motion about its center; I contriv'd an artificiall one which should perform the same effect. And that was done by applying of two Springs soe contriv'd that the motion they imprest on the ballance should not receive any irregularity from the shog of y$^e$ Instrument. These springs which may be applyed to the Ballance very many ways as ABC Soe determin'd the circular motion of y$^e$ wheel that such & such particular parts of y$^e$ wheel had tendency (or artificiall gravity as I may soe call it) not towards the center of y$^e$ earth but towards such or such determinate points of the frame that contein'd it soe that if the wheel were removed out of y$^e$ situs or position, it would after many vibrations returne to it And there stay. To this I applyed my former Expedient of the Cocke, which compounded an Instrument in all points such as was Desir'd...*[12]

[11] Hier wies der Autor *A.R. Hall* auf folgedes: This sentence is crossed out by Hooke, who begins his narrative afresh, but has been quoted here as it gives additional information.

[12] Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, 1951, S. 167 – 177.
Die Quelle die der Autor hier durchgehend verwendet, sind die Originalschriften von Hooke zu präzisen Uhren die für das Längengrad Problem die Lösung darstellen könnten. Diese Schriften sind vom Trinity College Cambridge mit *ms* 0.11*a* 1$^{15}$ gekennzeichnet.

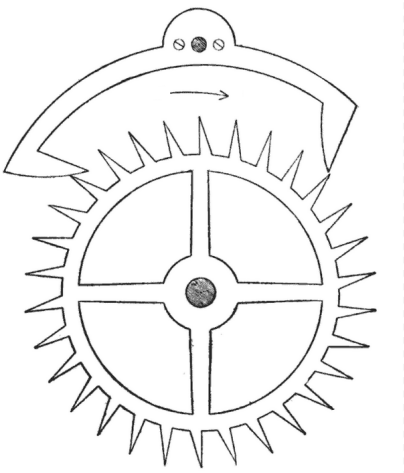


Abbildung 6.2: *Die Darstellung einer Ankerhemmung.*[13]

Hierbei wurde etwas Ähnliches wie ein Hakenanker verwendet, der über eine Welle mit einem Pendel oder einer Feder verbunden war. Die Haken griffen radial in das Ankerrad ein. Zu jeder Halbschwingung des Gangreglers verdrehte sich die Hemmung um eine halbe Zahnteilung. Die Haken waren so gelagert, dass sie sich auf einer größeren Entfernung von der Drehachse befanden als die Lappen. Weiterhin waren sie so geformt, dass sie eine Hebung bewirkten. Dadurch war der Ausschlag kleiner, wodurch auch längere Pendel verwendet werden konnten. Hooke gab weiter an, dass das sein erstes Mittel zur genaueren Regulierung von Uhren war, und er behauptete, dass es weitaus wirksamer sei als Huygens' Pendel. Huygens' Mechanismus allein könne keine zuverlässige transportable Uhr darstellen, da das Pendel oder die Unruh immer unter der Wirkung der Schwerkraft arbeitet und der Bewegungsmittelpunkt des Schwingens weit vom Schwerpunkt entfernt war, sodass jede Erschütterung oder Drehung ihre Bewegung beeinflusste.[14]

> *I therefore pois'd a wheel soe exactly upon its two poles as sharp as needles, that the center of its motion Sc that of its gravity were both the same which being thus pois'd noe kind of shog either upwards or downwards forwards or backwards to y$^{e}$ right or left or any intermediate would alter its circular motion, And because naturall gravity could take noe hold of it as to its motion about its center; I contriv'd an artificiall one which should perform the same effect. And that was done by applying of two Springs soe contriv'd that the motion*

[13] Quelle: ://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anchor_escapement.png
[14] Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, 1951, S. 173

> *they imprest on the ballance should not receive any irregularity from the shog of y^e Instrument. These springs which may be applyed to the Ballance very many ways as A B C Soe determin'd the circular motion of y^e wheel that such Sc such particular parts of y^e wheel had a tendency (or artificiall gravity as I may soe call it) not towards the center of y^e earth but towards such or such determinate points of the frame that contein'd it soe that if the wheel were removed out of y^t situs or position, it would after many vibrations returne to it And there stay. To this I applyed my former Expedient of the Cocke, which compounded an Instrument in all points such as was Desir'd*[...][15]

Das beschreibt ein System, bei dem ein Paar Federn so durch das Rad verbunden ist, dass jede Störung, die eine zu starke Drehung des Rades bewirken würde, durch die kombinierte Wirkung der Federn neutralisiert werden kann (*Abbildung 6.3*). Die beiden Systeme (*Abbildung 6.3.*) können verschiedene Herangehensweisen darstellen, um die gleiche Grundidee zu verwirklichen. Vermutlich bevorzugte Hooke die Verwendung von zwei Federn, weil deren Geometrie so beschaffen ist, dass jede Feder nur in einem Sinne auf die Balance des Systems wirken kann, wie in *Abbildung 6.3a)*. Die Anordnung mit der Messerschneide Form (*Abbildung 6.3b)*), bei der die Federn so eingestellt waren, dass sie in Richtung der Achse der Unruh zeigten, sollten es der Feder ermöglichen, bei jeder Verschiebung der Unruh gleich zu wirken. Das ist im Grunde also notwendig, aber durch die Wirkung an diametral entgegengesetzten Punkten wäre die Gesamtwirkung auf den Unruhzapfen reduziert oder eliminiert.[16]

Den Mechanismus der *perfekten* Uhr entwickelte Hooke weiter. In den Protokollen der Royal Society, in den 1660ern, wurde an mehreren Stellen erwähnt, dass Hooke diverse Methoden vorführte, die er als angemessen empfand für die Weiterentwicklung einer Uhr.[17] Unabhängig davon gibt es keine näheren Angaben zu der Verwendung von Federn in diesen Mechanismen. Hookes Bemühungen, eine zuverlässige Uhr für die Seefahrt zu entwickeln, stellt eine beachtliche Studie der damit verbundenen Probleme und ihrer wahrscheinlichsten Lösungen dar. Er war mit der theoretischen Lösung des Problems der Ermittlung des Längengrades völlig zufrieden und nach dem Scheitern seiner früheren Bemühungen verlor er vermutlich das Interesse an der praktischen Seite seiner Untersuchungen, bis seine Motivation 1675 geweckt wurde.[18] Einer der ersten notierten Nachweise, die in Bezug auf eine Feder für die Anwendung in einer Uhr vorgefunden werden kann, ist ein Eintrag in seinem Tagebuch aus dem Jahr 1675.

[15] Hall A.R., *Robert Hooke and Horology*, 1951, S. 174

[16] vgl. Wright M., *Robert Hooke's Timekeeper*, in *Robert Hooke: New Studies*, Hrsg. Hunter M., Boydell Press, 1989, S. 89, 91

[17] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. I*, 1756, z. B. S. 342, 384, 417, 467

[18] Darüber wird ausführlich im kommenden Abschnitt mehr Rede sein.

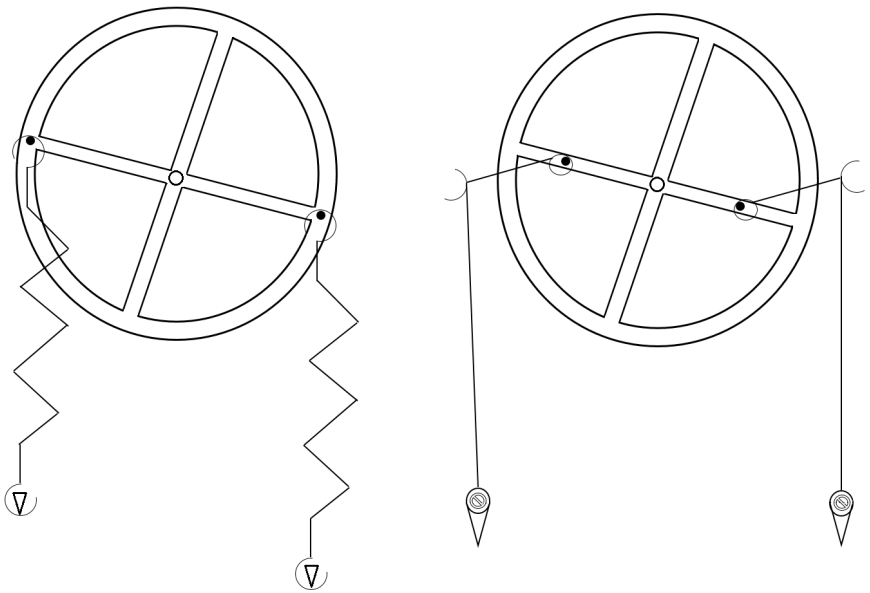


Abbildung 6.3: *a) Ein Paar Zugfedern die auf die Balance des Rades wirken. b) Ein Paar Federn die auf die Balance des Rades wirken.*[19]

> *14th April 1675*
> *... try'd double perpendicular spiral spring did well*
>
> *25th May 1675*
> *... I received the Double pendulum Sea clock and had Coffin make box for it. I hung it up by strings*
>
> *30th August 1675*
> *Contrived to move the double balance without teeth on springs at liberty bending equal Spaces by Equall increases weight.*[20]

Aus diesem Eintrag kann vermutet werden, dass Hooke bereits vor der Veröffentlichung seines *Gesetzes der Natur* eine Vorstellung davon hatte, welche Eigenschaften eine Feder

[19] Eigene Darstellung nach Wright M., *Robert Hooke's Timekeeper*, 1989, S. 89, 91
[20] Hooke R., *The Diary of Robert Hooke*, 1935, S. 161 – 205

haben könnte, die relevant für einen Uhrbau sein könnten. Die Uhr, an der Hooke arbeitete, war eine Uhr mit einem Federmechanismus. Die Uhr stellte er zusammen mit dem Uhrmacher Tompion dem König vor. Derham schrieb diesbezüglich:

> *The time of these Inventions was about the year 1658, as appears (among other evidence) from this inscription, upon one of the double Ballance-Watches, presented to K. Charles II, viz Robert Hook inven. 1658, T. Tompion fecit 1675.*
>
> *This Watch was wonderfully approved of by the King; and so the Invention grew into reputation, and was much talked of at home, and abroad.*[...] *Dr. Hooke had long before this, caused several pieces of this nature, to be made, altho they did not take till after 1675.*[21]

Es konnten hierbei keine konkreten Beweise gefunden werden, die Derham als *among other evidence* nannte, dass die 1675 vorgeführte Uhr, tatsächlich bereits 1658 von Hooke erfunden wurde. In Hookes Veröffentlichungen gibt es keine Aufzeichnung oder Beschreibung von einer solchen Uhr. Er hat lediglich im Nachhinein geschrieben, dass er über diesen Federmechanismus gesprochen hatte. Diesbezüglich kann nur anhand von Aussagen spekuliert werden.

Im Jahr 1677 veröffentlichte Hooke *Lampas*, die eine Beschreibung und eine Abbildung einer Uhr beinhaltet. Der Mechanismus, den Hooke beschrieben hatte, bestand aus zwei Federn mit Gewichten, die die Funktion der Unruh übernehmen sollten. Am Ende seiner Beschreibung erwähnte er, dass er das Prinzip von Federbewegung in seiner *Theorie der Federn* erklären wird. Damit wird vermutlich die Veröffentlichung des *Gesetzes der Natur* gemeint, dass er ein Jahr später veröffentlicht hatte.

*A New Principle for Watches*

> *This is a way of regulating both standing Watches and movable Watches, either for the Sea, or the Pocket, which some ten or twelve years since I shewed the Royal Society, when I shewed them my contrivances of the Circular Pendulum, which is since published by Monsieur Hugenius, which is also mentioned in the History of the said Society, p.247.lin.20. This was by a fly moving Circularly instead of a ballance, whose motion was regulated by weights, flying further and further from the Center according as the strength of the Spring of the Watch had more and more force upon its Arbor. The Weights were regulated from flying out further than they ought to do by the contrivance of a Spiral Spring, drawing both the said Weights to the Center of the motion or fly, in the same proportion as I then demonstrated Gravity to attract the weight of a Circular Pendulum, moved in a Parabolical Superficies, towards the Center or Axis of its*

[21] Derham W., *The artificial clock-maker*, 1696, S. 103

> *motion. The Weights were so contrived as always to counterpoise each other. The Skeleton of this fly you have represented in the Figure. The particular explanation of the parts, and the Geometrical Demonstration of the Principle both of the Springs, and of the flying from the Center, I shall explain in the Theory of Springs, and in the description of Time-keepers and Watches.*[22]

Interessant an dieser Veröffentlichung ist auch das *Postscript*, in dem diese Beschreibung von einer Uhr mit einem Federmechanismus veröffentlicht wurde. Es kann vermutet werden, dass diese Uhr ein Produkt von Hookes gekränktem Stolz war. Hooke arbeitete immer wieder an Uhren, aber bei der Entwicklung dieser bestimmten Uhr, so scheint es, hatte er einen persönlichen Antrieb. Im *Postscript* von *Lampas*, also nachdem er die Uhr selbst beschrieben hatte, wies Hooke auf Folgendes hin:

> *The Publisher of Transactions in that of October 1675. indeavours to cover former injuries done by accumulating new ones, and this with so much passion as with integrity to lay by directions; otherwise he would not have affirmed, that it was certain that none of my Watches succeeded, as it was that I had made them several years ago: For how could he be sure of a Negative? Whom I have not acquainted with my Inventions, since I looked on him as one that made a trade of Intelligence.*[23]

Diese Aussage von Hooke, bezog sich vermutlich auf Oldenburg, von dem er sich verraten fühlte. Der Grund für diese Annahme ist die Tatsache, dass Oldenburg bis zu seinem Tod für die *Philosophical Transactions* der Royal Society verantwortlich war. Hooke gab damit zu wissen, dass es sich dabei um das Jahr 1675 gehandelt hat. Das war das Jahr, in dem Huygens' Veröffentlichung *Horologium Oscillatorium* in der Royal Society bekannt gegeben wurde. Diese Veröffentlichung beinhaltet Beschreibungen von einer Uhr mit einem Federmechanismus. Darüber wird mehr im kommenden Abschnitt die Rede sein.

Beim Betrachten des Zusammenhangs der Elastizitätstheorie und der Unruh im heutigen Sinne, erscheint die Relevanz dieser Theorie eindeutig. Eine Unruh schwingt harmonisch. Das Gleichgewicht wird von einer Masse, die träge ist, hergestellt. Wenn die ausgelenkt wird, entsteht eine rücktreibende Kraft, die die Voraussetzung für die Schwingung ist. Solange die Auslenkung linear zu dieser Kraft ist, schwingt das System harmonisch. In diesem speziellen Fall ist die Schwingungsdauer isochron.

Das Motiv für die Entwicklung einer *perfekten* Uhr, zumindest erscheint es so, könnte auch einen Prioritätsstreit gewesen sein. Unabhängig davon, ob es Hookes eigene Veröffentlichungen oder Manuskripte sind, die Protokolle der Royal Society oder das Bezeugen von Freunden, wie Waller und Derham, überall wird Hookes Uhrbau im Kontext mit einem Disput in Verbindung gebracht, der sich zwischen Hooke und Oldenburg zugetragen hatte.

[22] Hooke R., *Lampas*, 1677, S. 43 – 44
[23] Hooke R., *Lampas*, 1677, S. 59

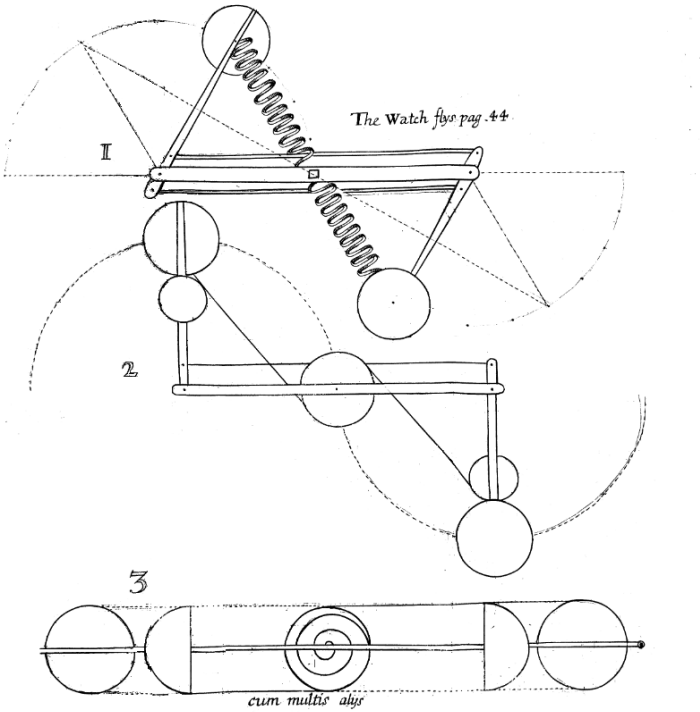



Abbildung 6.4: *Die Darstellung vom neuen Mechanismus einer Uhr die Hooke in Lampas veröffentlicht.*[24]

### 6.1.1 Der Disput Hooke und Oldenburg

In den 1660ern Jahren machte Hooke einige Vorführungen bezüglich neuer Mechanismen, die in Uhren anwendbar wären. Zur selben Zeit entwickelte auch Huygens seine Uhr. Diese Uhr wurde der Royal Society 1675 präsentiert. Das, was diese Uhr interessant gemacht hatte, war, dass sie einen Federmechanismus hatte. Diese Tatsache ließ Hooke nicht auf sich beruhen. Seine Reaktion darauf war:

> [...] *finding in the Transactions a passage inserted out of the French Journal de Scavans, about the inventation of applying a Spring to the Ballance of a Watch, for the regulating the motion thereof, without at all taking notice that this Invention was first found out by an English-man, and long since published*

[24]Hooke R., *Lampas*, 1677

> *to the World* [...] *About seventeen years since, being very inquisitive about regulating the measure of Time, in order to find the Longitude* [...] *in the year 1664, read several of my first Cutlerian lectures* [...] *many Strangers unknown to me, I there shewed the ground and reason of the application of Springs to the Ballance of a watch* [...] *I explained above twenty several ways by which springs might be applied to do the same thing* [...] *Of all these things the Publisher of the Transactions* [*Oldenburg*] *was not ignorant, and I doubt not but Mr. Hugens bath had an account, at least he might have read so much of it in the History of the Royal Society as was enough to have given him notice of it*[...][25]

In den Protokollen der Royal Society oder in seinen Veröffentlichungen kann man jedoch keine Hinweise oder Notizen diesbezüglich finden. Hier kann nur vermutet werden, dass der Grund dafür der ist, dass seine Arbeiten, die er *handgeschrieben* hatte, verloren gingen. Richard Waller, Hookes enger Freund, erwähnt einige Male in der Biografie *The Posthumous Works*, dass einige von Hookes Arbeiten verloren gingen.[26] Es gibt diesbezüglich auch Hinweise, dass es nach Hookes Tod, einen Brand gab, wobei einige seiner Arbeiten zerstört wurden.

> *Robison said: Unfortunately this* [Hooke's discoveries]*perished in the burning of Gresham College, where Mr. Hooke had apartments from the Royal Society; and he does not seem to have replaced it. It was, perhaps, like the rest, nothing more than scraps. The Correspondent who favours us with these observations saw, in 1768, many papers of Mr. Hooke's writing in the Society's archives, which had evidently been rescued from the flames, and had been in the posession of Mr. Waller; part of which he published, and would have given more had he lived.*[27]

Ob nun dabei seine Arbeiten zu einer *perfekten* Uhr vernichtet worden sind, ist ungewiss. Wenn den Aussagen von Derham geglaubt werden kann, musste Hooke konkrete Arbeiten zur *perfekten* Uhr gezeigt oder vorgeführt haben. Derham hatte sich nämlich in dem Kontext folgendermaßen geäußert:

> *Dr. Hook had long before this, caused several pieces of this nature, to be made, altho they did not take till after 1675. However he had before so far proceeded herein, as to have a Patent (drawn, tho not sealed) for these* [bezieht sich auf die Uhr die Tompion mit einem von Hooke entwickeltem Mechanismus gebaut hat] *and some other Contrivances, about Watches, in the year 1660.*

[25] Hooke R., *Helioscopes*, 1676, S. 28 – 30

[26] vgl. Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, z. B. S. 19, 39, 43, 265, 550.

[27] Patterson L.H., *Pendulum of Wren and Hooke*, Osiris, Vol. 10, 1952, S. 277 – 321.
Dieser Abschnitt befindet sich in der Fußnote der besagten Quelle und die Autorin verwies hier auf Watch–Work S. 805

> *But the reason why that Patent did no further proceed, was some disagreement about some Articles in it, with some Noble Persons who were concerned for the procuring it.*[28]

Das, was unklar aus dieser Aussage bleibt, ist, ob es sich hierbei nun um den Mechanismus mit dem Pendel oder der Feder handelt. Es gibt diverse Aufzeichnungen von den Vorführungen mit Pendeln, die in verschiedenen Formen ausgenutzt werden konnten, um eine Uhr ohne Abweichungen zu bauen.[29] Weiterhin kann aus dem Briefwechsel zwischen Oldenburg und Huygens und zwischen Moray und Huygens herausgelesen werden, dass Hooke gewisse Anwendungen der Feder bei einer Uhr gezeigt haben muss.[30] Waller berichtete in *Posthumous Works*, dass Hooke angeblich 1660 so eine Art von Regulierung Lord Brouncker gezeigt haben soll, jedoch äußerte er sich dabei auch klar:

> [...] *Monsieur Huygens having for some time apply'd himself to invent several ways to regulate Time-keepers by the correspondence he held with Mr. Oldenburgh, among other matters had notice of this, for which there was afterwards an application made to produce a Patent. This indeed is possible, but whether it was so or not I cannot determine.*[31]

Offensichtlich grenzte sich Waller hiermit in diesem Prioritätsstreit ab, aber er schrieb auch, dass die Beschreibungen, die in den Aufzeichnungen der Royal Society zu finden seien, nicht konkret aussagen, wie der Mechanismus mit der Feder aufgebaut wurde. Moray schrieb am 30. September 1665 einen Brief an Oldenburg mit dem Inhalt

> *You* [Oldenburg] *will be the first that knows when his* [Huygens's] *Watches will be ready, and I will therefore expect from you an account of them, and if he imparts to you what he does, let me know it; to that purpose you may ask him if he doth not apply a Spring to the Arbor of the Ballance, and that will give him occasion to say somewhat to you; if it be that, you may tell him what Hooke has done in that matter, and what he intends more.*[32]

Aus dem Brief lässt sich tatsächlich herauslesen, dass die Royal Society, zumindest einige von den Mitgliedern, von Hookes Mechanismus mit der Feder gehört hatten. Ob dieser

[28] Derham W., *The artificial clock-maker*, 1696, S. 103

[29] vgl. Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. II*, 1756–1757, S. 97 – 10

[30] vgl. Oldenburg H., *The Correspondences of Henry Oldenburg, Vol. II*, 1965, S. 531, 538 – 540, 553. Briefwechsel zwischen Moray und Oldenburg (30.09.1665), Oldenburg und Huygens (7.10.1665), Huygens C., *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens, Tome V*, 1893, S. 501 – 503, Briefwechsel zwischen Oldenburg und Huygens (7.10.1665), Briefwechsel zwischen Moray und Huygens (10.10.1665)

[31] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. vi

[32] Oldenburg H., *The Correspondences of Henry Oldenburg, Vol. II*, 1965, S. 531 oder Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. II*, 1756 – 1757, S. 97 – 110

jedoch erfolgreich war, ist fraglich. Wenn aber dieser Mechanismus nicht erfolgreich konstruiert wurde (vollendet wurde) und zum Funktionieren gebracht wurde, kann es sein, dass diejenigen, die es auch von Hooke hörten oder erklärt bekommen hatten, sich dachten, dass aus der Verwirklichung nichts wurde. In den Protokollen der Royal Society kann an mehreren Stellen gelesen werden, dass Hooke sehr häufig im Kontext *was ordered to do* oder *was desired to make* erwähnt wurde. Da er auch in vielen Bereichen tätig war, ist es möglich, dass er diesen Mechanismus (Anwendung der Feder) erklärt und beschrieben hat, jedoch die Uhr selbst niemand zu sehen bekam. Oldenburg behauptete dazu lediglich, dass diese Uhr nicht erfolgreich war.[33]

Hier kann nur spekuliert werden, dass, auch wenn irgendwelche Federmechanismen für Uhren vorgeführt wurden, die bis zu der Veröffentlichung von Huygens nicht zum Funktionieren gebracht worden sind. Dass Hooke diverse Vorschläge von Möglichkeiten der Anwendung gab, eventuelle Aufzeichnungen und mathematische Funktionen diesbezüglich machte, kann aus seinen Veröffentlichungen nachvollzogen werden, aber, dass er es zu einem perfekten Mechanismus auch entwickelte, ist zweifelhaft. Selbst Waller, der Hookes enger Freund war, behauptete:

> [...] *I suppose may be an undoubted Truth, the spiral Springs were not apply'd generally to regulate Watches, 'till after this Dispute with Huygens.*[34]

Anhand der durchgeführten Analyse kann Hooke geglaubt werden, aber es ist auch gerechtfertigt, zu zweifeln. Jemand wie Hooke, der verzweifelt bis zu seinem Tod um Anerkennung kämpfte, der mehr oder weniger jede seiner Errungenschaften und Hypothesen zu Papier brachte, würde es nicht zulassen, dass eine so große Erfindung nicht das Licht der Welt erblicken würde. Eine Möglichkeit bleibt jedoch offen, sollte aber nur als Hypothese gesehen werden, da sie keine dokumentierten Beweise als Stütze hat. Anhand von Hookes Empfinden gegenüber Huygens und Oldenburg besteht die vage Vermutung, dass gewisse Arbeiten und Manuskripte vernichtet worden sind. Ein konkreter Grund ist hierfür nicht dokumentiert. Die Erforschung dieser Möglichkeit würde mehr Zeit und Seiten in Anspruch nehmen.

Eine Stütze für diese Hypothese, wäre zum Beispiel die Meinung von Derham, der in diesem Kontext berichtet hatte, dass Huygens Uhr Ähnlichkeit mit Hookes Uhr hatte. Dabei dementiert er nicht, dass Huygens eine eigene Version dieser Uhr hatte, jedoch ist es in diesem Punkt relevant zu erwähnen, dass der Mechanismus, den Hooke schon vorher beschrieben hatte, auch bei der Uhr von Huygens angewendet wurde.

> *This Watch of Mr. Zulichem's* [Huygens] *agreed with Dr. Hooke's, in the application of the Spring to the ballance: only Mr. Zulichem's had a longer Spiral Spring, and the Pulses and Beats were much slower. That wherein it differs, is.*

[33] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol. II*, 1756 – 1757, S. 97 – 110
[34] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. vii

> *1. The Verge hath a Pinion instead of Pallets; and a Contrate-wheel runs therein, and drives it round, more than one turn. 2. The Pallets are on the Arbor of this Contrate-wheel. 3. then followeth the Crown wheel, &c. 4. The ballance, instead of turning scarce quite round (as Dr. Hook's) doth turn several rounds every vibration.* [35]

Weiterhin erwähnte Waller in den *Notes and Records* der Royal Society den Besuch von Lorenzo Magalotti 1668.[36] Magalotti berichtete von der Vorführung einer Uhr, die Hooke entwickelt hatte. Wie Hooke auch in *Helioscopes* geschrieben hatte, wurde die Vorführung in Anwesenheit von Besuchern durchgeführt, die er nicht kannte.

> *We also saw a pocket watch with a new pendulum invention. You might call it with a bridle, the time being regulated by a little spring of tempered wire which at one end is attached to the balance-wheel, and at the other to the body of the watch. This works in such a way that if the movements of the balance-wheel are unequal, and if some irregularity of the toothed movement tend to increase the inequality, the wire keeps it in check, obliging it always to make the same journey. They say that if you keep it hung up, the invention works well and that it corrects the errors of the movements as well as a pendulum, but that if you carry it in your pocket the temper of the wire changes in accordance with the temperature of the body, and getting softer, allows the balance wheel to turn with more freedom*[37]

Somit erscheint es, dass Hooke einen Fortschritt in der Entwicklung einer Uhr machte, die das Längengradproblem hätte lösen können. Dabei wird die Möglichkeit beschrieben, wie eine Gangreglung gewährleistet werden kann, wenn die Uhr unter dem Einfluss einer Bewegung (wie z. B. Schiffsbewegung) stünde. Für diese Regelung wurde eine Feder im gleichen Sinne wie ein gewöhnliches Pendel verwendet. Bei tragbaren Uhren verändert das Schwingungssystem seine Lage. Die Unruh wirkt je nach Lage der Uhr wie ein Pendel und verursacht Gangabweichungen. Damit die Uhr also präzise sein kann, ist es wichtig, dass die Unruh die Eigenschaft der Verlagerung des Schwerpunktes besitzt. Hooke sah dafür eine Feder mehr geeignet als ein Pendel. Ungewöhnlich ist, dass es zu diesem Ereignis keine Notiz in den Protokollen der Royal Society gibt. Das lässt nur spekulieren, dass das etwas mit dem Disput zwischen Hooke und dem damaligen Sekretär der Royal Society, Henry

[35] Derham W., *The artificial clock-maker*, 1696, S. 104

[36] vgl. Lyons H., *The Royal Society 1660 – 1940*, Cambridge University Press, 1944, S. 88
Lorenzo Magalotti (geboren 1637 in Rom, gestorben 1712 in Florenz) war ein italienischer Gelehrter, der 1709 als Mitglied der Royal Society of London aufgenommen wurde.

[37] 'Espinasse M., *Robert Hooke*, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1956, S. 67.
Eine direkte Angabe der Quelle gibt es nicht. Nur der Hinweis der Autorin auf Robison und Waller *Notes and Records* der Royal Society. Einen ähnlichen Hinweis gibt auch Lyons in *The History of the Royal Society*. In Birch's *The History of the Royal Society* gibt es diesbezüglich keine Angaben.

Oldenburg, zu tun haben könnte.[38] Robert Hooke warf Oldenburg vor, Informationen über seine Uhr an Christiaan Huygens gesendet zu haben, der auch wie Hooke dabei war, eine Uhr zu bauen. Bei einem Treffen der Society im Februar 1675 las Oldenburg einen Brief von Huygens vor, in dem Huygens das Geheimnis seiner Uhr erläuterte.

> *Mr. Oldenburg read a letter to him from Mons. Huygens, dated at Paris, 20th February, 1675, N.S. concerning a new pocket watch, which he affirmed to go as fast as a pendulum, this letter being an explication of his anagram sent 30th January, viz.*
>
> *Axis Circuli mobilis affixus in Centro Volutæ ferreæ*[39]

Hiermit hatte Huygens beschrieben, wie einfache Schwingungen mit einer Feder, anstatt mit einem Pendel, zu verursachen sind. Das ermöglichte ihm, eine Marineuhr zu bauen, dessen Funktion auch angeblich auf der See geregelt sein könnte. Dieses Ereignis führte dazu, dass Hooke, vergebens, wie sich herausstellte, versucht hatte, durch die Aufzeichnungen der Society nachzuweisen, dass er einen solchen Mechanismus bereits vor Jahren vorgestellt hatte.

In der Tat gab es einen Informanten aus der Royal Society, der einen Brief an Huygens über Hookes Uhr geschrieben hatte. Doch es war nicht Oldenburg, der Huygens geschrieben hatte, sondern Hookes guter Freund Sir Robert Moray. Im August 1665 schrieb Moray an Huygens, um ihm über Hookes Erfindung zu berichten:

> [...] *altogether new invention, or rather twenty of them, for measuring time exactly as your pendulum clocks, as well on sea as on land, for, according to him, they cannot in any way be disturbed by changes in position, or even at the air. It is, in a word, to apply to the balance, instead of a pendulum, a spring, which can be done in a hundered different ways; and he even went so far as to tell us that he has undertaken to prove that one can so adjust the oscillations that small and large will be isochronous*[*equal in time*]. *It would take too long to describe these in detail, and he claims to be publishing the whole thing in a little while.*[40]

Wie hätte Moray darüber 1665 berichten können, wenn Hooke angeblich vor 1675 keine Uhr mit Federmechanismus gezeigt hatte? Allein die Existenz von einem Brief mit einem solchen Inhalt lässt an die Priorität Hookes in diesem Disput glauben. Betrachtet man diesen Konflikt vom sozialen Aspekt, kann auch vermutet werden, dass Oldenburg eine Bereicherung der Royal Society in Huygens' Uhr sah.

[38] vgl. z. B. Inwood S., *The Forgotten Genius*, 2003, S. 109

[39] Birch T., *The History of the Royal Society, Vol III*, 1757, S. 190

Lat. *Die Achse des Beweglichen ist verbunden mit der Achse einer eisernen Spirale.*

[40] Huygens C., *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens, Tome V*, 1888, S. 426 – 428

> *When it is remembered that Oldenburg had a financial interest in Huygens' watch, since Huygens had assigned to him the patent rights, and that his petition for a patent is on record, it is perhaps possible to believe that he was not completely unprejudiced.*[41]

Robert Hooke beschäftigte sich mit der Zeitmessung über fünfzehn Jahre, aber brachte es nicht fertig, das *perfekte Exemplar* einer Uhr zu vervollständigen. Als die *Verschwörung*, wie es womöglich für Hooke erschien, von Oldenburg und Huygens 1675 dann öffentlich wurde (durch die Veröffentlichung von Huygens Arbeit), versuchte Hooke fanatisch seine Uhr zu bauen. Immerhin behauptete er in den 1660ern, dass es Hunderte Möglichkeiten gäbe, eine Feder in eine Uhr einzusetzen.[42]

Nach den Berichten seiner Zeitgenossen und Freunde kann vermutet werden, dass Hooke die Entwicklung der Uhr als wichtig empfand, was auch das *Hintergehen* von Oldenburg und Moray für ihn schlimmer machte. Unabhängig davon, wer aus diesem Prioritätsstreit als Sieger hervorgeht, erscheint es verwunderlich, wieso Hooke sein *Gesetz der Natur* erst 1678 veröffentlichte. Wenn seine Behauptungen der Wahrheit entsprechen, dass er bereits in den 1660er an der Entwicklung dieser Uhr gearbeitet hatte und sich dabei ausgiebig mit den Eigenschaften der Feder befasst hatte – wieso veröffentlichte er das Gesetz nicht schon dann? Laut Waller erschien es fast, als hätte Hooke erst dann darauf reagiert, diese Uhr zu entwickeln, als Huygens eine von ihm entwickelte Idee realisierte.[43]

Hooke war in der Tat in sehr vielen aktuellen Fragestellungen gleichzeitig involviert. In den 1660er befasste er sich nicht nur mit den Versuchen mit der Luft zusammen mit Boyle, sondern auch mit der Arbeit, die als *Micrographia* veröffentlicht wurde. Weiterhin darf der Große Brand von 1666 nicht vergessen werden, der dazu geführt hatte, dass Hooke seinem architektonischen Können nachging. Nichtsdestotrotz kann in den Aufzeichnungen der Royal Society eindeutig gelesen werden, dass Hooke immer seinen Aufgaben als Kurator nachging. Sei es nun, Experimente für andere aufzubauen und vorzubereiten, als auch seine eigenen Demonstrationen durchzuführen.

In den 1660ern gab es eine Reihe an Demonstrationen, die Hooke bezüglich seines Uhrmechanismus vorgeführt hatte. Er stellte einige Experimente mit Pendeln vor, wobei er den Mitgliedern der Royal Society Möglichkeiten ihrer Verwendung zeigte. Dennoch wurde Hooke von der Society nicht als der Erfinder eines Federmechanismus für eine Uhr gesehen. Das könnte wahrscheinlich einer der Gründe sein, wieso er eine ausgiebige Arbeit über Federn veröffentlicht hatte, was Huygens nicht tat. Das könnte Hooke als eine Möglichkeit gesehen haben, die Society davon zu überzeugen, dass er der wahre Experte für den Federmechanismus war. Doch um diese Vermutung zusätzlich argumentativ zu stützen, beinhaltet der folgende Abschnitt eine mehr fachspezifische Analyse.

[41] Andrade E., *Robert Hooke and His Contemporaries*, 1935, Nature, Vol. 136, S. 359
[42] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. iv – vii
[43] vgl. Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. iv – vii

## 6.2 Das Pendel und der Isochronismus

Im Kapitel 4 zeigte sich durch Beobachtungen, dass die Schwingungsdauer eines Federpendels und Fadenpendels ähnliche Veränderungen zeigten. Es stellte sich heraus, dass die Veränderung der Länge bei einem Fadenpendel ähnliche Veränderungen in der Bewegung zeigte, wie die Feder bei der Veränderung der Gewichtsstücke, die an die Feder aufgehängt wurden. Durch diese Parameter ließen sich z. B. die Bewegungen der Feder und des Fadenpendels so einrichten, dass sie eine gleiche Schwingungsdauer aufwiesen.

Die Ergebnisse der experimentellen Beobachtungen aus dem Kapitel 4 und die immer wiederkehrenden Aufzeichnungen der Royal Society von Vorführungen mit Fadenpendeln lassen vermuten, dass gewisse Eigenschaften des Fadenpendels noch nicht ganz klar waren. Hat das womöglich einen engeren Zusammenhang mit der Veröffentlichung des *Gesetzes der Natur*? In *Lectures de Potentia* sah Hooke sein Gesetz als Möglichkeit zur Erläuterung des *Isochronismus* bei einer Federbewegung.[44]

Der Isochronismus ist eine Eigenschaft von einem Schwingungssystem, wie z. B. einer Feder oder eines Pendels, die sowohl kleine als auch große Schwingungen in der gleichen Zeitspanne ausführen können. Die Herstellung vom Isochronismus war eines der größten Schwierigkeiten, die die Naturphilosophen bei der Entwicklung einer Uhr ohne Abweichungen hatten. Abweichungen, die dabei entstanden, konnten durch verschiedene Einflüsse entstehen wie z. B. die Lufttemperatur, Luftdruck oder Bewegung, die in der Verbindung zwischen Hemmung und dem Schwingungssystem Änderungen verursachen konnten. Das Beheben von einer solchen Abweichung ist die Voraussetzung für eine hohe Ganggenauigkeit.

John Robison[45] fand unter diversen Auszügen von Hookes Manuskripten einen Text, der wahrscheinlich, während Hookes Oxford Zeit (1657 – 1660) geschrieben wurde. Robison identifiziert ein *Theorem zum Isochronismus*, dass er in der dritten Ausgabe der *Encyclopædia Britannica*[46] erwähnte.

Dieses Theorem wurde von Robison als Bedingung für den Isochronismus interpretiert. Sowohl in Robisons *A System of Mechanical Philosophy*, als auch in der *Encyclopædia Britannica* konnte keine explizite Aufzeichnung dieses Theorems in exakt dieser Form gefunden werden. Robison schrieb lediglich:

[44] vgl. Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 5

[45] John Robison (geboren 1739 in Boghall, Baldernock, Stirlingshire, gestorben 1805 in Edinburgh) war ein schottischer Mathematiker und Naturphilosoph, außerdem war er Professor für Naturphilosophie an der University of Edinburgh. Robison beschäftigte sich ausgiebig mit der Navigation. Das, was hierbei interessant erscheint, Robison war ein Mitglied des Längengradausschusses (*Board of Longitude*). Dieser Ausschuss testete später auch die Uhr von Harrison.

[46] Patterson L.D., *Pendulums of Wren and Hooke*, 1952, S. 277 – 321
Hier gab die Autorin in der Fußnote an: *Robison J., Watchwork, Encyclopædia Britannica, 3rd edition,. Edinburgh, 1797*

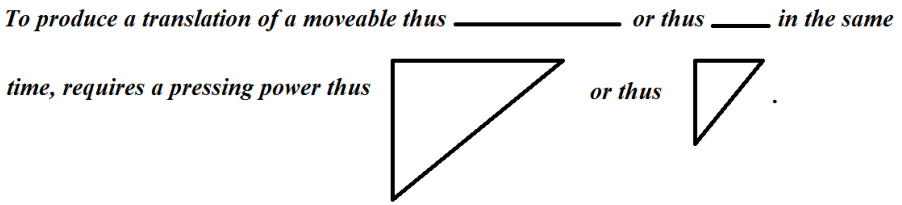



Abbildung 6.5: *Hookes Theorem des Isochronismus*[47]

> *In watch-work we assume a similar principle, namely, that the oscillations of a balance, urged by a spring, and undisturbed by all foreign forces, are performed in equal times, whether they be wide or narrow.*[48]

Dieses Prinzip, so Robison, stammte von Hooke, der viele Experimente mit Federn gemacht hatte. Interessanterweise wird dann erwähnt, dass Hooke bereits 1660 zur *Force* der Feder geschrieben hatte.

> *He* [Hooke] *found that the force necessary for retaining a spring in any constrained position was proportional to its tension, or deflection from its natural form. He expressed this in an anagram, which he published about the year 1660, in order to establish his claim to discovery, and yet conceal it, till he had made some important application of it. When the anagram was explained some years afterwards, it was, "Ut tensio, sic vis". Dr. Hooke thought of applying this discovery to the regulation of watch movements. For, if a slender spring be properly applied to the axis of a watch balance, it will put the balance in a certain determinate position. If the balance be turned aside from this position, it seems to follow that it will be urged back towards it by a force proportional to its distance from it. He immediateley made the application to an old watch, which he afterwards gave to Dr. Wilkins, Bishop of Chester. This was in 1658. Its motion was so amazingly improved, that Hooke was persuaded of the perfection of his principle, and thought that nothing was now wanting for making a watch of this kind a perfect chronometer but the hand of a good workman. For his watch seemed almost perfect, though made in a small country town, in a very coarse manner. Mr. Huyghens also claims this discovery. He published his claim about the year 1675, and proposed to make watches for discovering the longitude of a ship at sea. But there is the most unquestionable evidence of*

[47] Eigene Darstellung nach Patterson L.D., *Pendulums of Wren and Hooke*, 1952, S. 284
[48] Robison J., *A System of Mechanical Philosophy Vol. IV*, Edinburgh, 1822, S. 577

> *Dr. Hooke's priority by fifteen years, and of his having made several watches of this kind.*[49]

Nicht nur behauptet Robison, dass Hooke bereits 1660 sein *Gesetz der Natur* formuliert hatte, sondern er gab Hooke eindeutig die Priorität im Disput mit Huygens bei der Uhrentwicklung. Wenn die vermutete Zeit der Verschriftlichung dieses Theorems tatsächlich die Zeit zwischen dem Jahr 1657 und 1660 war, war das wahrscheinlich während der Entwicklung von Hookes Uhrhemmung. Das würde bedeuten, dass die Anwendung einer federgesteuerten Regelung zum ersten Mal da auftauchte. Robison interpretierte diese *Figuren* im Theorem als *a hasty expression of a force as a distance to be run through.*[50]

Beim Betrachten von Hookes späteren Veröffentlichungen, lässt sich das Theorem zum Isochronismus, als die *aggregate of Powers*, die ein gewisser Körper für eine Bewegung brauchen würde, um zum Gleichgewichtspunkt zurückzukehren, deuten. Dabei müsste diese *aggregate of Powers* proportional zum Quadrat der Auslenkung (Amplitude) sein.[51] Beim genauen Hinsehen lässt sich vermuten, dass es sich hierbei um zwei verschiedene Auslenkungen handelt (oder Veränderungen), die in gleicher Zeit zurückgelegt werden sollten. Dies sei nur dann möglich, wenn die *Power* proportional zur Auslenkung ist.

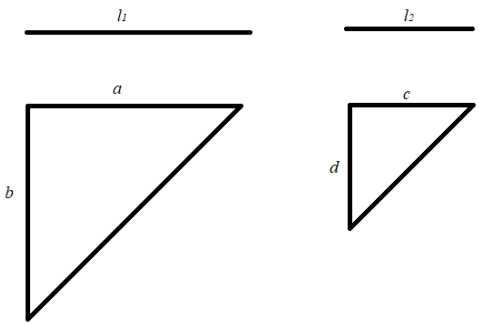



Abbildung 6.6: *Mögliche Interpretation von Hookes Theorem.*[52]

Kann hier dieselbe Methode, die auch auf Hookes Federbewegungsdiagramm zu sehen ist, betrachtet werden? Das Theorem besagt, dass um eine Translation der *Längen* $l_1$ oder $l_2$ in einem gleichen Zeitabschnitt bewirkt wird, dass es eine *pressing Power* gibt, die dem großen oder kleinen Dreieck respektive entspricht. Beim genauen Hinsehen (*Abbildungen*

[49] Robison J., *A System of Mechanical Philosophy Vol. IV*, 1822, S. 577 – 578
[50] Patterson L.D., *Pendulums of Wren and Hooke*, 1952, S. 277 – 321
[51] vgl. Patterson L.D., *Pendulums of Wren and Hooke*, 1952, S. 277 – 321
[52] Eigene Darstellung nach Hooke.

*6.6*), kann erkannt werden, dass die Seite des großen Dreiecks $a$ fast der Länge $l_1$ und die Seite des kleinen Dreiecks $c$ der Länge $l_2$ entspricht.

Das bedeutet, dass die *Veränderung* proportional zur *Power* ist. Wie auch beim Federbewegungsdiagramm können die Seiten $a$ und $b$ (bzw. $c$ und $d$) als gleichlang betrachtet werden (Skalierung). Sowohl $a$ als auch $b$ (bzw. sowohl $c$ als auch $d$) ändern sich mit der Länge $l_1$ (bzw. $l_2$). Dieses über die Dreiecke erklärte Isochronismustheorem, dass von Robison Hooke zugeschrieben wurde, kann als ein Vorläufer der Isochronismus Interpretation, die Hooke für die Federbewegung machte, gesehen werden. Demnach würde $l_1$ (damit auch $a$) proportional zu $b$ sein - was auch hier der Fall ist. Die Fläche des Dreiecks würde die *aggregate of Powers* darstellen. Genau wie beim Federbewegungsdiagramm würde auch hier, die Fläche des Dreiecks (also *aggregate of Powers*) proportional zum Quadrat der *Veränderung* (Auslenkung) sein. Da die Fläche des Dreiecks mit $\frac{1}{2}ab$ gegeben ist und $a \sim b$ ist, gilt $Fläche \sim a^2$.

Dementsprechend würde das Theorem mit heutigem Wissen besagen: Damit ein Körper in einer besagten Zeitspanne $t$ die Strecke $l_1$ (bzw. $l_2$) zurücklegen kann, braucht es die Energie $\int F_1 ds$ (bzw. $\int F_2 ds$), wobei $F_1 > F_2$.

Auf der anderen Seite, mit Bezug auf die Ergebnisse aus dem Kapitel 4, wobei ähnliche Eigenschaften einer Feder und eines Fadenpendels betrachtet wurden, kann Hookes Theorem auch folgendermaßen interpretiert werden: Wenn vermutet wird, dass die Linien ($l_1$ und $l_2$), die im Theorem gegeben sind, Längen eines Fadenpendels darstellen und die Dreiecke die *Gewichtsstücke*, die auf einer Feder hängen, kann behauptet werden, dass für eine bestimmte Länge eines Fadenpendels ein Gewichtsstück entspricht, dass dafür sorgt, dass die Anzahl der Schwingungen von der Feder und dem Fadenpendel gleich sind. Im Grunde würde das bedeuten, dass die Schwingungsdauer der Feder und des Fadenpendels gleich sind. Um es zu verdeutlichen: Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels ist mit

$$T \sim \sqrt{l} \tag{6.1}$$

gegeben, wobei $l$ die Länge darstellt. Für eine Feder ist die Schwingungsdauer

$$T \sim \sqrt{m} \tag{6.2}$$

Anhand von den Gleichungen (6.1) und (6.2) kann erkannt werden, dass die Veränderungen von $l$ und $m$ in gleicher Proportionalität zu der Schwingungsdauer sind. Das würde im Zusammenhang mit Kapitel 4 bedeuten, wenn ein maximal verwendetes Gewichtsstück der Masse $m$ an eine Feder angehängt wird und die Länge des Fadenpendels $l$ eine dementsprechend isochrone Schwingung von Feder und Fadenpendel gewährleistet, müsste für eine Masse $2m$ die Länge $2l$ verwendet werden, damit die Feder und das Pendel isochron schwingen. Das würde bedeuten, dass der Isochronismus in dem Sinne bei der Feder gewährleistet sein könnte. In *Lectures de Potentia* schrieb Hooke:

> *From these Principles also it will be easie to calculate the proportionate strength of the spring of a Watch* [...] *and consequently of adjusting Fusey to the Spring so as to make it draw or move the Watch always with an equal force. From the same also it will be easie to give the reason of the Isochrone motion of a Spring*[...][53]

Wenn die Diagramme in *Lectures de Potentia* betrachtet werden, kann tatsächlich das Theorem des Isochronismus wiedererkannt werden.

Aus dem Briefwechsel zwischen Moray und Huygens im August 1665[54] wird klar, dass Hooke Experimente mit den Federn begonnen hatte und, dass er entdeckt hatte, dass die Bewegung der Feder isochron ist. Für Hooke hing der Isochronismus davon ab, welche Kurve die Bahn der Bewegung beschreibt. Die *ideale* Kurve war für ihn ein Kreis. Das bedeutete, nach Hookes Annahme, dass die Bewegung vom Pendel isochron ist. Im Mai 1666 veröffentlicht Hooke einen Text, der sich genau auf diese Bewegungskurven bezog, indem er die Bewegung von einem Fadenpendel beschrieben hatte.

> *Let AB represent a pendulum hanging perpendicular, suspended at A: if it be moved out of it, as to C or F, the conatus of the body to descend in the point C to the conatus in F shall be always as CD to FG. For it is a common principle of mechanics, that the conatus of a body descending in an inclining plane to that of one descending perpendicular, is reciprocal proportion to the length of those planes included between two horizontal parallel lines: As if there be a body at C, and another at D, the one descending by CE, the other by DE, the conatus in CE to that in DE shall be as DE to CE; that is as CA to CD. The same may be also proved of a ball at F and G, that the conatus of the body to descend in GH to that descending in FH, shall be as FH to GH; that is as AF to FG: Therefore the conatus in C to that in F, shall be as CD to FG; and consequently the conatus of returning to the centre in a pendulum is greater, according as it is farther and farther removed from the centre, which seems to be otherwise in the attraction of the sun; as I may afterwards further explain.*[...][55]

Hier wird ein hängendes Pendel der Länge $AB$ beschrieben, das im Punkt $A$ aufgehängt ist. Wenn es aus dem Gleichgewicht gebracht wird, wird der *Conatus* im Punkt $F$ geringer sein als im Punkt $C$. Der Pendelkörper bewegt sich entlang eines Kreises in einer horizontalen Ebene, anstatt hin und her zu schwingen. Hooke ging der Behauptung nach, dass der *Conatus*, der dazu neigt, einen solchen Körper bei $C$ oder $F$ in Richtung der zentralen, vertikalen Position $B$ zusammenfallen zu lassen, direkt als Radius der jeweiligen Kreisbahn

[53] Hooke R., *Lectures de Potentia*, 1678, S. 5
[54] Dieser Brief wurde schon im Zusammenhang der Uhrentwicklung zitiert.
[55] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol.VI*, 1930, S. 265 – 268

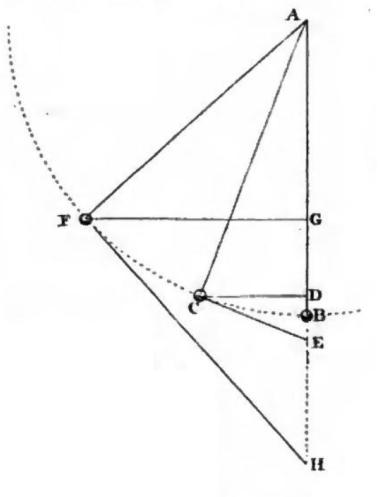



Abbildung 6.7: *Hookes Darstellung von Pendelbewegung in der Intention zu zeigen, welche Kurven Himmelskörper bei ihrer Bewegung machen.*[56]

$CD$ oder $FG$ variiert. Die Frage, die sich hierbei stellt, ist, was *Conatus* eigentlich darstellt. In Descartes Arbeiten wird *Conatus* als etwas beschrieben, das die Eigenschaften der Trägheit eines Körpers hat.[57] Laut Hooke:

> [...] *conatus or endeavour to Motion* [...] *is not a Motion, and consequently cannot propagate Motion: And Endeavour to move is not moving, and so cannot propagate Motion: But for the Propagation of Motion, Motion is necessary.*[58]

Wegen dieser Wirkung tendiert das Pendel dazu, wieder in die Gleichgewichtsposition zu gelangen. Anhand der Proportionalitäten die Hooke hierfür verwendete, kann vermutet werden, dass er die Komponenten einzelner Kraftwirkungen betrachtete. Da die Bewegung eines Fadenpendels mit einer Kreiskurve dargestellt werden kann, kann beispielsweise, durch eine Tangente auf der Kreiskurve, die resultierende Kraft dargestellt werden. *Conatus* könnte dann, als Komponente von der *Power* interpretiert werden, die den Körper dazu bringt, wieder in die Gleichgewichtsposition zurückzukehren. Diese Vermutung unterstützt zusätzlich Hookes folgende Aussage:

[56] Birch.T., *The History of the Royal Society, Vol. II*, 1756, am Ende ohne Seitenangabe, wobei Bezug auf die Erklärung auf S. 92 genommen wird.

[57] Ariew R., Des Chene D., Jesseph D.M., Schmaltz T.M., Verbeek T., *Historical Dictionary of Descartes and Cartesian Philosophy*, Second Ed., Rowman & Littlefield, 2015, S. 143

[58] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. 136

> [...] *a part of the gravity of such Bodies* [heavy Bodies moved with Revolution]*towards the center must be taken off by this conatus*[59]

Laut seiner Beschreibung der einzelnen Strecken die der Pendelkörper in *Abbildung 6.7* zurücklegt, soll sich der *Conatus* in $CE$ zum *Conatus* in $DE$ so verhalten, dass gelten muss:

$$\frac{DE}{CE} = \frac{CD}{CA} \tag{6.3}$$

Wenn der Winkel zwischen $CA$ und $DA$ mit $\alpha$ gekennzeichnet wird, kann anhand der *Abbildung 6.7* folgende Gleichung hergeleitet werden:

$$\sin\alpha = \frac{CD}{CA} \tag{6.4}$$

Dementsprechend wäre bspw. der *Conatus* $CD$:

$$CD = CA\sin\alpha \tag{6.5}$$

Hiermit wollte Hooke vermutlich zeigen, dass eine Kreisbewegung aus zwei *Komponenten* des sogenannten *Endeavour*[60] besteht: Zum einen, kann es durch die Tangente einer direkten Bewegung beschrieben werden und zum anderen durch eine Komponente, die strebt, den Pendelkörper in die Gleichgewichtsposition zurückzubringen.

> *The discourse was an introduction to an experiment to show, that circular motion is compounded of an endeavour by a direct motion by the tangent, and of another endeavour tending to the centre.* [...][61]

Dabei gab es, laut Hooke, hauptsächlich zwei Dinge, die bei der Bewegung eines Pendels zu berücksichtigen wären. Auf der einen Seite, die Geschwindigkeit der Bewegung in jeder Schwingung und auf der anderen, die Unveränderlichkeit der Dauer der Schwingung durch unterschiedliche Bögen, also der Isochronismus.

> *As to the first, the determination of the velocity of the vibration depends on the proportion between quantity of strength, and the bulk of the body moved; wherever the proportion of strength is greater to the proportion of the bulk, there*

[59] Waller R., *The Posthumous Works*, 1705, S. 349

[60] *Endeavour* wird in dem oben kommenden Zitat erwähnt und kann als etwas interpretiert werden, was ein Streben in eine bestimmte Richtung formuliert.

[61] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 267 – 268

> *the motion is swifter, and where less, there slower. In all pendulous motions, the strength moving is gravity, and that is more less, according as it moves the body more directly or obliquely towards the centre of the earth.*[62]

Hierdurch wird die Interpretation der Komponenten unterstützt. Bei den Beobachtungen der Geschwindigkeit des Pendels betrachtete Hooke sowohl die *Menge* (Bulk) als auch die *Strength* die auf den Pendelkörper wirkte. Betrachtet werden sollen als Beispiel zwei identische Fadenpendel gleicher Länge. Auf das eine Pendel wird das Gewicht $G_1$ und auf das andere $G_2$ aufgehängt, wobei z. B. $G_1 > G_2$. Beide Pendel werden zu einem gleichen Punkt ausgelenkt. Allein bei dieser Wirkung ist es leicht zu erkennen, dass verschiedene Kräfte nötig sind, um diese Auslenkung zu bewirken. Das, was dabei beobachtet werden kann, ist, dass der Impuls dieser Pendelkörper unterschiedlich ist, während die Schwingungsdauer dieselbe ist. Also gilt wieder das Theorem des Isochronismus.

Über die Wahrnehmung des Impulses bei einer Bewegung war bereits in vorherigen Kapiteln die Rede. Es ist auch mehrfach angedeutet worden, dass ein Problem herrschte, wobei nicht ganz klar war, ob $mv$ oder $mv^2$ eine Bewegung beschreiben kann. Daher kann deswegen zusätzlich angenommen werden, dass hiermit eine Art *Erhaltungsgesetz* formuliert wurde. Ist das Pendel auf einer größeren Höhe, hat es eine größere potentielle Energie, die die Geschwindigkeit der Bewegung beeinflusst. Nur formulierte es Hooke durch das Verhältnis von *Strength* und *Bulk*. Also gilt anhand dieser Behauptung:

$$E_{Pot} \sim mv^2 \tag{6.6}$$

demnach ergibt sich die Geschwindigkeit mit

$$v \sim \sqrt{\frac{E_{Pot}}{m}} \tag{6.7}$$

Wenn also, wie Hooke es behauptete, $E_{Pot} \to \infty$ schneller wächst als $m \to \infty$, ist das Verhältnis der beiden Größen größer und damit auch die Geschwindigkeit. Also wenn auf einem Pendel die Masse $m$ hängt, von einer größeren Höhe im Gegensatz zur Gleichgewichtsposition losgelassen wird, ist die Geschwindigkeit, die das Pendel beim Schwingen durch den Gleichgewichtspunkt hat, größer.

Es erscheint, als sei die Proportionalität der *Power*, oder in dem Fall der *Strength*, zum Quadrat der Geschwindigkeit Hookes Grundlage der Dynamik. Für ihn war klar, dass dieses Verhältnis jede Bewegung, indem sich ein Körper mit einer gewissen Geschwindigkeit fortbewegt, beschrieben werden kann. Das betonte Hooke auch in *Lampas*, indem er schrieb:

[62] Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 284

> *Now this is exactly according to the General Rule of Mechanicks. Which is, that the proportion of the strength or power of moving any Body is always in a duplicate proportion of the Velocity it receives from it;* [...] *This is most certainly true in the motion of Bullets shot out of cannons, Muskes, Pistols, Wind-guns, Crossbows* [...] *and the like; as likewise in the motion of Arrows shot with Bows or Ballistae; of stones thrown by the hand or with slings; of pendulums moved by Gravity or Weights; of Musical Strings; of Springs and all other vibrating Bodies; of the motion of Wheels, Flies &c. drawn and turned by weights or springs; of the motion of perpendicularly or bliquely falling Bodies; and in a word, of all Mechanical and Local motions* [...][63]

Diese *General Rule of Mechanicks* hatte Hooke im Februar 1667 angewendet, indem er vorführte, dass eine Bewegung auf einer Parabel und einem Kreisbogen in gleicher Zeit zurückgelegt werden kann. Interessanterweise können aber keine Aufzeichnungen dieser Vorführung in den Protokollen der Royal Society gefunden werden.

Diesbezüglich kann in den *Classified Papers* der Royal Society eine Beschreibung gefunden werden, die etwas Ähnliches wiedergibt. Um zu zeigen, dass die Bewegung auf einer Parabel und einem Kreisbogen in gleicher Zeit zurückgelegt werden kann, führte Hooke sowas wie Axiome ein. Diese Axiome beschreiben die Verhältnisse der mechanischen Quantitäten, die gewährleistet werden müssen, um dies auch tatsächlich geometrisch darstellen zu können. Im Nachhinein erscheint diese geometrische Interpretation mit dem Bewegungsdiagramm der Feder vergleichbar zu sein. Das Bewegungsdiagramm der Feder beinhaltet eine Kreiskurve, die zusammen mit einer Parabelkurve im gleichen Punkt endet, und das *zur gleichen Zeit*. Die Axiome, die Hooke formulierte, lauten folgendermaßen:

1. *If a body be moved by severall powers it shall have severall degrees of velocity but the increase of velocity will be made but in a subduplicate proportion to of* [sic] *the increase of the power.*
2. *In a circular motion the indeavour of receding from the center is in a duplicate proportion to the velocity.*
3. *If a body be placd in any point of the superficies of a parabolick concavity whose axis is perpendicular to the horizon & whose vertex is downwards the conatus of such a body towards the axis is in a duplicate proportion to its distance.*
4. *Circles increase in the same proportion with their diameters & their diameters being ordinates in the same proportion with the ordinates of a Parabola.*[64]

[63] Hooke R., *Lampas*, 1677, S. 33

[64] Hooke R., *Paraboloic conical pendulum*, 1667, aus dem Artikel von Pulgiese P.J., *Robert Hooke and the Dynamics of Motion in a curved path.* veröffentlicht in *Robert Hooke. New Studies.*, Hrsg. Hunter M., Schaffer S., Boydell Press, 1989, S. 204

Die Propositionen lassen sich wie folgt deuten:

1. Wenn sich ein Körper durch die Wirkung von mehreren *Power* bewegt, wird jeder dieser *Power* eine bestimmte (*Momentan*) Geschwindigkeit entsprechen. Die (*Gesamt*) Geschwindigkeit dieser Bewegung ist proportional zur Wurzel der *increase of the Power*. Darunter kann die Veränderung der *severall powers* verstanden werden. Diese Veränderung entspricht dem, was wir mit einem Integral betrachten würden. Das bedeutet, dass auch hier die *aggregate of Powers* dem Quadrat der Geschwindigkeit entsprechen würde. Anhand der vorher diskutierten Veröffentlichung von Hooke, erscheint dies lediglich eine Bewegungsgleichung darzustellen, die heute als kinetische Energie formuliert werden könnte. Auch wenn Hooke hier nicht explizit *aggregate of Powers* geschrieben hatte, schrieb er dennoch, dass auf das Pendel *severall Powers* wirken und, dass das Quadrat der Geschwindigkeit proportional zum *increas of the power* ist, und nicht zu der *Power* selbst.

2. Die *Indeavour* auf das Pendel ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit. Anhand von Hookes Veröffentlichungen kann *Indeavour* sowohl als Neigung als auch *Arbeit* betrachtet werden. In diesem Axiom ist die Bedeutung in dem Sinne nicht relevant, weil z. B. die Neigung als maximale Höhe interpretiert werden kann, was bedeuten würde, dass mit dem zweiten Axiom der Energieerhaltungssatz gegeben ist. Arbeit wäre zu dieser Interpretation auch nicht falsch, wenn dabei nur die horizontale Komponente der wirkenden Kraft betrachtet wird.

3. Aus der Gleichung (6.5) konnte hergeleitet werden, dass der *Conatus* direkt proportional zu der Länge des Pendels ist (also im Fall der *Abbildung 6.7* wäre das $CA$). Das dritte Axiom besagt im Grunde, dass wenn ein Körper senkrecht über seinem *Vertex* (vermutlich Drehachse) steht, ist sein *Conatus* doppelt so groß. Das entspricht auch der Tatsache, wenn ein Pendel von einer solchen Höhe schwingen gelassen wurde, dass es sich in einer Position *über* seiner Gleichgewichtsposition befindet, wäre $CD_1 = 2CA \sin\alpha$. Also wäre $CD_1 = 2CD$.

4. Der Bogenumfang (bzw. der Kreisumfang) ist proportional zum Radius. Im Zusammenhang damit kann als Beispiel die erste Geschwindigkeitskurve in Hookes Bewegungsdiagramm einer Feder (*Abbildung 5.12* oder Abbildung im Anhang) genommen werden, die einem Viertelkreis entspricht, dabei die Ordinate $AF$ der maximalen Geschwindigkeit entspricht, ist es leicht zur erkennen, dass diese Geschwindigkeit dem Radius der Kreiskurve entspricht. Diese Interpretation hat die Konsequenz, je größer die Strecke (Radius), desto größer die Geschwindigkeit, die das Pendel dadurch bekommt. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die Strecke in gleicher Zeit zurückgelegt wird. Dies bedeutet wiederum, dass die *Power* oder der *Bulk* größer sein muss.

Hooke gab hiermit eine Möglichkeit, eine Pendelbewegung grafisch darzustellen und geometrisch zu interpretieren. Eine Pendelbewegung lässt sich, laut Hooke, mit einer Parabel darstellen. Unabhängig davon, welche *Power* auf das Pendel wirkt und auf welche Position es ausgelenkt wird, jeder dieser Positionen lässt sich wieder auf dieser Parabel finden. Jede Schwingung, wieder unabhängig von der Position, dauert immer gleich lang. Also ist die Schwingungsdauer konstant und ist nicht abhängig von der *Power*, die auf das Pendel wirkt. Diese Wirkung ist immer proportional zur Auslenkung. Die Ordinate, die vom Kreisbogen senkrecht auf der Schwingungsachse steht, ist proportional zur Geschwindigkeit. Eine gleiche Beschreibung lässt sich in dem Bewegungsdiagramm der Feder finden. Da stellen die Ordinaten des gesetzten Kreisbogens auch die Geschwindigkeit dar.

Aus dem zweiten und dritten *Axiom* geht hervor, dass die Geschwindigkeit proportional zum Radius des Kreisbogens sein muss. Das würde auch erklären, wieso Hooke in der Darstellung seines Diagramms zur Federbewegung die Geschwindigkeit als Kreiskurve dargestellt hatte. Wenn dieses Axiom für ihn auch für die Federbewegung gegolten hat, ist es verständlich, dass die Ordinaten dieses Viertelkreises ($CGGF$) die Geschwindigkeiten darstellen. Aus diesem Grund erscheint es möglich, dass Hooke eine Feder mit einer solchen Federhärte gewählt hat, dass die Strecke $CD$ der Strecke $AC$ entsprach, sodass als Ergebnis eine Kreiskurve heraus kommen musste, die die Veränderung der Geschwindigkeit darstellte. Er machte keine weiteren Angaben zu den Kurven der anderen Federhärten, für die eine Ellipsenkurve zur Beschreibung der Veränderung der Geschwindigkeit herausgekommen wäre, da eine analoge Argumentation sonst nicht möglich gewesen wäre. Auf diese Art und Weise war die Darstellung des Isochronismus gewährleistet. Dadurch wird auch der Isochronismus gewährleistet.

Mit dem vierten *Axiom* wird die Strecke vorausgesetzt als der Radius des Bogens, womit der Radius proportional zur Geschwindigkeit ist. Das ist auch etwas, was sich auf dem Federbewegungsdiagramm wiederfinden lässt. Zum einen wählte er die Kreiskurve zur leichteren Ermittlung von Geschwindigkeiten, zum anderen setzte er die Auslenkung der Feder so, dass sie dem Radius der Kreiskurve entspricht. Unabhängig davon gilt sowohl bei der Feder (zumindest bis zum Gleichgewichtspunkt wie in Hookes Beschreibung), als auch bei dieser Beschreibung von Pendelbewegung, je größer die Strecke (zurückgelegter Weg), desto größer die Geschwindigkeit.

Aus den praktischen (eigenen) Beobachtungen geht hervor, dass es eine gewisse Ähnlichkeit gibt zwischen der Veränderung der Länge des Pendels und der benutzten Gewichtsstücke bei der Feder. Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit der Beschreibung des Federbewegungsdiagramms, kann eine gewisse Proportionalität wiedererkannt werden.

Die Eigenschaften des Pendels könnten auf vielerlei Arten nützlich gemacht werden. Um das zu zeigen, stellte Hooke, einige mathematische Erklärungen zu der Bewegung vom Pendel dar. Ob es damit einen Zusammenhang zwischen der Feder und dem Fadenpendel für Hooke gab, kann nur spekuliert werden. Isochronismus ist eines der Eigenschaften, die Hooke sowohl bei dem Fadenpendel, als auch bei der Feder als wichtig gesehen hatte.

Immer wieder wird in seinen Veröffentlichungen diese Eigenschaft als etwas erwähnt, das zur präzisen Zeitmessung beitragen könnte.

# Kapitel 7

# Im Rückblick

Im Jahr 1678 veröffentlichte Robert Hooke *Lectures de Potentia Restitutiva*, in der er ein Gesetz formulierte, dass heute als das Hookesche Gesetz bekannt ist. Zu der Zeit der Veröffentlichung war Hooke ein Mitglied der Royal Society of London. Er erarbeitete sich sein Platz in der Gesellschaft und war Geometrieprofessor am Gresham College. Anerkannt von vielen Naturphilosophen des 17. Jahrhunderts, wie Robert Boyle und Christopher Wren. Trotz seiner Fähigkeiten und immer wiederkehrenden Errungenschaften, scheint Hooke nicht die Anerkennung empfunden zu haben, die er anscheinend angestrebt hatte.

Robert Hooke war jemand, der für sein Ansehen sehr hart arbeiten musste. Er kam aus bescheidenen Verhältnissen und musste sich seine Ausbildung selbst finanziell erarbeiten. Um dies zu tun, gab Hooke bspw. den eher wohlhabenden Schulkameraden Nachhilfestunden. Die Arbeitsstellen, die er später im Laufe seiner Karriere antrat, erarbeitete er sich mit seinem brillanten Können, seinen Fähigkeiten für das Experimentieren und dem Entwickeln diverser mechanischer Geräte.

Anhand der vorgenommenen Quellenanalyse kann vermutet werden, dass Hooke eine Persönlichkeit war, die sehr nach Anerkennung strebt. Es ist ungewiss, woher das kam. Eine Möglichkeit wäre, dass sich Hooke seiner Talente sehr bewusst war, die aber nach seinem Empfinden von anderen nicht gesehen wurden.
In vielen seiner Veröffentlichungen können Sätze gefunden werden, wie bspw. die Aussage die Hooke bzgl. der Veröffentlichung *Horologium Oscillatrium* von Huygens 1675 äußerte:

> [...] *I had made them several years ago* [...] *I made them without publishing them to the world in Print* [...][1]

Häufig konnten diese Sätze im Zusammenhang mit Entdeckungen, Erfindungen usw. von anderen (die Hooke selbst als seine Rivalen gesehen hatte) gefunden werden. Solche Aus-

[1] Hooke R., *Lampas*, 1677, S. 53

sagen waren vermutlich der Grund, wieso Hooke für einige der Mitglieder der Society nicht immer glaubwürdig in dem war, was er behauptete.

Das offensichtliche Problem von Hooke hierbei war es, dass er immer mehrere Forschungsfragen auf einmal bearbeitete. Hooke hatte den Drang, sich zu jedem Zeitpunkt in aktuellen Forschungsfragen zu beweisen, ganz gleich ob ein Phänomen keine Erklärung gefunden hatte oder ein Gerät noch nicht entwickelt wurde oder etwas noch nicht untersucht wurde, es aber interessant für die Society gewesen wäre. Ob das nun sein eigenes Empfinden war oder ein Ereignis in seinem Leben (über das es keine Berichte gibt), das dazu beigetragen hat, sich ständig beweisen zu müssen, bleibt nur Spekulation. Tatsache aber bleibt, dass anhand der Protokolle der Royal Society of London gezeigt werden kann, dass die aktuellen Fragestellungen chronologisch mit den Fragestellungen von Hooke übereinstimmen. Von der Forschung zur Luft, astronomische Beobachtungen, Optik, Lichtphänomene, mechanische Bewegungen, Elastizität – mit allen diesen Dingen beschäftigte sich auch Hooke (was anhand seiner Veröffentlichungen nachvollzogen werden kann). Wenn noch zusätzlich explizite Anregungen von Mitgliedern der Society kamen, sah es Hooke wahrscheinlich als ein zusätzliches Motiv, das, was er gerade bearbeitete, liegen zu lassen und genau mit dieser aktuellen besagten Sache anzufangen. Das führte oft dazu, dass die Sachen, die er liegen gelassen hatte, nicht zur Vollendung gebracht wurden. Dabei entstand ein Problem dann, wenn jemand anderes genau diese, von ihm nicht vollendete Sache, fertig brachte. Eine Erklärung für ein solches Verhalten wäre, dass Hooke es womöglich so empfand, dass, wenn er eine Lösung für diese *so dringende* Sache fände, er endlich die Bewunderung bekäme, die er seiner Meinung nach verdiente. Dies erscheint plausibel vor dem Hintergrund, dass Hooke scheinbar sehr um Anerkennung und vielleicht Bewunderung innerhalb seines professionellen Umfeldes kämpfte.

Die Elastizität war auch ein solches Problem, dass dringend eine Erklärung brauchte. Vor *Lectures de Potentia* gab es keine Veröffentlichung, die in einer solchen Form die Elastizität erklärt und gesetzlich formuliert, wie Hooke es tat. Die wahre Inspiration und die wahre Motivation lassen sich nur schwer deuteten. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die dahinterstecken könnten. Nach meiner Ansicht scheint die folgende Interpretation schlüssig:

Während seiner Oxford Zeit (über die es mit Bezug auf Hooke nur wenig Informationen gibt) arbeitete er mit John Wilkins zusammen. Wilkins kannte gewisse Federmechanismen und arbeitete viel zur Navigation.[2] Während dieser besagten Zeit, bevor er bei Boyle anfing zu arbeiten, baute Hooke die Ankerhemmung einer Uhr. Durch die Arbeiten von Hooke lässt sich vermuten, dass er sehr interessiert an dem Uhrbau war. Nach der Empfehlung von Wilkins stellte Boyle Hooke als seinen Assistenten ein.

Boyle wiederum, arbeitete zu der Zeit intensiv an den Eigenschaften der Luft. Hooke und Boyle bauten gemeinsam die Luftpumpe und arbeiteten zu den Eigenschaften der Luft. Dafür führten sie viele Versuche durch, die letztlich zum Boyleschen Gesetz führten.

[2]Wilkins J., *Mathematical Magick: or the Wounders That maybe perform'd by mechanical geometry.*, 5th Edition, London, 1707, S. 133

Mit den Erkenntnissen dieser Luftforschung kamen neue Ideen und neue Fragestellungen. Was ist die Elastizität? Mit welchen Quantitäten lässt sie sich beschreiben? Könnten diese Erkenntnisse andere Phänomene erklären?

Anfang der 1660er beschäftigte sich Hooke auch nebenbei mit der Bewegung von verschiedenen Formen von Pendeln. Er hatte auch zu dieser Zeit von Huygens Pendeluhr gehört und tüftelte selber an einer solchen. In diesem Zeitraum war auch eindeutig klar, dass das Pendel geeignet für eine Uhr war. Jedoch war auch schnell danach klar, dass diese Form der Uhr nicht geeignet für die See war. Durch die von der See verursachte Eigenbewegung des Schiffes geriet das Räderwerk der Uhr aus dem Takt und diese zeigte nicht mehr richtig die Zeit an.

Mit der Erforschung von der Neuen Welt (neuen Kontinenten) wuchs auch das Interesse der Gesellschaft im damaligen Europa für die Navigation. Die Navigation war ein aktuelles Thema, das viele Forscher des 17. Jahrhunderts beschäftigte. Zu dieser Zeit herrschte das sogenannte Längengradproblem. Die Lösung, die das meiste Potential hatte, war eine genaue Zeitmessung. Diese genaue Zeitmessung konnte nur dann erfolgen, wenn die Uhr durch die Wirkung der Schiffsbewegung nicht beeinflusst wurde. Doch, wie? Hooke hatte die Idee, dass ein Federmechanismus die Lösung sein könnte.

Es gibt keine expliziten Beweise, dass Hooke eine solche Uhr Anfang der 1660er gebaut hatte, aber aus dem Briefwechsel zwischen Oldenburg, Huygens und Moray erscheint eine Vermutung diesbezüglich gerechtfertigt. Die Frage, ob diese Uhr funktionierte oder nicht, ist in diesem Kontext nicht wichtig. Wenn sie nicht funktionierte, hätte Hooke womöglich noch mehr Motiv daran zu forschen, um eine Funktionierende zu bauen. Wenn sie aber funktionierte, weshalb veröffentlichte es Hooke nicht? Selbst in den Protokollen der Royal Society konnte kein Eintrag gefunden werden, der dem gerecht wäre, was in den Briefen von Oldenburg, Huygens, Moray zu finden ist. Trotzdem können zusätzliche Hinweise gefunden werden, die belegen, dass Hooke in den 1660ern viel zu Uhren gemacht und geschrieben hatte.[3]

Bis 1675 arbeitete Hooke an verschiedenen Forschungsfragen. Zwischendurch lassen sich auch ein paar Schriftzüge zum Uhrbau finden, jedoch nichts, was ausführlich ist. Als aber 1675 *Horologium Oscillatorium* die Royal Society of London erreichte, bekam Hooke, so erscheint es, einen enormen Antrieb für die Entwicklung einer federgesteuerten Uhr. Zum einen war er wahrscheinlich beleidigt, dass Huygens für die Anwendung einer Feder in einer Uhr so viel Anerkennung bekam, obwohl er selbst schon früher darüber gesprochen hatte. Zum anderen brachte Huygens seine Uhr zum Funktionieren. Den Ruhm, den Huygens hierfür bekam, hätte sich Hooke vermutlich für sich selbst gewünscht. Es wurde aber relativ schnell klar, dass die Uhr, die Huygens gebaut hatte, auf der See auch nicht präzise war. Das brachte Hooke dazu, sich ausgiebig mit dem Isochronismus von Federn zu beschäftigen.

In der Veröffentlichung *Lectures de Potentia* hat Hooke relativ kurz einzelne Federfor-

[3]Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, z. B. S. 269, 278, 279, 286, 323, 349, 351 – 356, 370

men beschrieben, aber eher ausführlicher die elastischen Eigenschaften von Körpern und die Zeitermittlung mithilfe von Quantitäten, die die Schwingung einer Feder beschreiben. Hooke ging dabei so weit, dass er einzeln jede Quantität (die ihm bekannt war) klar formulierte und schrittweise erklärte, wie sie geometrisch zu ermitteln sind. Dabei lässt sich nicht einfach erkennen, von welchen physikalischen Größen, im heutigen Sinne, Hooke da eigentlich geschrieben hatte. Aus der Analyse kann entnommen werden, dass anhand von allen Angaben die Hooke machte, nicht eindeutig ist, ob hier der Begriff *Kraft* (so wie er heute aus dem Hookeschen Gesetz bekannt ist) im Mittelpunkt steht. Es ist eindeutig, dass durch das Fehlen von Newtons *Principia* ein Problem herrschte, was das Formulieren von mechanischen Quantitäten angeht. Es kann behauptet werden, dass es schon eine Vorstellung davon gab, dass es bspw. einen Unterschied gab zwischen dem was die *Kraft* im heutigen Sinne beschreibt und dem, was die *Energie* im heutigen Sinne beschreibt. Das war jedoch nicht eindeutig genug, um eine klare Formulierung der beiden Größen zu differenzieren. Die Quantitäten, die Hooke in seinen Beschreibungen benutzte, sind Ergebnisse von Beobachtungen und nicht unbedingt von Messungen. Dementsprechend führte Hooke die Begriffe *Power* und *aggregate of Powers* ein. Diese Quantitäten formulierte er als Proportionalitäten, die andere Abhängigkeit von kinetischen Größen zeigten. Diese Tatsache führte zur Vermutung, dass Hookes *Power* sich auf etwas beziehen muss, dass sich ähnlich verhält wie die *Kraft*, die aus der heutigen Form des Hookeschen Gesetzes bekannt ist. Die *aggregate of Powers* wäre etwas, was sich ähnlich verhält wie die *Energie* der Federschwingung. Also ist das von ihm formulierte Gesetz: *the power is always proportionate to the space*, genau in der Form formuliert, wie es auch heute bekannt ist.

Aus seiner Beschreibung der quantitativen Größen in *Lectures de Potentia* kann eine Art der Darstellung von Federbewegung beobachtet werden, die verglichen mit der heutigen Art und Weise, fremd und ungewohnt erscheint. Heutzutage wird das Hookesche Gesetz als ein statisches Gesetz interpretiert. Hookes Beschreibung gibt aber den Anschein eines dynamischen Gesetzes. Das, was Hooke genau dargestellt hatte, ist die Veränderung der Geschwindigkeit und der Zeit in Abhängigkeit von der Strecke (Auslenkung). Diese Methode ist im Vergleich zu anderen Darstellungen der Bewegung aus dem 17. Jahrhundert eher ungewöhnlich. Das ist vermutlich der Grund, wieso Hookes Diagramm mit dem Wissen des 21. Jahrhunderts nicht schlüssig erscheint. Die Analyse ergab eine Interpretation, die es ermöglicht, physikalische Größen mit dem heutigen Wissen herauszulesen. Unabhängig davon, ob sie, mathematisch betrachtet, im heutigen Sinne anwendbar sind oder nicht, dennoch ergeben sie Verhältnisse physikalischer Größen, die auch heute verwendet werden.

Sehr relevant für Hooke, so hat es den Anschein, ist die Tatsache, dass ein solches *Gesetz der Natur* bereits 14 Jahre zuvor von ihm formuliert wurde. Dafür wies er auf die *Micrographia* hin. Wahrscheinlich folgte er hierbei die Idee, ein allgemeines Gesetz zur Elastizität zu formulieren, dass sowohl für Festkörper als auch für Fluide gelten würde. Wie aus der durchgeführten Analyse hervorgeht, gibt es eine klare Analogie zwischen Boyles und Hoo-

kes Gesetz. Für ihn war es vermutlich sehr wichtig zu erwähnen, dass es bereits von ihm formuliert wurde. Dadurch wollte er wahrscheinlich sicherstellen, dass er in dieser besagten Sache die Priorität haben muss und, dass diese allgemeine Elastizitätstheorie, die auch von Petty explizit in den Protokollen angefordert wurde, nun endlich eine Form bekam. Es erscheint fast so, als hätte Hooke eine klare Vorstellung darüber gehabt, was elastische Eigenschaften ausmacht, aber die Veröffentlichung von Huygens war der Auslöser an *Lectures de Potentia* zu arbeiten. Hooke glaubte vermutlich, dass durch die Veröffentlichung *Lectures de Potentia* der von ihm erdachte Federmechanismus in Uhren geschützt werden könne und dass es ihm eindeutig zugeschrieben wird, da Huygens in *Horologium* kein Wort über die Eigenschaften der Feder oder der Federschwingung verlor. Hierbei sollte klar gesagt werden, dass es unmöglich ist wiederzugeben, was Hooke tatsächlich dazu veranlasste *Lectures de Potentia* zu veröffentlichen und wieso er es später tat als er es im Grunde hätte tun können.

Aus dieser Analyse ist klar, dass Hooke ein außergewöhnlicher Forscher war. Unabhängig davon, wie er es empfunden hatte, kann dennoch gesagt werden, dass viele seiner Zeitgenossen die Arbeit, die Hooke während seines Werdegangs geleistet hatte, respektierten.

*Many things I long to be at, but I do extremely want time.*

*Hooke to Boyle, 5. September 1667*[4]

[4]Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, 1930, S. 314

# Fazit

Wenn im heutigen Sinne über das Hookesche Gesetz nachdacht wird, erscheint es so klar und leicht verständlich. Am Anfang der Erarbeitung dieser Analyse, waren die Erwartungen von dem, was zu diesem Gesetz zu finden sein könnte, sehr gering. Für jemanden, der sich nie mit Wissenschaftsgeschichte befasst hat, ist es erstmals ziemlich schwer, sich in diese Zeit hineinzuarbeiten. Alles was heute bekannt ist zu vergessen und die Dinge aus den Augen von jemanden zu betrachten, der im 17. Jahrhundert gelebt hat. Es gibt keine Newtonsche Gesetze, keine Erklärung darüber was Kraft ist, was Energie ist. Das einzige, das zur Verfügung steht sind Beobachtungen von Phänomenen, ohne dabei den Luxus zu haben, physikalische Gesetze, so wie sie heute bekannt sind, zu verwenden.

Die Persönlichkeit von Hooke ist auch nicht die einfachste zu analysieren. Robert Hooke war eindeutig leidenschaftlich in dem, was er machte. Aber er war auch oft von seinem verletzten Stolz getrieben, gewisse Dinge zu untersuchen und (oder) zu bauen. Unabhängig ob das theoretisch oder experimentell gemacht werden musste, er war immer an allem beteiligt, was gerade in der Society *angesagt* war. Aufgewachsen in einem bescheidenen Elternhaus, gefolgt von häufigen Erkrankungen, war der junge Hooke etwas abgeschnitten von einem größeren sozialen Umfeld. In jungen Jahren verlor er seinen Vater, weswegen er, um seine Interessen nachgehen zu können, einen Weg oder Möglichkeit finden musste, sich die Ausbildung zu finanzieren. Das machte ihn vermutlich sehr selbstständig und auch selbstsicher. Er gab während seiner Schulzeit Nachhilfe und war auch bei anderen Aktivitäten in der Schule tätig. Durch die Tatsache, dass er sich alles selbst finanzieren und erarbeiten musste, könnte auch zu seinem Stolz geführt haben, der durch seine Aussagen in seinen Veröffentlichungen immer wiederzuerkennen ist.

Nach Abschluss der Schule ging Hooke nach Oxford, wo er Wilkins kennenlernte. Wilkins schätzte Hooke und seine Arbeit sehr. Da Wilkins ein angesehener Naturforscher war, war es für Hooke wahrscheinlich schon schmeichelhaft, dass Wilkins eine solch hohe Meinung von ihm hatte. Dies zeigt sich auch darin, dass Wilkins Boyle die Empfehlung gab, Hooke zu engagieren. Hooke arbeitete sehr intensiv mit Boyle, der dessen Talente auch sehr schnell erkannte.

Durch die Aufnahme in der Royal Society erhielt Hooke auch seinen Platz in der

Londoner Gesellschaft. Zumindest erhoffte Hooke sich das, ob er es so empfunden hatte, ist nicht so offensichtlich. Er durfte nun mit der Elite zusammenarbeiten und ihnen seine Ideen vorstellen. Wobei hier nicht unbedingt die Rede von Zusammenarbeit sein kann, viel mehr war es arbeiten für die Elite. Es stellt sich aber schnell heraus, dass seine Ideen nicht so wahrgenommen wurden, wie er es sich vermutlich gewünscht hatte. Trotz der Brillanz, die Hooke in seiner Arbeit zeigte, dominiert in der Royal Society viel mehr die Hierarchie. Hooke war nur ein Kurator und trotz der Position als Sekretär, blieb er weiterhin nur ein Kurator, der aus bescheidenen Verhältnissen kam.

Hooke arbeitete an so vielen Dingen und bekam nicht das Lob, den er glaubte verdient zu haben. Aus vielen der Korrespondenzen von Hooke ist zu entnehmen, dass er sich immer wieder beweisen musste. Ob Hooke zu große Erwartungen von der Society hatte, ist ungewiss. Hierbei sollte gesagt werden, dass einige seiner Veröffentlichungen an gewissen Stellen, einen solchen versteckten Unterton zu erkennen gaben, dass vermutet werden kann, dass er durch diese Aussage seine Wut oder sein Stolz hochkommen ließ. Natürlich kann das nicht bewiesen werden, aber sehr häufig vermittelte Hooke ein Gefühl, dass er irgendjemanden durch diese Aussagen provozieren oder zur Rede stellen wollte. Zu der Zeit war er nicht der einzige, der solche Aussagen veröffentlichte, aber er vermittelt damit leicht, er sei das Opfer von einem falschen Spiel seiner Kollegen der Society.

Zu der aktiven Zeit von Hookes Arbeiten gab es viele Fragestellungen, die die Society und die damalige Gesellschaft beschäftigten. Es gab so viel zu erforschen: die Eigenschaften von Luft, die astronomischen Phänomene, die Navigation und das Längengradproblem, die Bewegungsformen, die Eigenschaften von Festkörpern, die Optik und die Lichtphänomene usw. Alles Forschungsgebiete die in der heutigen Zeit relativ gut erforscht sind und dadurch gut verständlich. Bei so viel interessanten und wichtigen Forschungsfragen ist es klar, dass Hooke auch aus eigenem Interesse an diesen Dingen forschte. Sein Problem aber war, er konnte manchmal die Dinge nicht zu Ende bringen, bevor er mit etwas Neuem anfing. Und wenn nun jemand vor ihm das zu Ende brachte, was er liegen gelassen hatte, wurde er schnell wieder dazu motiviert, es dann zu Ende zu bringen. Das wurde immer mit einer gewissen Anmerkung unterstrichen, er habe es bereits erforscht. Eine solche Einstellung machte ihn nicht gerade beliebt. Wenn er sich noch dazu jemandem widersetzte, der in der Royal Society sehr angesehen war, verbesserte dies seine Situation nicht wirklich.

Die Forschungsfrage, die zu dieser Zeit am meisten für Aufsehen sorgte, war das Längengradproblem. Niemand konnte eine einfache Lösung finden, um die Navigation von Schiffen zu verbessern. Die Lösung dieses Problems würde dem Finder nicht nur Ruhm verschaffen, sondern auch den Respekt von jedem Mitglied der Society und von dem König selbst. Viele Forscher dieser Zeit waren sich einig, dass eine präzis gehende Uhr das Problem beheben würde. Dieses Längengradproblem war so wichtig, dass Hooke sich von der Lösung dieses Problems erhoffte, endlich, ohne Widerrede, so angesehen zu werden, wie er es sich vermutlich wünschte. Er hoffte, dass seine Meinung dann so gefragt wäre, wie zuvor die von Oldenburg oder Newton. Er wäre derjenige, der so viel Respekt verdiente,

dass sich jedes Mitglied der Society mit einem Problem an ihn wenden würde. Es wäre sein Name, der in den *Philosophical Transactions* der Society immer beinhaltet wäre und niemand würde je an seinen Aussagen zweifeln.

Um also dieses Problem zu lösen, musste er sich einen Mechanismus überlegen, der auch durch die Wirkung der See auf ein Schiff, standhalten könnte und die Zeit weiterhin präzise angeben könnte. Anfang der 1660er versuchte Hooke es mit einem Federmechanismus, da das Pendel dafür nicht geeignet war. Das klappte offensichtlich nicht, so wie er hoffte, weswegen er die Arbeit dazu nicht veröffentlichte. Trotz der Tatsache, dass das Pendel ineffektiv auf der See war, hatte das Pendel Eigenschaften, die die Uhr auf Land gut funktionieren ließ. Also machte Hooke viele Untersuchungen zur Pendelbewegung und Uhren, in der Hoffnung eine *perfekte* Uhr zu entwickeln, die ihm Ruhm verschaffen würde.

Seinem Stolz ist es wahrscheinlich zu verdanken, dass er nicht konsequent an diesem Mechanismus gearbeitet hatte, sondern seine Zeit in anderen Forschungsgebieten investierte und noch dazu in den Wiederaufbau von London. In dieser Zeit arbeitete Huygens vermutlich an Hookes Federmechanismus weiter. Als die Nachricht die Society erreichte, dass Huygens eine federgesteuerte Uhr entwickelt hatte, die funktionierte, fand Hooke wieder seinen Weg zurück zur Entwicklung der Uhr, die das Längengradproblem lösen sollte. Die Tatsache, dass die Uhr von Huygens nicht auf See so funktionierte, wie es erhofft war, motivierte Hooke womöglich noch mehr. Er baute nicht nur eine funktionstüchtige Uhr mit einem Federmechanismus, er veröffentlicht seine Elastizitätstheorie dazu. Diese Veröffentlichung (*Lectures de Potentia*) zeigt alle Eigenschaften der Feder, die wichtig waren für die richtige Zeitmessung. Zumindest schien es so für einen Augenblick. Es ist zweifelhaft, dass seine Uhr auf See funktionierte und, dass die Zeitbestimmung, die er in *Lectures de Potentia* beschrieben hatte, in irgendeiner Form für die Zeitmessung auf See verwendet wurde.

Trotz des Misserfolges konnte Hooke anhand seiner Forschungen mit den verschiedenen Formen von Pendeln zeigen, dass der Isochronismus eine wichtige Rolle in der Entwicklung dieser Uhr spielte. Das könnte auch der Grund sein, wieso er in seiner Veröffentlichung beweisen wollte, dass eine Feder ebenso isochron schwingen kann wie ein Pendel. Mit dieser Veröffentlichung wusste jeder, dass Hooke diesen Mechanismus erfunden und entwickelt hatte und nicht Huygens. Hooke war derjenige, der die Eigenschaften einer Feder erklären konnte, die Quantitäten ihrer Bewegung formulierte und herleitete, und Hooke formulierte ein Gesetz, das zeigte, dass die Auslenkung der Feder proportional zur verwendeten *Power* ist.

Ob in diesem Zeitpunkt der Veröffentlichung von *Lectures de Potentia* Hooke den gewollten Ruhm bekam, ist zweifelhaft. Die *perfekte* Uhr wurde nicht von ihm entwickelt und das Längengradproblem wurde auch nicht durch sein Gesetz gelöst. Auch wenn er den Ruhm zu seinen Lebzeiten nicht genießen konnte, bleibt sein Gesetz für die klassische Mechanik eins der unersetzlichen Grundsteine, die gelegt worden sind.

Auch wenn es aus heutiger Sicht einfach erscheint, muss bedacht werden, dass Hooke

mit einigen Sachen bei der Formulierung seines Gesetzes zu kämpfen hatte. Wie können Größen formuliert werden, die nicht klar beschreiben werden konnten? Wie können nur aus Beobachtungen Proportionalitäten hergeleitet werden? Stellen wir uns folgende Situation vor: Es ist eine normale Spiralfeder gegeben und sie wird ausgelenkt, dabei wird ihre Schwingung beobachtet. Heute wissen wir, dass die Schwingung der Feder mit folgenden Gleichungen beschrieben werden kann (wenn wir voraussetzen, dass nur Extrempunkte betrachtet werden):

$$F = -Dx, \;\; E_P = \frac{Dx^2}{2}, \;\; E_K = \frac{mv^2}{2}$$

wobei die wirkende Kraft mit $F = mg$ gegeben ist. Und nun gehen wir zurück in das Jahr 1678, dabei lassen wir alle Größen weg, die zur Zeit der Veröffentlichung unbekannt waren. Das Ergebnis ist:

$$(?)_1 \sim x, \;\; (?)_2 \sim x^2, \;\; (?)_3 \sim v^2$$

Die Gewichtsstücke sind das einzige, was Hooke verändert hatte. Diese Veränderung stellte er in Form einer Proportionalität dar:

$$1 : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7 : 8$$

Wie können diese Größen formuliert werden (definiert werden)? Es gibt eine Quantität $(?)_1$, die zur Auslenkung proportional ist und die sich abhängig von den Gewichtsstücken ändert. Das bedeutet, dass diese erste Quantität $(?)_1$ sowohl zur Auslenkung, als auch zu der *Masse* der Gewichtsstücke proportional sein muss. Dann gibt es eine zweite Quantität $(?)_2$, die Proportional zum Quadrat der Auslenkung ist. Was bedeutet $(?)_1 \neq (?)_2$. Es handelt sich also um zwei verschiedene Quantitäten. Wenn bspw. für jede Auslenkung die entsprechende erste Quantität notiert wird, kann ein Muster erkannt werden. Dieses Muster bildet eine Fläche, die dem Produkt der ersten Quantität und der Auslenkung entspricht. Da die erste Quantität nicht klar formuliert werden kann, kann der Wert der ersten Quantität so gewählt werden, dass sie dem Wert der Auslenkung entspricht. Also gilt, dass die zweite Quantität proportional zum Quadrat der Auslenkung ist. Die Geschwindigkeit kann nicht gemessen werden. Was kann in diesem Fall gemacht werden? Die Antwort ist: beobachten und nachforschen. Hookes Überzeugung zu der Zeit war, dass jede Bewegung mit $v^2$ beschrieben werden kann. Zusätzlich setzte er voraus, dass das Verhältnis

$$velocity : \sqrt{space} \sim \sqrt{space} : time$$

bereits gegeben war. Dementsprechend wusste er, dass sich die zweite Quantität $(?)_2$ auch so verhalten muss, dass $(?)_2 \sim v^2$ gilt. Also stellen die zweite und dritte Quantität ein und dieselbe Quantität dar. Es gilt also $(?)_2 = (?)_3$.

Es ist beeindruckend, wie weit Hooke mit seiner Geometrie kam. Die Analyse des Diagramms hat ergeben, dass die S-Kurve die Veränderung der Zeit in bestimmten Abschnitten der Strecke darstellt, während die Versetzung nach oben oder unten, abhängig von der angewendeten *Power* ist, die mit $\omega$ in Verbindung stehen muss. In diesem Punkt kann Hooke also auch zugestimmt werden. Die Veränderung der Zeit bei einer harmonischen Schwingung, hat, visuell betrachtet, eine Wellenform und die Periodendauer ändert sich während einer Schwingung nicht. Erst durch die Anwendung einer anderen Feder oder einer anderen Kraft ändert sich die Periodendauer. Also kann hiermit zwar klar der Unterschied zwischen der Zeit in einem besagten Punkt der Schwingung und der Periodendauer einer Feder erkannt werden. Die Frage, die offenbleibt, ist, wie genau ermittelte Hooke tatsächlich diese S-Kurve. Vermutungen können zwar eventuelle Möglichkeiten geben, aber ob die auch tatsächlich so angewendet wurden, bleibt ungewiss. In späteren Arbeiten erwähnt Hooke zwar auch, dass das Bestimmen der Zeit in einem Punkt der Bewegung unmöglich sei und dass er früher einen konzeptuellen Fehler gemacht habe, aber nicht, ob es auch die Zeitermittlung in *Lectures de Potentia* mit einbezieht.

Wie erkannt werden konnt, hat Hooke nicht nur die *Kraft*, die eine Feder zum Schwingen bringt, formuliert, er hat auch andere Größen formuliert, die diese Bewegung beschreiben können. Anhand der durchgeführten Analyse ist auch deutlich geworden, wie groß die Bedeutung von der Präzisierung von physikalischen Begriffen, wie z. B. Energie, Kraft, Impuls und Arbeit, tatsächlich ist.

Hooke hat viel für die Entwicklung eines Grundsteines der klassischen Mechanik getan. Er war ein würdiger Vorgänger von Newton, Leibniz und Young. Es kann sehr lange darüber spekuliert werden, ob Hooke als Kollege, Freund und Wissenschaftler etwas schwierig war. Das, was aber nicht sehr viele Menschen von sich behaupten können, ist, es braucht einen starken Charakter und viel Durchhaltevermögen sich so sehr in seiner Arbeit durchzusetzen, um trotz des großen Druckes und des *nicht Würdigens* immer weiter arbeiten zu wollen.

*Es genügt nicht, eine Landschaft, ein Gesicht, ein Kunstwerk, eine Erfahrung, ein Abenteuer wissens- und gedächtnismäßig aufzunehmen, ich muß aus ihnen gewissermaßen einen Traum machen können, dadurch werden sie zu einem Bestandteil meines Wesens, ja meines Charakters, und so gering auch der reale Eindruck auf mein Auge, mein Nervensystem, meine Empfindung gewesen sein mag, irgend etwas wird sich in mir verändern, wenn sie mir im Sinn des Traums zu Eigen werden. Was uns bei der Betrachtung der Lebensdinge, bei der Beziehung zu Menschen vor allem im Wege steht, ist unser Urteil über sie, das in neunzig von hundert Fällen Vorurteil ist. Urteil ist aber der Feind jeder Illusion, und Vorurteil vernichtet sie gänzlich. Man soll nicht urteilen, bevor man geschaut hat, bevor man angeschaut hat und Anschauung führt sofort zur Imagination, das heißt zur Bildwerdung. Das kostet nur einen Entschluß. In einer Welt, die, wie ich schon sagte, verwüstet ist von Tatsachen wie ein Garten von Hagelschauern, ist ein solcher Entschluß selbstverständlich eine Frage des Mutes. Des Mutes um sich selbst. Der Bereitschaft, vernachlässigtes Seelengut wieder in Sicherheit zu bringen und in Funktion zu setzen.*

*Jakob Wassermann*

# Danksagung

Aufgrund meiner Herkunft und der Relevanz, dass diese Worte von allen, die hier erwähnt werden, verstanden werden, besteht die Danksagung aus zwei Teilen (in deutscher und bosnischer Sprache) mit gleichem Inhalt.

*I*

Während der Entwicklungsphase dieser Arbeit habe ich mich häufig gefragt, was ich wohl in diesem Abschnitt schreiben würde. Wie lassen sich die richtigen Worte finden, die die Dankbarkeit so hervorheben, dass das wahre Empfinden dargestellt werden kann? Es ist schwer Worte zu finden, die auch würdig dessen wären, ausdrucken zu können wie groß die Unterstützung all dieser Menschen war, die mich auf diesem langen Weg begleitet haben. Dennoch bin ich großer Hoffnung, dass die folgenden Worte, wenigstens in einer geringen Menge, den Dank übermitteln können, den ich auch empfinde.

Ich möchte vorerst diese Gelegenheit nutzen, um mich bei den Menschen zu bedanken, die mein ganzes Leben eine Unterstützung waren – meine Eltern und meine Schwester. In schlechten und guten Zeiten, egal welche Fehler ich machte, welche schlechten Entscheidungen ich traf – ihr seid die Einzigen, die immer, bedingungslos für mich da wart. Ohne euch wäre ich nicht der Mensch, der ich geworden bin, und ohne euch wäre ich nicht da, wo ich bin. Danke.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Tanten, die trotz der schweren Zeiten, in denen sie selbst waren, immer ein Ohr für mich hatten. Ich bin euch dankbar, für jedes nette Wort, für jeden Rat und eure unendliche Unterstützung. Vielen Dank an meine Cousinen und Cousins, die einfach immer da waren und mich immer zum Lachen bringen konnten, die mich bei jedem Schritt, den ich machte, vollkommen unterstützten.

Ein besonderes Dankeschön geht an meinen Opa Muki, der das leider nicht mehr miterleben konnte. Ich bedanke mich für alle Momente, die wir zusammen verbrachten, für die besondere Art, die die Familie immer zusammenhielt.

Eine Persönlichkeit, die einen speziellen Dank verdient, ist mein Mentor (in jedem Aspekt des Lebens) Prof. Dr. Nenad Tanovic. Ich danke Ihnen, dass Sie immer an meine Fähigkeiten geglaubt haben, auch wenn ich es manchmal selbst nicht tat. Ein Mensch,

der immer Zeit für schöne und tröstende Worte hatte. Ohne Sie und Ihre Unterstützung, hätte ich nicht nur das geschafft, was ich geschafft habe, sondern ich hätte niemals diese Selbstachtung, die ich dank Ihnen hab.

Den Familien Jamakovic und Sehic, die nicht nur dieser Arbeit beigetragen haben, sondern auch für eine der schönsten Erfahrungen, die ich machen durfte. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht fertig geworden. Ich bin euch unendlich dankbar, dass ihr mir die Gelegenheit gegeben habt, diesen Wunsch zu verwirklichen.

Des Weiteren, für die moralische Unterstützung möchte ich mich bei der Familie Hasic bedanken, die immer jeden einzelnen Schritt meiner Ausbildung verfolgte und mich unterstützte. Danke, dass ihr mir immer das Gefühl gegeben habt, dass ich das Richtige tue. Für die Motivation weiterzumachen. Egal wie oft ich auf meinem Weg gefallen bin, eure Worte konnten mich immer auf die Füße bringen.

Meinen Freunden, die immer das Richtige im richtigen Augenblick sagten. Die mir Hoffnung gaben. Die in schweren Zeiten für mich da waren, auch dann, als nicht unzugänglich war. Danke, dass ihr immer ein Weg finden konntet, mich aus dem Loch, dass oft, so schien es, kein Ende hatte, herauszuholen. Ein ganz besonderer Dank geht dementsprechend an meinen *Klan*, der mir immer und überall das Gefühl gab, nichts allein machen zu müssen.

Ein großer Dank geht, vor allem, an die Menschen, die vor Ort da waren. Frauke, danke, dass Du während dieser Zeit meine Freunde, meine Eltern, meine Schwester warst. Danke für jeden Kaffee, den Du mit mir getrunken hast und jedes Überraschungspäckchen, das auf mich auf dem Schreibtisch wartete. Für die Besorgnis, und dass Du immer an mich mitdachtest, auch in den Momenten, wo ich es selbst nicht tat.

Andreas, danke, dass Du immer für mich da warst, dass Du mein Sozialleben gepflegt hast. Danke für die Unterstützung, für die Ratschläge und für jede Unterhaltung, die mich wieder positiv denken ließ. Besonders bin ich Dir und Michelle dankbar für die sprachliche Unterstützung und die Zeit die Ihr in diese Arbeit investiert habt.

Danke Lydia, dass Du mir immer eine Hilfe warst in allen Aspekten des Lebens. Vielen Dank für Deine Unterstützung und Aufmunterungen, die mich über Wasser hielten.

Ein besonderes Dankeschön geht an René und Christian. Danke für die Hilfe an den Experimenten, für die Geduld und die immer zuverlässige Bereitschaft.

Für die besondere Art der Unterstützung, kontinuierliche Motivation und Verständnis möchte ich mich bei Dr. Michael Kuipel bedanken, danke auch für die vielen Gespräche, die wir während dieser drei Jahre hatten.

Bei Jasmin Janka, die mir nicht nur Unterkunft bieten konnte, sondern auch immer ein nettes Wort zur Unterstützung und Trost, Danke.

Großes Dankeschön an Dr. Jan Frercks, der zugestimmt hat mein Zweitgutachter zu sein. Danke für Deine Ratschläge und jede Rückmeldung, die mir sehr viel geholfen haben.

Zur guter Letzt, das größte Dankeschön von allen geht an meinen Mentor und Chef, Prof. Dr. Peter Heering, der mir nicht nur diese Möglichkeit gegeben hat, sondern auch an meine Fähigkeiten immer glaubte. Danke, für die Geduld und Unterstützung, für je-

den Kampf, den Du mit mir ausgetragen hast, für Dein großes Verständnis. Das war eine wundervolle Erfahrung, die ich nie vergessen werde.

*II*

Tokom ovog rada sam se cesto pitala sta bi napisala u ovom dijelu. Kako izraziti zahvalnost svim onim ljudima, onako kako to i osjecam? Tesko je naci prave rijece koje bi bile dostojne onoga sta su svi ti ljudi ucinili za mene. Tesko je prenjeti kroz rijeci znacaj podrske svih onih koji su me na ovom dugom putu pratili. Ipak se naadam se da ce ovaj odlomak barem u malo mjeri uspjeti doci do onih kojima sam beskrajno zahvalna.

Zelim najprije iskoristiti ovu priliku da se zahvalim onim ljudima, koji su me cijeli zivot podrzavali - mojim roditeljima i seki. U losim i dobrim vremenima, kakve god greske sam pravila ili lose odluke donjela - vi ste jedini koji ste bezuslovno bili uvijek uz mene. Bez vas ne bi bila onaj covjek koji i jesam i bez vas ne bi bila ovdje gdje jesam. Hvala.

Veliko hvala i mojim tetkama, koje su vijek, bez obzira u kojoj su situaciji same bile, imale vremena da me saslusaju i da mi daju savjet ili da me ohrabre. Hvala mojim rodicama i rodacima koji su bili uz mene, koji su me uvijek mogli nasmijati i koji su besebicno uvijek bili podrska u svim mojim odlukama.

Posebna beskrajna zahvalnost dedi, mom Mukiju, koji nazalost nije docekao ovaj moment. Zelim se zahvaliti za sve one momente, koje smo zajedno proveli, za poseban nacin kojim si uspio da nasa porodica uvijek bude ujedinjena, sto si svojim pristupom uspio olaksati teret koji nosimo.

Jedna licnost kojoj pripada posebno hvala je moj mentor (u svakom aspektu zivota) Prof. Dr. Nenadu Tanovicu. Hvala Vam sto ste uvijek vjerovali u mene i moje sposobnosti. Covjek koji je imao uvijek vremena za lijepe i utjesne rijeci. Bez Vas i Vase podrske, ne samo da ne bi postigla sto sam postigla, nego i ne bi imala ono samopostovanje koje imam, koje ste jedino Vi mogli na jedan poseban nacin izgraditi.

Porodici Jamakovic i Sehic koji su zasluzni ne samo na doprinosu ovom radu, nego i za jedan od najljepsih iskustava koje sam imala u zivotu. Bez vas ovaj rad ne bi mogao biti ostvaren, a time ni ovo postignuce. Beskrajno sam vam zahvalna sto ste mi pruzili priliku da ostvarim ovaj cilj.

Za moralnu podrsku zelim spomenuti porodicu Hasic, koji su uvijek nastojali da podrze svaki moj korak u obrazovanju. Hvala sto ste mi uvijek davali osjecaj da cinim ispravnu stvar, sto ste uvijek znali naci prave rijeci, koje su me motivisale da nastavim dalje. Koliko god puta sam pala, vi ste nasli rijeci koje su me uspjele ponovo podici.

Mojim prijateljima koji su znali naci prave rijeci u pravim trenucim, koji su me gurali i podrzavali, davali mi nadu. U teskim trenucima bili uz mene, pa cak i kad sam bila nepristupacna, nasli su uvijek put da me izvuku iz rupe, koja, cesto se cinilo, nije imala dno. Posebno hvala tu pripada mom *Klanu*, koji je uvijek tu za mene, koji mi daje snagu i osjecaj da ne moram sve sama.

Veoma bitni ljudi, koji su bili na licu mjesta - Frauke, hvala sto si bila prijatelj, sestra, roditelji. Hvala za svaku popijenu kafu i *teglu iznenadenja*, koja me cesto cekala na stolu... bez povoda. Sto si se brinula i sto si mislila uvijek na mene, pogotovo u trenucima kad ni sama nisam mislila na sebe.

Andreas, hvala sto si uvijek bio tu za mene, a najvise sto si odrzao moj socijalni zivot, za svaki razgovor i savijet koji su u meni budili nadu. Posebno hvala Andreasu i Michelle za podrsku u stilistici izrazavanja i za vrijeme koje ste ulozili u ovaj rad.

Hvala Lydia sto si mi uvijek bila pomoc u svim aspektima zivota. Hvala za podrsku i utjehu.

Posebno hvala Reneu i Christianu. Hvala za pomoc za eksperimentima, za strpljenje i pouzdanost.

Za posebnu podrsku se zelim zahvaliti i Dr. Michael Kuipel, hvala za mnoge razgovore. Jasmin Janka, hvala ne samo za krov nad glavom, nego za svaku lijepu rijec. Hvala.

Veliko hvala Dr. Jan Frercks, koji je pristao da bude dio komisije. Hvala za savjete i upustva, koja su mi mnogo pomogla.

Za kraj, ali ne manje vazno, najvece hvala mom sefu i mentoru Prof. Dr. Peter Heering-u koji mi je pruzio priliku da pokazem svoje sposobnosti i siroj javnosti. Hvala za strpljenje i podrsku, za borbu, koju si sa mnom vodio i za tvoje razumjevanje. Ovo je bilo lijepo iskustvo, koje nikad necu zaboraviti.

# Literaturverzeichnis


Acland H.W., *The inaugural Robert Boyle lecture founded by the Oxford University Junior Scientific Club in May, 1892*, Oxford, 1892

Adams G., *Lectures on Natural and experimental Philosophy, considered in its present state of improvement, Vol. I*, London, 1794

Adams G., *Lectures on Natural and Experimental Philosophy, Vol. II*, London, 1794

Adams G., *Lectures on Natural and Experimental Philosophy, Vol. III*, London, 1794

Adams G., Jones W. & Patterson R., *Lectures on Natural and Experimental Philosophy, Vol. IV*, London, 1807

Adams R. & Jardine L., *The Return of the Hooke Folio*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 60, No. 3, 2006, S. 235 – 239

Agassi J., *Who discovered Boyle's Law?*, Stuies in the History and Philosophy of Science, Vol. 8, 1977, S. 189 – 250

Anderade E., *Robert Hooke and his contempories*, Nature, Vol. 136, 1935, S. 358 – 361

Andrade E., *Wilkins Lecture. Robert Hooke*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 201, No. 1067 (May 23, 1950), pp. 439 – 473

Andriesse C.D., *Huygens. The Man Behind the Principle*, Cambridge University Press, 2005

Anstey P.R., *The Philosophy of Robert Boyle*, Routledge London/New York, 2000

Anstey P.R. & Schuster J.A., Hrsg., *The Science of Nature in the Seventeenth Century. Patterns of Change in Early Modern Natural Philosophy*, Springer Dordrecht, The Netherlands, 2005

Anstey P.R. & Jalobeanu D., Hrsg., *Vanishing Matter and the Laws of Motion. Descartes and Beyond*, Foutledge, New York, 2011

Applebaum W., Hrsg., *Encyclopedia of the Scientific Revolution: From Copernicus to Newton*, Garland Publishing Inc., New York/London, 2000

Ariew R., Des Chene D., Jesseph D.M., Schmaltz T.M., Verbeek T., *Historical Dictionary of Descartes and Cartesian Philosophy*, Second Ed., Rowman & Littlefield, 2015

Ariotti P., *Galileo on the isochrony of the pendulum*, Isis, Vol. 59, No. 4 (Winter, 1968), pp. 414 – 426

Ariotti P.E., *Aspects of the Conception and Development of the Pendulum in the* $17^{th}$ *century*, Arhive for History of Exact Sciences, Vol. 8, No. 5 (12.IX. 1972), pp. 329 – 410

Armitage A., *Edmond Halley*, Thomas Nelson (Printers) Ltd, London/Edinburgh, 1966

Arnold V.I., *Huygens and Barrow, Newton and Hooke*, Birkhäuser Verlag Basel/Boston/Berlin, 1990

Baker G.L. & Blackburn J.A., *The Pendulum. A case Study in Physics*, Oxford University Press, 2005

Baker G.L., *Seven Tales of the Pendulum*, Oxford University Press, 2011

Barbour J.B., *The Discovery of Dynamics*, Oxford University Press, 2001

Baron M.E., *The Origins of the Infinitesimal Calculus*, Pergamon Press, Oxford, 1969

Barrow I., *Lectiones Geometricæ*, London, 1670

Bechler Z., Hrsg., *Contemporary Newtonian Research*, Springer Science+Business Media B.V., 1982

Bechler Z., *Newton's Physics and the Conceptual Structure of the Scientific Revolution*, Kluwer Academic Publishers, 1991

Beck L.J., *Metaphysics of Descartes*, Oxford Universtiy Press, 1966

Beckmann P., *A History of* $\pi$, The Golem Press, New York, 1971

Beeley P. & Scriba C.J., *The Correspondence of John Wallis. Vol. IV (1672 – April 1675)*, Oxford University Press, 2014

Bell A.E., *Christian Huygens and the Development of Science in the Seventeenth Century*, E. Arnold, London, 1950

Bennett J.A., *Hooke and Wren and the system of the World: Some points towards an historical account*, The British Journal for the History of Science Vol. 8, No. 28, 1975, 32 – 61

Bennett J.A., *The Mathematical Science of Christopher Wren*, Cambridge University Press, 1982

Bennett J., Cooper M., Hunter M. & Jardine L., *London's Leonardo – The Life and Work of Robert Hooke*, Oxford University Press, 2003

Benvenuto E., *An introduction to the history of Structural Mechanics: Statics and resistance of solids*, Springer Verlag, University of Michigan, 1991

Benz W., *Classical Geometries in Modern Contexts*, Springer Basel, 2012

Bernoulli J.& N., *Die Werke von Johann I und Nicolaus II Bernoulli, Band 6*, Bearbeitet und kommentiert von P. Villaggio, mit historischen Anmerkungen B. Gaino, Birkhäuser Basel/Boston/Berlin, 2008

Bertoloni Meli D., *Who Is Afraid of Centrifugal Force?*, Early Science and Medicine, Vol. 10, No. 4 (2005), pp. 535 – 543

Bertoloni Meli D., *Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, Verlag JHU Press, 2006

Bertoloni Meli D., *Patterns of the Transformationin Seventeenth–Century Mechanics*, The Monist, Vol. 93, No. 4, Philosophical History of Science (OCTOBER 2010), pp. 580 – 597

Birch T.,*The History of the Royal Society of London, Vol. I*, London, 1756

Birch T., *The History of the Royal Society of London, Vol. II*, London, 1756 – 1757

Birch T., *The History of the Royal Society of London, Vol. III*, London, 1757

Birch T., *The History of the Royal Society of London, Vol. IV*, London, 1757

Birch T., *The Works of the Honourable Robert Boyle*, London, 1772

Boas Hall M., *Robert Boyle and seventeenth–century chemistry*, Cambridge at the University Press, 1958

Boas Hall M., Hrsg., *Nature and Nature's Laws. Selected documents*, Palgrave MacMillan, 1970

Bogen S., *Diagramm, Experiment und die Anschaulichkeit von Theorie: zur Schematisierung der Bewegung bei Galileo Galilei*, Das Mittelalter: Perspektiven mediävistischer Forschung, Das Mittelalter, 2017, 22(2): 431 – 455

Bos H.J.M., Hrsg., *Studies on Christiaan Huygens*, Lisse: Swets, 1980, 234 – 270

Boschero L., *Translation, Experimentation and the spring of the Air: Richard Waller's Essays of Natural Experiments*, Notes & Records of the Royal Society (2010), 67 – 83

Bourdi J.C., *What was Mechanical about Mechanics. The Concept of Force between Metaphysics and Mechanics from Newton to Lagrange*, Springer, 2002

Boyer C.B., *Historical Stages in the Definition of Curves* , National Mathematics Maganzine, Vol. 19, $N_o6$, March 1945, pp. 294 – 310

Boyer C.B., *History of Analytic Geometry*, Dover Publications, Inc., New York, 2004

Boyle R., *New Experiments Physico-Mechanicall. Touching the Spring of Air and its Effects*, Oxford, 1660

Boyle R., *New Experiments Physico-Mechanicall. Touching the Spring of Air and its Effects*, Oxford, 1662

Boyle R., *Tracts Written by the Honourable Robert Boyle*, London, 1671

Britten F.J., *On the Springing and Adjusting of Watches: Being a Description of the Balance Spring and the Compensation Balance with Directions for Applying the Spring and Adjusting for Isochronism and Temperature*, E.& F.N. Spon, New York, 1898

Britten F.J., *On the Springing and adjusting of Watches*, London/New York, 1898

Brush S.G., *The Kinetic Theory of Gases. An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary*, Imperial College Press, 2003

Burgan M., *Robert Hooke. Natural Philosopher and scientific explorer*, Compass Point Books, 2008

Burke J.G., Hrsg., *The Uses of Science in the Age of Newton*, University of California Press, 1983

Burns C.D., *Leibniz and Descartes*, The Monist, Vol. 26, 1916

Burtt E.A., *The Metaphysical foundations of modern physical Science*, Routledge, New York, 1924

Cajori F., *Sir Isaac Newton's Principia Vol. II The System of the World*, University of California Press, Berkeley/Los Angeles, 1966

Cajori F., *William Oughtred, a great seventeenth-century teacher of mathematics*, Chicago Open Court Pub. Co., 1916

Calero J.S., *The Genesis of Fluid Mechanics 1640 – 1780*, Translated by V.H.A. Watson, Springer Dordrecht, 2008

Capecchi D., *History of Virtual Work Laws: A History of Mechanics Prospective*, Springer Verlag Italia, 2012

Caspar R., *Galileo Galilei. Zusammenstellung der Forschungen und Entdeckungen Galilei's auf dem Gebiete der Naturwissenschaft, als Beitrag zur Geschichte der neueren Physik*, Stuttgart, 1854

Cassirer E., *Descartes' Kritik der mathematischen und naturwissenschaftlichen Erkenntnis*, Marburg, 1899

Caswell J., *A Brief Account of the Doctrine of Trigonometry*, London, 1680

Centore F.F., *Robert Hooke's Contributions to Mechanics. A Study in Seventeenth Century Natural Philosophy*, Martinus Nijhoff/The Hague, 1970

Chambers J., *Christopher Wren*, Sutton Publishing, 1998

Chapman A., *England's Leonardo: Robert Hooke and the Seventeenth-Century Scientific Revolution*, IOP Bristol/Philadelphia, 2005 IOP Bristol/Philadelphia, 2005

Christianson G.E., *In the presence of the Creator. Isaac Newton and his times*, University of Michigan, 1984

Clavelin M., *The Natural Philosophy of Galileo. Essay on the Origins and Formation of Classical Mechanics*, M.I.T. Press, 1974

Coelho R.L., *Zur Konzeption der Kraft der Mechanik*, Waxmann Münster/New York/München/Berlin, 2001

COHEN I.B., *Newton, Hooke, and "Boyle's Law"(Discovered by Power and Towneley)*, Nature, No. 204, November 1964, 618 – 621

COHEN H.F., *How Modern Science Came Into The World. Four Civilizations, One 17th-Century Breakthrough*, Amsterdam University Press, Amsterdam 2010

COHEN H.F., *Quantifying Music: The Science of Music at the First Stage of Scientific Revolution 1580 – 1650* , Springer Science & Business Media, 1984

COHEN H.F., *The Scientific Revolution. A Historiographical Inquiry*, The University of Chicago Press, 1994

CONANT J.B., *Harvard Case Histories in Experimental Science Vol. I*, Harvard University Press, 1957

COOKE R., *The History of Mathematics. A Brief Course.* $2^{nd}$ *Edition*, John Wiley & Sons, 2005

COOPER M., *Robert Hooke and the Rebuilding of London*, History Press, 1998

COOPER M.A.R., *A More Beautiful City. Robert Hooke and the Rebuilding of London after the Great Fire*, Sutton, 2003

COOPER M. & HUNTER M., Hrsg., *Robert Hooke: Tercentennial Studies*, The Editors, New York, 2006

CORETH E. & SCHÖNDORF H., *Philosophie des 17. und 18. Jahrhunderts*, 4. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 1983

COTTINGHAM J., *Force, Motion and Causality: More's Critique of Descartes*, The Cambridge Platonists in Philosophical Context, Hrsg. G.A.J. Rogers, J.M. Vienne & Y.C. Zarka, Springer Science+Business Media B.V., 1997, pp. 159 – 171

CUNNINGHAM W., *The influence of Descartes on metaphysical speculation in England*, MacMillan & Co, London/Cambridge, 1876

DAMEROW P., FREUDENTHAL G., MCLAUGHLIN P. & RENN J., *Exploring the limits of preclassical mechnaics. A Study of Conceptual Development in Early Modern Science: Free Fall and Compounded Motion in the Work of Descartes, Galileo, and Beeckman*, Springer, 2004

DAVIS R.O. & SELVADURAI A.P.S., *Elasticity and Geomechanics*, Cambridge University Press, 1996

DE BERG K.C., *The Development of the Concept of Work: A case where History can Inform Pedagogy*, Science & Education, Vol. 6, Issue 5, May 1997, pp. 511 – 527

De Gandt F., *Force and Geometry in Newton's "Principia"*, Princeton University Press, 1995

De la Bédoyère G., Hrsg., *The Letter of Samuel Pepys 1656 – 1703*, The Boydell Press, Woodbridge, 2006

De Risi V., *Leibniz on the Parallel Postulate and the Foundations of Geometry*, Springer International Publishing Switzerland, 2016

De Roberval G.P., *Divers ouvrages*, Paris, 1693

De Roberval G.P., *Ouvrages de Mathematique*, Amsterdam, 1736 Delepierre J.O., *Historical difficulties and contested events*, London J. Murray, 1868

Dellin E., *Galileo Galilei – Discorsi*, Pro Business, Berlin, 2014

Dennis M.A., *Graphic Understanding: Instruments and Interpretation in Robert Hooke's Micrographia*, Science in Context, Vol. 3, $N_o2$, 1989, pp. 309 – 364

Derham W., *The artificial clock-maker : a treatise of watch and clock-work, wherein the art of calculating numbers for most sorts of movements is explained to the capacity of the unlearned : also the history of clock-work, both ancient and modern, with other useful matters never before published*, London, 1696

Derham W., *Philosophical Experiments and observations of the late Eminent Dr. Robert Hooke*, London, 1726

Desaguliers J.T., *A course of Experimental Philsosophy Vol. II*, London, 1744

Desaguliers J.T., *A system of Experimental Philosophy Prov'd by Mechanicks*, London, 1719

Descartes R., *Œuvres de Descartes*, Hrsg. V. Cousin, Paris, 1824

Descartes R., *La géométrie*, A. Hermann, Hrsg., Libraire Scientifique, Paris, 1886

Descartes R., *The Philosophical Writings of Descartes: Volume 3, The Correspondence*, translate by J. Cottingham, R. Stoothoff, D. Murdoch, A. Kenny, Cambridge University Press, 1997

Dietzschold C., *Die Hemmungen der Uhren, ihre Entwicklung, Konstruktion, Reparatur und Behandlung vor der Reglage*, C. Dietzscholds Verlag. Krems a. Donau, Nied.-Österr., 1905

Dieudonne S.C., *History of Algebraic Geometry*, Northwestern University, Wadsworth, 1985

DIJKSTERHIUS E.J., *The Mechanization of the World Picture*, Clarendon Press, 1961

DOLÆUS J., *Opera omnia*, Lyon, 1695

DOLNICK E., *The Clockwork Universe. Isaac Newton, the Royal Society and the Birth of the Modern World*, Harper Collins Publisher, New York, 2011

DOSTROVSKY S., *Early Vibration Theory: Physics and Music in the Seventeenth Century*, Archive for History of Exact Sciences, Vol. 14, No. 3, July 1975, pp. 169 – 218

DRAKE E.T., *Restless Genius. Robert Hooke and his earthly thoughts*, Oxford University Press, 1996

DUGS R., *Mechanics in the seventeenth century: from the Scholastic antecendents to classical thought*, Éditions du Griffon, University of Michigan, 1958

DYKE H. & BARDON A., Hrsg., *A Companion to the Philosophy of Time*, John Wiley & Sons, Inc., West Sussex, 2013

EKERT J., *Galileo Galilei dessen Leben und verdienste um die Wissenschaften*, Basel, 1858

ELLIS R., *Calculus with analytic geometry* $2^{nd}$ *Edition*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1982

ELMES J., *Sir Christopher Wren and his times*, London, 1852

'ESPINASSE M., *Robert Hoooke*, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1956

EULER L., *The Rational Mechanics of flexible or elastic bodies 1638 – 1788. Introduction to Leonhardi Euleri Pera Omnia. Vol. X et XI seriei secundae*, Hrsg. C. Truesdell, Springer Science & Business Media, 1960

FAHIE J.J., *Galileo, his Life and Work*, London J. Murray, 1903

FANNING P.A., *Isaac Newton and the Transmutation of Alchemy*, Berkeley, 2009

FARRAR J., *Elementary Treatise on Mechanics, Comprehending the doctrine of equilibrium and motion, as applied to solids and fluids*, Boston Hilliard, Gray and Co., 1834

FEISENBERGER H.A., *The Libraries of Newton, Hooke and Boyle*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 21, No. 1, June 1966, pp. 42 – 55

Forbes E.G., Murdin L. & Wilmoth F., Hrsg., *The Correspondence of John Flamsteed. The First Astronomer Royal*, IOP Publishing Ltd, 2002

Fraser J.T. & Lawrence J.T., Hrsg., *The Study of Timme II*, Springer Verlag New York/Heidelberg/Berlin, 1975

Frova A. & Marenzana M., *Thus Spoke Galileo*, Translated by J. McManus, Oxford University Press, 1998

Funari A., *Francis Bacon and the Seventeenth-Century Intellectual Discourse*, Palgrave MacMillan, 2011

Gal O. & Eric C.H., *Between Kepler and Newton: Hooke's "principles of congruity and incongruity" and the naturalization of mathematics*, Annals of Science, Vol. 76, Nos. 3 – 4, S. 241 – 266, 2019

Gal O. & Chen Morris R., *Nature's drawing: problems and resolutions in the mathematization of motion*, Synthese, Vol. 185, No. 3, Special Section: Seeing the causes: Optics and epistemology in the scientific revolution, April 2012, pp. 429 – 466

Gal O., *Producing knowledge: Robert Hooke*, University of California,1996

Gal O., *Meanest Foundation and Nobler Superstructures. Hooke, Newton and the "Compounding of the Celestiall Motions of the Planets"*, 2002 Kluwer Academic Publishers

Galilei G., *Dialogues concerning two new science*, G. Galilei, 1638, translated by H. Crew & A. de Salvio, New York The MacMillan Company, 1914

Garber D. & Ayers M., Hrsg., *The Cambridge History of Seventeenth-Century Philosophy, Vol. I*, Cambridge University Press, 1998

Garber D. & Roux S., Hrsg., *The Mechanization of Natural Philosophy*, Springer Science+Business Media B.V., 2013

Gaukroger S., *Descartes: philosophy, mathematics and physics*, Harvester Press, University of Michigan, 1980

Gaukroger S., *Descartes' System of Natural Philosophy*, Cambridge University Press, 2002

Gazeley W.J., *Clock & Watch Escapements*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1982

Gerbino A., Hrsg., *Geometrical Objects. Architecture and the Mathematical Science 1400-1800*, New Studies in the History and Philosophy of Science and Technology, Springer International, 2014

Gindikin S., *Tales of Mathematicians and Physicists*, Springer, 1988

Girvin H.F., *A Historical Appraisal of Mechanics*, Purdue University, 1948

Gorham G, Hill & B., Slowik E., Hrsg., *The Language Of Nature Reassessing The Mathematization Of Natural Philosophy In The 17th Century*, Minesota Studies of the Philosophy of science, Vol. 29, 2016

Gorham G., *Descartes on Time and Duration*, Early Science and Medicine, Vol. 12, Issue 1, 28 – 54

Gow M., *Robert Boyle. Pioneer of experimental chemistry*, Enslow Publisher, Berkeley Heights, New Jersey, 2005

Grant E., *The Nature of Natural Philosophy in the Late Middle Ages*, The Catholic University of America Press, Washington D.C., 2010

Gratten Guinness I. & Bos H.J.M., Hrsg., *From the Calculus to Set Theory, 1630 – 1910: An Introductory History* , Princeton University Press, Princeton & Oxford, 1980

Greene R.A., *Henry More and Robert Boyle on the Spirit of Nature*, Journal of the History of Ideas, Vol. 23, No. 4, 1962, pp. 451 – 474

Grosholz E. & Breger H., Hrsg., *The Growth of Mathematical Knowledge*, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2000

Grosholz E.R., *Geometry, Time and Force in the Diagrams of Descartes, Galileo, Torricelli and Newton* , PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. 2, 1988, pp. 237 – 248

Guicciardini N., *Conceptualism and contextualism in the recent historiography of Newton's Principia*, Elsevier, Historia Mathematica, Vol. 30, Issue 4, November 2003, 407 – 431

Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VI*, Oxford, 1930

Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VII*, Oxford, 1930

Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. VIII*, Oxford, 1930

Gunther R.T., *Early Science in Oxford, Vol. IX*, Oxford, 1930

GUNTHER R.T., *Early Science in Oxford, Vol. X*, Oxford, 1930

HALL A.R., *Robert Hooke and Horology*, Notes and Records of the Royal Society of London Vol. 8, No. 2, April 1951, pp. 167 – 177

HALL A.R., *Mechanics and the Royal Society, 1668 – 70*, The British Journal for the History of Science, Vol. 3, No. 9, 1966, 24 – 38

HALL A.R., *Philosophers at War. The quarrel between Newton and Leibniz*, Cambridge University Press, 1980

HALL A.R., *Isaac Newton. Adventurer in thought*, Cambridge University Press, 1992

HALL M.B., *Promoting Experimental Learning. Experiment and the Royal Society, 1660 – 1727*, Cambridge, 1991

HAMMOND N., Hrsg., *The Cambridge Companion to Pascal*, Cambridge University Press, 2003

HASWELL J.E., *Horology*, Chapman and Hall Ltd., London, 1937

HEATH T.L., *The Works of Archimedes*, Cambridge University Press, 1897

HEATH T.L., *A history of Greek Mathematics*, Oxford at the Clarendon press, 1921

HENDERSON F., *Robert Hooke and the visual world of the early Royal Society*, Perspectives on Science, Vol. 27, Issue 3, May – June 2019, p. 395 – 434

HESSE M.B., *Forces and Fields: The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*, Dover Publications, Inc., New York, 1962

HESSE M.B., *Hooke's Vibration Theory and the Isochrony of Springs*, Isis, Vol. 57, No. 4, 1966, pp. 433 – 441

HESSE M.B, *Hooke's Philosophical Algebra*, Isis, Vol. 57, No. 1 (Spring, 1966), pp. 67 – 83

HEYMAN J., *Hooke's Cubico-Parabolical Conoid*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 52, No. 1 (Jan., 1998), pp. 39 – 50

HIDETO NAKAJIMA, *Robert Hooke's Family and His Youth: Some New Evidence from the Will of the Rev. John Hooke*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 48, No. 1 (Jan., 1994), pp. 11 – 16

HIGTON H., *Does using an instrument make you mathematical? Mathematical practitioners of the 17th century*, Endeavour, Vol. 25, Issue 1, March 2001, pp. 18 – 22

HOBBES T., *Elementorum Philosophiæsectio prima de corpore*, Lyon, 1655

HOLLIS L., *The Phoenix. The Men who made modern London*, Hachette UK, 2011

HOOKE R., *An Attempt for the Explication of the Phænomena*, London, 1661

HOOKE R., *Micrographia: or some Phsychological Descriptions of Minute Bodies made by magnifying glasses with Obervations and Inquiries thereupon*, London, 1665

HOOKE R., *Parabolic conical pendulum*, Royal Society Papers, 1667

HOOKE R., *An Attempt to Prove the Motion of the Earth by Oservations*, London, 1674

HOOKE R., *A Description of Helioscopes and Some Other Instruments*, London, 1676

HOOKE R., *Lampas: or, Descriptions of some Mechanical Improvements of Lamps & Waterpoises*, London, 1677

HOOKE R., *Lectures de Potentia Restitutiva; or, of Spring*, London, 1678

HOOKE R., *Lectiones Cutlerianæor a Collection of Lectures*, London, 1679

HOOKE R., *The Diary of Robert Hooke, M.A., M.D., F.R.S., 1672 – 1680: Transcribed from the Original in the Possession of the Corporation of the City of London (Guildhall Library)*, Henry William Robinson, Walter Adams, Hrsg., Indiana University, Taylor & Francis, 1935

HUNTER M., *Establishing the New Science: The Experience of the Early Royal Society*, The Boydell Press, New York, 1989

HUNTER M., SCHAFFER S., Hrsg., *Robert Hooke. New Studies*, Woodbridge, Suffolk: The Boydell Press, 1989

HUNTER M., Hrsg., *Robert Boyle Reconsidered*, Cambridge University Press, 1994

HUNTER M., *Robert Boyle 1627 – 1691. Scrupulosity and Science*, The Boydell Press, 2000

HUNTER M., *The Boyle Papers. Understanding the Manuscripts of Robert Boyle*, Ashgate Pub. Ltd, 2007

HUTCHINGS D., Hrsg., *Late seventeenth century scientists*, Pergamon Press, 1969

HUTTON C., *Tracts on Mathematical and Philosophical Subjects: Comprising among Numerous important Articles, Vol. I*, London, 1812

Huygens C., *Horologivm Oscillatrivm Sive de motv pendvlorvm ad Horologia Apatato Demonstrationes Geometricæ*, Paris, 1673

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome I. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1888

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome II. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1889

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome III. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1890

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome IV. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1891

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome V. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1893

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome VI. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1895

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome VII. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1897

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome VIII. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1899

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome IX. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1901

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome X. Correspondance*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1905

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome XII. Travaux de Mathématiques Pures 1652 – 1656*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1910

Huygens C.,*Œuvres complètes. Tome XVIII. L'Horologe à pendule ou à balancier de 1666 à 1695 Anecdota*, Hrsg. Martinus Nijhoff, Den Haag 1934

Huygens C., *Christian Huygens' Nachgelassene Abhandlungen: Über die Bewegung der Körper durch den Stoss.*, Hrsg. F. Hausdorff, Leipzig Verlag von Willhelm Engelmann, 1903

Huygens C., *Christiaan Huygens' the Pendulum Clock or Geometrical Demonstrations Concerning the Motion of Pendula As Applied to Clocks*, Hrsg. R. J. Blackwell, Iowa State Press, 1986

Immisch M., *Prize Essay on The Balance Spring and its isochronal adjustments*, E.& F.N. Spon, London, 1872

Inwood S., *The Man who knew too much*, Pan Macmillan UK, 2002

Inwood S., *The Forgotten Genius. The Biography of Robert Hooke 1635 – 1703*, MacAdam/Cage, San Francisco, 2003

Jagemann C.J., *Geschichte des Lebens und de Schriften des Galileo Galilei*, Leibzig, 1787

Jalobeanu D., *The Art of Experimental Natural History. Francis Bacon in Context*, Zeta Books, Bucharest, 2015

James G., *Vera circuli et hyperbolæquadratura cui accedit geometria pars vniuersalis inseruiens quantitatum curuarum transmutationi & mensuræ.*, Patavii, 1668

James W.S., *The Discovery of the Gas Laws*, Science Progress in the Twentieth Century (1919 – 1933), Vol. 23, No. 90, October 1928, pp. 263 – 272

Jammer M., *Concepts of Force. A Study in the Foundations of Dynamics*, New York, 1962

Jammer M., *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, Courier Corporation, 1997

Jardine L., *The Curious Life of Robert Hooke*, Harper Collins, New York, 2004

Jardine L., *Temptation in the Archives. Essays in Golden Age Dutch Culture*, UCL Press, London, 2015

Jaynes J., *The Problem of Animate Motion in the Seventeenth Century*, Journal of the History of Ideas, Vol. 31, No. 2, Apr – Jun 1970, pp. 219 – 234

Jenemann H.R., *Robert Hooke und die frühe Geschichte der Federwaage*, Berichte zur Wissenschaftsgeschichte 8 (1985), S. 121 – 130

Jesseph M.D., *On analytics and indivisibles: Hobbes on the methods of modern mathematics*, Revue d'histoire des siences, 46, No. 2 – 3, 1993, pp. 153 – 193

Jourdain P.E.B., *Robert Hooke as a precursor of Newton*, The Moist, Vol. 23, No. 3, July 1913, pp. 353 – 384

Jurin J., *Philosophical Transactions: XIV. An inquiry into the measure of the force of bodies in motion: With a proposal of an experimentum crucis, to decide the controversy about it*, Phil. Trans. 1744 43, 423 – 440, January 1744

KAPITANIAK T. & KURTHS J., *Synchronized pendula: From Huygens' clocks to chimera states*, European Physical Journal Special Topics, Vol. 223, Issue 4, April 2014, pp. 609 – 612

KASSLER J.C., *Inner Music. Hobbes, Hooke and North on Internal Character*, Fairleigh Dickinson University Press, 1995

KENT P. & CHAPMAN A., Hrsg., *Robert Hooke and the English Renaissance*, Gracewing, Herefordshire, 2005

KEPLERI J., *Opera Omnia*, Frisch D.Ch., Hrsg., Vol. VIII, Pars 1., 1870

KESARIS P. & HOY J.P., *The early letters and classified papers, 1660 – 1740*, Kesaris P. & Hoy J.P., Hrsg., University Publications of America, 1990

KEYENES G., *A bibliography of Dr. Robert Hooke*, At Clarendon Press, Oxford, 1960

KIRBY R.S., WITHINGTON S., DARLNG A.B. & KILGOUR F.G., *Engineering in history*, Dover Publications Inc., New York, 1956

KLEIN M., *Mathematics and the physical World*, Dover Publication, New York, 1958

KLINE M., *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, Oxford University Press, 1972

KNIGHT C., *London, Vol. I*, Published by Charles Knight & Co., Ludgate Street, London, 1841

KNOX R., *An Historical Relation of Ceylon. Together with somewhat concerning severall passages of my life*, James R., Hrsg., James Madehose & Sons, Glasgow, 1911

KOETSIER T. & CECCARELLI M., Hrsg., *Explorations in the History of Machines and Mechanisms*, Springer Science+Business Media Dordrecht 2012

KOYRÉ A., *Galileo and the Scientific Revolution of the Seventeenth Century*, The Philosophical Review, Vol. 52, No. 4, July, 1943, pp. 333 – 348

KOYRÉ A., *An unpublished Letter of Robert Hooke to Isaac Newton*, Isis, Vol. 43, No. 4, 1952, 312 – 337

KUHN T.S., *Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte.*, Ed. 3, Krüger L. (Hrsg.), Suhrkamp, 1983

KUHN T.S., *Die kopernikanische Revolution*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 1981

KUTSCHMANN W., *Die Newtonsche Kraft: Metamorphose eines Wissenschaftlichen Begriffs*, Band 12 von Studia Leibnitiana (Sonderheft), Steiner Franz Verlag, 1983

LANDES D.S., *Revolution in time. Clocks and the making of the modern world*, Cambridge, 1985

LENOIR T., *Descartes and the geometrization of thought: The methodological background of Descartes' géométrie*, Elsevier, Historia Mathematica, Vol. 6, Issue 4, November 1979, pp. 355 – 379

LEYBOURN T., *The Mathematical Repository*, London, 1799

LINDBER D.C. & NUMBERS R.L., Hrsg., *The Cambridge History of Science: Volume 2, Medieval Science*, Cambridge University Press, 2003

LOCKWOOD E.H., *A Book of Curves*, Cambridge at the University Press, 1963

LODGE O., *Pioneers of science: and the development of their scientific theories*, Dover Publications, 1926

LOWELL COOLIDGE J., *A History of Geometrical Methods*, Dover Publications, Inc., New York, 1963

LYONS H., *The Royal Society 1660 – 1940. A history of its administration under its charters*, Cambridge at the University Press, 1944

MACH E., *History and root of the principle of the Conservation of Energy*, Translated by P.E.B. Jourdain, Chicaggo the Open court Pub. Co., 1911

MACINTOSH J.J., *Perception and Imagination in Descartes, Boyle and Hooke*, Canadian Journal of Philosophy, Vol. 13, No. 3, September 1983, pp. 327 – 352

MADDISON R.E.W., *The life of the honourable Robert Boyle*, Taylor & Francis, London, 1969

MAIER A., *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft. Studien zur Naturphilosophie des 14.Jahrhunderts*, Essener Verlagsanstalt, Essen, 1943

MAIER A., *Studien zur Naturphilosophie der Spätscholastik, I.Band, Die Vorläufer Gelileis im 14. Jahrhundert*, Edizioni di Storia e letteratura, Roma, 1949

MALET A., *From Indivisibles to Infinitesimals*, Universitat Autònoma de Barcelona, 1996

MANCOSU P., *Philosophy of Mathematics and Mathematical Practice in the Seventeenth Century*, Oxford University Press, 1996

MANDEY V., *Mellificium mensionis, or, The marrow of measuring*, London, 1727

MARIOTTE E., *Oeuvres de M. Mariotte, de l'Académie royale des sçiences*, A la Haye, Jean Neaulme, 1740

MARTIN B., *Philosophia Britannica: or A New and Comprehensive System of the Newtonian Philosophy Vol. I*, London, 1747

MARTIN B., *Philosophia Britannica: or A New and Comprehensive System of the Newtonian Philosophy Vol. II*, London, 1759

MARTIN B., *Philosophia Britannica: or A New and Comprehensive System of the Newtonian Philosophy Vol. III*, London, 1771

MASSON F., *Robert Boyle. A biography.*, London Constable & Company Ltd, London, 1914

MATTHEWS M.R., GAULD C.F. & STINNER A., Hrsg., *The Pendulum. Scientific, Historical, Philosophical & Educational Perspectives*, Springer, 2005

MCLAUGHLIN P., *Descartes on Mind–Body Interaction and the Conservation of Motion*, The Philosophical Review, Vol. 102, No. 2, April 1993, 155 – 182

MERSENNE M., *Harmonie universelle, contenant la theorie et la pratique de la musique*, Paris, 1636

MERSENNE M., *Vniuersægeometriæ, mixtaeque mathematicæsynopsis, et bini refractionum demonstratarum tractatus. Studio & operâ* , Paris, 1644

MIKHAĬOVICH GESSEN B. & HERVIEL J., *The background to Newton's Principia. A Study of Newton's dynamical researches in the years 1664 – 1684*, Clarendon Press, University of California, 1965

MILLER D.M., *Representing Space in the Scientific Revolution*, Cambridge University Press, 2014

MILLER W.A., *Elements of Chemistry. Chemical Physics*, London, 1872

MILMAN L., *Sir Christopher Wren*, Duckworth and Co., London, 1908

MLODINOW L., *Euclid's window : the story of geometry from parallel lines to hyperspace*, New York, 2001

MOLESWORTH BART W., *The English Works of Thomas Hobbes of Malmesbury, Vol. I*, London, 1839

MOYER A.E., *Robert Hooke's Ambiguous Presentation of "Hooke's Law"*, Isis, Vol. 68, June 1977, pp. 266 – 275

MULLIGAN L., *Self-Scrutiny and the Study of Nature: Robert Hooke's Diary as Natural History*, Journal of British Studies, Vol. 35, No. 3, July 1996, pp. 311 – 342

MURDY A., Hrsg., *Galileo Galilei. Schriften–Briefe–Dokumente*, Albus VMA-Verlag, Wiesbaden, 2005

NARRIEN J., *Analytical Geometry: with the Properties of Conic Sections and an Appendix*, London, 1846

NAUENBERG M., *Robert Hooke's Seminal Contribution to Orbital Dynamics*, A talk to be presented at the conference to mark the tercentenary of the death of Hooke, The Royal Society of London, July 2003

NAYLOR R., *Galileo, Copernicanism and the Origins of the New Science of Motion*, The British Journal of the History of Science, Vol. 36, No. 2, June 2003, pp. 151 – 181

NEMÉNYI P.F., *The main concepts and ideas of fluid dynamics in their historical development*, Archive for History of Exact Sciences, August 1962, Vol. 2, Issue 1, pp. 52 – 86

NEWTON I., *The Mathematical Papers of Isaac Newton, Vol. VII 1691 – 1695*, Hrsg. D.T. Whiteside, Cambridge at the University Press, 1976

NEWTON I., *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, Translated by A. Motte, A short Comment on, and Defence of, the Principia by W. Emerson, London 1803

NEWTON I., *Newton. Philosophical Writings*, Hrsg. A. Janiak, Cambridge University, 2014

NICHOLS R., *The Diaries of Robert Hooke, the Leonardo of London, 1635 – 1703*, Book Guild, 1994

NICHOLS R., *Robert Hooke and the Royal Society*, Book Guild, 1999

NICODEMI O., *Galileo and Oresme: Who Is Modern? Who Is Medieval?*, Mathematics Magazine, Vol. 83, No. 1, 2010, S. 24 – 32

OLDROY D.R., *Some Writings of Robert Hooke on Procedures for the Prosecution of Scientific Inquiry, including His "Lectures of Things Requisite to a Natural History"*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 41, No. 2, June 1987, pp. 147 – 167

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. I*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. II*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. III*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. IV*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. V*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. VI*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. VII*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oldenburg H., *The Correspondence of Henry Oldenburg, Vol. VIII*, Hall A.R. & Hall M.B., Hrsg., Madison, University Press Wisconsin Press, 1965

Oliveira H.M. & Melo L.V., *Huygens synchronization of two clocks*, Scientific Reports, No. 5, Article number:11548, January 2015

Olschki L.S., *The pulse of time. Galileo Galilei, the determination of longitude, and the pendulum clock*, University of Michigan, 1991

Oresme N., *De latitudinibus formarum. Add: Blasius Pellecanus, Quaestiones super tractus de Latitudinibus formarum Nicolai Oresme (I, II)*, Padova Cerdonis, Matthæus, 1482

Osler M.J., Hrsg., *Rethinking the Scientific Revolution*, Cambridge University Press, 2000

Osler M.J., *Divine Will and the Mechanical Philosophy. Gassendi and Descartes on contingency and necessity in the created world*, Cambridge University Press, 1994

Ozanam J., *Récréations mathématiques et physiques, qui contiennent plusieurs problèmes d'arithmétique, de géométrie, de musique, d'optique, de gnomonique, de cosmographie, de mécanique, de pyrotechnie et de physique avec un Traité des horloges élémentaires*, Paris, 1750

Palmerino C.R. & Thijssen J.M.M.H. (Hrsg.), *The Reception of the Galilean Science of Motion in seventeenth century Europe*, Springer Science+Business Media, B.V., 2004

Palmerino G.R., *The Geometrization of Motion: Galileo's Triangle of Speed and its Various Transformations*, Early Science and Medicine, Vol. 15, No. 4/5, Forms of Mathematization (14th – 17th Centuries), 2010, pp. 410 – 447

Panza M., *Mathematisation of the Science of Motion and the Birth of Analytical Mechanics: A Historiographical Note*, The Application of Mathematics to the Science of Nature, Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2002, pp. 253 – 271

Park K. & Daston L., Hrsg., *The Cambridge History of Science: Volume 3, Early Modern Science*, Cambridge University Press, 2006

Parkinson G.H.R., Hrsg., *The Renaissance and 17th Century Rationalism*, Routledge, New York, 2000

Patterson L.D., *Robert Hooke and the Conservation of Energy* , Isis, Vol. 38, No. 3/4, February 1948, pp. 151 – 156

Patterson L.D., *Hooke's Gravitation Theory and Its Influence on Newton. II: The Insufficiency of the Traditional Estimate*, Isis, Vol. 41, No. 1 (Mar., 1950), pp. 32 – 45

Patterson L.D., *Pendulums of Wren and Hooke*, Osiris, Vol. 10 (1952), pp. 277 – 321

Pearce G. & Maynard P., Hrsg., *Conceptual Change*, Reidel Pub. Co., 1973

Pecquet J., *Diepæi Experimenta Nova Anatomica*, Paris, 1651

Peiser D., *Discovering the Principles of Mechanics 1600 – 1800*, Williams K. & Caparrini S., Hrsg., Birkhäuser Basel/Boston/Berlin, 2008

Pepys S., *The Diary of Samuel Pepys M.A. F.R.S.*, Wheatley H.B., Hrsg., London, 1893

Petty W.,*The Discourse Made before the Royal Society The 26. November 1674 concerning the use of duplicate proportion in sundry important particulars together with a new hypothesis of springing or elastique motions*, London, 1674

Phillips J.P., *Brachistochrone, Tautochrone, Cycloid-Apple of Discord*, The Mathematics Teacher, Vol. 60, No. 5, May 1967, pp. 506 – 508

PLAUTUS, *Menæchmi*, Translated with Introduction and Notes by D. Christenson, Hackett Publishing Company, Indianapolis, 2012

Pook L.P., *Understanding Pendulums*, Springer Science+Business Media B.V., London New York, 2011

POTTAGE J., *Geometrical investigations: illustrating the art of discovery in the mathematical field, Vol. II*, Addison Wesley, University of California, 1983

POWER H., *Experimental Philosophy. The Second Book.*, London 1663

PRINCIPE L., *The Aspiring Adept: Robert Boyle and his Alchemical Quest*, Princeton University Press, 1998

PROTTER M.H. & PROTTER P.E., *Calculus with Analytic Geometry, $4^{th}$ Edition*, Jones and Bartlett Publishers Inc., Boston, 1988

PURRINGTON R.D., *The First Professional Scientist. Robert Hooke and the Royal Society of London*, Birkhäuser Verlag AG Basel/Boston/Berlin, 2009

RIGAUD S.J., *Correspondence of Scientific Men of the Seventeenth Century, Including Letters of Barrow, Flamsteed, Wallis, and Newton, Printed from the Originals in the Collection of the Earl of Macclesfield*, Oxford at the University Press, 1841

ROBENS E., JAJAWEERA S.A.A. & KIEFER S., *Balances. Instruments, Manufacturers, History*, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 2014

ROBINSON A., *The Story of Measurement*, Thames & Hudson, Pennsylvania State University, 2007

ROBINSON E.A. & CLARK D., *Elasticity; Cartesian fileds of dilatation*, The Leading Edge, Vol. 8, No. 6, June 1989, 28 – 31

ROBINSON HEATH L., *The Concept of Time*, The Journal of Philosophy, Vol. 34, Issue 6, March 1937, 164 – 165

ROBISON J., *System of Mechanical Philosophy Vol. IV*, Edinburgh, 1822

ROCHE J.J., *The Mathematics of Measurement. A critical History.*, The Athlone Press, London, Springer, 1998

ROIDT T., *Cycloids and Paths*, Portland State University, 2011

ROSSI P., *The Dark Abyss of Time. The History of the Earth & the History of Nations from Hooke to Vico*, Translated by L.G. Cochrane, The University of Chicago Press, 1984

ROUSSEAUX G., COULLET P. AND GILLI J., *Robert Hooke's Conical Pendulum from the Modern Viewpoint of Amplitude Equations and Its Optical Analogues*, Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 462, No. 2066 (Feb. 8, 2006), pp. 531 – 540

ROWBURY R., *Robert Hooke 1635 – 1703*, Science Progress (1933–), Vol. 95, No. 3 (2012), pp. 238 – 254

ROWLINSON J.S., *Cohesion. A Scientific History of Intermolecular Forces*, Cambridge University Press, 2004

RUSSELL J.L.,*Action and Reaction before Newton*, The British Journal for the History of Science, Vol. 9, Issue 1, March 1976, pp. 25 – 38

RUTHERFORTH T., *A System of Natural Philosophy, being a course of Lectures in Mechanics, Optics, Hydrostatics, and Astronomy; Vol. II*, Cambridge, 1748

SALSBURY T., *Discourse On Bodies In Water*, University of Illinois Press, 1960

SASAKI C., *Descartes's Mathematical Thought* , Springer Netherlands Dordrecht, 2003

SCOTT J.F., *The Mathematical Work of John Wallis, D.D., F.R.S., (1616 – 1703)*, Chelsea Publishing Company, 1981

SCURR R., *John Aubrey. My Own Life*, Chatto & Windus, London, 2015

SHAPIN S. & Schaffer S., *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, Princeton University Press, 1985

SHAPIN S., *A Social History of Truth. Civility and Science in Seventeenth-Century England*, The University of Chicago Press, 1994

SHAPIN S., *Never Pure. Historical Studies of Science as if it was Produced by People with Bodies, Situated in Time, Space, Culture, and Society, and Struggling for Credibility and Authority*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2010

SHAPIRO B.J., *John Wilkins, 1614 – 1672. An intellectual biography*, Berkeley, University of California Press, 1969

SHAW P., *The philosophical works of the Honourable Robert Boyle Esq., Vol. II*, London, 1738

SHERMAN S., *Telling Time. Clocks, Diaries and Englisch Diurnal Form 1660 – 1785*, The University of Chicago, 1996

Shore S.N., *Forces in Physics. A Historical Perspective*, Greenwood Press, Westport, Connecticut/London, 2008

Simson R., *The Elements of Euclid*, London, 1806

Slowik E., *Quantity of Motion: The Origin and Function of the Cartesian Conservation Principle*, Cartesian Spacetime, Springer Science+Business Media B.V., 2002 pp. 109 – 134

Smeenk C., *Philosophical Geometers and Geometrical Philosophers*, Hrsg. B. Hill, G. Gorham, E. Slowik & C.K. Waters, The Language of Nature: Reassessing the Mathematization of Natural Philosophy in the Seventeenth Century. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2016, pp. 308 – 338

Sobel D., *Longitude. The Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time*, Walker and Company, New York, 1995

Spinoza B., *The principles of Descartes' philosophy*, Translated by H.H. Britan, Chicago, 1905

Stakhov A., *The Mathematics of Harmony. From Euclid to Contemporary Mathematics and Computer Science*, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd, 2009

Stedall J., *John Wallis and the French: his quarrels with Fermat, Pascal, Dulaurens, and Descartes*, Elsevier, Historia Mathematica, Vol. 39, Issue 3, August 2012, 265 – 279

Stedall J.A., *The Arithmetic of Infinitesimals. John Wallis 1656*, New York, 2004

Steele R., *The Earlies Arithmetics in English*, Kraus Reprint Co., New York, 1973

Struik D.J., Hrsg., *A source book in Mathematics, 1200 – 1800*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1969

Sully H., *Regle Artificielle Du Temps Traite* , Paris, 1717

Suppes P., *Descartes and the Problem of Action at a Distance*, Journal of the History of Ideas, Vol. 15, No. 1, January 1954, pp. 146 – 152

Swetz F.J., Hrsg., *The European Mathematical Awakening: A Journey Through the History of Mathematics, 1000 – 1800*, Dover Publications Inc., New York, 2013

Tacon D., *The Cycloid: "The Helen of Geometers"*, Parabola, Vol. 29, Issue 3, 1993, 14 – 19

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. 1 – 2*, London, 1665 – 1667

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. VII*, London, 1672 – 1673

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. IX*, London, 1674

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. X*, London, 1675

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. XIV*, London, 1684

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. XVI*, London, 1686 – 1687

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. XXX*, London, 1717 – 1719

The Royal Society of London, *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Vol. XLVIII*, London, 1754

The Royal Society of London, *The Statutes of the Royal Society of London*, London, 1663

Todhunter I., *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials, Vol. I*, Cambridge University Press, 1886

Tokaty G., *A History of Philosophy of Fluid Mechanics*, Dover Publications Inc., New York, 1971

Torricelli E., *Opera Geometrica EvangelistæTorricelli*, Florenz, 1644

Truesdell C., *The Rational Mechanics of flexible or elastic bodies 1638 – 1788*, Turin, 1960

Veitch J., textitThe Method, Meditations and Philosophy of Descartes, Tudor Publishing, New York, 1901

Wallace W.A., *Galileo's Logic of Discovery and Proof. The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatises on Aristotle's Posterior Analytics*, Springer Science+Buisness Media Dordrecht, 1992

WALLER R., R.S. *Secr The Posthumous Works of Robert Hooke, M.D.S. R.S. Geom. Prof. Gresh. &c*, London, 1705

WALLIS J., *A summary account given by Dr John Wllis of the general law of motion*, London, 1668

WALLIS J., *Mechanica sive De Motu, Tractus Geometricus*, London, 1670

WALLIS J., *An Extract of a Letter from the Reverend Dr. John Wallis to Richard Waller, Esq; Secretary to the Royal Society, Concerning the Spaces in the Cycloid, which are Perfectly Quadrable*, Philosophical Transactions (1683 – 1775). 1753 – 01 – 01. 19: 111 – 113

WALLIS J., *Opera Mathematica, Vol. I*, Oxford, 1695

WALTEON M.T., *Boyle and Newton on the Transmutation of Water and Air, from the Root of Helmont's Tree*, Ambix, Vol. 27, Issue 1, 1980, 11 – 18

WARD J., *The lives of the Professors of Gresham College*, London, 1740

WATSON R.A., *The Downfall of Cartesianism 1673 – 1712. A Study of Epistemological Issues in Late 17th Century Cartesianism*, Martinus Nijhoff, The Hague, 1966

WEBSTER C., *Richard Towneley and Boyle's Law*, Nature, Vol. 197, No. 4864, 1963, pp. 226 – 228

WEBSTER. C., *The Discovery of Boyle's Law, and the Concept of the Elasticity of Air in the seventeenth Century*, Archive for history of exact sciences, Vol. 2, Issue 6, pp. 441 – 502, 1965

WESTFALL R., *Circular Motion in Seventeenth-Century Mechanics*, Isis, Vol. 63, No. 2, June 1972, pp. 184 – 189

WESTFALL R.S., *Force in Newton's Physics. The science of dynamics in the seventeenth century*, MacDonald and Co, 1971

WESTFALL R.S., *Isaac Newton*, Oxford University Press, 2007

WESTFALL R.S., *The Construction of Modern Science. Mechanisms and Mechanics*, Cambridge University Press, 1977

WESTFALL R.S., *The Life of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1993

WHINNEY M.D., *Christopher Wren*, Praeger, New York, 1971

WHITEHEAD A.W., *The Concept of Nature*, The Scientist as Philosopher, Hrsg. F. Weinert, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 2005, pp. 9 – 74

WHITESIDE D.T., *Patterns of Mathematical Thought in the later Seventeenth Century* , Archive for History of Exact Sciences, Vol. 1, No. 3, July 1961, pp. 179 – 388

WHITROW G.J., *The Laws of Motion*, The British Journal for the History of Science, Vol. 5, No. 19, 1971

WHITROW G.J., *The Measurement of Time: Its Role in Scientific Thought since Galileo*, Interdisciplinary Science Reviews, Vol. 16, Issue 4, 1991, 367 – 373

WILKINS J., *Mathematical Magick*, London, 1680

WILLIAMS E., *Hooke's Law and the Concept of the Elastic Limit*, Annals of Science, Vol. 12, 1956

WOLFSON P.R., *The Crooked Made Straight: Roberval and Newton on Tangents*, The American Mathematical Monthly, Vol. 108, No. 3, March 2001, pp. 206 – 216

WOODRUFF L.L., *Hooke's Micrographia*, The American Naturalist, Vol. 53, No. 626, May – June 1919, pp. 247 – 264

WOOTTON D., *The Invention of Science. A New History of the Scientific Revolution*, Penguin UK, 2015

WREN C., *Life and works of Sir Christopher Wren. From the Parentalia; or memoirs*, London, 1701

YODER J.G., *Unrolling Time. Christiaan Huygens and the Mathematization of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988

YOUNG T., *A course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts Vol. II*, London, 1807

ZILL D.G.& DEWAR J.M., *Precalculus with Calculus Previews,* $6^{th}$ *Edition*, Jones & Bartlett Learning, 2017

# Index


**A**
Aristoteles, 21
Aspenden, 25

**B**
Bacon *Francis*, 18
Baldernock, 197
Barrow *Isaac*, 29
Bateman *Anthony*, 30
Bedfordshire, 31
Boghall, 197
Bourg d'Oizé, 44
Boyle *Robert*, 12, 13, 21–25, 28, 35, 36, 42, 52–57, 64, 78, 79, 84, 91, 93, 96–99, 196, 209, 210, 212, 215
Brouncker *William*, 27
Busby *Richard*, 17

**C**
Castle Lyons, 27
Ceylon, 39
Chitenay, 35
Croune *William*, 54
Cutler *John*, 29, 30

**D**
Dacres *Arthur*, 29, 30
de Roberval *Gilles Personne*, 44
Derham *William*, 188, 189, 191, 193
Descartes *René*, 64, 65, 74, 138–140, 142, 170, 202
Dokkum, 181

**E**
Edinburgh, 197

**F**
Fawsley, 18
Fonenay-le-Comte, 116
Freshwater, 15
Frisius *Gemma*, 181

**G**
Gale *Thomas*, 36
Galileo *Galilei*, 18, 21, 32, 65, 69, 74, 76, 77, 127, 133–135, 170, 177, 179
Graunt *John*, 29
Grew *Nehemiah*, 33, 35

**H**
Hampton Court, 18
Henshaw *Thomas*, 33
Hertfordshire, 25
Hevelius *Johannes*, 36
Highgate, 18
Hill *John*, 33

Hooke *Cecily*, 15
Hooke *John*, 15, 16
Hoskins *John*, 16
Huygens *Christiaan*, 32, 35–37, 65, 77, 78, 116, 174, 175, 180, 185, 188–190, 192, 193, 195, 196, 199, 201, 209, 211, 213, 217

**I**
Isle of Wight, 15

**K**
Kepler *Johannes*, 18
Knightsbridge, 25
Knox *Robert*, 39
Kopernikus *Nikolaus*, 18

**L**
Löwen, 181
Lawrence *John*, 30
Leibniz *Gottfried Willhelm*, 116, 219
Lely *Peter*, 16
London, 16–18, 21, 29, 30, 33, 35, 39, 54, 216, 217

**M**
Maine, 44
Mancetter Parish, 33
Menaechmus, 147, 148
Mersenne *Marin*, 44, 76, 138, 170
Middlesex, 25
Moray *Robert*, 29, 37, 192, 195, 201, 211

**N**
Newton *Isaac*, 29, 36, 37, 54, 65, 71, 72, 83, 93, 96, 115, 116, 140, 212, 215, 216, 219
Northill, 31

**O**
Oldenburg *Henry*, 33, 35–37, 54, 180, 189, 192, 193, 195, 196, 211, 216
Oresme *Nicole*, 116, 127–131, 133, 135, 140, 150, 164, 170
Oxford, 17, 18, 21, 197, 210, 215

**P**
Papin *Denis*, 35, 37
Paris, 35, 44, 45, 116, 195
Pecquet *Jean*, 44–46
Perthshire, 29
Petty *William*, 75, 213
Power *Henry*, 45, 46, 48–52, 54, 57, 61

**R**
Ricci *Michelangelo*, 42
Roberval, 44
Robison *John*, 191, 197, 199, 200
Rom, 42

**S**
Senlis, 44
Soest Westfalen, 16
Sountière, 44
Stirlingshire, 197

**T**
Tompion *Thomas*, 31, 114, 188
Torricelli *Evangelista*, 21, 42–44, 47, 55, 57, 79, 83
Towneley *Richard*, 46, 48, 52–57, 61, 82

**V**
Viètes *François*, 116
von Guericke *Otto*, 22, 23

**W**
Waller *Richard*, 15, 19, 38, 64, 140, 161, 162, 181, 189, 191–194, 196

Wallis *John*, 117
Ward *Seth*, 25
Warwickshire, 33
Westminster, 27
Wilkins *John*, 18–21, 28, 198, 210, 215
Williamson *Joseph*, 33
Wiltshire, 18
Wren *Christopher*, 18, 25, 27, 31, 33, 36, 209

**Y**
York, 36
Yorkshire, 36

Das 1678 veröffentlichte Hookesche Gesetz stellt einen linearen Spezialfall des Elastizitätsgesetzes dar, das das einfache Verhältnis zwischen Belastung und Verformung beschreibt. Für diese quantitative Beschreibung der Schwingung einer Feder führte Hooke Größen ein, allerdings sind zu diesem Zeitpunkt die heute verwendeten Größen Kraft und Energie noch nicht defi niert. Dies erfolgte mithilfe von geometrischen Verhältnissen, die er als Diagramm in den Lectures de Potentia Restitutiva veröffentlichte. Doch welche Größen verwendete Hooke hierbei eigentlich? Mit dieser Arbeit wird eine mögliche Interpretation entwickelt.

Sabina Muminovic ist Physikerin und war bis 2015 Lehrkraft an einem Gymnasium. Danach war sie Doktorandin an der Europa-Universität Flensburg und ist seit 2019 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Hauptabteilung Bildung des Deutschen Museum München.

**Flensburg University Press**

Flensburg Studies on the History and Philosophy of Science in Science Education – Bd. 7

www.wbg-wissenverbindet.de
ISBN 978-3-534-45026-8

wbg Academic