

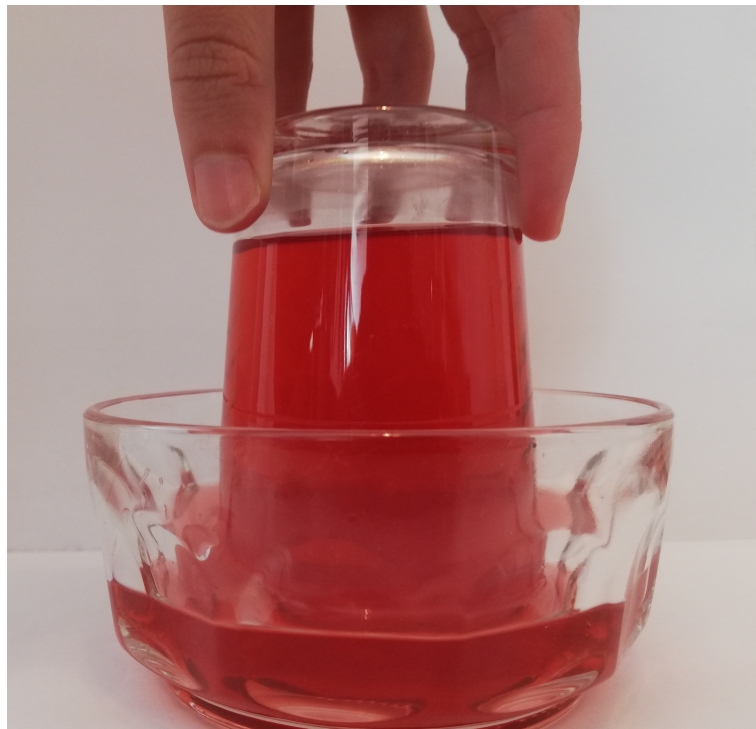
Institute für Theoretische Physik  
Universität zu Köln  
Masterarbeit

---

# Physikunterricht zum Thema Luftdruck vor dem Hintergrund naturwissenschaftlicher Entwicklungen

Eine kritische Betrachtung des Lehrstücks „Pascals Barometer“

---



*Erstgutachter:* PD Dr. Rochus Klesse  
*Zweitgutachter:* Prof. Dr. Dr. Marc Eyer

**Eva Mix**  
E-Mail: [eva.mix@smail.uni-koeln.de](mailto:eva.mix@smail.uni-koeln.de)  
Matrikelnummer: 7307221



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fachwissenschaft</b>	<b>3</b>
2.1	Vakuum . . . . .	3
2.2	Masse und Gewichtskraft . . . . .	4
2.3	Druck . . . . .	6
2.3.1	Hydrostatischer Druck . . . . .	6
2.3.2	Schweredruck der Luft . . . . .	9
2.4	Kinetische Gastheorie . . . . .	11
2.4.1	Spezialfälle des idealen Gasgesetzes . . . . .	11
2.4.2	Reale Gase . . . . .	14
2.4.3	Bei geringem Druck kochen . . . . .	14
2.5	Hydrostatisches Paradoxon . . . . .	15
2.6	Kommunizierende Röhren . . . . .	18
2.7	Steighöhe von Wasser und Quecksilber . . . . .	18
2.8	Barometer . . . . .	19
2.9	Druckeinheiten . . . . .	20
2.10	Aufbau und Mächtigkeit der Atmosphäre . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Geschichte</b>	<b>23</b>
3.1	Aristoteles . . . . .	24
3.2	Berti . . . . .	25
3.3	Galilei . . . . .	26
3.4	Torricelli . . . . .	28
3.5	Pascal . . . . .	30
3.6	Guericke . . . . .	32
3.7	Boyle . . . . .	34
3.8	Weitere historische Persönlichkeiten . . . . .	37
3.9	Moderne . . . . .	38
3.9.1	Luftdruck und Vakuum in der Modernen . . . . .	40
3.10	Zeittafel . . . . .	41
3.11	Gesellschaft in Mitteleuropa 1610 - 1660 . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Didaktik</b>	<b>45</b>
4.1	Lehrkunst . . . . .	45
4.1.1	Lehrstücke . . . . .	48

4.1.2	Kulturgenetisch orientierter Lehrstückunterricht . . . . .	49
4.1.3	Lehrkunst im Schulalltag . . . . .	52
4.2	Lehrstück „Pascals Barometer“ . . . . .	53
4.2.1	Variationen der Inszenierung . . . . .	62
4.3	Abwandlungen und Ergänzungen . . . . .	63
4.3.1	Denkbild . . . . .	63
4.3.2	Aristoteles . . . . .	64
4.3.3	Berti . . . . .	64
4.3.4	Galilei . . . . .	65
4.3.5	Gewicht der Luft . . . . .	65
4.3.6	Torricelli . . . . .	66
4.3.7	Pascal . . . . .	67
4.3.8	Von Guericke . . . . .	69
4.3.9	Boyle . . . . .	70
4.3.10	Moderne . . . . .	71
4.3.11	Paradigmenwechsel . . . . .	72
4.3.12	Zusatz- und Transferaufgaben . . . . .	73
	4.3.12.1 Experimente . . . . .	74
	4.3.12.2 Luftdruck und Wetter . . . . .	74
	4.3.12.3 Rechnungen . . . . .	76
	4.3.12.4 Barometer . . . . .	77
	4.3.12.5 Postererstellung . . . . .	80
	4.3.12.6 Fragenspeicher . . . . .	80
4.4	Eigene Lehrstückversion . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>Kommentiertes Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>A 1</b>
A.1	Experimente zur Integration in das Lehrstück . . . . .	A 1
A.1.1	Druck als Quotient aus Kraft und Fläche . . . . .	A 1
A.1.2	Druck wirkt in alle Richtungen . . . . .	A 3
A.1.3	Hydrostatisches Paradoxon . . . . .	A 4
A.1.4	Kommunizierende Röhren . . . . .	A 8
A.1.5	Bei geringem Druck kochen . . . . .	A 9
A.1.6	Gewicht der Luft . . . . .	A 11
A.2	Experimente als Zusatz . . . . .	A 17
A.2.1	Saugnapf . . . . .	A 17
A.2.2	Vakuumglocke anheben . . . . .	A 19
A.2.3	Wasserglas verschließen . . . . .	A 20
A.2.4	Löchrige Flasche . . . . .	A 21

A.2.5	Saugheber (engl. Siphon)	A 23
A.2.6	Strohalm	A 25
A.2.7	Druckdifferenzen	A 26
A.2.8	Schokokuss im Vakuum	A 28
A.2.9	In den Bergen	A 29
A.2.10	Im Flugzeug	A 30
A.2.11	Implodierende Dose	A 31
A.2.12	Leben ohne Atmosphäre	A 32
A.3	Auszug aus Discorsi	A 33
A.4	Briefwechsel zwischen Pascal und Périer	A 35
A.4.1	Französische Zusammenfassung	A 35
A.4.2	Deutsche Übersetzung	A 36



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Barometrische Höhenformel . . . . .	8
2.2	Boyle-Mariotte Gesetz (1662) . . . . .	12
2.3	Guy-Lussac Gesetz (1787) . . . . .	12
2.4	Ermittlung des absoluten Nullpunktes . . . . .	13
2.5	Amontons Gesetz (1802) . . . . .	13
2.6	Hydrostatisches Paradoxon . . . . .	15
2.7	Wassersäule . . . . .	16
2.8	Hydrostatisches Paradoxon in einem breiter werdenden Gefäß . . . . .	16
2.9	Hydrostatisches Paradoxon mit einer Trennwand . . . . .	17
2.10	Kommunizierende Röhren . . . . .	18
2.11	Schichten der Erdatmosphäre . . . . .	22
3.1	Aristoteles . . . . .	24
3.2	Gasparo Berti . . . . .	25
3.3	Galileo Galilei . . . . .	26
3.4	Evangelista Torricelli . . . . .	28
3.5	Blaise Pascal . . . . .	30
3.6	Otto von Guericke . . . . .	32
3.7	Magdeburger Halbkugeln im Miniaturwunderland . . . . .	33
3.8	Robert Boyle . . . . .	34
4.1	Ouverture: Wasserglasexperiment . . . . .	53
4.2	1. Akt: Der lange Wasserschlauch . . . . .	55
4.3	2. Akt: Beschränkte Kraft des Vakuums . . . . .	56
4.4	3. Akt: Das Gewicht von Luft . . . . .	57
4.5	4. Akt: Puy de Dôme . . . . .	59
4.6	5. Akt: Die Kraft des Luftdrucks . . . . .	60
4.7	Finale: Wasserglasexperiment unter der Vakuumglocke . . . . .	61
4.8	Wasserglasexperiment unter der Vakuumglocke . . . . .	71
4.9	Wetterstation . . . . .	75
4.10	Goethe-Barometer Experiment . . . . .	79
A.1	Druck als Quotient aus Kraft und Fläche . . . . .	A 1
A.2	Druck wirkt in alle Richtungen . . . . .	A 3
A.3	Hydrostatisches Paradoxon mit Kraftmesser . . . . .	A 4
A.4	Hydrostatisches Paradoxon mit Röhren und Schläuchen . . . . .	A 6

A.5 Pascals Wette . . . . .	A 7
A.6 Kommunizierende Röhren . . . . .	A 8
A.7 Bei geringem Druck kochen . . . . .	A 9
A.8 Dichte der Luft mit einer Flasche bestimmen . . . . .	A 11
A.9 Dichte der Luft mit einer Spritze bestimmen . . . . .	A 13
A.10 Masse der Luft mit Luftballons verdeutlichen . . . . .	A 15
A.11 Saugnapf unter der Vakuumlöcke . . . . .	A 17
A.12 Saugnapf mit Vakuumpumpe . . . . .	A 18
A.13 Vakuumlöcke anheben . . . . .	A 19
A.14 Wasserglas verschließen . . . . .	A 20
A.15 Löchrige Flasche . . . . .	A 21
A.16 Saugheber . . . . .	A 23
A.17 Strohhalm . . . . .	A 25
A.18 Druckdifferenzen . . . . .	A 27
A.19 Schokokuss im Vakuum . . . . .	A 28
A.20 Chipspackung im Flugzeug . . . . .	A 30
A.21 Implodierende Dose . . . . .	A 31

# 1 Einleitung

Einer der wichtigsten Denker und Experimentatoren zum Thema des Luftdrucks, Robert Boyle, schrieb „Luft sei das ideale Studienobjekt. Sie sei nicht nur unerlässlich für die Atmung, sondern sie berühre uns auch innerlich und äußerlich an jedem Tag unseres Lebens. Etwas, was zugleich so notwendig und so allgegenwärtig ist, berge sicherlich bisher ungeahnte wissenschaftliche Schätze“ [38, S. 34]. Daran hat sich bis heute nichts geändert. Die Beschäftigung mit Luft und ihren Eigenschaften ist und bleibt ein spannendes Entdeckungsfeld. In der universitären Forschung spielt sie in der Meteorologie eine zentrale Rolle und insbesondere für den schulischen Unterricht ist sie sehr gut geeignet.

Heute wissen wir dank Aristoteles, Berti, Galilei, Torricelli, Pascal, Boyle und vielen weiteren Persönlichkeiten, sehr viel über die physikalischen Eigenschaften der Luft. Diese wissenschaftlichen Erkenntnisse sind jedoch häufig nicht in unser Alltagserleben integriert. Genau das macht die Luft zu einem geeigneten Inhalt für entdeckenden Unterricht. Sie ist allgegenwärtig und doch entsprechen die wissenschaftlichen Erkenntnisse häufig nicht den Alltagserfahrungen. Beispielsweise wird beim Trinken mit einem Strohhalm davon gesprochen, dass wir die Flüssigkeit in unseren Mund saugen. Es ist jedoch viel mehr die Luftdruckdifferenz zur Umgebung, welche die Flüssigkeit hinein drückt. Aus der Geschichte können wir sehr viel über den Luftdruck lernen und die historische Erkenntnisgewinnung zum Begriff des Luftdrucks spiegelt häufig die Individualgenese wider.

In dieser Arbeit beschäftige ich mich mit dem Lehrstück „Pascals Barometer“, welches die fachwissenschaftlichen und historischen Erkenntnisse zum Vakuum und Luftdruck thematisiert. Es beschäftigt sich mit der Kraft des Umgebungsluftdrucks und der Frage, ob ein Vakuum existieren kann. Angelehnt an die historischen Entwicklungen werden die Inhalte Stück für Stück von den Schüler\*innen anhand von Experimenten, historischen Texten sowie mit Hilfe sokratischer Gespräche im Klassenverband erarbeitet.

Lehrstücke sind erkenntnisorientierte Unterrichtseinheiten nach den Methoden der Lehrkunstdidaktik. Das Lehrstück „Pascals Barometer“ wurde, basierend auf einer Idee von Martin Wagenschein, maßgeblich durch Marc Eyer und Ueli Aeschlimann entwickelt und bereits vielfach beschrieben, interpretiert, durchgeführt und weiterentwickelt [12] [13]. Weshalb beschäftige ich mich dennoch damit?

Durch eine kritische Außensicht kann das Lehrstück weiter verbessert werden. Einen besonderen Fokus lege ich auf mögliche dramaturgische Sprünge sowie fachliche und historische Lücken, betrachte das Lehrstück kritisch in Bezug auf die Lerngruppenorientierung und schlage Erweiterungen vor. Dabei soll das Lehrstück nicht grundsätzlich umfangreicher werden, es geht vielmehr darum, Lehrkräften eine Auswahl an weiterführenden Aufgaben zu bieten, sodass Zusatzmaterial für besonders kritische oder lernfreudige Lerngruppen zu finden ist und aufkommende Fragen experimentell beantwortet werden können. Auch alle physikalischen Informationen und historischen Hintergründe sind in dieser Arbeit enthalten, sodass die Begriffsbildung des Luftdrucks ermöglicht und Lehrkräften der Zugang zu dem Lehrstück erleichtert wird.

In meiner Betrachtung konzentriere ich mich auf die Lehrstückversion von Marc Eyer und die Umsetzung in der Schule. Diese Arbeit soll für Kenner\*innen des Lehrstücks neue Aspekte beleuchten. Für diejenigen, die das Lehrstück bisher noch nicht kennen, stellt diese Arbeit das Lehrstück grob vor und bietet Verweise auf die Originalliteratur in einem kommentierten Literaturverzeichnis. Falls Sie die Lehrkunstdidaktik und das Lehrstück „Pascals Barometer“ noch nicht kennen, empfehle ich mit den Abschnitten [4.1 Lehrkunst](#) und [4.2 Lehrstück „Pascals Barometer“](#) zu beginnen. So erhalten Sie einen guten Überblick und können die fachlichen und historischen Hintergründe besser einordnen.

## 2 Fachwissenschaft

In diesem Kapitel werden alle für das Lehrstück relevanten fachlichen Hintergründe kompakt, auf einem für Lehrkräfte angedachten Niveau dargelegt. Darüber hinaus verbinde ich diese Informationen mit historischen Hintergründen und bette sie in den Kontext des Lehrstücks ein. Damit soll Lehrer\*innen die Unterrichtsvorbereitung und die Planung von Exkursen erleichtert werden. Falls bestimmte Fragen in der Lerngruppe auftauchen oder im Laufe des Lehrstücks Begriffe explizit geklärt werden müssen, kann dieses Kapitel als Unterstützung dienen. Auftretende Fragen können an passenden Stellen innerhalb des Lehrstücks, beispielsweise als eingeschobener Lehrvortrag, ergründet werden. Die Inhalte prägen sich besser ein, weil sich die Fragen aus der Beobachtung heraus entwickelt haben.

### 2.1 Vakuum

Anders als man annehmen könnte, ist die Frage, ob und in welcher Form Vakuum existieren kann, keine rein wissenschaftliche Frage. Ein Blick in die Geschichte zeigt, dass an das Vakuum zu glauben, gleichsam den christlichen Gott und die Macht der katholischen Kirche infrage stellte. In diesem Abschnitt geht es zunächst darum, darzustellen, was wir heute aus wissenschaftlicher Sicht unter einem Vakuum verstehen.

Allgemein hin ist mit Vakuum das chemische Vakuum gemeint. Als Vakuum wird ein Volumen bezeichnet, welches einen Gasdruck hat, der deutlich geringer ist als der Atmosphärendruck bei Standardbedingungen ( $1,013 \text{ bar} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) [28, S. 106]. Dies entspricht auch der alltäglichen Verwendung des Vakuumbegriffs, wo dieses Wort synonym zu „Unterdruck“ verwendet wird [13, S. 89]. Es wird erzeugt, indem aus einem Volumen Gasatome entnommen werden. Prinzipiell ist es denkbar, alle Gasatome zu entfernen, doch praktisch ist dies unmöglich, weil dieser Zustand nicht stabil ist. Hingegen

ist es realistisch, sehr wenige Gasatome in einem definierten Volumen zu erreichen (vgl. [2.4 Kinetische Gastheorie](#) und [3.9 Moderne](#)).

Luft, die unter Standardbedingungen in das Volumen eines Zuckerwürfels passt, beinhaltet ungefähr  $25 \cdot 10^{18}$  Moleküle. Ihr mittlerer Abstand liegt bei ungefähr 3 nm [8, S. 189] [38, S. 41]. Bei der Erzeugung eines Vakuums wird die Anzahl der Moleküle verringert, der mittlere Abstand zwischen den Molekülen wird größer. Sie stoßen weniger oft, wodurch sich ein geringerer Druck ergibt. Die verbleibende Teilchenanzahl und der damit verbundene Restdruck entscheidet, welchen Grad das Vakuum hat.

Ein **Großvakuum** ist erreicht, wenn ein Druck von  $1000 - 1$  mbar herrscht. Der mittlere Abstand zwischen Molekülen der Luft beträgt dabei  $0,1 \mu\text{m} - 0,1 \text{mm}$ . Dieses Vakuum findet sich beispielsweise in Lebensmittelverpackungen und alten Glühbirnen. Ein **Feinvakuum** liegt bei einem Druck von  $1 - 10^{-3}$  mbar vor. Hier beträgt der mittlere Abstand der Luftmoleküle  $0,1 \text{mm} - 10 \text{cm}$ . Dieses Vakuum befindet sich beispielsweise in Leuchtstoffröhren. Als **Hochvakuum** wird ein Druck ab  $10^{-3} - 10^{-7}$  mbar bezeichnet. Dort beträgt der mittlere Abstand der Luftmoleküle bereits  $10 \text{cm}$  bis  $1 \text{km}$ . Vorzufinden ist dieses Vakuum beispielsweise in Teilchenbeschleunigern. Ein **Ultrahochvakuum** ist erreicht, wenn der Druck weniger als  $10^{-7}$  mbar beträgt. Dort ist der mittlere Abstand größer als  $1 \text{km}$ . Dies kann im erdnahen Weltraum vorgefunden werden [28, S. 131].

Doch auch in einem Ultrahochvakuum befindet sich etwas. Zwar befinden sich dort nur sehr wenige Gasatome, doch Neutrinos, Gravitationswellen und elektromagnetische Wellen, beispielsweise Photonen, sind in diesem Raum enthalten und virtuelle Teilchen können immer wieder erzeugt und vernichtet werden [19, S. 2] (vgl. [3.9.1 Virtuelle Teilchen](#)). Die Existenz der virtuellen Teilchen bedeutet, dass ein perfektes Vakuum, also ein Raum ohne Teilchen selbst theoretisch nicht möglich ist.

Im Lehrstück tritt die Frage nach der Beschaffenheit eines Vakuums spätestens dann auf, wenn im Experiment mit dem langen Schlauch das Wasser plötzlich seine maximale Steighöhe erreicht und darüber nichts zu sein scheint (vgl. 1. Akt in [4.2 Lehrstück „Pascals Barometer“](#)).

## 2.2 Masse und Gewichtskraft

Umgangssprachlich werden Masse und Gewichtskraft häufig synonym verwendet und als „Gewicht“ bezeichnet. Physikalisch bezeichnen sie jedoch etwas Unterschiedliches.

## Masse

Die Masse  $m$  (SI-Einheit: kg) gibt an, wie stark ein Körper von Gravitationsfeldern beeinflusst wird (schwere Masse) und wie er sich Beschleunigungen widersetzt (träge Masse) [28, S. 21]. In der allgemeinen Relativitätstheorie wird die Äquivalenz von Trägheit und Schwere als Axiom postuliert. Dies kann durch Experimente bestätigt werden. In der klassischen Physik bleibt die quantitative Gleichheit von Trägheit und Schwere der Masse jedoch ungewiss.

## Gewichtskraft

Die Gewichtskraft  $F_G$  (SI-Einheit: N) ist die Anziehungskraft zweier Objekte aufgrund ihrer (schweren) Massen und deren Abstand zueinander. Je größer die Massen und je kleiner der Abstand, desto größer ist die Gewichtskraft.

In einem System, in dem eine Masse ( $M$ ) sehr viel größer ist als die andere Masse ( $m$ ), kann man die Gewichtskraft schreiben als

$$F_G = m \cdot g \quad (2.1)$$

Die Gravitationsbeschleunigung  $g$  setzt sich aus der Gravitationskonstante ( $G$ ), der großen Masse ( $M$ ) und dem Abstand der Massenmittelpunkte ( $r$ ) zusammen.

$$g = G \cdot \frac{M}{r^2} \quad (2.2)$$

Auf der Erdoberfläche ist diese Gravitationsbeschleunigung näherungsweise

$$g_{Erde} \approx 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ [11, S. 84].}^1 \quad (2.3)$$

Konkret kann man sich darunter Folgendes vorstellen: Auf eine Astronautin mit einer Masse von 70 kg, die auf der Erdoberfläche steht, wirkt eine Gewichtskraft von  $F_G = m \cdot g_{Erde} = 70 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 686,7 \text{ N}$ . Befindet sie sich nun auf der Mondoberfläche, wo eine etwa 6-mal geringere Gravitation herrscht, wirkt nur noch eine Gewichtskraft von  $F_G = m \cdot g_{Mond} = 70 \text{ kg} \cdot 1,62 \text{ m/s}^2 = 113,4 \text{ N}$ . Weil die Gewichtskraft auf dem Mond deutlich geringer ist, kann sie beispielsweise viel höher springen. Ihre Masse bleibt jedoch unverändert.

## 2.3 Druck

Um gut über die Inhalte des Lehrstücks sprechen zu können, kann es hilfreich sein, die Begriffe Druck und hydrostatischer Druck zu klären. Die Klärung ist insbesondere deswegen relevant, weil die Verwendung in der Alltagssprache häufig unpräzise ist [13, S. 127]. Allgemein gesprochen ist der Druck  $p$  (englisch „pressure“) ein intensive, skalare Zustandsgröße innerhalb eines Volumen, das durch eine Fläche  $A$  begrenzt ist. Gemessen wird der Druck häufig, indem die auf die Oberfläche  $A$  wirkende senkrechte Kraft  $F$  bestimmt wird. Somit ergibt sich der Druck als

$$p = \frac{F}{A} \quad [28, \text{S. } 101]. \quad (2.4)$$

In Fluiden wird dieser Druck durch Stöße zwischen den Molekülen hervorgerufen. Diese erzeugen eine Kraft, welche auf eine Fläche wirkt.

- Experiment siehe [A.1.1 Druck als Quotient aus Kraft und Fläche](#)

### 2.3.1 Hydrostatischer Druck

Der hydrostatische Druck bezeichnet den Druck innerhalb eines ruhenden Fluids (Flüssigkeit, Gas, Plasma), der durch die Gewichtskraft der Fluidsäule über der Messstelle hervorgerufen wird [1, S. 5ff].

In der aktuellen Lehrstückversion wird der Druck als skalare Größe, das Pascal'sche (hydrostatische) Prinzip und Druck als senkrecht auf die Oberfläche gerichtete Kraft nicht explizit behandelt. Diese Aspekte sollten ergänzt werden [13, S. 34]. Die in diesem Abschnitt beschriebenen physikalischen Hintergründe ermöglichen es, dieses Thema als Exkurs in das Lehrstück zu integrieren.

#### Hydrostatischer Druck ist richtungsunabhängig

Dass Druck gleichermaßen in alle Richtungen wirkt, lässt sich innerhalb eines Fluids mit Hilfe der kinetischen Gastheorie erklären (vgl. [2.4 Kinetische Gastheorie](#)). Die Moleküle in einem Fluid (z.B. Luft) bewegen sich pausenlos innerhalb des verfügbaren Volumens. Dabei stoßen sie miteinander, wodurch ein Druck erzeugt wird. Je größer die kinetische Energie der Teilchen ist und je geringer der Abstand der Moleküle zueinander ist, desto häufiger stoßen sie. Dies führt zu einem höheren Druck in alle Richtungen, weil sich die

Teilchen in alle Richtungen bewegen [28, S. 108] [38, S. 41]. Die Wirkung des Drucks ist eine Kraft, die Druckkraft. Auf Höhe des Meeresspiegels ist die Druckkraft der Luft stark genug eine 10 m hohe Wassersäule in einem Steigrohr zu halten (vgl. 3.2 Berti).

Für die Druckkraft des Umgebungsluftdrucks, die wir spüren, ist es dabei unwichtig, ob wir freie Sicht nach oben haben oder wir uns unter einem Dach befinden. Die Außenluft und die Luft unter einem Dach stehen in Verbindung. Da die Druckkraft gleichmäßig in alle Richtungen wirkt, gleichen sich die Drücke aneinander an. Dieses Prinzip wird auch das „Pascal’sche Prinzip“ genannt [13, S. 140]. Dies stellte auch Pascals Schwager beim Besteigen des Puy de Dôme fest, als der Druck in einer Hütte oder unter freiem Himmel gleich war (vgl. 3.5 Pascal).

- Experiment A.1.2 Druck wirkt in alle Richtungen

### Hydrostatischer Druck wirkt senkrecht auf Oberflächen

Zwar hat der Druck innerhalb des Fluids keine feste Richtung, doch die Wirkung des Drucks, die Druckkraft, wirkt senkrecht auf Oberflächen beziehungsweise Grenzflächen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich Druckkräfte, die nicht senkrecht auf die Oberfläche wirken, gegenseitig aufheben. Somit bleibt effektiv nur noch die Kraft senkrecht zur Oberfläche [1, S. 5].

### Hydrostatischer Druck ist nur von der Höhe abhängig

In dem Lehrstück „Pascals Barometer“ wird der hydrostatische Druck, der Atmosphäre und von Flüssigkeitssäulen betrachtet.

Für **inkompressible Flüssigkeiten** im homogenen Schwerfeld, wie es für Wasser bei Standardbedingungen näherungsweise der Fall ist, gilt

$$p_s = \rho \cdot h \cdot g \quad [11, S. 97]. \quad (2.5)$$

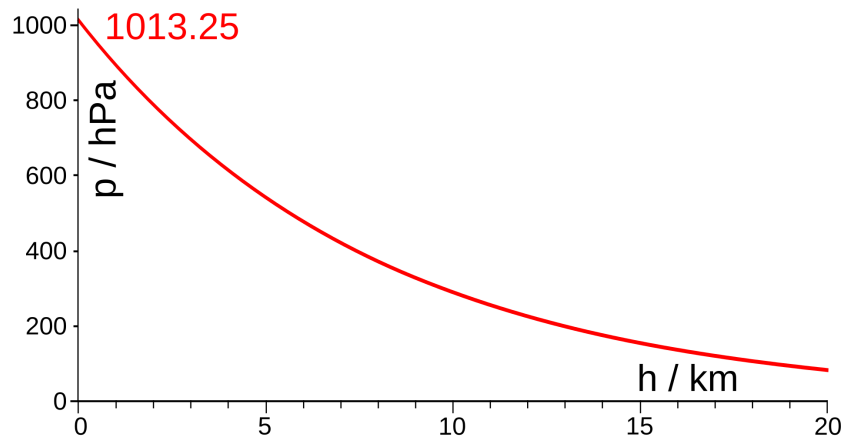
Die Größe des Wasserdrucks ist demnach abhängig von der Höhe, welche die Wassersäule erreicht. Das Volumen spielt keine Rolle (vgl. 2.5 Hydrostatisches Paradoxon).

Da Luft **kompressibel** ist, verhält es sich bei ihr anders. Die Dichte der Luft nimmt mit zunehmender Höhe ab. Deswegen muss der Schweredruck von Luft anders beschrieben werden. Hierzu wird die barometrische Höhenformel verwendet. Danach gilt für den

Druck  $p(h)$  bei einer bestimmten Höhe  $h$  über dem Meeresspiegel  $h_0$

$$p(h) = p(h_0) \cdot e^{-\frac{\rho(h_0)}{p(h_0)} \cdot g \cdot h}, \quad (2.6)$$

dabei ist  $p(h_0) = 101300$  Pa der Luftdruck auf Meereshöhe,  $\rho(h_0) = 1,29$  kg/m<sup>3</sup> die Dichte der Luft auf Meereshöhe und  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup> die Schwerebeschleunigung der Erde [12, S. 79].



**Abbildung 2.1:** Die barometrische Höhenformel gibt den Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe an [50].

Hiermit lässt sich erklären, weshalb der Luftdruck auf einem Berg geringer ist als im Tal. Entscheidend für den Luftdruck ist also nicht die Richtung, in die wir uns bewegen, sondern wie hoch das „Luftmeer“ über uns ist.<sup>2</sup> Dies bestätigte Pascals Schwager Florin Périer mit dem Experiment auf dem Puy de Dôme. Es zeigte, dass der Druck mit der Höhe abnimmt.

<sup>2</sup> Die Metapher „Luftmeer“ geht auf die Aussage „Wir Menschen leben am Grunde eines Meeres aus Luft“ von Torricelli zurück. Allerdings besteht beim „Luftmeer“ im Vergleich zum Wasser-See die Erschwernis, dass das Luft-See oben nicht scharf begrenzt ist. Entsprechend wird bei der Berechnung des Luftdrucks nicht von der Oberfläche des Mediums nach unten gerechnet, sondern von unten nach oben, wobei man von einem empirisch erhobenen „Null-Wert“ (Druck auf Meereshöhe  $p(0) = 1013,25$  hPa) ausgeht.

### 2.3.2 Schweredruck der Luft

Luft hat auf Meereshöhe eine Dichte von ungefähr  $1,29 \text{ kg/m}^3$  [12, S. 70]. Das scheint zunächst nicht viel, führt in der Summe jedoch zu einer beachtlichen Masse. Die Luft in einer 1-Liter-Wasserflasche hat eine Masse von 1,29 Gramm, die in einem Umzugskarton bereits ungefähr 80 Gramm, in einem Klassenzimmer ganze 120 Kilogramm [13, S. 138] und in der New Yorker Carnegie Hall 32 000 Kilogramm [38, S. 23]. Diese Masse ist so groß, dass selbst Galilei, der das Gewicht der Luft bestimmte, glaubte, dass Luft kein Gewicht habe, wenn sie „frei“ sei.

Dass Luft eine Gewichtskraft ausübt, ist nicht nur für Galilei unvorstellbar, weshalb diese Tatsache auch im Unterricht und im Alltag zu Skepsis führt. So kann ein Schüler aus Marc Eyers Lehrstückbeschreibung nicht glauben, dass der Luftdruck das Wasser im Schlauch hält. Er sagt:

„Es kann nie und nimmer der Luftdruck sein. Die Kraft der 10 m Wassersäule ist so groß, man könnte das Wasser nie mit dem Daumen im Schlauch zurückhalten! Wie soll der Luftdruck so stark sein? Der würde uns ja zerquetschen. Und übrigens können wir ja die Luft problemlos mit der Hand heben!“

Eyer 2015, S. 131 [13]

#### Warum werden wir von dem Umgebungsluftdruck nicht zerquetscht?

Wie häufig in der Physik ist die Antwort prinzipiell schnell gegeben, jedoch schwierig zu erfahren. Damit Arbeit geleistet werden kann (beispielsweise um uns zu zerquetschen) ist der absolute Druck irrelevant. Wichtig ist allein der Druckunterschied [19, S. 187]. Unsere Körper sind größtenteils nicht kompressibel und die wenigen Räume, die komprimierbar wären, enthalten Luft. Der Druck dieser Luft gleicht dem Umgebungsluftdruck. Es gibt also keinen Druckunterschied. Dadurch wird jede Kraft, welche durch einen Außendruck auf eine Oberfläche entsteht, durch eine gleich große Kraft kompensiert, welche durch den Innendruck erzeugt ist. Hierbei wirken sehr wohl Kräfte, doch diese sind vom Betrag her gleich und einander entgegengerichtet. Wir leben in einer fein austarierten Welt. Daher werden wir durch den Luftdruck nicht zerquetscht und können uns frei bewegen. „So hart, wie die Atmosphäre uns drückt, drücken wir zurück“ [38, S. 28]. In den Tiefen des Meeres, wo der Druck ausreicht, um Dosen zu zerquetschen, können wir Menschen nicht leben. Unser Körper ist auf diesen Druck nicht ausgelegt. Es gibt jedoch Tiere, die

an die Druckverhältnisse dort angepasst sind. Sie können diesen hohen Druck aushalten und dort leben [19, S. 187].

Diese Tatsache zu verstehen ist schwierig. Mit Hilfe von Experimenten ist es jedoch möglich nachzuvollziehen, dass nur die Druckdifferenz entscheidend ist (vgl. [A.2.7 Druckdifferenzen](#)). Unser Innenohr reagiert sehr sensibel auf kleinste Druckdifferenzen. Wenn sich der Umgebungsdruck schnell ändert, kann das zu Irritationen führen. Etwa beim Überwinden größerer Höhenunterschiede mit einer Seilbahn oder beim schnellen Fahren in einen Tunnel, ist dies als Druck auf den Ohren zu spüren.

### **Warum können wir die Luft problemlos mit der Hand heben, das Wasser aber nicht?**

An dieser Stelle kann es sinnvoll sein, das Experiment mit dem langen Schlauch noch einmal aufzubauen und zweifelnden Schüler\*innen die Möglichkeit zu geben, ihre Hand unter den Schlauch zu halten, um so den Druck der Wassersäule zu spüren. Sie können feststellen, dass wir in der Lage sind, dem Druck des Wassers standzuhalten. Dafür ist es allerdings wichtig, dass der Schlauch oben gut festgehalten wird. Ansonsten wird das Gefühl in der Hand auch von der Masse des Schlauchs beeinflusst. Der Schweredruck ist jedoch nur von der Höhe abhängig (vgl. [2.5 Hydrostatisches Paradoxon](#)).

Beim Heben der Hand bewegen wir nicht die gesamte Luftsäule über unserer Hand. Stattdessen bewegen wir unsere Hand durch die Luft hindurch. Da der Luftdruck gleichermaßen in alle Richtungen wirkt (vgl. [2.3.1 Hydrostatischer Druck](#)) hindert er uns nicht daran, uns zu bewegen. Einzig die Reibung mit Luftmolekülen erschwert die Bewegung. Diese ist jedoch sehr gering.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Befinden wir uns unter Wasser, wirken dort der Luftdruck auf der Wasseroberfläche und der Druck des Wassers. Dass wir uns dort langsamer bewegen können, liegt jedoch nicht am größeren Druck, sondern daran, dass der Widerstand, der durch die Reibung mit den Wassermolekülen entsteht, wesentlich größer ist als die Reibung an den Luftmolekülen.

## 2.4 Kinetische Gastheorie

In der kinetischen Gastheorie werden die Eigenschaften von Gasen aus den Bewegungen der Gasmoleküle abgeleitet. Für ideale Gase wird angenommen, dass die Gasteilchen keine Anziehungs- oder Abstoßungskräfte aufeinander ausüben. Die einzigen Interaktionen der Gasteilchen sind demnach elastische Stöße untereinander und mit den Außenwänden. Zudem werden Teilchen als Punktteilchen angesehen. Das heißt, sie besitzen kein Volumen. Dadurch steht in dem Modell der Gastheorie das gesamte Volumen  $V$  des Behälters als Freiraum für Bewegungen zur Verfügung. Darüber hinaus wird angenommen, dass ausschließlich kinetische Energie relevant für die Wechselwirkungen der Gasteilchen ist. Dadurch sind die Teilchenbewegungen unabhängig [19, S. 79] [28, S. 107].

Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase, auch ideales Gasgesetz oder allgemeine Gasgleichung genannt, lautet

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T, \quad (2.7)$$

wobei  $p$  den Druck,  $V$  das Volumen des Gefäßes,  $N$  die Teilchenanzahl,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K die Boltzmann-Konstante und  $T$  die Temperatur in Kelvin bezeichnen [8, S. 190].

### 2.4.1 Spezialfälle des idealen Gasgesetzes

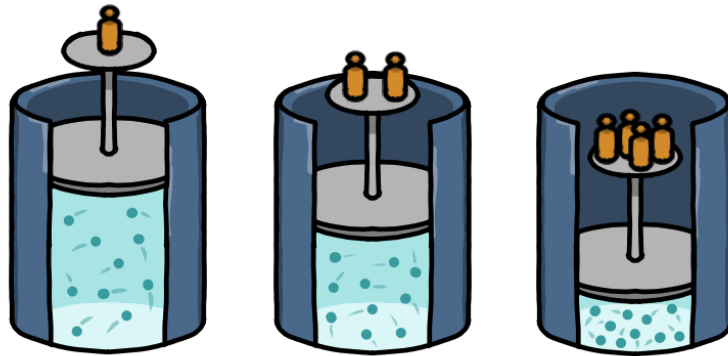
Die Gesetze von Boyle-Mariotte, Guy-Lussac und Amontons werden häufig als Spezialfälle des idealen Gasgesetzes genannt [8, S. 190]. Historisch wurden diese Gesetze früher entdeckt und erst später zu einer gemeinsamen Formel zusammengefügt.

#### Boyle-Mariotte Gesetz (1662)

Bei gleichbleibender Teilchenanzahl und Temperatur (isotherme Zustandsänderung) gilt

$$p \sim 1/V \text{ oder } p \cdot V = \text{konst.} \quad (2.8)$$

Druck  $p$  und Volumen  $V$  verhalten sich umgekehrt proportional zueinander. Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie kann dies erklärt werden, indem die Kompression auf ein kleines Volumen dazu führt, dass die Moleküle des Gases häufiger untereinander und gegen die Gefäßwand stoßen, wodurch der Druck erhöht wird [8, S. 186] [23, S. 31].



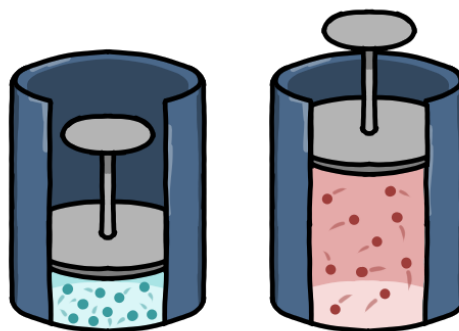
**Abbildung 2.2:** Wenn die Temperatur gleich bleibt und das Volumen geringer wird, stoßen die Moleküle häufiger. Das führt zu einem größeren Druck.

### Guy-Lussac Gesetz (1787)

Bei gleichbleibender Teilchenanzahl und konstantem Druck (isobare Zustandsänderung) gilt

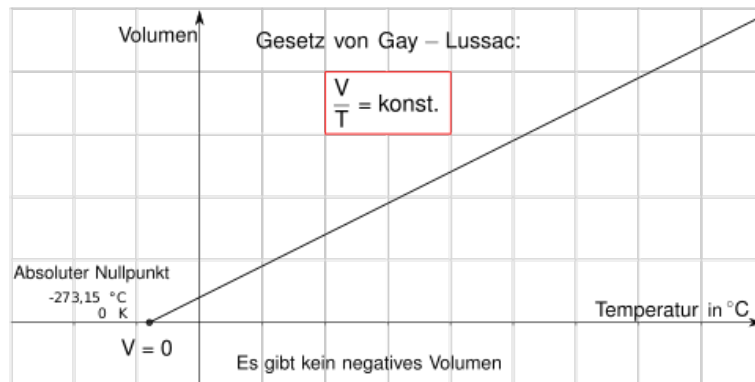
$$V \sim T \text{ oder } V/T = \text{konst.} \quad (2.9)$$

Dies bedeutet, dass sich Volumen  $V$  und Temperatur  $T$  (gegeben in Kelvin) proportional zueinander verhalten. Mit der kinetischen Gastheorie kann dies erklärt werden, indem Gasmoleküle bei einer höheren Temperatur eine größere kinetische Energie, also eine höhere Geschwindigkeit besitzen. Ein gleichbleibender Druck bedeutet, dass die Stoßanzahl der Teilchen untereinander und mit den Gefäßwänden gleichbleibend ist. Damit dies gegeben ist, nehmen die Teilchen ein größeres Volumen ein [8, S. 263] [23, S. 31].



**Abbildung 2.3:** Wenn der Druck gleich bleibt, führt eine höhere Temperatur zu mehr Bewegung der Teilchen und damit zu einem größeren Volumen.

Mit dieser Gleichung ist es zudem möglich, den absoluten Temperaturnullpunkt zu ermitteln. Da negative Volumina nicht existieren können, ist der Temperaturnullpunkt ( $0 \text{ K} \hat{=} -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) dort erreicht, wo das Volumen Null betragen würde.



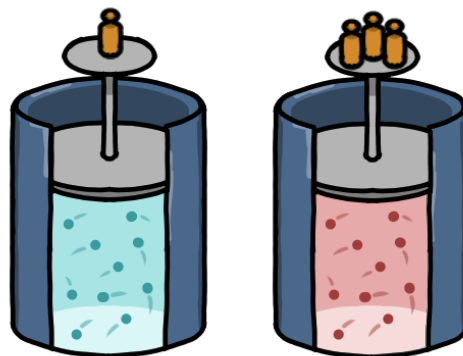
**Abbildung 2.4:** Mit Hilfe des Gesetzes von Gay-Lussac kann der absolute Nullpunkt, also die tiefstmögliche Temperatur, ermittelt werden [52].

### Amontons Gesetz (1802)

Bei gleichbleibender Teilchenanzahl und konstantem Volumen (isochore Zustandsänderung) gilt

$$p \sim T \text{ oder } p/T = \text{konst.} \quad (2.10)$$

Druck  $p$  und Temperatur  $T$  (gegeben in Kelvin) verhalten sich proportional zueinander. Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie kann dies erklärt werden, indem eine erhöhte Temperatur zu einer erhöhten Teilchenbewegung führt. Bleibt das Volumen gleich, führt dies zu häufigeren Stößen der Moleküle untereinander und mit den Gefäßwänden. Dadurch erhöht sich der Druck [11, S. 103] [23, S. 31].



**Abbildung 2.5:** Wenn das Volumen gleich bleibt, führt eine höhere Temperatur zu häufigeren Stößen und damit zu einem größeren Druck.

## 2.4.2 Reale Gase

Das ideale Gasgesetz kann näherungsweise verwendet werden, um Vorgänge in Gasen zu beschreiben. Doch genau genommen spiegeln die getroffenen Näherungen reale Gase nicht vollständig wider. Daher gibt es eine Korrektur für das Eigenvolumen der Moleküle  $b$  und für die anziehenden Kräfte zwischen den Molekülen  $a$ . Dabei erhöhen die anziehenden Kräfte den Druck und die Ausdehnung der Moleküle sorgt für eine Verringerung des effektiven Volumens. Die Anwendung dieser Korrektur führt zu der Gleichung für reale Gase

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = R \cdot T \quad [8, \text{S. 307}]. \quad (2.11)$$

Van der Waals erhielt für diese Gleichung 1910 den Physiknobelpreis [19, S. 79f].

## 2.4.3 Bei geringem Druck kochen

Warum „kocht“ Wasser unter der Glasglocke beziehungsweise im langen Schlauch (vgl. 4.2 1. Akt: [Der lange Wasserschlauch \(Gasparo Berti\)](#))? Diese für das Lehrstück wichtige Frage lässt sich anschaulich mit Hilfe der kinetischen Gastheorie beantworten. Wenn Wasser verdampft, haben einzelne Wassermoleküle genug Energie, um die Anziehung der anderen Moleküle zu überwinden und so der Flüssigkeit zu entkommen. Die Anziehung zwischen den Molekülen ist aber nicht der einzige Faktor. Auch der Luftdruck spielt eine Rolle. Der Luftdruck an der Wasseroberfläche drückt auf die Wassermoleküle und hält sie in der Flüssigkeit. Die Wassermoleküle müssen daher genug Energie haben, um der Anziehung der anderen Moleküle zu entkommen UND den Luftdruck zu überwinden. Ist der Luftdruck auf der Wasseroberfläche geringer, brauchen die Wassermoleküle daher wesentlich weniger kinetische Energie, sprich eine geringere Temperatur, um der Flüssigkeit zu entkommen und zu verdampfen. Deswegen beginnt das Wasser zu sieden, wenn der Luftdruck mit Hilfe der Vakuumpumpe verringert wird. Und auch durch im Wasser eingeschlossene Luft, die sich ausdehnt, entstehen Bläschen.<sup>4</sup>

- Experiment [A.1.5 Bei geringem Druck kochen](#)

---

<sup>4</sup> Der gleiche Effekt ist auch auf hohen Bergen zu beobachten. Weil dort der Umgebungsluftdruck geringer ist, als in der Nähe des Meeresspiegels, verdunstet das Wasser dort bei geringeren Temperaturen. Beispielsweise liegt die Siedetemperatur auf dem Mount Everest bei ca. 71 °C. Da der Wärmeübertrag temperaturabhängig ist, dauert es dort länger, bis Essen gar wird. Wenn Wasser schon bei Raumtemperaturen „kocht“ ist es damit also nicht möglich, Nahrungsmittel zu garen. Der umgekehrte Effekt wird in Druckkochtöpfen genutzt. Durch den erhöhten Druck verdampft das Wasser erst bei höheren Temperaturen. Das Essen wird bei einer höheren Temperatur gekocht und ist schneller gar. Daher werden Druckkochtöpfe umgangssprachlich Schnellkochtöpfe genannt.

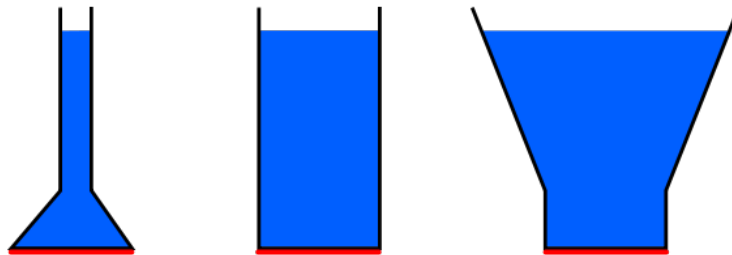
## 2.5 Hydrostatisches Paradoxon

Das hydrostatische Paradoxon besagt, dass der Druck am Boden eines Gefäßes nur von der Steighöhe der Flüssigkeit und nicht vom Volumen oder der Querschnittsfläche abhängt. Das wirkt paradox, denn intuitiv könnte man denken, dass das größere Volumen mit seiner größeren Gewichtskraft einen größeren Druck erzeugt. Warum ist es so, dass der Druck auf den Boden eines Gefäßes nur von der Steighöhe der Flüssigkeit abhängt?

Betrachtet man Zylinder mit unterschiedlichen Durchmessern, aber gleicher Füllhöhe, kann dieses Phänomen dadurch erklärt werden, dass das Volumen mit dem Quadrat des Durchmessers steigt. In gleichem Maße nimmt jedoch auch die Fläche des Gefäßbodens zu. Die Gewichtskraft wirkt also auf einer größeren Fläche. Der Druck bleibt gleich.

$$p = \frac{F_G}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot h \cdot A \cdot g}{A} = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.12)$$

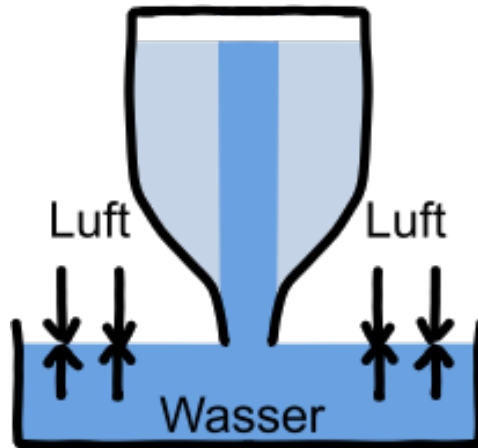
Aber wie ist das bei Gefäßen, die nach unten hin breiter oder schmaler werden? Alle Gefäße aus Abbildung 2.6 haben die gleiche Steighöhe. Aber sehr unterschiedliche Formen und Volumina. Auf den Gefäßböden lastet aber immer der gleiche Druck. Wie kann das sein?



**Abbildung 2.6:** Der hydrostatische Druck ist am Boden aller drei Gefäßen gleich, obwohl das Flüssigkeitsvolumen unterschiedlich ist [45].

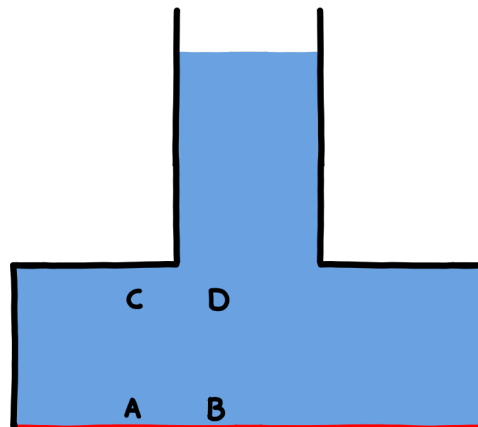
Betrachten wir zunächst das Gefäß, das nach unten schmaler wird. Die Gewichtskraft der Flüssigkeit wirkt nach unten. Dort wo sich die Flüssigkeitssäule über den schrägen Wänden befindet, wird sie gewissermaßen von diesen schrägen Wänden „gestützt“. Die Gewichtskraft der Flüssigkeit wird von den schrägen Wänden kompensiert. Für den Druck am Gefäßboden ist deswegen nur noch die Wassersäule über dem Boden relevant und diese Säule hat die gleiche Höhe wie beim Zylinder.

In Bezug auf das Lehrstück bedeutet dies beispielsweise, dass in einer umgedrehten bauchigen Flasche nur das Wasser direkt über der Öffnung eine Druckkraft nach unten ausübt. Der Rest des Wassers wird von der Flaschenwand getragen [13, S. 128].



**Abbildung 2.7:** Für den hydrostatischen Druck an der Öffnung der Apothekerflasche ist nur relevant, wie hoch der Wasserspiegel ist.

Wie lässt sich bei Gefäßen, die nach unten hin breiter werden erklären, dass am Boden überall der gleiche Druck herrscht?

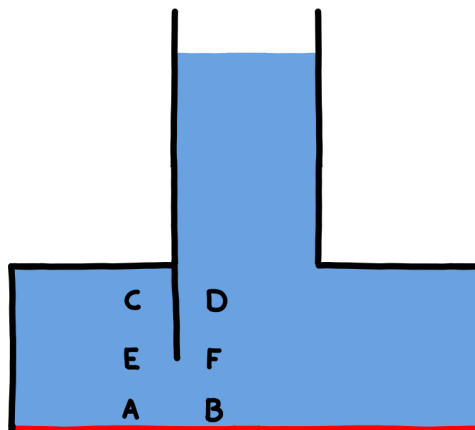


**Abbildung 2.8:** An den Punkten A und B herrscht der gleiche Druck, obwohl die Flüssigkeitssäule über Punkt B höher ist.

Warum herrscht an Punkt A der gleiche Druck wie an Punkt B, obwohl die Flüssigkeitssäule über B deutlich höher ist? Dies kann mit dem Pascal'schen Prinzip erklärt werden. Es besagt, dass sich der Druck innerhalb eines Fluids mit gleicher Intensität in alle Richtungen ausbreitet. Wenn also die Flüssigkeit in Kontakt steht, breitet sich der Druck an Punkt D gleichermaßen in alle Richtungen aus. Dies führt dazu, dass an

Punkt C und D der gleiche Druck herrscht. Weil C und D gleich hoch vom Gefäßboden entfernt sind, ist der Druck somit auch in A und B gleich. Der Druck bei A setzt sich also zusammen aus dem Schweredruck der kleinen Wassersäule und Ausgangsdruck an Punkt C, der genau dem Druck in Punkt D entspricht. Somit herrscht insgesamt der gleiche Druck in Punkt A und B.

Gleiches gilt auch in einem Gefäß, in dem eine Trennwand eingefügt ist.



**Abbildung 2.9:** An den Punkten A und B herrscht der gleiche Druck, obwohl sich eine Trennwand zwischen C und D befindet.

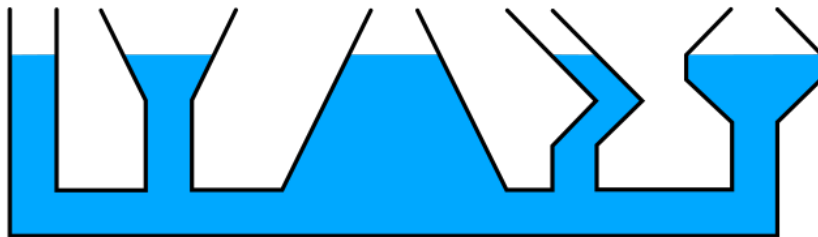
In diesem Gefäß besteht keine direkte Verbindung zwischen C und D. Dennoch ist der Druck an den Punkten A und B weiterhin gleich. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Flüssigkeit auch hier in Kontakt steht. Der Druckausgleich findet dort statt, wo eine Verbindung besteht. Also auch zwischen Punkten auf Höhe des Endes der Trennwand E und F.

Der Druckausgleich führt dazu, dass der Druck in (quasi) inkompressiblen Medien auf gleicher Höhe gleich ist. Dieses Verständnis ist wichtig, um zu begreifen, warum beim Besteigen des Puy de Dôme unter dem Dach der Hütte die gleiche Quecksilbersäulenhöhe gemessen wird, wie unter freiem Himmel. Die Luftsäule direkt über dem Barometer ist in der Hütte zwar geringer, doch da sich der Druck der Außenluft und der Druck der Innenluft aneinander angleichen, herrscht auch dort auf gleicher Höher der gleiche Druck.

- Experiment [A.1.3 Hydrostatisches Paradoxon](#)

## 2.6 Kommunizierende Röhren

Die Funktionsweise von kommunizierenden Röhren ist eine direkte Folgerung des hydrostatischen Paradoxons. Der Wasserstand von offenen, miteinander verbundenen Gefäßen ist in allen Gefäßen gleich hoch, unabhängig von der Form und dem Volumen. Wie groß der Druck auf den Gefäßboden ist, hängt, wie bereits gezeigt, nur von der Höhe des Füllstandes, nicht von der Form ab. Steht das Wasser in einer der Röhren höher als in einer anderen, wie es beim Einfüllen der Fall ist, ist in dieser Röhre der Druck höher. Der höhere Druck bewirkt, dass Wasser durch das Verbindungsstück in die anderen Gefäße befördert wird, bis der Druck am Boden jeder Röhre gleich ist. Dies ist der Fall, wenn der Wasserstand in jeder Röhre die gleiche Höhe hat. Somit stellt sich in jeder der verbundenen Röhren derselbe Flüssigkeitsspiegel ein, unabhängig von der Geometrie der Röhren [28, S. 103].



**Abbildung 2.10:** In jeder der verbundenen Röhren steht das Wasser gleich hoch [44].

- Experiment [A.1.4 Kommunizierende Röhren](#)

## 2.7 Steighöhe von Wasser und Quecksilber

Der hydrostatische Druck hängt nur von der Steighöhe ab. Wie groß dieser ist, hängt auch von der Dichte  $\rho$  der Flüssigkeit ab. Je größer die Dichte, desto größer der Schweredruck.

Der Schweredruck der Flüssigkeit  $p_s = \rho \cdot g \cdot h$  wirkt in einem Steigrohr, wie beispielsweise Berti und Pascal es nutzen, gegen den Umgebungsluftdruck. Die maximale Steighöhe einer Flüssigkeit ist dann erreicht, wenn der Schweredruck der Flüssigkeit dem Umgebungsluftdruck gleicht. Für Stoffe verschiedener Dichte ergeben sich dadurch verschiedene maximale Steighöhen [23, S. 27]. Dies hat sich Torricelli zu Nutzen gemacht, als er anstelle von Wasser, Quecksilber in eine Röhre füllte, um die Luftdrucktheorie zu überprüfen.

### Wasser

Wasser hat bei einer Temperatur von 25 °C eine Dichte von ungefähr 1 kg/Liter, also 1000 kg/m<sup>3</sup> [11, S. 98]. Wie hoch muss die Wassersäule  $h$  sein, damit der Schweredruck des Wassers dem Luftdruck auf Meereshöhe von 101 300 Pa [12, S. 70] gleicht?

Ein Gleichgewicht gilt, wenn

$$p_0 = 101\,300\text{ Pa} = 101\,300 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot h. \quad (2.13)$$

Umgestellt nach  $h$  ergibt sich

$$h = \frac{101\,300 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 10,3\text{ m}. \quad (2.14)$$

Dies entspricht der Höhe, die in Bertis Experiment beobachtet werden kann.

### Quecksilber

Quecksilber hat eine etwa 14-mal größere Dichte als Wasser. Bei einer Temperatur von 25 °C hat es eine Dichte von ungefähr 13,5 kg/Liter, also 13 500 kg/m<sup>3</sup>. Für den maximalen Pegelstand ergibt sich

$$h = \frac{101\,300 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{13\,500 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 0,76\text{ m}. \quad (2.15)$$

Dies entspricht dem Ergebnis, welches in Torricellis Quecksilberröhre zu beobachten ist.

## 2.8 Barometer

Mit Barometern wird der Schweredruck der Luft gemessen. Der Begriff Barometer ist aus dem Altgriechischen abgeleitet und wurde von Robert Boyle eingeführt. Barýs bedeutet „schwer, gedrückt“ und métron bedeutet „Maß, Maßstab“. Bereits in dem Begriff steckt die Auswirkung des Luftdrucks auf Phänomene, wie die Steighöhe von Wasser. In der Luftfahrt werden Barometer eingesetzt, um die Höhe über dem Meeresspiegel zu bestimmen und in Wetterstationen zur Messung von Hoch- oder Tiefdruckgebiete.

Es gibt viele verschiedene Barometerarten. Eine Auswahl an Barometern sowie deren Funktionsweise befindet sich in [4.3.12.4 Barometer](#).

## 2.9 Druckeinheiten

Der Druck ist eine Größe, die bereits seit vielen Jahrhunderten eine wichtige Rolle spielt. Entsprechend existieren zu ihr verschiedene historisch geprägte Einheiten. In vielen Definitionen steckt die große Bedeutung des Umgebungsluftdrucks. Die hier vorgestellten Einheiten für den Druck werden jedoch nicht nur für den Luftdruck der Umgebung, sondern auch für andere Druckphänomene, wie beispielsweise den Schalldruck, Reifendruck oder die Beschreibung der Festigkeit von Materialien verwendet.

### Pascal

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \quad (2.16)$$

Die Einheit Pascal, benannt nach Blaise Pascal, ist im internationalen Einheitensystem (SI) die offizielle Maßeinheit des Drucks. Ein Pascal ist der Druck, der auf einer Fläche von einem Quadratmeter eine Kraft von einem Newton ausübt [28, S. 7]. Für Wetterphänomene wird zudem häufig die Einheit Hektopascal hPa verwendet. Es gilt  $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ .<sup>5</sup>

### Bar

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 10^5 \text{ Pa} \quad (2.17)$$

$$1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa}. \quad (2.18)$$

Ein bar entspricht dem Druck, den eine Masse von 1 kg auf eine Fläche von  $1 \text{ cm}^2$  ausübt [28, S. 101]. Die Bezeichnung leitet sich von dem Altgriechischen Wort *barýs* ab. Auch hieran kann die Bedeutung der „Schwere“ der Luft für die Entwicklung des Druckbegriffes nachvollzogen werden. Ein bar wurde nach klar definierten Kriterien festgelegt, doch es ist kein Zufall, dass es in etwa dem Luftdruck auf Meereshöhe entspricht.

### Atm

$$\text{atm} = 1,01325 \text{ bar} = 101\,325 \text{ Pa} \quad (2.19)$$

---

<sup>5</sup> Die Einheit PSI (pounds per squareinch) ist definiert als die Kraft, die ein Pfund auf einen Quadratzoll ausübt. Die Art der Definition ähnelt demnach der, des Pascal. Es gilt  $1 \text{ PSI} = 6895 \text{ Pa}$ . Die Einheit wird im angloamerikanischen Raum im Alltag verwendet und ist auch in Deutschland beispielsweise bei Angaben zum Reifendruck oder auf Luftmatratzen zu finden [28, S. 101].

Ein atm bezeichnet die physikalische Atmosphäre und gibt den mittleren Luftdruck der Atmosphäre auf Meereshöhe an [28, S. 101]. Atm ist in Deutschland keine gesetzliche Einheit mehr, doch der Umgebungsluftdruck spielt weiterhin eine wichtige Rolle, da er zu den Standardbedingungen vieler Prozesse und Messwerte gehört.

## Torr

$$\text{mmHg} = \text{Torr} = 133 \text{ Pa} \quad (2.20)$$

Die Einheit Torr, auch mmHg (ausgeschrieben „Millimeter Quecksilbersäule“), bezeichnet den statischen Druck, den eine Quecksilbersäule von 1 mm Höhe bei 20 °C ausübt. Benannt wurde sie nach Evangelista Torricelli und erinnert an sein Experiment mit dem Quecksilberbarometer (vgl. 3.4 Torricelli). Die Benennung der Einheit zeigt eindrücklich die geschichtliche Entwicklung des Luftdruckbegriffes. Da Torricelli in seinem Quecksilberbarometer eine Steighöhe von 760 mm feststellte, entsprechen 760 Torr dem Atmosphärendruck auf Höhe des Meeresspiegels [28, S. 101]. Torr ist zwar keine SI-Einheit, wird jedoch nach wie vor für die Druckangabe in der Medizin verwendet.

## 2.10 Aufbau und Mächtigkeit der Atmosphäre

Unsere Atmosphäre ist „das größte Geschenk, das unser Planet besitzt“ [38, S. 11]. Sie ist einzigartig für die bisher bekannten Planeten, schützt uns vor schädlichen Einflüssen des Weltalls, ermöglicht das Leben auf der Erde und lässt die Erde für Astronauten\*innen zerbrechlich und schön erscheinen [38, S. 11].

Ohne unsere Atmosphäre würde die durchschnittliche Temperatur der Erde 33 °C weniger betragen, wobei es tagsüber sehr heiß und nachts sehr kalt wäre [22]. Außerdem sorgt die Atmosphäre durch ihre Masse für den Umgebungsluftdruck, der uns alltäglich begegnet und uns doch wegen der Allgegenwärtigkeit in der Regel unbewusst ist. Die Atmosphäre spielt daher die Hauptrolle in dem Lehrstück „Pascals Barometer“.<sup>6</sup>

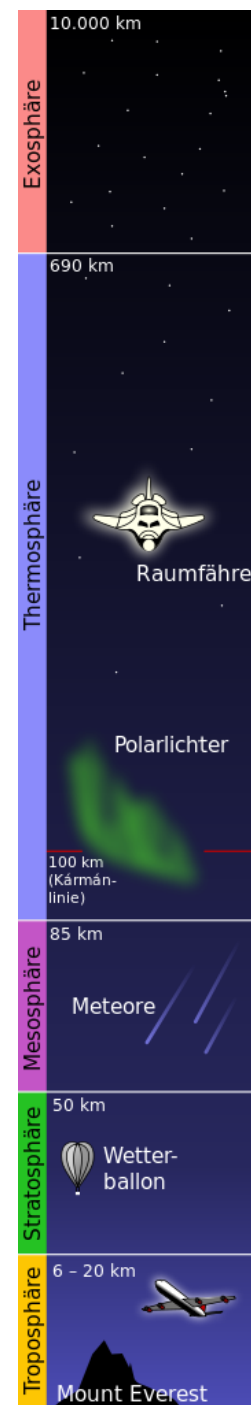
---

<sup>6</sup> An dieser Stelle kann man sich fragen, wie die Menschheit auf die Idee gekommen ist, dass die Atmosphäre eine Begrenzung hat. Die Antwort darauf ist schwierig zu finden. Doch sowohl in historischen Zeichnungen des geozentrischen als auch des heliozentrischen Weltbildes sind, klar begrenzte Schalen zu sehen (vgl. kopernikanisches Weltbild in Simonyi 1995 [34, S. 185]). Eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Höhe der Atmosphäre spielte der arabische Mathematiker, Optiker und Astronom Alhazen. Um das Jahr 1000 berechnete er mit Hilfe der Lichtbrechung der Sonne nach Sonnenuntergang die ungefähre vertikale Ausdehnung der Atmosphäre und bewies als erster, dass die Milchstraße weit von der Atmosphäre entfernt sein muss [10] [13, S. 99].

Die Erdatmosphäre ist eine gasförmige Hülle, welche die Erde umgibt. Ihre vertikale Ausdehnung ist nicht einfach anzugeben, da der Übergang zum Weltraum kontinuierlich ist und die Dichte mit zunehmender Höhe abnimmt (vgl. 2.3.1 Hydrostatischer Druck). Als mögliche Grenze kann die Kármán-Linie dienen. Sie liegt 100 km Höhe über dem Meeresspiegel und stellt eine theoretische Abgrenzung zwischen der Erdatmosphäre und dem freien Weltraum dar. Ungefähr ab dieser Höhe reicht die Atmosphäre nicht mehr aus, um dynamischen Auftrieb für Flugobjekte zu erzeugen [14].

In bodennähe ist die Zusammensetzung der Atmosphäre näherungsweise gleichmäßig. Unter Vernachlässigung des Wasserdampfs setzt sie sich zu 78% aus Stickstoff  $N_2$ , zu 21% aus Sauerstoff  $O_2$  und zu geringeren Anteilen aus weiteren Gasen zusammen [25]. Als Verursacher des Treibhauseffektes spielen vor allem Kohlenstoffdioxid  $CO_2$ , Methan  $CH_4$  und Stickstoffdioxid  $NO_2$  eine entscheidende Rolle [9].

Die Masse der Atmosphäre wird auf rund  $5,6 \cdot 10^{18}$  kg, also 5,6 Milliarden Tonnen, geschätzt [38, S. 326]. Dies ist zwar nur ein millionstel der Erdmasse, erscheint jedoch sehr viel, wenn man bedenkt, dass wir von dem auf uns lastenden Gewicht im Alltag so wenig bemerken. Weil es schwer vorstellbar ist, dass die uns umgebende Luft eine solche Masse hat, wurde Luft lange Zeit als schwerelos angesehen. Aristoteles glaubte, dass Luft keine Masse habe und sogar Galilei, der erstmals die Masse der Luft bestimmte, glaubte, dass Luft nur etwas wiege, wenn sie eingesperrt sei. Wenn sie frei ist, sei sie hingegen schwerelos. Diese Ansicht wandelte sich jedoch im Laufe der Geschichte. Überliefert ist, dass Blaise Pascal die Gesamtmasse der Atmosphäre auf  $3,7 \cdot 10^{18}$  kg schätzte, was nah an der heutigen Schätzung liegt [38, S. 34].



**Abbildung 2.11:** Die Schichten der Erdatmosphäre [47].

## 3 Geschichte

„Die Fragen nach dem leeren Raum ist wohl die älteste naturwissenschaftliche Frage, die noch heute die Physik beschäftigt.“ [19, S. 1] Kann das Nichts existieren? Oder hat die Natur eine Abscheu gegen das Vakuum?

In dem Lehrstück „Pascals Barometer“ begleiten Schüler\*innen historische Persönlichkeiten auf der Suche nach dem Vakuum und der Entdeckung des Luftdrucks. Die Dramaturgie des Lehrstücks entwickelt sich um die Frage, warum das Wasser nicht aus einem umgedrehten Glas, das mit dem Rand noch unter Wasser getaucht ist, ausfließt. Wird das Wasser vom Umgebungsluftdruck (Luftdrucktheorie) hineingedrückt oder wird es oben gehalten, da sonst ein Vakuum entstehen würde, was die Natur nicht zulässt (Horror Vacui)? Heute wissen wir, dass der Umgebungsluftdruck dafür entscheidend ist. Unsere Atmosphäre übt einen ständigen Druck auf uns aus. Eine Vakuumenergie gibt es aber dennoch, auch wenn diese keinen Sog erzeugt und das Vakuum ist keineswegs leer. Der luftleere Raum ist von Feldern und Teilchen erfüllt (vgl. 3.9 Moderne, [19], [28]).

Wie hat sich diese wissenschaftliche Erkenntnis entwickelt? Wie ist der Paradigmenwechsel vom Glauben an die natürliche „Abscheu gegen das Vakuum“ (Horror Vacui) hin zum Luftdruck entstanden? Welche gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Hürden mussten dabei genommen werden? Die Kulturgeneese der Suche nach dem Vakuum ist von entscheidender Bedeutung für den Aufbau des Lehrstücks und hilft, den Verstehensprozess der Schüler\*innen zu begleiten und nachzuvollziehen.

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Personen Aristoteles, Berti, Galilei, Torricelli, Pascal und von Guericke, welche ausführlich in den Büchern „Pascals Barometer“ [12, Eyer und Aeschlimann 2013] und „Lehrstückunterricht im Horizont der Kulturgene“ [13, Eyer 2015] beschrieben sind. Robert Boyle und die Erkenntnisse der Modernen werden dort nur kurz erwähnt, weswegen sie hier ausführlicher beleuchtet werden. Weitere Informationen sowie historische Experimente zu dem Thema sind unter anderem in Simonyi 1995 [34] zu finden.

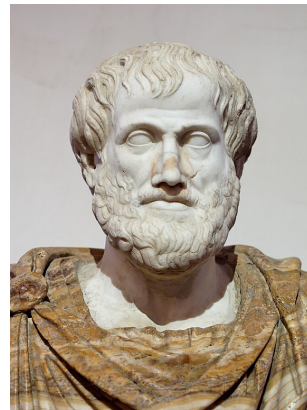
### 3.1 Aristoteles

Der griechische Philosoph Aristoteles war der Überzeugung, dass es kein Vakuum geben könne. Dies begründete er mit seiner Bewegungslehre. Dieser zufolge entspricht die Geschwindigkeit eines Körpers der auf ihn wirkenden Kraft geteilt durch den Widerstand.

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Widerstand}}$$

Aristoteles zufolge könne jedoch in einem Vakuum keine Kraft wirken. Er ging davon aus, dass Berührung für das Ausüben von Kraft notwendig sei. Somit würde sich ein Körper im Vakuum nicht bewegen. Andererseits herrscht im Vakuum kein Widerstand, wodurch die Geschwindigkeit unendlich groß sein müsste. Aus diesem Widerspruch folgerte er, dass es kein Vakuum geben könne [13, S. 94]. Die Natur habe eine „Abscheu gegen das Vakuum“ (Horror Vacui).

Aristoteles stützte sich bei seinen Theorien stets auf direkt wahrnehmbare Beobachtungen [6, S. 80] [34, S. 84] und lehnte die Verwendung der Mathematik zur Erklärung von irdischen Naturphänomenen ab [6, S. 70].



**Abbildung 3.1:** Büste von Aristoteles [39]

**Aristoteles:**

\* 384 v. Chr. in Stageira

† 322 v. Chr. in Chalkis

<b>Bekannt als:</b>	Griechischer Universalgelehrter
<b>Position zum Thema:</b>	Das Vakuum kann nicht existieren, weil die Natur es nicht zulässt.
<b>Rolle im Lehrstück</b>	Aristoteles tritt nicht als Protagonist auf. Seine Denkweisen kommen indirekt durch Galileis Ansichten und durch Alltagserfahrung und die Präkonzepte der Schüler*innen zum Vorschein.

## 3.2 Berti

Gasparo Berti entwickelte 1640 bis 1643 gemeinsam mit Raffaello Magiotti verschiedene Experimente zur Untersuchung des atmosphärischen Luftdrucks.<sup>1</sup> Unter anderem baute er eine 11 Meter hohe Steigröhre, in welcher das Wasser maximal ungefähr 10 Meter stieg. Darüber schien ein Vakuum zu entstehen. Dieses Experiment wird im Lehrstück in Form eines langen transparenten Schlauches nachempfunden. Es wird zum Anlass genommen, über die Ursache des Phänomens zu sprechen. Da das Experiment 1648 in den Straßen Roms durchgeführt wurde, erweckte es eine große Aufmerksamkeit [13, S. 89].

Die Verfechter des Horror Vacui ließen sich durch dieses Experiment nicht überzeugen, dass ein Vakuum erzeugt werden kann. Unter anderem wurde die Dichtigkeit von Bertis Apparaturen angezweifelt und Aristoteles Idee, dass die Natur eine „Abscheu gegen das Vakuum“ habe, bestand weiterhin [12, S. 42].



**Abbildung 3.2:** Gemälde von Gasparo Bertis Experiment [53]

<b>Gasparo Berti:</b>	
* 1600 im Mantua	
† 1643 in Rom	
<b>Bekannt als:</b>	Italienischer Astronom, Physiker und Mathematiker
<b>Position zum Thema:</b>	Das Vakuum kann existieren, was im Experiment mit der Steigröhre zu sehen ist.
<b>Rolle im Lehrstück</b>	Berti tritt als erster Protagonist des Lehrstücks auf und begleitet die Schüler*innen beim Experiment, welches die maximale Steighöhe von Wasser zeigt. Die Frage, wodurch diese maximale Steighöhe verursacht wird, wird an dieser Stelle besprochen, jedoch nicht beantwortet.

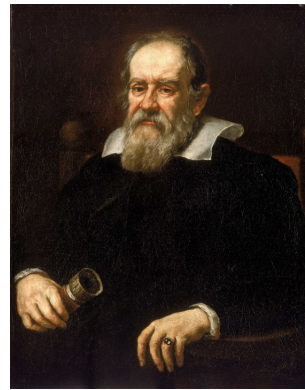
<sup>1</sup> Zeitlich fanden seine Experimente nach der Veröffentlichung von Galileis *Discorsi* 1638 statt, in welcher er die Theorie des Horror Vacui bekräftigte. Im Lehrstück wird Bertis Experiment jedoch vor Galilei besprochen, da es die Fragestellung verdeutlicht und sich dieses Experiment als Konsequenz aus der Eröffnung des Lehrstücks ergibt.

### 3.3 Galilei

Der Italiener Galileo Galilei wurde primär für seine Errungenschaften in den Bereichen der Mechanik und Astronomie, seinen Beitrag zur empirischen Wissenschaft und den Kampf gegen das Weltbild der Kirche berühmt und ist noch heute von großer Relevanz.<sup>2</sup>

Im Gegensatz zu Aristoteles vertrat Galilei die Ansicht, dass die alltäglichen Beobachtungen für wissenschaftliche Erkenntnisse nicht ausreichen. Ihm zufolge sind Experimente, Idealisierungen und experimentell überprüfbare Fragestellungen notwendig. Seine Ergebnisse beschrieb er mit Hilfe der Mathematik [6, S. 91].

Galilei war daher ein entschiedener Gegner Aristoteles. Es fiel ihm jedoch schwer, sich vollständig von den Lehren Aristoteles zu lösen [6, S. 84] [34, S. 37]. Neben der aristotelischen Annahme, dass Kraft nur zwischen sich berührenden Körpern übertragen werden könne, war er auch der Überzeugung, dass die Natur eine „Ab-scheu gegen das Vakuum“ hege. Im Unterschied zu Aristoteles ließ er jedoch zu, dass ein Vakuum künstlich „entgegen der Natur“ [17, S. 23f] erzeugt werden könne. Galilei zufolge wird das Wasser von einer „Vakuumkraft“ in der Höhe gehalten. Diese Kraft sei jedoch begrenzt, wodurch



**Abbildung 3.3:** Portrait von Galileo Galilei [43]

#### Galileo Galilei:

\* 1564 in Pisa

† 1641 in Arcetri bei Florenz

<b>Bekannt als:</b>	Italienischer Universalgelehrter, der als Begründer der empirischen, mathematisierten Naturwissenschaften gilt und durch seinen Kampf gegen das Weltbild der Kirche berühmt wurde.
<b>Position zum Thema:</b>	Auf künstliche Weise kann ein Vakuum erzeugt werden, wenn die „Kraft des Vakuums“ überwunden wird.
<b>Rolle im Lehrstück</b>	Galilei tritt als Verfechter des Horror Vacui und als Entdecker der Masse der Luft auf. Hierzu wird ein Ausschnitt aus seinen <i>Discorsi</i> gelesen.

<sup>2</sup> In seinen Hauptwerken den Dialogen „über die zwei wichtigsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische“ [16] und den *Discorsi* „über zwei neue Wissenszweige die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“ [17] beschrieb er seine Entdeckungen und Weltansichten in Form von Gesprächen zwischen drei fiktiven Personen.

die Wassersäule ab einer gewissen Höhe zu schwer würde [23, S. 26] [34, S. 232]. Die maximale Steighöhe einer Wassersäule erklärte er damit, „dass das Wasser – wie ein genügend langer Draht – unter seinem eigenen Gewicht abreiße“ [31, S. 77]. Sein Experiment aus dem Jahre 1613, zur Messung dieser Kraft, machte den Horror Vacui zu einer messbaren Größe [34, S. 232f].

Paradoxerweise war es ebenfalls Galilei, der ein Experiment beschrieb, welches die Bestimmung des Gewichts der Luft in einer Flasche ermöglichte. Er ging jedoch davon aus, dass die Luft nur ein Gewicht habe, wenn sie sich in einem Gefäß befinde. Analog zu Aristoteles Lehren glaubte Galilei, dass Luft in ihrem natürlichen Element, also wenn sie frei ist, kein Gewicht habe. Dementsprechend sei es ihm zufolge auch nicht möglich, dass die Atmosphäre einen Druck ausübe [38, S. 22ff].

### 3.4 Torricelli

Torricelli ging drei Monate vor Galileis Tod, im Spätherbst 1641, nach Arcetri, um Galileis Assistent zu werden. Nach dessen Tod wurde Torricelli sein Nachfolger als Hofmathematiker des Großherzogs der Toskana [12, S. 74] und forschte genau wie Galilei an der Ergründung der Ursache der begrenzten Steighöhe von Flüssigkeiten.

Nach einigen Experimenten kam Torricelli zu dem Schluss, dass der Luftdruck die Flüssigkeit in der Röhre hält und dieser Druck durch das Gewicht der darüber befindlichen Luft verursacht wird [23, S. 26] [31, S. 78]. Die Überzeugung verbildlichte er mit der Aussage „Wir leben untergetaucht am Boden eines Meeres von Luft“ [38, S. 29].

Für den weiteren Verlauf der Kulturgeschichte des Luftdrucks ist von besonderer Bedeutung, dass Torricelli im Jahre 1643 Quecksilber anstelle von Wasser für die Steigröhre verwendete [13, S. 88]. In seinem Experiment zeigte sich, dass die 14-mal größere Dichte von Quecksilber zu einer 14-mal kleineren Flüssigkeitssäule führte. Mit einer maximalen Steighöhe von 76 cm erhielt er so eine handliche Version der Steigröhre [23, S. 26] [31, S. 77f].

Die geringere Steighöhe ermöglichte, dass das Rohr aus Glas gefertigt werden konnte, wodurch die Flüssigkeit beobachtet werden kann [34, S. 233].

„Im Leerraum kann die Existenz eines Vakuums angenommen oder verneint werden und die Ursachen für diese endliche Steighöhe kann bei dem äußeren Luftdruck oder



**Abbildung 3.4:** Portrait von Evangelista Torricelli [51]

#### Evangelista Torricelli:

\* 1608 in Faenza

† 1647 in Florenz

<b>Bekannt als:</b>	Italienischer Physiker und Mathematiker
<b>Position zum Thema:</b>	Der Luftdruck wirkt ständig auf uns. „Wir leben untergetaucht am Boden eines Meeres von Luft.“
<b>Rolle im Lehrstück</b>	Torricelli steht stellvertretend für den Paradigmenwechsel von der Theorie des Horror Vacui hin zur Luftdrucktheorie. Diese war zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht bewiesen.

im Horror Vacui gesucht werden [...]. Die möglichen Antworten lassen sich sogar miteinander kombinieren und in der Tat hatte jede mögliche Kombination ihren namhaften Verfechter.“

Simonyi 1995, S. 233 [34]

Mit Torricellis Experimenten war die Luftdrucktheorie also noch nicht bewiesen. Doch Torricelli war von ihrer Richtigkeit überzeugt und die Verwendung von Quecksilber verhalf dem Wissenschaftler Blaise Pascal, den Beweis zu erbringen.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Da Torricelli sich nicht öffentlich zu diesem Thema äußerte, sind seine Beweggründe nur zu vermuten. Möglicherweise veranlassten die Widersprüche in Galileis Argumentation Torricelli dazu, nach der Ursache für die begrenzte Steighöhe zu suchen. Aus Angst vor der katholischen Kirche behielt Torricelli seine Ergebnisse für sich. Die Kirche lehnte die Existenz des Vakuums ab. Ein leerer Raum wäre ihr zufolge nutzlos. Gott würde jedoch keine nutzlosen Werke erschaffen. Wer also die Existenz des Vakuums zuließ, machte sich gleichzeitig der Gotteslästerung strafbar. Erst durch einen später berühmt gewordenen Brief von Torricelli an den Jesuiten Ricci vom 11. Juni 1644 wurden seine Entdeckungen und Experimente sowie Zeichnungen seiner Geräte bekannt [19, S. 16] [38, S. 24ff].

## 3.5 Pascal

Als Blaise Pascal, der Namensgeber des Lehrstücks, im Jahre 1646 von Torricellis Versuch hörte, war er begeistert. Wenn Torricelli recht hatte und die Flüssigkeit durch die darüber befindliche Luft in der Steigröhre gehalten würde, müsste der Flüssigkeitsspiegel auf einem Berg niedriger sein als im Tal, da dort weniger Luft über der Röhre ist, welche entsprechend weniger Druck ausübt [31, S. 78]. Torricellis handliche Quecksilberröhre ermöglichte es, den historischen Versuch durchzuführen. Auf Blaise Pascals Bitte hin, trug sein Schwager Florin Périer im Jahre 1648 ein Quecksilberbarometer auf den 1460m hohen Puy de Dôme und beobachtete den Quecksilberstand. Zur Kontrolle wurde zeitgleich ein zweites Barometer in einem Kloster am Fuße des Berges aufgebaut, wo ein Mönch jeden Tag den Quecksilberstand notierte.

Das Experiment bestätigte Pascals Vermutung. Die Quecksilbersäule sank, je höher Périer stieg und der leere Raum über dem Quecksilber wurde größer. Gleichzeitig blieb der Quecksilberstand im Tal unverändert [13, S. 139] [23, S. 27].

Doch Pascal war zunächst vorsichtig mit der Interpretation seines Experimentes und ließ lange Zeit sowohl die quantitative Beschreibung des Horror Vacui als auch den Luftdruck als Ursache zu [34, S. 234]. Doch schlussendlich war für Pascal eindeutig, dass die Natur keine „Abscheu gegen das Vakuum“ hegt und über dem Quecksilber ein Vakuum



**Abbildung 3.5:** Portrait von Blaise Pascal [49]

**Blaise Pascal:**

\* 1623 in Clermont-Ferrand

† 1662 in Paris

<b>Bekannt als:</b>	Französischer Mathematiker und Physiker
<b>Position zum Thema:</b>	Der Luftdruck ist für die begrenzte Steighöhe von Flüssigkeiten verantwortlich. Ist der Luftdruck geringer, sinkt die Steighöhe.
<b>Rolle im Lehrstück</b>	Im Lehrstück wird sein berühmtes Experiment der Besteigung des Puy de Dôme nachempfunden und so der Beweis für die Luftdrucktheorie erbracht.

entsteht.<sup>4</sup> Genau wie Torricelli war auch Pascal der Überzeugung, dass der Luftdruck, hervorgerufen durch das Gewicht der Luftmassen, die Erklärung für die begrenzte Steighöhe ist [31, S. 78] [34, S. 233ff]. Pascal schätzte das Gewicht des „Luftmeeres“ und erhielt ein Ergebnis von  $3,7 \cdot 10^{18}$  kg, welches sehr nah an der heutigen Schätzung von  $5,6 \cdot 10^{18}$  kg liegt [38, S. 34]. Zudem zeigte Pascal die Analogie von Phänomenen des Flüssigkeits- und Luftdrucks, was für die Erforschung weiterer Phänomene von großer Bedeutung war [26, S. 106].

---

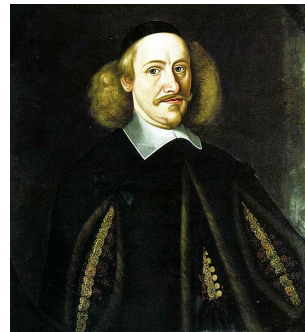
<sup>4</sup> Genau genommen befindet sich in dem Raum über dem Quecksilber kein Vakuum, sondern Quecksilberdampf. Um auszuschließen, dass der beobachtete Effekt durch diesen Dampf verursacht wird, führte Pascal das Experiment der Steigröhre einmal mit Wasser und einmal mit Wein durch. Alkohol verdampft bei einer niedrigeren Temperatur als Wasser. Wenn also der entstehende Dampf dafür sorgt, dass die Flüssigkeitssäule nach unten gedrückt würde, sollte die Weinsäule niedriger stehen als die Wassersäule. Das Experiment zeigte jedoch, dass die Weinsäule höher stand als die Wassersäule. Da Alkohol eine geringere Dichte hat als Wasser, ist eine höhere Säule möglich bis der Luftdruck kompensiert ist. Dieses Experiment konnte zeigen, dass nicht der Dampf, sondern die Dichte ausschlaggebend ist. Der bei dem Versuch entstehende Dampf hat keinen Einfluss auf das Ergebnis [34, S. 233f].

## 3.6 Guericke

Der Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke setzte sich zum Ziel, der breiten Öffentlichkeit die Kraft des Luftdrucks zu demonstrieren, damit alle von den neuen Erkenntnissen erfahren [13, S. 141]. Hierzu entwickelte er, nach einigen Anfangsschwierigkeiten, im Jahre 1649 eine Vakuumpumpe [12, S. 74]. Diese ermöglichte es, weitere wissenschaftliche Experimente zum Thema Luftdruck durchzuführen, da mit ihrer Hilfe ein Vakuum nach Belieben hergestellt und untersucht werden konnte [6, S. 90].

Otto von Guericke nutzte seine Vakuumpumpe für die öffentliche Präsentation eindrucksvoller Experimente. Das berühmteste sind seine Magdeburger Halbkugeln. Hierzu legte er zwei Kupfer-Halbkugeln abgedichtet aufeinander und pumpte den Hohlraum zwischen ihnen leer. Die Halbkugeln „hafteten“ so fest aneinander, dass selbst 16 Pferde es nicht schafften, sie auseinander zu ziehen. Erst als der Hohlraum zwischen den Kugeln wieder mit Luft gefüllt wurde, konnten die Hälften auseinandergenommen werden [23, S. 27]. Für Otto von Guericke war das eine sehr eindrucksvolle Demonstration der Kraft, mit welcher der Luftdruck die beiden Halbkugeln aufeinanderdrückt.

Im Jahre 1660 sagte Otto von Guericke zum ersten Mal ein Unwetter aufgrund des fallenden Luftdrucks voraus [12, S. 74].



**Abbildung 3.6:** Portrait von Otto von Guericke [55]

### Otto von Guericke:

\* 1602 in Magdeburg

† 1686 in Hamburg

<b>Bekannt als:</b>	Politiker und begeisterter Hobbywissenschaftler
<b>Position zum Thema:</b>	Der Luftdruck ist ein spannendes Phänomen, welches alle Menschen kennenlernen sollen.
<b>Rolle im Lehrstück</b>	Im Lehrstück wird sein Experiment der Magdeburger Halbkugeln durchgeführt und in seinem Namen werden weitere Experimente mit der Vakuumpumpe unternommen.



**Abbildung 3.7:** Im Jahre 1654 führte von Guericke unter anderen das Experiment der Magdeburger Halbkugeln dem Kaiser in Regensburg vor [13, S. 89]. Bildquelle [29].

## 3.7 Boyle

Robert Boyle (1627-1691) gilt als Begründer der modernen Chemie [6, S. 100] [34, S. 235] und hat sich ebenfalls in ausführlichen Experimenten mit der Natur der Luft beschäftigt. Zeitlich sind seine Beiträge nach Berti, Galilei, Torricelli, Pascal und von Guericke einzuordnen. Er interessierte sich jedoch bereits früher in seinem Leben für dieses Thema.

Als Sohn eines der reichsten Adligen Irlands kam Robert Boyle im Oktober 1641, kurz vor Galileis Tod, als sechzehnjähriger Schüler im Rahmen einer Bildungsreise nach Florenz. Dort stieß er auf ein Exemplar von Galileis *Discorsi* [38, S. 30]. Dieses beeindruckte ihn sehr und prägte ihn einige Jahre später stark in seinem wissenschaftlichen Schaffen.

Aufgrund eines Aufstandes in seiner Heimat Irland und des Bürgerkrieges in England (vgl. 3.11 Gesellschaft in Mitteleuropa 1610 - 1660) dauerte es jedoch über zwei Jahre, bis er wieder zurück auf die

Britischen Inseln kam. Dort lebte er erst bei seiner Schwester in London und anschließend in einem Gutshaus in Stalbridge, das sein Vater für ihn kaufte. Dort war er in sicherer Entfernung zu den politischen Instabilitäten und konnte sich der Wissenschaft widmen. Er wollte die Welt auf die neue Weise verstehen, die Galilei in seinem Buch dargestellt hatte. Dazu richtete er 1649 ein Laboratorium in Stalbridge ein und führte eigene Experimente durch. Anstelle des Gewinns von Geld beschäftigte er sich lieber mit dem Gewinn von Wissen [38, S. 31ff].

Zunächst beschäftigte er sich, wie viele in dieser Zeit, erfolglos mit Verfahren zur Verwandlung von Blei in Gold. Über seine Schwester lernte er schließlich in London die



**Abbildung 3.8:** Portrait von Robert Boyle [40]

### Robert Boyle:

\* 1627 in Lismore

† 1691 in London

**Bekannt als:** Begründer der Chemie

**Position zum Thema:** Die Luft spielt eine wichtige Rolle für unser Leben.

**Rolle im Lehrstück** Das Ausgangsexperiment des Lehrstücks noch einmal unter der Vakuumglocke durchzuführen geht auf Boyle zurück. Namentlich wird er in dem Lehrstück jedoch nicht erwähnt.

Männer des Invisible College kennen, die im Jahre 1660 die Royal Society gründeten. Boyle lernte viel von ihnen und ihren Diskussionen mit seiner gedankenvollen und intelligenten Schwester. Aufgrund der politischen Instabilität in London nahmen viele dieser Männer eine Stelle an der Universität in Oxford an. Mitte der 1650er Jahre zog Boyle ebenfalls dorthin, denn Oxford entwickelte sich zu einem Treffpunkt für experimentierfreudige Menschen, welche die Welt verstehen wollten [38, S.32f].

Noch bevor Boyle nach Oxford ging, stieß er bei einem seiner Besuche in London auf das Experiment von Torricelli und interessierte sich sogleich dafür. Allerdings war das Experiment bereits mehrfach gründlich analysiert und reproduziert worden und auch Blaise Pascals Experiment auf dem Puy de Dôme wurde bereits durchgeführt. Es schien, als könne Boyle dort nicht mehr viel entdecken.

Die Theorie des Horror Vacui hatte jedoch weiterhin viele Anhänger. Boyle wollte den Rest der Welt davon überzeugen, dass die Masse der Luft für die begrenzte Steighöhe von Flüssigkeiten verantwortlich ist. Dazu wollte er Torricellis Experiment im Vakuum reproduzieren. Die Vakuumpumpe von Otto von Guericke eignete sich jedoch nicht dazu. Bei Guerickes Pumpe musste das, was leer gepumpt werden sollte, unter Wasser gehalten werden und es gab keine Vakuumkammer, in welche das Quecksilberbarometer platziert werden konnte. Robert Hooke wurde eingestellt, um eine neue Vakuumpumpe zu entwickeln. Er galt damals als talentiertester Experimentator Englands. Die von Hooke entworfene Vakuumpumpe besaß ein System aus Ventilen, mit denen ein Vakuum in einer Kammer erzeugt werden konnte. Dies ermöglichte neue Weisen des Experimentierens. So konnten Boyle und Hooke die Quecksilberröhre in die Vakuumkammer stellen und Messungen vornehmen [23, S. 30f] [34, S. 235] [38, S. 34ff].

Ihr Experiment bestätigte auf neuartige Weise, was schon zuvor Torricelli, Pascal und von Guericke gezeigt hatten. Wird der Luftdruck, der die Quecksilbersäule umgibt, verringert, sinkt die Steighöhe der Flüssigkeit. Wenn durch das Ventil wieder Luft in die Kammer gelassen wurde, stieg das Quecksilber wieder in der Röhre. Zweifellos und im Labor reproduzierbar hatte Boyle damit gezeigt, dass der Luftdruck für die Steighöhe der Flüssigkeit verantwortlich ist. Er hatte das „Meer aus Luft“ und den Puy de Dôme ins Labor geholt und das Experiment dort nachgestellt. Galilei und Aristoteles' Theorien wurden widerlegt [38, S. 38].

Nachdem sich die politische Lage Englands mit dem Ende des Bürgerkrieges gebessert hatte, wurde sie im Jahre 1660 wieder unsicherer. Daher verließ Boyle Oxford und zog vorübergehend in das Landhaus eines Freundes. Dort schrieb er sein Buch *New Expe-*

*riments Physico. Mechanical Touching the spring of Air* [5], welches 1660 veröffentlicht wurde [38, S. 40].<sup>5</sup>

Boyles Buch enthielt eine Beschreibung der Vakuumpumpe sowie verschiedenste Experimente zur Kraft der Luft, bei denen er sich auch auf Torricelli bezog. Boyle erweiterte zudem von Guericks Versuche und fügt einige neue hinzu. Zudem bemerkte er, dass Luft komprimiert werden kann. Daraus schloss er, dass die Luft unzusammenhängende Teilchen enthalten muss [38, S. 41] (vgl. 2.4 Kinetische Gastheorie). Zwei Jahre nach Veröffentlichung seines Buches formulierte Boyle aus diesen Beobachtungen seine Gasgleichung  $p \sim 1/V$  oder  $p \cdot V = konst.$  bei gleichbleibender Temperatur (vgl. 2.4.1 Boyle-Mariotte Gesetz (1662)). Darüber hinaus betrachtete er die Ausbreitung des Lichtes und die Wirkung von Magneten im Vakuum sowie die Rolle der Luft für die Schallausbreitung. Auch war er der Erste, der beschrieb, dass Flüssigkeiten abhängig vom Druck sieden oder frieren [26, S. 112f] [34, S. 235] [38, S. 44]. Weiterhin führte er Galileis Fallexperiment im Vakuum durch und bestätigte so, dass dort eine Feder ebenso schnell herabfällt wie ein Stein (vgl. Lehrstück „Das Fallgesetz nach Galilei“ [13, S. 173]). Diese Erkenntnis führte ihn zu der Annahme, dass die Luft unsichtbare Materie enthält.<sup>6</sup>

In den Streit um die Beschaffenheit des Vakuums wollte er sich jedoch nicht einmischen und definierte das Vakuum als Raumgebiet, in dem sich keine Luft befindet [34, S. 235]. Dies ist sehr nah an der Definition, die wir heute wählen. Denn ein luftleerer Raum ist nicht vollkommen leer, wie uns die Moderne gezeigt hat (vgl. 3.9 Moderne).

---

<sup>5</sup> Inspiriert durch Francis Bacon schrieb Boyle sein Buch in verständlichem Englisch. Zudem verzichtete er auf die damals übliche Darstellung in Form von philosophischen Diskursen zwischen fiktiven Personen. Stattdessen beschrieb er seine Experimente auf schlichte und sachliche Weise. Alle sollten in der Lage sein, die Experimente zu wiederholen. In diesem Sinne ging er einen großen Schritt in Richtung der modernen Wissenschaft [23, S. 30] [38, S. 40].

<sup>6</sup> Auch wollte Boyle die Rolle der Luft für das Fliegen untersuchen. Hierzu sperrte er zunächst Bienen und später einen Vogel in eine Vakuumblocke und wollte beobachten, wie der geringer werdende Druck das Flugverhalten beeinflusst. Doch die Tiere starben, bevor sie versuchten im Vakuum zu fliegen. Der schnelle Tod der Tiere musste mit der fehlenden Luft zusammenhängen. Damals gab es viele verschiedene Theorien zur Notwendigkeit des Atmens. Boyle tendierte zu der Vorstellung, dass die Atmung notwendig sei, um die Lunge zu kühlen, weil kaltblütige Tiere, wie Fische, keine Lunge haben. Allerdings vermutete er korrekterweise, dass Fische möglicherweise die im Wasser gelöste Luft nutzen würden. Er vermutete daher, dass die Luft „verborgene Qualitäten“ oder „Kräfte“ hat, die auf ihren Bestandteilen beruhen [38, S. 44f]. Dies sollte u.a. der im 18. Jahrhundert entdeckte Sauerstoff sein.

## 3.8 Weitere historische Persönlichkeiten

Die Geschichte des Luftdrucks und des Vakuums war jedoch nicht so gradlinig, wie sie erscheinen mag. Torricelli war nicht der Erste, der an die Luftdrucktheorie glaubte und auch nach Pascals Experiment auf dem Puy de Dôme und von Guericke und Boyles Experimenten war die Luftdrucktheorie noch nicht allseits akzeptiert. Für die Dramaturgie des Lehrstücks ist eine gradlinige Darstellung der Geschehnisse sehr hilfreich. Für mögliche Rückfragen und zweifelnde Schüler\*innen ist es dennoch sinnvoll, ein wenig über die Ab- und Umwege der Erkenntnisse zu wissen.

Um das Jahr 400 v.Chr., noch vor Aristoteles, erfanden Leukipp und Demokrit das Atom und damit auch den leeren Raum. Ihnen zufolge gab es nur Atome und den leeren Raum [31, S. 75]. Und noch während Aristoteles Lebzeit fand Straton experimentelle Beweise für die Existenz des Vakuums [34, S. 85f]. Doch Aristoteles setzte sich durch. Die Natur habe eine „Abscheu gegen das Vakuum“ und Atome gerieten bis ins 18. Jahrhundert in Vergessenheit [23, S. 13]. Im 17. Jahrhundert wendete sich schließlich Galilei erneut der Frage des Vakuums zu. Doch obwohl er ein entscheidender Kritiker Aristoteles war, behielt er doch den Glauben an den Horror Vacui bei. Dabei hatte vor ihm bereits der Niederländer Isaak Beeckman 1618 festgestellt, dass die Luft das Wasser in den Röhren hochdrückt, auch wenn er dies noch nicht beweisen konnte [31, S. 77] [34, S. 233]. Und auch Giovanni Battista Baliani hatte gegenüber Galilei argumentiert, dass die Atmosphäre für die begrenzte Steighöhe des Wassers verantwortlich sei [23, S. 26] [38, S. 25]. Doch Galilei konnte sich nicht vorstellen, dass die Atmosphäre ein solches Gewicht habe.

Was das Hinterfragen des Horror Vacui zusätzlich erschwerte, war, dass Thomas von Aquino im Mittelalter das aristotelische Weltbild mit dem christlichen Weltbild vereinigte. Er postulierte, dass rationale Argumente so ausgelegt werden sollen, dass sie dem Glauben nicht widersprechen. So schuf er eine mächtige Allianz, die es schwierig machte, Aristoteles Lehren zu kritisieren [34, S. 84, 156].

Zur Verdeutlichung, wie langsam sich die neue Vorstellung des Luftdrucks in der Gesellschaft ausbreitete, dient ein Artikel von Voltaire aus dem Jahre 1764. Hundert Jahre nach Pascal, von Guericke und Boyle schrieb er, dass Luft nicht sichtbar oder wahrnehmbar wäre und setzt die Wahrscheinlichkeit, dass Luft existiert und eine Wirkung erzielt, gleich mit der Wahrscheinlichkeit, dass der Äther existiert [26, S. 103]. Dieses Gefühl könnten auch einige Schüler\*innen haben, da wir im Alltag die Luft üblicherweise nur in

Form von Wind spüren und sie für unseren Alltag inexistent zu sein scheint [26, S. 101]. An dieser Stelle gilt es, Verständnis zu zeigen, falls Schüler\*innen Schwierigkeiten mit dem Konzept des Luftdrucks haben.

Die Geschichte zeigt, dass die richtige Antwort schon lange verfügbar gewesen wäre. Häufig dauert es jedoch lange, bis eine Aussage bewiesen werden kann. Auch zeigt die Geschichte, dass es noch länger dauert, bis sich eine Erkenntnis als wissenschaftliche Allgemeinmeinung durchsetzt und nochmals länger, bis sie von den Individuen im Alltag als wahr akzeptiert wird. Zudem ist die Forschung an der Frage nach der Leere bis heute nicht abgeschlossen.

## 3.9 Moderne

Die Moderne der Physik zeichnet sich durch das Ziel aus, universelle Verallgemeinerung und vereinheitlichte Theorien zu entwickeln. Dies geht insbesondere mit dem Verlust der Anschaulichkeit einher, da die Theorien stark mathematisiert sind und sich weitestgehend der Alltagserfahrung entziehen. Für die Untersuchung dieser Theorien werden spezielle Rahmenbedingungen, wie hoch spezialisierte Technik und Laboratorien, benötigt [6, S. 218]. Dies führt zu einem weiteren Charakteristikum der Moderne – der Entkopplung von Wissenschaft und Allgemeinbildung. Dies ist beispielsweise daran zu erkennen, dass die Themen der modernen Physik in der Schule, wenn überhaupt, nur als Randthemen betrachtet werden und der Schulunterricht überwiegend auf die Klassik ausgerichtet ist.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war ein Großteil der Physiker überzeugt, dass nur noch wenige Details zur Erklärung aller physikalischen Erscheinungen fehlten und im Grunde alles bereits eindeutig beschrieben wäre [6, S. 219]. Diese Ansicht vertraten jedoch nicht alle. So schreibt Ernst Mach bereits 1883 in seinem Buch „Die Mechanik in ihrer Entwicklung“ Folgendes:

„Die Anschauung, dass die Mechanik als Grundlage aller übrigen Zweige der Physik betrachtet werden müsste und alle physikalischen Vorgänge mechanisch zu erklären seien, halten wir für ein Vorurteil. Das historisch Ältere muss nicht immer die Grundlage für das Verständnis des später Gefundenen bleiben. In dem Maße, als mehr Tatsachen bekannt und geordnet werden, können auch ganz neue leitende Anschauungen platzgreifen. Wir können jetzt noch gar nicht wissen, welche von den

physikalischen Erscheinungen am tiefsten gehen, ob nicht die mechanischen gerade die oberflächlichsten sind, ob nicht alle gleich tief gehen. Auch in der Mechanik betrachten wir ja nicht mehr das älteste Gesetz, das Hebelgesetz, als die Grundlage aller übrigen.“

Mach 1912, S. 472 [26]

Der gleichen Ansicht war auch William Thomson (Lord Kelvin; 1824-1907). Im Jahre 1900 hielt er einen Vortrag darüber, dass er aufgrund des Experimentes von Michelson und Morley<sup>7</sup> und der Wärmestrahlung von Körpern<sup>8</sup> an der Schönheit und Klarheit der klassischen Theorien zweifle. Aus diesen beiden Phänomenen, die nicht mit der klassischen Physik erklärt werden konnten, entstand die moderne Physik. „Aus dem Versuch von Michelson und Morley erwuchs die Relativitätstheorie und aus der Forschung zur Wärmestrahlung von heißen Körpern wurde die Quantenphysik geboren“ [6, S. 185].

Seitdem gibt es kein geschlossenes Erklärungssystem mehr. Insbesondere gibt es bislang noch keine Theorie, welche die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenphysik verbindet. An dieser sogenannten „Theory of everything“ (TOE) wird viel geforscht, bislang ohne Erfolg [6, S. 219]. Mindestens bis Quantenphysik und die Relativitätstheorie vereint werden, gibt es in der Physik noch viel zu erforschen und zu verstehen.

„Der österreichisch-polnisch-israelische Wissenschaftsphilosoph Ludwik Fleck (1896-1961) formuliert [...] «Naturwissenschaft ist eine nicht fertig zu machende Arbeit». Aber gerade das macht die Naturwissenschaft so spannend, sie ist eine abenteuerliche Reise in unbekannte Welten des Wissens, und es scheint für diese Reise keine Grenzen zu geben. Die Geschichte der Naturwissenschaften zeigt, dass es sich immer neu lohnt, auf diese Reise zu gehen“

Bühler und Hafer 2016, S. 220 [6]

<sup>7</sup> Michaelson und Morley wollten die Bewegung der Erde in einem ruhenden Äther nachweisen. Der Lichtäther soll nach der damaligen Theorie ein Medium sein, in dem sich das Licht ausbreitet. Der Beweis für den Äther sollte durch ein Interferometer mit zwei senkrecht zueinanderstehenden Armen erfolgen. Wenn es einen Äther gäbe, der im Weltall ruht, müsste das Licht bei Bewegung mit der Rotation der Erde schneller sein als in die Richtung senkrecht zur Bewegungsrichtung der Erde. Das Experiment konnte jedoch keine signifikanten Differenzen in der Laufzeit feststellen. Albert Einstein erklärte dies 1905 mit der speziellen Relativitätstheorie [28, S. 619].

<sup>8</sup> Jeder Körper strahlt abhängig von seiner Temperatur Wärmestrahlung ab. Die Theorien der klassischen Physik erklären die experimentellen Befunde jedoch nur für lange Wellenlängen (hohe Temperaturen). Für kleine Wellenlängen (niedrige Temperaturen) sagt die klassische Beschreibung eine divergierende, also viel zu große, Intensität voraus. Erst Max Planck konnte diesen Widerspruch durch die Annahme von quantisierter Energie aufheben [28, S. 589ff].

### 3.9.1 Luftdruck und Vakuum in der Modernen

Aristoteles glaubte, dass der leere Raum nicht existieren kann. Doch zahlreiche Experimente zeigen, dass Vakua existieren können. Also existiert auch der leere Raum, oder? Das Vakuum existiert. Es ist möglich, Luftmoleküle aus einem Raum zu entfernen. Trotzdem ist dieser luftfreie Raum nicht leer. Photonen, Wärmestrahlung, fluktuierende Quantenfelder, Higgs-Felder und virtuelle Teilchen bevölkern diese „Leere“ [19, S. 2, 56, 194]. Das Vakuum übt keine Kraft aus, trotzdem beinhaltet es eine Energie. Das erinnert konzeptionell stark an die Vorstellung des Horror Vacui. So zeigt sich auch in diesem Thema ein häufiges Phänomen: Neue Erkenntnisse bringen uns weiter im Verständnis der Sachverhalte, doch man kommt sehr häufig, beinahe spiralförmig, wieder zurück zu historischen Erkenntnissen, die im Laufe des Prozesses bereits verworfen wurden.

#### Vakuumenergie

Mit der Vakuumenergie ist in der modernen Physik jene Energie gemeint, welche ein Raum unseres Universums hätte, wenn alle Materie (manifeste Energie) aus ihm entfernt wurde [19, S. 186]. Die Vakuumenergie (genauer gesagt, die Vakuumenergiedichte  $\rho_{vac}$ ) hängt dabei eng mit der von Albert Einstein eingeführten kosmologischen Konstante  $\Lambda$  zusammen. Es gilt:  $\Lambda = (8 \cdot \pi \cdot G)/c^2 \cdot \rho_{vac}$ . Die kosmologische Konstante  $\Lambda$  und die Vakuumenergiedichte  $\rho_{vac}$  sind also direkt proportional zueinander.

Die kosmologische Konstante ergibt sich aus der Summe aller Beiträge zur Energie des leeren Raumes [19, S. 9].<sup>9</sup> Allerdings können wir  $\Lambda$  bis heute nicht direkt beobachten. Nur eine Abschätzung der Einzelbeiträge ist möglich. Die Summe der Einzelbeiträge liegt jedoch aufgrund fehlender Genauigkeit viele Größenordnungen über dem experimentell höchstens erlaubten Wert. Erst eine Theorie, die es ermöglicht, die kosmologische Konstante direkt zu beobachten, würde hier Fortschritte bringen. Eine solche Theorie müsste aber die Quantenmechanik und die allgemeine Relativitätstheorie verbinden [19, S. 9f].

---

<sup>9</sup> Die kosmologische Konstante wurde von Albert Einstein eingeführt, da seine allgemeine Relativitätstheorie ein Universum voraussagte, welches nicht statisch ist, sondern expandiert oder kollabiert. Zu der damaligen Zeit wurde jedoch angenommen, dass es statisch sein müsse. Daher führte Einstein die kosmologische Konstante ein, um diesen „Fehler“ zu korrigieren. Als Hubble 1929 die Expansion des Universums beobachtete, distanzierte Einstein sich von der kosmologischen Konstante und bezeichnete sie als „größte Eselei“ seines Lebens. Nach dem aktuellen Stand der Erkenntnisse hat sie einen leicht positiven Wert, was eine beschleunigte Expansion des Universums bedeutet. In aktuellen Theorien hat sie zudem als Vakuumenergie neue Bedeutung erlangt [19, S. 185].

## Virtuelle Teilchen

Zum einen entstehen virtuelle Teilchen durch quantenmechanische Fluktuationen, die durch die Unschärferelationen für Energie und Impuls hervorgerufen werden [19, S. 63]. Da laut der speziellen Relativitätstheorie Energie und Masse äquivalent sind, können aus dieser fluktuierenden Energie für kurze Zeit massebehaftete Teilchen entstehen. Dabei treten stets Teilchen-Antiteilchen-Paare auf, damit die Ladung erhalten bleibt [19, S. 55].

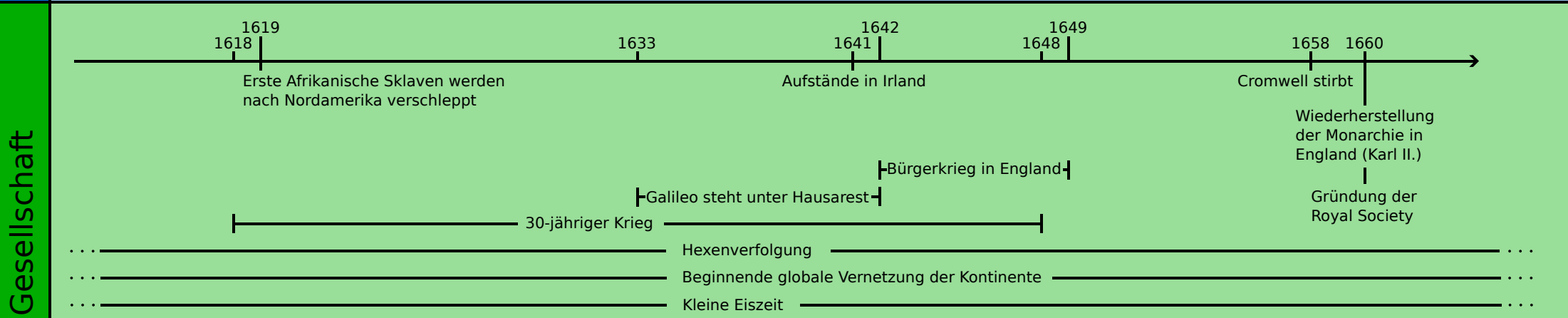
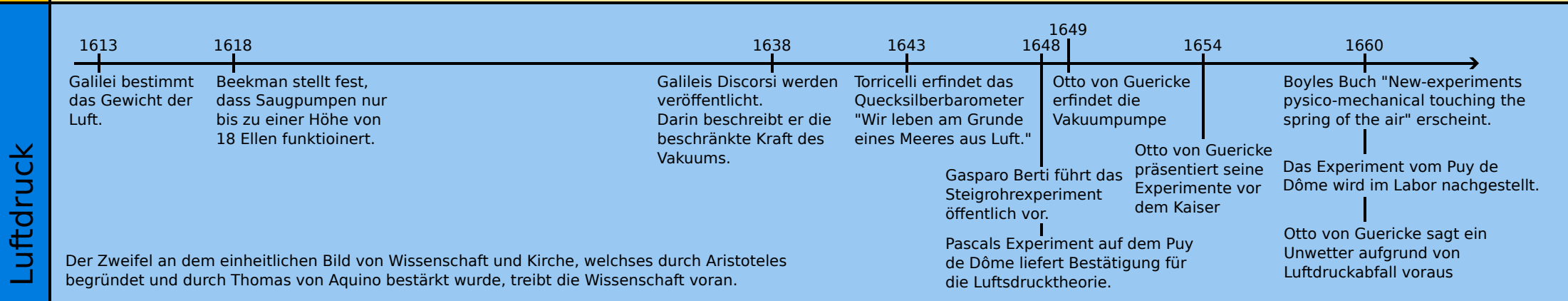
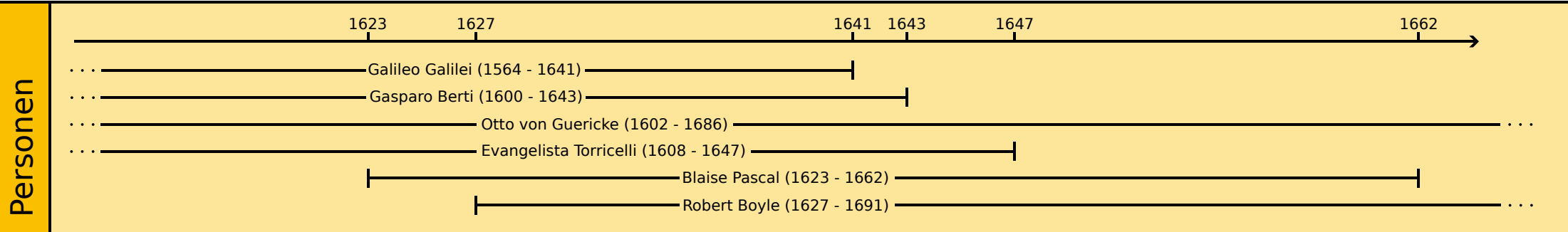
Zum anderen lassen sich virtuelle Teilchen dadurch erklären, dass geordnete Zustände energieärmer sind als ungeordnete [19, S. 9]. Die Natur strebt nach einer Minimierung der Energie und damit auch nach einer Erhöhung der Ordnung.<sup>10</sup> Virtuelle Teilchen entstehen, wenn diese zur Minimierung der Energie beitragen.

## 3.10 Zeittafel

Auf der folgenden Zeittafel sind die Ereignisse in Bezug auf die Entwicklung der Luftdrucktheorie, die Gesellschaft in Mitteleuropa sowie die Lebensspannen der Protagonisten des Lehrstücks zusammengefasst. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der Zeit zwischen 1610 und 1660, da sich dort die Ereignisse konzentrierten.

---

<sup>10</sup> Mit Ordnung ist hier gemeint, dass der Raum von jedem Punkt aus betrachtet gleich aussieht (Isotropie). Bei genügend geringer Temperatur bilden sich geordnete Strukturen, wenn einige virtuelle Teilchen entstehen. Wäre die Temperatur zu hoch würden Stöße dazu führen, dass die Ordnung zerstört würde. Durch die erhöhte Ordnung wird Energie gewonnen. Dieser Energiegewinn ist größer als die Energie  $E = m \cdot c^2$ , die aufgewendet werden muss, um die Teilchen zu erzeugen. Insgesamt wird also die Energie des Systems verringert. Das Entstehen zu vieler Teilchen würde allerdings mehr Energie kosten als es freisetzt [19, S. 7ff].



## 3.11 Gesellschaft in Mitteleuropa 1610 - 1660

Der Hochpunkt der Entwicklungen zur Luftdrucktheorie hat sich in einer Zeitspanne von nur ca. 50 Jahren abgespielt. Weil Entwicklungen in der Physik in engem Zusammenhang zu gesellschaftlichen Phänomenen stehen und diese sich gegenseitig beeinflussen, lohnt es sich, die Gesellschaft dieser Zeit in Mitteleuropa genauer zu betrachten [34, S. 32].

Im 17. Jahrhundert begann durch den europäischen Kolonialismus die globale Vernetzung der Kontinente [33, Kapitel 6]. 1619 werden die ersten Sklaven aus Afrika nach Nordamerika verschleppt [33, S. 345]. Gleichzeitig sorgte die sogenannte kleine Eiszeit für große Hungersnöte aufgrund von Ernteaussfällen. Erst 1750 wurde es wieder wärmer [33, S. 43].<sup>11</sup> Zusätzlich sorgte der 30-jährige Krieg zwischen 1618 und 1648 für Hungersnöte und Seuchen. Er begann als Religionskrieg und war eng verbunden mit der Frage, ob die Verfassungsverhältnisse zentralistisch oder föderalistisch ausgerichtet sein sollten [33, S. 134]. Gleichzeitig war die Hexenverfolgung in vollem Gange [33, S. 98f].

In Irland gab es 1641 Aufstände und in England herrschte 1642-1649 ein Bürgerkrieg um den Streit des Machtverhältnisses zwischen der Monarchie, mit Karl I. als König, und dem Parlament, welches durch Oliver Cromwell angeführt wurde [33, S. 120f]. Der Krieg wurde zu Gunsten der Parlamentarier entschieden und Cromwell stellte die politische Ordnung weitestgehend wieder her [38, S. 31]. Doch als 1658 Cromwell starb, gab es erneut politische Unsicherheiten [33, S. 121] [38, S. 36] und 1660 wurde der Sohn von Karl I. als Karl II. aus dem französischen Exil geholt, um 1661 gekrönt zu werden und die Macht in England zu übernehmen. Die Monarchie wurde wieder hergestellt. Doch dies bedeutete nicht der Rückgang zu den Verhältnissen von 1640. Karl II. musste vor seiner Rückkehr eine Vereinbarung mit dem Parlament unterschreiben, welche sicherstellte, dass er sich mit den von einem Parlament beabsichtigten Regelungen einverstanden erklärt [33, S. 121f].

Auch auf Ebene der Wissenschaft war es eine Zeit des Umbruchs. Die neu entdeckten Welten zeigten den Europäern, dass es Unbekanntes zu entdecken gibt. Die Unantastbarkeit der antiken Gewissheiten wurden hinterfragt [6, S. 70] [34, S. 174]. Die als unumstößlich geltenden Lehren Aristoteles wurden angezweifelt. Doch das aristotelische Weltbild

---

<sup>11</sup> Die kleine Eiszeit in Europa dauerte von 1570 bis 1750 und sorgte für um vier Grad niedrigere Durchschnittstemperaturen. Es kam zu sehr kalten Wintern und verregneten oder heißen Sommern. Die Ursachen für die kleine Eiszeit sind weiterhin unklar, doch die Auswirkungen auf Europa waren gravierend und resultierten in einer erhöhten Sterblichkeit, welche durch Krieg und Seuchen nochmals erhöht wurde [33, S. 31, 43].

lieferte ein geschlossenes System, das Antworten auf nahezu alle Fragen bereithielt. Es musste also als Ganzes akzeptiert oder als Ganzes verworfen werden [6, S. 24] [34, S. 85]. Die Aufgabe, die sich in diesem Jahrhundert stellte, war also das Stürzen des aristotelischen Weltbildes und das Finden eines neuen Systems [34, S. 175f]. Auch das Finden einer neuen wissenschaftlichen Praxis spielte im 17. Jahrhundert eine große Rolle. Hierbei waren die Erkenntnisse der antiken Griechen zentral. Zweifel an der Überzeugung der Griechen, dass grundlegende Naturgesetze allein durch Nachdenken erkennbar wären, führten dazu, dass Experimente durchgeführt und technische Hilfsmittel erfunden wurden. Von den Griechen übernommen wurde jedoch der Grundsatz, dass Abstraktion und Idealisierung für Naturgesetze notwendig sind und diese mit Mathematik beschrieben werden können [34, S. 24, 36f, 199]. So erlangte auch die Mathematik zunehmend an Bedeutung für Wirtschaft und Wissenschaft und es wurden Schulen errichtet, an denen Mathematik gelehrt wurde [6, S. 70f].

Durch das Hinterfragen von Aristoteles Lehren wurde auch die Macht der Kirche in Frage gestellt. Denn die Prinzipien dieses Weltbildes waren durch Thomas von Aquino stark mit dem Glauben verknüpft [34, S. 37]. Zeichen dieses Kampfes ist unter anderem die Hinrichtung von Giordano Bruno, welcher dafür plädierte, das aristotelische Weltbild zu hinterfragen [34, S. 174f]. Weil Galilei mit seinem *Dialogo* dem geozentrischen Weltbild der Kirche widersprach, wurde das Buch verboten und er wurde im Jahre 1633 zu lebenslanger Haft verurteilt. Diese Haft wurde später in Hausarrest umgewandelt. Dort schrieb Galilei sein zweites Hauptwerk, die *Discorsi*, in denen er Aristoteles Lehren widersprach [15, S. 253f] und unter anderem die Entdeckungen zum Thema Luftdruck und Vakuum vorantrieb. Sein Buch verbreitete sich durch ganz Europa und regte andere Wissenschaftler zum Forschen an. Der Prozess gegen Galilei zeigt daher wie aussichtslos es war, die neuen Entwicklungen aufzuhalten. Mit Galileis *Discorsi* wurde der Blick auf die irdischen Zustände verändert [6, S. 85].

Im Jahre 1663 wurde die Royal Society gegründet [32]. Sie ist ein Symbol für die neue wissenschaftliche Praxis, die im 17. und 18. Jahrhundert in Europa entstand und sich von dort aus in die ganze Welt verbreitete [6, S. 7]. Gleichzeitig verloren die Universitäten an Bedeutung, weil sie an den Lehren Aristoteles' festhielten [34, S. 174]. Erst Ende des 18. Jahrhunderts gewannen sie diese wieder zurück, als sie sich der neuen Wissenschaft grundlegend öffneten [6, S. 86].

# 4 Didaktik

Als Lehrstück werden in der Lehrkunstdidaktik Unterrichtspläne bezeichnet, die sich mit bedeutsamen wissenschaftlichen oder kulturellen Themen auseinandersetzen, welche in der Pädagogik beziehungsweise Didaktik eine zentrale Rolle spielen („exemplarisch“). Diese Themen werden auf entdeckende Art und Weise erarbeitet („genetisch“) und lebendig und anregend gestaltet („dramaturgisch“).

In dem Lehrstück „Pascals Barometer“ werden die fachwissenschaftlichen und historischen Erkenntnisse Leere und Luftdruck thematisiert. In diesem Lehrstück hat „genetisch“ eine doppelte Bedeutung. Einerseits sollen die Schüler\*innen den Weg der Erkenntnis zur Luftdrucktheorie selbst beschreiten (individualgenetisch), andererseits orientiert sich die Erkenntnisfindung an der historischen Entwicklung (kulturgenetisch).

Im Folgenden schildere ich zunächst die Grundzüge der Lehrkunst und des kulturgenetisch orientierten Lehrkunstunterrichts. Anschließend beschreibe ich das Lehrstück „Pascals Barometer“ von Marc Eyer und schlage Abwandlungen und Ergänzungen dafür vor.

## 4.1 Lehrkunst

Wissenschaft besteht aus vielen Aspekten die selbstverständlich erscheinen, wenn sie erst einmal erklärt und verstanden sind. Doch der Prozess des Erklärens hat historisch häufig mehrere Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende gedauert und das Verstehen ist ein Prozess, den jede\*r für sich selbst durchlaufen muss.

Um etwas wirklich zu verstehen reicht es nicht, die Fakten präsentiert zu bekommen. Sie müssen nachvollzogen und verinnerlicht werden. Deswegen ist das Prinzip der Lehrkunst, die Schüler\*innen die Inhalte selbst erkunden zu lassen, damit sie die Wissenschaft nachvollziehen und das Besondere hinter den Erkenntnissen entdecken können. Die hierzu entworfenen Unterrichtseinheiten werden Lehrstücke genannt. Sie bewegen

sich vor allen Dingen auf phänomenologischer Ebene, basieren auf Beobachtungen und verwenden eine für Kinder und Laien gut zugängliche Sprache [13, S. 41].<sup>1</sup>

Die Lehrkustdidaktik wurde durch den Schulpädagogen Hans Christoph Berg, auf Basis des exemplarischen Lernens des Physikdidaktikers Martin Wagenschein und der Bildungstheorien Klafkis, begründet. Wichtig sind insbesondere die Konzeptbände „Die Werkdimensionen im Bildungsprozess“ von Hans Christoph Berg [2] und „Lehrstückunterricht gestalten“ von Susanne Wildhirt [56]. Aufgrund ihres gegenstandsorientierten Ansatzes kann die Lehrkustdidaktik in jedem Unterrichtsfach sowie für interdisziplinäre Fragestellungen eingesetzt werden [13, S. 22].<sup>2</sup>

Das primäre Ziel der Lehrkunst ist es, die Schüler\*innen für die Inhalte zu begeistern und ihr Verständnis zu fördern. Wissenschaftlichkeit im Sinne von präziser Fachsprache und Rechnungen soll erst erfolgen, wenn die Grundzüge verstanden und die Begeisterung entfacht wurde. So erhalten die Formeln eine Bedeutung [12, S. 126]. Für diesen Verstehensprozess soll viel Zeit genommen werden, damit sich alle Schüler\*innen die Inhalte erschließen können. In diesem Lehr-Lern-Prozess muss Ratlosigkeit ausgehalten, Ideen kritisch geprüft und im Gespräch nach Lösungen gesucht werden [12, S. 58].

Ein wichtiger Aspekt der Lehrkunst ist das Einbeziehen von Vorerfahrungen und Präkonzepten der Schüler\*innen. Die Lehrkunst vertritt die Ansicht, dass die Einnahme einer objektiven Betrachtung für die Wissenschaft von grundlegender Bedeutung ist. Für die Pädagogik ist jedoch wichtig anzuerkennen, dass die Subjektivität der Zugang zur Welt und die Grundlage des Lernens ist. Scheinbaren Misserfolgen des Erfahrungswissens (häufig Fehlvorstellungen genannt) soll nachgegangen werden, um die Ursachen zu ergründen und den Bezug zur wissenschaftlichen Erkenntnis herzustellen [13, S. 18f, 45].<sup>3</sup>

Der Lehrkunst zufolge soll zudem ein großer Fokus auf den Bildungsprozess gelegt werden [13, S. 15]. Die Lehrkunst stützt sich dabei wesentlich auf Klafkis Bildungsbegriff und seine Theorie der kategorialen Bildung. Ihm zufolge ist Bildung die wechselseitige

---

<sup>1</sup> Das dahinterstehende Prinzip „Umgangssprache vor Fachsprache“ geht auf Martin Wagenschein zurück. Er schrieb: „Die Muttersprache ist die Sprache des Verstehens, die Fachsprache besiegelt es, als Sprache des Verstandenen.“ [37, S. 138]

<sup>2</sup> Eine Sammlung von Lehrstücken aus den verschiedensten Unterrichtsfächern ist zu finden unter <https://www.lehrkunst.org/lehrstuecke-tabelle/>.

<sup>3</sup> Hierzu führt Eyer als Beispiel die Beobachtung einer Kugel an, welche durch einen spiralförmig gewundenen Schlauch geschickt wird. Wie wird die Kugel austreten? Gerade? In Richtung der Windung? Oder entgegen der Windung? Das Erforschen der Ursache für die unterschiedlichen Antworten kann helfen, etwas über die physikalischen Denkweisen der Schüler\*innen zu erfahren und das Phänomen besser zu verstehen [13, S. 43ff].

Erschließung von Mensch und Welt [13, S. 39]. Dies geschieht durch das Aufeinanderbeziehen von Inhalt und Methode anhand ausgewählter exemplarischer Inhalte [13, S. 15]. Dabei soll ein ganzheitlicher Blick auf die betrachteten Phänomene eingenommen werden. Das Unerklärliche soll zum Anlass genommen werden, über die Vielfalt und Komplexität realer Erscheinungen zu sprechen. Auf diese Weise ist es beispielsweise möglich, den Modellcharakter (schul-) physikalischer Konzepte zu thematisieren [13, S. 47].

Voltaire schreibt dazu „In der Physik ist der Zweifel oft das, was in der Mathematik der Beweis ist: das Resultat einer richtigen Schlussfolgerung“ [20, S. 21]. In der Geschichte der Physik haben Zweifel häufig zu neuen Erkenntnissen geführt. Durch Torricellis Zweifel an Galileis Theorie zur „Kraft des Vakuums“ konnte sich die Erkenntnis zum Luftdruck entwickeln. Die Schüler\*innen sollen in die Lage versetzt werden, „mündig über den Einbezug neuer Konzepte in das persönliche, gesellschaftliche und politische Wirken zu entscheiden“ [13, S. 17]. Die Präkonzepte der Schüler\*innen sind sinnstiftend miteinander vernetzt und haben sich bereits im Alltag als taugliche und erfolgreiche Erklärungsmuster erwiesen. Daher sind Präkonzepte sehr persistent und der sogenannte „confirmation bias“ sorgt dafür, dass Interpretationen bevorzugt werden, welche die eigenen Konzepte unterstützen [30]. Werden die Präkonzepte der Schüler\*innen übergangen, birgt dies die Gefahr, dass sie das „Vertrauen in ihr physikalisches Erfahrungswissen verlieren und der Physik mit gemischten Gefühlen gegenüberstehen“ [13, S. 46]. So schreibt schon Kepler in dem IV. Buch der Harmonie der Welt: „Erkennen heißt, das äußerlich Wahrgenommene mit den inneren Ideen zusammenbringen und ihre Übereinstimmung zu beurteilen“ [20, S. 16]. Dementsprechend muss das neu erlangte Wissen mit den Alltagserfahrungen der Schüler\*innen verknüpft werden, damit sie das Wissen einordnen und an ihren Erfahrungen verifizieren können sowie die Bedeutung der Forschungsergebnisse verstehen [13, S. 39, 59]. Die alltäglichen Wahrnehmungen sollen dabei nicht durch ein wissenschaftliches Paradigma ersetzt werden. Vielmehr geht es darum, die eigenen alltäglichen Standpunkte zu reflektieren und eine bewusste Beziehung zwischen ihnen und einer wissenschaftlichen Weltanschauung zu schaffen [13, S. 61, 111].

### 4.1.1 Lehrstücke

Lehrstücke sind erkenntnisorientierte, gründliche, gegenstandsorientierte Unterrichtseinheiten, die nach und nach über mehrere Jahre in sogenannten Lehrkunstwerkstätten<sup>4</sup> und in der Unterrichtspraxis entwickelt werden [13, S. 4f, 22, 38]. Lehrkustdidaktik ist eine Didaktik, die aus der Praxis gewachsen ist und sich ständig weiterentwickelt. Das Verschränken von Theorie und Praxis ist ihr zentrales Anliegen [13, S. 3].

Fundamental für die Komposition von Lehrstücken ist die Methodentrias „exemplarisch – genetisch – dramaturgisch“ nach Hans Christoph Berg basierend auf Ideen von Martin Wagenschein [13, S. 8] [3]. In Lehrstücken werden Menschheitsthemen dramaturgisch aufbereitete und auf entdeckende Art und Weise vermittelt [13, S. 5, 10].

#### Exemplarisch

Eine exemplarische Themenauswahl bedeutet, Themen zu wählen, an denen grundlegende und allgemeine Einsichten und Fähigkeiten gewonnen werden können [13, S. 154]. Es sind kulturhistorische und menschengeschichtliche Errungenschaften, die stellvertretend für andere Entdeckungen und Erkenntnisse stehen, die unsere Kultur noch heute wesentlich prägen [13, S. 9, 57]. Dabei sollen diese Kernthemen Faszination ausstrahlen und zum Wundern, Rätseln und Staunen anregen [13, S. 8]. Ein Ausgangsphänomen bietet den Anlass, sich auf Entdeckungsreise zu begeben [13, S. 59]. Hieraus entwickelt sich eine Sogfrage. Eine ansprechende und fesselnde Fragestellung, die im Laufe des Lehrstücks aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet, diskutiert und im Finale des Lehrstücks geklärt wird [13, S. 11].

#### Genetisch

Diese exemplarischen Themen werden in einem Lehrstück genetisch entdeckt. Die Schüler\*innen sollen dabei die Entdeckungen nach-entdecken. Durch das individuelle Erkunden der Zusammenhänge stellen die Schüler\*innen einen inneren Bezug zu dem Thema her, was den Lernprozess begünstigt [13, S. 10]. Die Aufgabe der Lehrperson besteht darin, diesen Prozess zu begleiten. Sie muss den Schüler\*innen genügend Freiheiten lassen, damit sie den Weg selbst gehen können und erkennen, an welcher Stelle Hilfen und

---

<sup>4</sup> In Lehrkunstwerkstätten tauschen sich Lehrkräfte miteinander über Lehrstücke aus, üben diese gemeinsam, besprechen unterschiedliche Lehrstückversionen und diskutieren über Details und Verbesserungsmöglichkeiten [13, S. 38].

Richtungsweisungen für den Lernprozess hilfreich beziehungsweise notwendig sind. Die Präkonzepte, Vorstellungen und Denkweisen der Schüler\*innen müssen dabei von der Lehrperson verstanden werden, um den Lernprozess passend zu begleiten und die Schüler\*innen bei ihrem individuellen Wissensstand abzuholen [13, S. 156]. Eine Schwierigkeit besteht darin, beharrlich zu bleiben, dass die Schüler\*innen den Weg selbst gehen sollen. Diese Art des forschenden Lernens ist sehr ungewohnt und häufig fordern die Schüler\*innen die Lehrperson auf, das „Rätsel“ endlich zu lösen [13, S. 85, 157].

### **Dramaturgisch**

Durch den Aufbau eines Lehrstücks soll die Entwicklung des Erkenntnisprozesses zur Geltung gebracht werden. Die einzelnen Sequenzen werden in Analogie zu Theaterwerken in Eröffnung, Akte, Höhepunkte und Finale strukturiert. Lehrstücke werden von Lehrkräften komponiert und schließlich inszeniert und nachgespielt [13, S. 5, 11]. Die Hauptperson eines Lehrstücks ist dabei das Phänomen, welches durch das gesamte Lehrstück begleitet wird. Im Lehrstück „Pascals Barometer“ ist dies das rätselhafte Wasserglas, aus dem sich Fragen ergeben und Erkenntnisse gewonnen werden [13, S. 155, 158].

### **4.1.2 Kulturgenetisch orientierter Lehrstückunterricht**

Kulturgenetisch orientierter Lehrkunstunterricht ist eine spezielle Form des dramaturgischen Aufbaus eines Lehrstücks. Dabei wird der Aufbau des Lehrstücks stark an der kulturhistorischen Entwicklung des Themas orientiert, um den Weg der Erkenntnis für die Schüler\*innen nach-empfindbar zu machen. Die folgenden Ausführungen fokussieren sich auf den Physikunterricht, können jedoch auf andere Unterrichtsfächer übertragen werden.

### **Grundprinzip**

Durch das Aufzeigen, Nachvollziehen und Beschreiten des Weges, der zu den physikalischen Konzepten geführt hat, kann es gelingen, moderne naturwissenschaftliche Paradigmen als Konzept in unsere Erfahrungswelt zu integrieren [13, S. 65]. Martin Wagenstein formulierte es noch nachdrücklicher: „Ein naturwissenschaftliches Ergebnis kann gar nicht erst verstanden werden ohne Kenntnis des Weges, der zu ihm führte“ [37, S. 99]. Dabei sollen möglichst viele Originalquellen verwendet werden, um eine Beziehung zu der Geschichte herzustellen [13, S. 83f].

Wird im Physikunterricht nachvollzogen, wie neue Sichtweisen entstanden sind und wie diese das Weltbild beeinflusst haben, trägt dies zur Allgemeinbildung der Schüler\*innen bei [12, S. 58]. Sie sollen zu der Erkenntnis gelangen, dass sie mit ihren Gedanken, Ideen, Erkenntnissen und Konzepten in einer historisch gewachsenen, kulturellen Gesellschaft leben, die sie prägt und formt [13, S. 115]. Geschieht dies nicht, erscheinen Naturwissenschaften, insbesondere die Physik, als etwas Absolutes [13, S. 34]. Doch die Denkmuster und Erklärungsansätze werden stark von dem gesellschaftlichen, sozialen und wirtschaftlichen Hintergrund beeinflusst [6, S. 7]. So wurde beispielsweise die Erforschung des Luftdrucks von der Kirche gehemmt. Zudem können Experimente auf unterschiedliche Weise interpretiert werden und neue Erkenntnisse können zur Umstoßung alter Theorien führen. Simonyi schreibt dazu in seinem umfassenden Buch über die Kulturgeschichte der Physik bis zum Jahre 1995: „Nur die historische Darstellung kann aufzeigen, worin eigentlich der entscheidende Schritt bei einer Entdeckung besteht, der übrigens neben Genialität sehr oft auch eine außergewöhnliche Zivilcourage erfordert hat.“ Anderenfalls wird Schüler\*innen „eine völlig unzutreffende Vorstellung der Einfachheit des Entdeckens neuer Gesetze [vermittelt]“ [34, S. 15]. Dabei sollen auch die Sichtweisen der Gegner der Theorien einbezogen werden, um zu vermitteln, dass die Entdeckung nicht trivial war [34, S. 16].

Die historischen Experimente zeigen die kulturhistorischen Dimensionen unseres Wissens auf und ermöglichen eine implizite Auseinandersetzung mit „Wissenschaftsgeschichte und mit wissenschaftstheoretischen Fragen zur Bildung, Validierung und Begrenztheit von wissenschaftlichen Paradigmen“ [13, S. 34, 144].

### **Lehrstücke aus Kulturgenese entwickeln**

Themen mit Lehrstückpotential lassen sich in der Kulturgeschichte an Stellen finden, „an denen wegweisende Paradigmenwechsel oder gar neue Weltbilder entstanden sind, technische Erfindungen gemacht wurden, neue Prinzipien gefunden oder epochenprägende Werke geschaffen wurden“ [13, S. 56].

Die Kulturgenese entspricht dabei häufig der Individualgenese der Schüler\*innen.<sup>5</sup> Sie haben vielfach die gleichen Fragen, wie die historischen Forscher\*innen, wodurch die Ideen dieser Forscher\*innen helfen können, den Unterricht zu planen und die Inhalte zu verstehen [12, S. 58] [13, S. 157]. Wenn die Entstehung einer neuen Erkenntnis jedoch

---

<sup>5</sup> Eine detaillierte Beschreibung von Kultur- und Individualgenese in Bezug auf das Lehrstück „Pascals Barometer“ ist in Kapitel 3.1.1 von Eyer 2015 [13] zu finden.

sehr verworren ist, muss die Kulturgeschichte zu didaktischen Zwecken, auf transparente Art und Weise, zurechtgerückt werden, um einen nachvollziehbaren Ablauf zu erhalten [13, S. 11, 83]. Das Ziel ist die Darstellung von prinzipiellen Strukturen der Wissenschaftsentwicklung. Ein Anspruch auf eine vollständige Darstellung der Kulturgenese besteht nicht [13, S. 76].

### **Aristotelik, Klassik und Moderne**

Um Lehrstücke zu entwickeln, kann die Wissenschaftsgeschichte grob in drei Epochen unterteilt werden. Die Aristotelik (Anthropozentrik), die Klassik (Idealisierungen und mathematische Modelle) und die Moderne (universelle Verallgemeinerung) [13, S. XX-XI, 63]. Charakteristisch für die Aristotelik ist eine direkte Anschauung der Welt, bei welcher der Mensch im Zentrum steht. Unmittelbare Beobachtungen sind dabei die Grundlage naturwissenschaftlicher Theorien. In der Klassik rückt der Mensch als Maßstab immer weiter in den Hintergrund [13, S. 69]. Es wird nach Idealisierungen der Beobachtungen gesucht, anschauliche Modelle werden gebildet und die Erkenntnisse werden mit Hilfe der Mathematik beschrieben.<sup>6</sup> In der Moderne wird nach universellen Verallgemeinerungen und fundamentalen Prinzipien gesucht [13, S. 76]. Die Theorien der Moderne sind schwierig zu verstehen, da sie aufgrund fehlender Analogien in der direkt erfahrbaren Welt wenig anschaulich sind, sie ausschließlich kognitiv erfasst werden können und die Mathematik zur Beschreibung dieser Theorien sehr abstrakt ist [13, S. 68, 71]. Jedoch gewinnt der Mensch in modernen Theorien der Physik eine neue Bedeutung. „Objekte verhalten sich gänzlich unterschiedlich, ob sie beobachtet werden oder nicht“ [13, S. 49].

Der Schulunterricht beschäftigt sich in der Regel hauptsächlich mit der klassischen Physik [13, S. 63]. Die Aristotelik wird zumeist entweder vollständig ausgelassen oder als Beweis des wissenschaftlichen Fortschrittes genutzt und erscheint somit überholt und unwissenschaftlich. Und auch die Moderne wird größtenteils ausgelassen, weil sie als zu komplex gilt. Um einen Sachverhalt vollständig verstehen zu können, sind jedoch die Sichtweisen aller drei Epochen notwendig.

Kulturgenetisch orientierter Lehrkunstunterricht soll sich dementsprechend in allen drei Weltbildern (Aristotelik, Klassik, Moderne) bewegen und einen Bezug zwischen diesen

---

<sup>6</sup> Dieser Vorgang der Abstraktion wird Galilean Purification genannt. Dabei werden komplexe reale Beobachtungen auf das Wesentliche, aber alltagsferne Beobachtungen reduziert. Es werden Idealisierungen vorgenommen, durch welche es möglich ist, Gesetzmäßigkeiten zu entwickeln. In realen Beobachtungen ist allerdings zu beachten, dass keine idealisierte Situation vorliegt [7] [13, S. 65].

drei Weltbildern herstellen. Diese umfassende Betrachtung des Unterrichtsgegenstandes soll helfen, „die tiefen Gräben zwischen Alltag (Aristotelik), Schule (Klassik) und Wissenschaft (Moderne) zu schließen“ [13, S. VI]. Auch belegen Untersuchungen von Fritz Kubli, dass der Zugang zum Lernstoff durch historische Bezüge erleichtert wird und Schüler\*innen dadurch zum Physiklernen motiviert werden können [24, S. 260].

Eine Möglichkeit, um eine Verbindung zwischen den Weltanschauungen zu erzeugen, ist, dass naturwissenschaftlicher Unterricht bei den Anschauungen der Schüler\*innen ansetzt und die subjektiven Wahrnehmungen einbezieht (Aristotelik), um ihnen so einen persönlichen Zugang zu den Inhalten zu ermöglichen und eine Verknüpfung zu ihren alltäglichen Erfahrungen herzustellen [13, S. 64ff]. Diese Verwurzelung in den Beobachtungen ermöglicht es anschließend, basierend auf dem historischen Werdegang, die klassische Abstraktion, also die Loslösung von menschlichen Normen nachzuvollziehen [13, S. 70]. Die darauffolgende Einordnung des Themas in die Moderne ist für ein vollständiges Bild der wissenschaftlichen Entwicklung notwendig. Sie verleiht ihm aktuelle Relevanz [13, S. 71]. „[D]er Zugang zu Erkenntnis führt immer über den Weg vom individuellen persönlichen Wahrnehmen und Beschreiben, über die Abstraktion zu allgemeinen Modellen und allgemeingültigen Prinzipien“ [13, S. 72].

### 4.1.3 Lehrkunst im Schulalltag

Lehrstücke werden oft über Jahre entwickelt, sind aufwendig vorzubereiten und benötigen viel Zeit in der Durchführung. Speziell das selbstständige Ergründen und die Verknüpfung der Erkenntnisse mit der Lebenswelt der Schüler\*innen benötigen viel Zeit. Doch gerade dieser persönliche Bezug zu den Lerninhalten erfüllt das Wissen mit Bedeutung [13, S. 38f, 85]. Lehrstücke sind daher nicht dazu geeignet, den Unterricht vollständig abzudecken, können aber gezielt zur Bereicherung des Curriculums und zur Erweiterung der Methoden eingesetzt werden [13, S. 35ff]. Sie eignen sich besonders zum Einstieg in den Physikunterricht. Schüler\*innen wird ein ganzheitlicher Zugang zu dem Fach ermöglicht und ein Einstieg in die Denk- und Arbeitsweisen der (Natur-) Wissenschaften vermittelt. Zudem wird hierdurch der Blick auf die Phänomene und die Begeisterung für diese gerichtet [13, S. 36]. Falls nur wenig Zeit zur Verfügung steht, kann lehrkünstlerisches, erkenntnisorientiertes, begeisterungsförderndes Unterrichten jederzeit in kürzeren Sequenzen eingesetzt werden [13, S. 33ff].<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Weitere Informationen zur Lehrkünstlerdidaktik sind in Eyer [13], Wagenschein [37] und Wildhirt [56] zu finden. Weitere Informationen zum kulturgenetisch orientierten Lehrkünstlerunterricht finden

## 4.2 Lehrstück „Pascals Barometer“

Ausgehend von einem „Wasserglas in einem Spülbecken, aus dem Wasser nicht auslaufen «will», wenn man es verkehrt aus dem Becken zieht [und den unteren Rand vom Glas unter der Wasseroberfläche lässt]“ [13, S. 85] werden in dem Lehrstück „Pascals Barometer“ die Ideen von der „Kraft des Vakuums“ und des Luftdrucks entwickelt und anhand von Experimenten untersucht. Das Lehrstück wurde nach einer Vorlage von Martin Wagenschein durch Ueli Aeschlimann und Marc Eyer entwickelt [12]. Im Folgenden werde ich mich auf die Lehrstückversion von Marc Eyer beziehen, da diese für die Inszenierung in der Schule konzipiert wurde.

### Ouvertüre – Das Experiment mit dem Wasserglas



**Abbildung 4.1:** Martin Wagenschein 1983 bei der Besprechung des Phänomens, welches durch das Lehrstück „Pascals Barometer“ leitet [54].

Das Lehrstück beginnt mit einem Wasserglas, welches voll mit Wasser gefüllt und anschließend mit der Öffnung nach unten im Wasserbecken umgedreht wird, sodass der Rand des Glases weiterhin unter der Wasseroberfläche ist. Das Wasser fließt nicht aus. Warum? Über die Gründe dafür diskutieren die Schüler\*innen in einem sokratischen Gespräch.<sup>8</sup> Die Lehrkraft motiviert die Lernenden zum Hinschauen und Nachfragen. Es

sich in Eyer [13]. Eine ausführliche Darstellung physikalischer Geschichte wird in Simonyi [34] beschrieben.

<sup>8</sup> In einem sokratischen Gespräch diskutieren Schüler\*innen untereinander über das vorliegende Phänomen. Die Schüler\*innen ergründen dabei das Phänomen und sollen ihre Ideen vorurteilsfrei

werden weitere Experimente durchgeführt, um den Gedanken und Hypothesen der Schüler\*innen nachzugehen.<sup>9</sup> Dafür setzt die Lehrkraft das Phänomen in Szene und lenkt das Gespräch sanft in die gewünschte Richtung. Am Ende der Ouvertüre stehen die Idee des Horror Vacui und die Luftdrucktheorie einander gegenüber.<sup>10</sup> Dies entspricht den gegenüberstehenden Paradigmen im 17. Jahrhundert. Im Folgenden wird, in Anlehnung an die Kulturgenealogie, beiden Theorien nachgegangen, um zu entscheiden, welche die zutreffendere ist [13, S. 112f].

### Material:

- Wasserwanne mit Wasser
- Hohes Trinkglas<sup>11</sup>
- Weitere Gefäße wie
  - Petrischale
  - Reagenzgläser
  - eine bauchige Glasflasche
  - transparenter Plastikschlauch (20 - 30 cm)

---

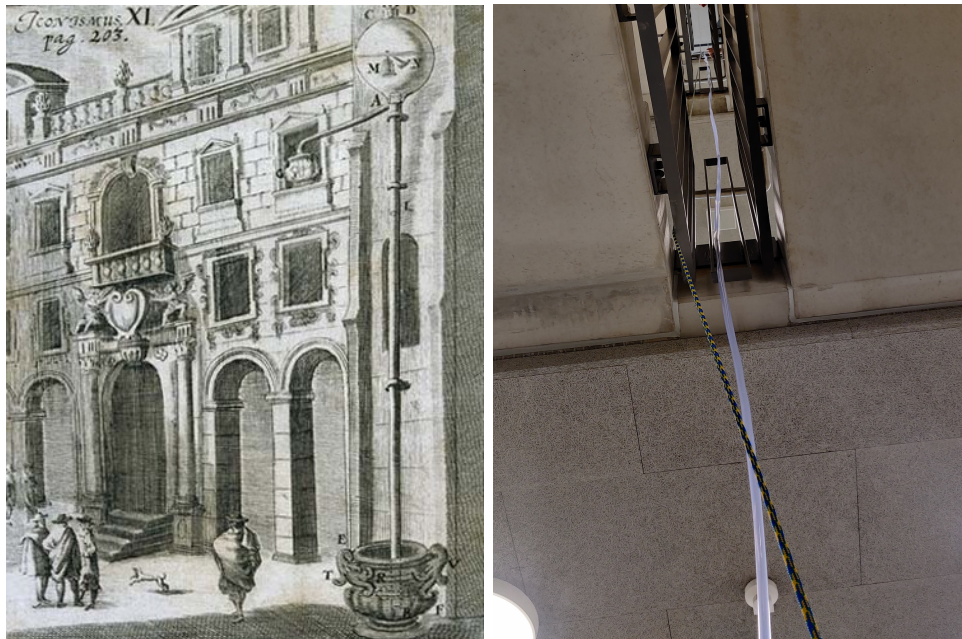
äußern können. Damit dies gelingen kann, muss versucht werden, sich ausschließlich auf die Beobachtung des Phänomens und die sich daraus ergebenden Erkenntnisse zu konzentrieren. Wissen vom Hörensagen und auswendiggelerntes Schulwissen sollen bestmöglich zurückgelassen werden. Es wird in Alltagssprache ohne Fachbegriffe kommuniziert, um Authentizität zu erreichen und besser bemerken zu können, ob das Gesagte wirklich verstanden wurde. Für diesen Prozess muss ausreichend Zeit eingeplant werden. Um- und Irrwege sind explizit zugelassen und auch mehrfaches Formulieren des gleichen Sachverhaltes ist ein wichtiger Aspekt, um das Phänomen und die damit verbundene Fragestellung für alle wahrnehmbar zu machen. Die Lehrperson soll sich dabei so weit wie möglich aus dem Gespräch heraushalten. An der ein oder anderen Stelle kann es dennoch notwendig sein, Impulse zu geben, um das didaktische Ziel zu erreichen [13, S. 85f, 113].

<sup>9</sup> Die hierbei vorgeschlagenen Experimente können sehr unterschiedlich sein. Häufig beinhalten sie den Vorschlag, ein kleineres Wasserbecken oder ein größeres Glas zu nehmen. Aber auch Vorschläge, wie die Verwendung eines halbvollen Glases oder das Pusten von Luft in das Glas, mit Hilfe eines Schlauches, treten hierbei auf.

<sup>10</sup> Horror Vacui bezeichnet die Idee, dass die Natur eine „Abscheu gegen das Vakuum“ hegt und ein Vakuum nicht zulässt. In Bezug auf das Experiment ist dies die Idee, dass das Wasser nicht herausläuft, weil sonst ein Vakuum entstehen würde, was die Natur nicht zulässt. Dies ist in diesem Fall die intuitive Idee. Die Idee, dass der Luftdruck auf die Wasseroberfläche drückt und dadurch das Wasser im Glas hält, wird vor allen Dingen deswegen genannt, weil es nahezu unmöglich ist, das Vorwissen vollständig abzulegen [13, S. 113].

<sup>11</sup> In der Vorlage von Martin Wagenschein wird ein Bierglas verwendet. Diese Verbindung zum Alkohol soll bei der Durchführung in einer Schule jedoch vermieden werden.

## 1. Akt: Der lange Wasserschlauch (Gasparo Berti)

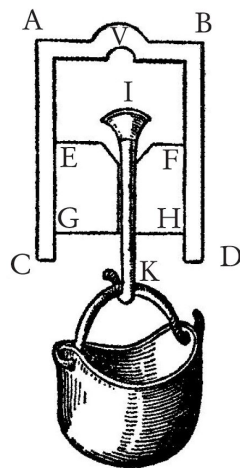


**Abbildung 4.2:** Das linke Bild zeigt ein historisches Gemälde von Berti's Experiment [53]. Rechts ist ein Foto von diesem Experiment durchgeführt in einem Schultreppenhaus.

Im Laufe der Ouvertüre wird, u.U. durch sanfte Steuerung der Lehrperson, die Idee entwickelt zu überprüfen, was passiert, wenn das Wasserglas immer größer wird. Da aufgrund des hydrostatischen Paradoxons (vgl. 2.5 Hydrostatisches Paradoxon) nur die Höhe der Flüssigkeitssäule entscheidend ist, wird im Folgenden ein ca. 12 Meter langer transparenter Schlauch verwendet. Dieser liegt zunächst aufgerollt und vollständig mit Wasser gefüllt in einem mit Wasser gefüllten Becken. Er wird am oberen Ende luftdicht verschlossen. Dann wird der Schlauch im Treppenhaus oder an einer Außenwand nach oben gezogen, während das untere Ende im Wasser des Beckens gehalten wird. Es ist zu beobachten, dass das Wasser bis zu einer Höhe von ungefähr 10 m steigt. Wird der Schlauch dann noch weitergezogen, bleibt der Wasserspiegel auf dieser Höhe und es bilden sich Bläschen im Wasser. Die Fragen, die sich hierbei stellen sind: „Warum bleibt das Wasser stehen? Woher kommen die Blasen im Wasser? Was ist im entstehenden Raum über dem Wasser?“ [13, S. 114] Das Phänomen kann dabei sowohl mit dem Horror Vacui als auch mit dem Luftdruck erklärt werden.

**Material:**

- 12 m langer transparenter Schlauch
- Schraubzwinde, um Schlauch wasserdicht zu verschließen
- Wasserschale
- Hohes Treppenhaus oder Außenwand

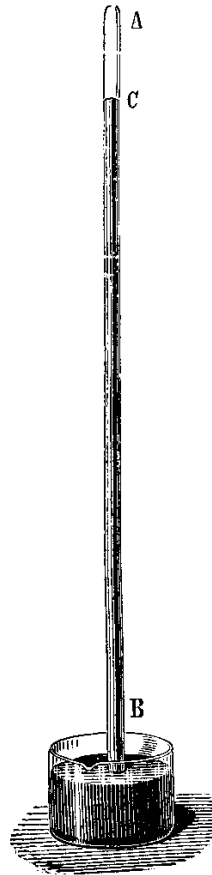
**2. Akt: Die beschränkte Kraft des Vakuums (Galileo Galilei)**

**Abbildung 4.3:** Galileis historisches Experiment zur Bestimmung der beschränkten „Kraft des Vakuums“ [17].

In diesem Akt wird mit Galileo Galilei der Idee des Horror Vacui nachgegangen. Galilei ging davon aus, dass ein künstliches Vakuum möglich sei, wenn eine Kraft dafür aufgewendet wird. Er beschreibt in seinen *Discorsi* [17] eine Methode zur Messung dieser beschränkten „Kraft des Vakuums“. Dazu wird ein Auszug aus Galileis *Discorsi* gelesen (vgl. [A.3 Auszug aus Discorsi](#)). Um sein Experiment nachzuempfinden, wird eine große Spritze zur Hälfte mit Wasser gefüllt und die Öffnung verschlossen. Hierzu kann entweder der Daumen oder ein Drehverschluss verwendet werden. Durch kräftiges Ziehen kann der Kolben herausgezogen werden. Wird er losgelassen, schnellert er zurück. Mit einem Kraftmesser wird gemessen, wie stark gezogen werden muss, damit sich der Kolben bewegt. Hierbei kann überraschenderweise festgestellt werden, dass die benötigte Kraft nicht von der Größe des Vakuums, sondern nur von der Querschnittfläche abhängig ist [13, S. 115]. „Irgendwie ist das komisch, mehr Vakuum sollte doch auch mehr Kraft haben, die zurückzieht?“ [13, S. 134]

**Material:**

- Spritzen mit unterschiedlicher Querschnittsfläche
- Kraftmesser

**3. Akt: Hat die Luft ein „Gewicht“? (Galileo Galilei und Evangelista Torricelli)**

**Abbildung 4.4:** Evangelista Torricelli war der erste, der Quecksilber anstelle von Wasser verwendete [41].

Im Gegensatz zu Galilei, der glaubte, dass die „Kraft des Vakuums“ für die maximale Steighöhe des Wassers verantwortlich ist, glaubte Evangelista Torricelli, dass der Luftdruck das Ausfließen des Wassers verhindert. Um der Luftdrucktheorie nachzugehen, wird in diesem Teil des Lehrstücks das Gewicht der Luft untersucht (Experiment 1 in [A.1.6 Gewicht der Luft](#)). Denn wenn die Luft tatsächlich einen Druck ausüben soll, der das Wasser in dem Glas hält, muss sie eine beträchtliche Masse haben. Interessanter-

weise war es Galilei, der die Idee für die Bestimmung der Masse der Luft vorschlug. Er zog jedoch andere Schlüsse aus der Erkenntnis [13, S. 116]. Nachdem die Dichte der Luft bestimmt ist, wird berechnet, wie groß die Masse der Luft im Klassenzimmer ist. Hierzu können die Schüler\*innen vor dem Experiment Schätzungen abgeben.<sup>12</sup> Aus den Beobachtungen ergeben sich unter anderem die Fragen, wie wir Menschen die Gewichtskraft der ganzen Luft ertragen. Wie viel wiegt die Luft der gesamten Atmosphäre?

Evangelista Torricelli ist der Überzeugung, dass wir am Grunde eines Meeres aus Luft leben. An dieser Stelle geht die ganze Klasse kurz aus dem Schulgebäude, um unter freiem Himmel diesen Gedanken besser nachempfinden zu können [13, S. 138]. Zudem schlägt Torricelli vor, das Wasser in der Steigröhre durch Quecksilber zu ersetzen. Es hat eine wesentlich größere Dichte und somit bereits bei 76 cm seine maximale Steighöhe erreicht. Dadurch wird das Experiment deutlich handlicher [13, S. 116]. Torricelli war zwar ein Verfechter der Luftdrucktheorie, zu diesem Zeitpunkt des Lehrstücks und der Historie ist es jedoch weiterhin unklar, ob der Horror Vacui oder die Luftdrucktheorie die passendere Theorie ist.

### **Material:**

- Glasflasche
- Vakuumpumpe
- Wasserbecken
- Feine Waage (Messbereich bis Milligramm, i.d.R. in Chemiesammlungen zu finden)
- Quecksilberbarometer

---

<sup>12</sup> Abhängig von der Größe des Klassenzimmers sind es um die 120 kg.

## 4. Akt: Die Besteigung des Puy de Dôme (Blaise Pascal)



**Abbildung 4.5:** Der Puy de Dôme in der Nähe von Clermont-Ferrand in Frankreich [48].

Analog zur Kulturhistorie stehen an diesem Punkt im Lehrstück die Theorie des Horror Vacui und die Luftdrucktheorie einander gegenüber. Torricelli hat mit der Quecksilbersäule den Luftdruck nicht bewiesen. Um eine Entscheidung für eine der beiden Theorien treffen zu können, schlug Blaise Pascal 1647 ein Experiment vor, welches sein Schwager Périer durchführte. Er trug ein Quecksilberbarometer, wie auch Torricelli es genutzt hatte, auf den Puy de Dôme (1465 m ü. M.) und beobachtete den Pegelstand. Um dies historisch bedeutsame Experiment nachzuempfinden, wird zunächst der Briefwechsel zwischen Pascal und Périer im französischen Original gelesen (vgl. [A.4 Briefwechsel zwischen Pascal und Périer](#)).<sup>13</sup> Anschließend wird das Quecksilberbarometer im Schulgebäude in die Höhe getragen, um die Veränderungen des Pegelstandes zu beobachten. Es ist festzustellen, dass der Pegelstand mit der Höhe abnimmt, weil der Luftdruck mit der Höhe abnimmt. Denn „auf [dem] Berg [hat man] eine geringere «Luft-Meeres-Tiefe»“ [13, S. 139]. Im Anschluss daran schreiben die Schüler\*innen in ihren eigenen Worten auf, welche Erkenntnisse das Experiment von Pascal liefert [13, S. 117f].

**Material:**

- Quecksilberbarometer
- Hohes Gebäude

<sup>13</sup> Das Lehrstück stammt aus der Schweiz, wo alle Schüler\*innen Französisch lernen.

## 5. Akt: Die Kraft des Luftdrucks (Otto von Guericke)

Otto von Guericke führte spektakuläre Experimente durch, um den Luftdruck zu demonstrieren und das Wissen darüber zu verbreiten. Er entwickelte eine Vakuumpumpe, mit der er seine Experimente durchführte. Um diese Faszination nachzuempfinden, werden an dieser Stelle des Lehrstücks verschiedene Experimente mit Hilfe der Vakuumpumpe durchgeführt. Insbesondere Guericke's Magdeburger Halbkugeln, welche in vielen Physiksammlungen in Schulen vorhanden sind, spielen eine zentrale Rolle. Auch wird das Verhalten verschiedener Dinge unter der Vakuummantel untersucht [13, S. 118].



**Abbildung 4.6:** Die Magdeburger Halbkugeln als Foto (links) und als Zeichnung des historischen Experimentes (rechts) [42].

### Material:

- Vakuummantel
- Magdeburger Halbkugeln
- Schokokuss
- Wasserglas
- Ballon
- Weitere Materialien abhängig davon, welche Experimente durchgeführt werden

**Finale: Schlussrunde (Berti, Galilei, Torricelli, Pascal und von Guericke)**

**Abbildung 4.7:** Das Wasserglasexperiment vom Beginn des Lehrstücks als Miniaturversion unter der Vakuumlucke.

Im Finale des Lehrstücks wird die Wissenschaftsgeschichte noch einmal vollständig betrachtet, indem sich die Schüler\*innen gruppenweise mit einem Wissenschaftler des Lehrstücks beschäftigen. In einer Abschlussrunde stellt je ein\*e Vertreter\*in der Gruppe das Ausgangsphänomen des Wassers im Wasserglas aus Sicht des entsprechenden Wissenschaftlers vor und argumentieren anschließend aus der jeweiligen Sicht und den Experimenten des Wissenschaftlers für eine Begründung des Phänomens. Hierzu werden die Tische jeweils mit einem Portrait des entsprechenden Wissenschaftlers und des dazugehörigen Experimentes gestaltet. Ein\*e Moderator\*in leitet diese Podiumsdiskussion, durch welche der Paradigmenwechsel von dem Horror Vacui hin zur Luftdrucktheorie deutlich wird. Im Anschluss daran wird das Experiment mit dem Wasserglas noch einmal unter der Vakuumlucke wiederholt [13, S. 119, 142f].

„Evakuieren bedeutet, Luftdruck vermindern und schließlich verhindern. Aber genau das geschieht, wenn wir auf den Puy de Dôme steigen, zwar nicht in diesem Ausmaß wie unter der Vakuumlucke. Im Prinzip aber ist es dasselbe. Genau diese Kunst, die Natur im Labor zu modellieren, nachzubilden und daraus Schlüsse der allgemeingültigen Naturgesetze zu formulieren, hat sich mit Galilei etabliert. Sie bildet die Grundlage der heutigen naturwissenschaftlichen Forschung.“

Eyer 2015, S. 147 [13]

### Material:

- Vakuumglocke
- Wasserglas, Reagenzglas und Standfuß
- Fotos der Wissenschaftler
- Gegenstände, welche die Experimente der Wissenschaftler repräsentieren

### Epilog: Postererstellung und Test

Im Anschluss erstellen die Schüler\*innen digitale Poster in Dreier- bis Vierergruppen, auf denen die wichtigsten Erkenntnisse und Informationen zu den Wissenschaftlern festgehalten sind. Eine Woche später findet eine Prüfung über die Inhalte des Lehrstücks statt. Sie beinhaltet, in Analogie zum Lehrstück, qualitative Fragen sowie eine Transferaufgabe [13, S. 119f].

### 4.2.1 Variationen der Inszenierung

Die Lehrstückvariante von Marc Eyer ist für Schüler\*innen konzipiert. Er legt viel Wert auf das Erleben der Physik, das Staunen und das Finden von Erklärungen. Ueli Aeschlimann hat sein Lehrstück für Lehramtsstudent\*innen konzipiert. In seiner Lehrstückversion stellt er den Paradigmenwechsel mehr in den Vordergrund [13, S. 159]. Zudem bespricht Aeschlimann die barometrische Höhenformel und den Einfluss von Luftdruck auf Wetterphänomene [13, S. 152f].

Eine Abwandlung von Marc Eyers Lehrstückversion wurde von Fabienne Freiburghaus<sup>14</sup> erprobt. Sie nimmt Aristoteles mit in die Ahnengalerie auf und bespricht seine Ideen ausführlich [12, S. 87f].

Darüber hinaus gibt es eine unveröffentlichte Lehrstückversion von Björn Gemmer<sup>15</sup>, dessen Struktur sich ebenfalls an der Lehrstückversion von Marc Eyer orientiert. Björn Gemmer integriert vereinzelt Rechnungen und legt großen Wert auf die Anwendung der Inhalte. Hierzu greift er beispielsweise Aeschlimanns Ansätze zur Besprechung des Wetters auf und integriert sie in einer Wahlaufgabe.

---

<sup>14</sup> Fabienne Freiburghaus ist Physik- und Mathematiklehrerin am Gymnasium der Kantonsschule Solothurn.

<sup>15</sup> Björn Gemmer ist Schulleiter der Steinmühle in Marburg und unterrichtet Physik und Mathematik. <https://steinmuehle.de/>

## 4.3 Abwandlungen und Ergänzungen

In diesem Abschnitt greife ich Aspekte aus Marc Eyers Lehrstückversion heraus, die ich kommentiere, schlage Änderungen vor und gebe Anregungen für ergänzende Experimente, welche ausführlich im Anhang beschrieben sind. Damit deutlich wird, wie das Lehrstück nach meinen Überlegungen aussehen würde, befindet sich eine Kurzbeschreibung meiner Lehrstückversion am Ende dieses Kapitels.

### 4.3.1 Denkbild

Das Denkbild eines Lehrstücks fasst den Kern des Lehrstücks symbolisch zusammen. In ihm verdichtet sich der Inhalt und der Lernprozess, sodass an ihm die gewonnenen Erkenntnisse zu sehen sind. In einem Denkbild konzentriert sich die ganze Wissenschaftsgeschichte und sie lässt sich anhand dieses Bildes erschließen [13, S. 10, 166].

Doch was ist das Denkbild für das Lehrstück „Pascals Barometer“? Marc Eyer schreibt dazu:

„Im Experiment des Wasserglases steckt die ganze Phänomenologie, Problematik und Philosophie des Themas und aus dem Wasserglasexperiment lässt sich hier und heute mit gesundem Menschenverstand die ganze wissenschaftliche Diskussion um den Luftdruck und das Vakuum wieder entfalten.“

Eyer 2015, S. 53 [13]

Dennoch wird das Bild des Experimentes nicht zweifelslos als Denkbild für das Lehrstück angesehen. Ist nicht vielleicht doch das Quecksilberbarometer oder die Besteigung des Puy de Dôme charakteristischer für das Lehrstück? [13, S. 167]

Diese Diskussion möchte ich um meine Gedanken ergänzen. Für mich ist in diesem Lehrstück die Frage nach der Leere entscheidend. Kann es das Nichts geben? Was passiert in dem Raum, in dem sich keine Materie befindet? Diese Frage zieht sich durch die (Wissenschafts-) Geschichte und ist bis heute nicht abschließend theoretisch beschrieben. Vielleicht könnte man sogar sagen, dass der Luftdruck, die gewaltige Masse der Luft, erst durch die Suche nach dem leeren Raum entdeckt wurde. Wichtig wäre, dass in dem Denkbild des Lehrstücks der leere Raum enthalten ist. Welche Form er dabei annimmt ist jedoch eine andere Frage. Leere ist weniger ein konkretes Bild als vielmehr ein Konzept. Möglicherweise ist es auch nur ein *DENK*-Bild, was allein in der Vorstellung existiert und nicht gezeichnet werden kann.

### 4.3.2 Aristoteles

Aristoteles ist kein Protagonist des Lehrstücks. Doch seine Überlegungen haben die Diskussion über das Vakuum und den Luftdruck stark geprägt. Seine Vorstellung hat sich viele Jahrhunderte gehalten. So versuchte Galileo Galilei sich von den Lehren des Aristoteles frei zu denken, doch glaubte trotzdem, dass die Natur eine „Abscheu gegen das Vakuum“ hege und lehnte die Luftdrucktheorie ab.

Ist es in Anbetracht seiner historisch wichtigen Rolle vertretbar, dass Aristoteles nicht als Protagonist in dem Lehrstück auftritt? Für mich ist sehr nachvollziehbar, dass Fabienne Freiburghaus in ihrer Inszenierung des Lehrstücks Aristoteles Gedanken zum leeren Raum einen eigenen Platz schafft [12, S. 87ff]. Jedoch erscheint es mir auch sinnvoll, das Lehrstück nicht zu überfrachten. Die Idee von Aristoteles wird zudem, wie bereits angedeutet, zu großen Teilen von Galilei „präsentiert“. In Marc Eysers Version des Lehrstücks werden Aristoteles Ideen auch nach dem sokratischen Gespräch, beziehungsweise vor dem Wasserschlauchexperiment, besprochen, wenn der Horror Vacui und die Luftdrucktheorie gegenübergestellt werden [13, S. 126]. Bei dieser Besprechung kann Aristoteles namentlich erwähnt und in die Ahnengalerie aufgenommen werden. In die Diskussionsrunde am Ende des Lehrstücks würde ich ihn allerdings eher nicht integrieren. Möchte man Aristoteles Ideen tiefgreifender besprechen finde ich es wichtig, dass er auch an der Diskussionsrunde teilnimmt.

### 4.3.3 Berti

Berti tritt als Protagonist auf, da er im Jahre 1630 in Rom präsentierte, dass Wasser nicht höher als etwa 10 Meter steigen konnte. Damit steht er für ein historisch wichtiges Experiment, das später Evangelista Torricelli zu seinen Experimenten veranlasst haben soll. Neues theoretisches Wissen bringt er dabei allerdings nicht ein. Ist er damit ein Gewinn für die Diskussionsrunde am Ende des Lehrstücks? [13, Abschnitt 4.2.4.7]

Ich finde schon. Zwar bringt er nichts konzeptionell Neues ein, doch sein Experiment hat Torricelli und andere zum Nachdenken angeregt. Es zeigte die begrenzte Steighöhe von Wasser und führte zu ausgiebigen Diskussionen über die Ursache dafür. Zudem ist es aus pädagogischer Sicht sinnvoll, einen Wissenschaftler in der Diskussionsrunde zu haben, der etwas ruhiger ist. So können sich mehr Schüler\*innen beteiligen.

Damit die Schüler\*innen Bertis Experiment gut folgen können, ist es wichtig, dass sie das Hydrostatische Paradoxon verstanden haben (2.5 Hydrostatisches Paradoxon).

#### 4.3.4 Galilei

Galilei spielt in dem Lehrstück eine Doppelrolle. Einerseits glaubte er an den Horror Vacui und erfand die Messung der „Kraft des Vakuums“. Andererseits bestimmte er die Masse der Luft und leistete damit einen wichtigen Beitrag zur Luftdrucktheorie. Es erscheint mir sehr wichtig, deutlich zu machen, wie dies jeweils einzuordnen ist, um die Theorien klar voneinander abzugrenzen. Die Zeit, in der unklar ist, welches Paradigma das zutreffendere ist, ist historisch von großer Bedeutung, um die Schwierigkeit der Entscheidung für eine Theorie hervorzuheben. Dadurch wird eine Spannung aufgebaut und der historische Höhepunkt, hier Pascals Experiment auf dem Puy de Dôme, gewinnt an Bedeutung.

Ich schlage daher vor, dass Galilei weiterhin als Verfechter des Horror Vacui präsentiert wird. Bei dem Experiment zum Gewicht der Luft (4.3.5 Gewicht der Luft) ist entsprechend zu erwähnen, dass er sich nicht vorstellen konnte, dass Luft wirklich so schwer sei. Weswegen er, angelehnt an Aristoteles dachte, dass Luft in ihrer natürlichen Umgebung, also wenn sie frei ist, nichts wiege. Im weiteren Verlauf des Lehrstücks kann thematisiert werden, dass Torricelli aus dem Gewicht der Luft andere Schlüsse gezogen hat und daher die Luftdrucktheorie verfolgte.<sup>16</sup>

#### 4.3.5 Gewicht der Luft

Luft wirkt leicht, beinahe „schwerelos“. Sie umgibt uns jeden Tag und doch merken wir kaum etwas von ihr. Dass sie eine Masse haben soll, die eine Kraft auf uns ausübt, ist nicht trivial. Umso wichtiger ist es, mit Hilfe von Experimenten zu zeigen, dass Luft ein Gewicht besitzt.<sup>17</sup> Hierzu können unterschiedliche Ansätze genutzt werden. Da die Bestimmung der Masse der Luft zentral für die Vorstellung der Luftdrucktheorie ist, muss die Vorgehensweise genau beleuchtet werden. Den Experimentvorschlägen im Anhang sind didaktische Kommentare, für eine geeignete Auswahl der Experimente entsprechend der Lerngruppe, hinzugefügt.

- Experimente siehe [A.1.6 Gewicht der Luft](#)

---

<sup>16</sup> Ein Beispiel aus der heutigen Zeit, an dem die Schwierigkeit unterschiedlicher Theorien gut nachvollzogen werden kann, ist der Welle-Teilchen-Dualismus. Dieser ist noch nicht vollständig in einer Formel vereint.

<sup>17</sup> An dieser Stelle meint Gewicht in Analogie zur Alltagssprache sowohl die Masse, welche im Folgenden bestimmt wird, als auch die Gewichtskraft der Luft, welche den Luftdruck verursacht.

### 4.3.6 Torricelli

Zu Torricelli schreibt Fabienne Freiburghaus, dass es in seiner Sequenz einige Unsicherheiten gibt, da unklar ist, wie die Idee des Luftdrucks entstanden ist, wie Torricelli auf die Idee kommt, am Grunde eines Meeres aus Luft zu leben und wie er sich den luftleeren Raum erklärt hat [12, S. 91].<sup>18</sup>

Eine Herausforderung für diesen Teil des Lehrstücks ist zudem, dass die Idee des Horror Vacui tief in den Alltagsvorstellungen verwurzelt ist, die Luftdrucktheorie hingegen nicht. Daher kann es in Inszenierungen dazu kommen, dass Schüler\*innen diese Idee nicht einbringen. Eine offene Frage ist daher, wie die Luftdrucktheorie in diesen Fällen plausibel eingebracht werden kann. Hierzu kann es hilfreich sein, in der Geschichte nach Gründen zu suchen, aus denen die Luftdrucktheorie entwickelt wurde. Diese Frage ist jedoch schwierig zu klären. Hier bedarf es noch weiterer Nachforschungen. Werden weitere Gründe für die historische Entwicklung des Luftdruckbegriffes gefunden, können diese Gedanken im Lehrstück durch Torricelli geäußert werden.

Bis es dazu neue Erkenntnisse gibt, kann die Idee des Luftdrucks sehr gut durch die Feststellung, dass Luft eine Masse hat, motiviert werden. Diese Masse erzeugt eine Gewichtskraft. Ähnlich wie das Wasser im Meer, wodurch das Bild des Lebens am Grunde eines Meeres aus Luft entsteht.

Torricelli erbringt jedoch nicht den Beleg für die Luftdrucktheorie. Er ist lediglich ein Verfechter dieser, noch zu überprüfenden, These. Weitere Experimente müssen durchgeführt werden, um zu entscheiden, welche Theorie die treffendere ist.<sup>19</sup> Dementsprechend ist es in Ordnung, wenn einige Schüler\*innen nach diesem Abschnitt des Lehrstücks noch nicht vollständig von der Vorstellung überzeugt sind, am Grunde eines Meeres aus Luft zu leben.

---

<sup>18</sup> Torricelli versuchte zu verhindern, von der Kirche verfolgt zu werden. Deswegen ging er vorsichtig mit der Verbreitung seiner Ideen um. Studien der nach seinem Tod veröffentlichten Manuskripte „Esperienza dell’ argento vivo“ (deutsch „Quecksilber erleben“) <https://d-nb.info/810499134> und seiner Briefe an den Jesuiten Ricci, könnten zeigen, wie er die Idee des „Meeres aus Luft“ entwickelte. Diese Quellen aus dem Italienischen zu übersetzen und zu interpretieren könnte ein nächster Schritt zur Verfeinerung des Lehrstücks sein.

<sup>19</sup> Torricelli führte weitere Experimente durch. Unter anderem eines, in dem er eine Quecksilberröhre mit einem größerer (Hohl-) Raum am Ende der Röhre verwendete. Die Röhre wurde erst mit Quecksilber gefüllt, dann umgedreht. Torricellis Gedanke dabei war: Wenn tatsächlich die „Kraft des Vakuums“ verantwortlich für die Steighöhe ist, müsste der Quecksilberspiegel in dieser Röhre mit dem größeren Hohlraum höher sein, da mehr Vakuum mit mehr Kraft vorhanden ist. Tatsächlich war die Höhe des Quecksilberspiegels jedoch gleich. Dies sah er als Beweis, dass die Theorie des Horror Vacui nicht stimmen kann. Dass die Luftdrucktheorie richtig ist, hatte er damit jedoch noch nicht bewiesen.

### 4.3.7 Pascal

Pascals Experiment, die Besteigung des Puy de Dôme, stellt den Höhepunkt des Lehrstücks dar. Der nachempfundene historische Moment liefert die Erkenntnis, dass die Höhe, bis zu welcher Flüssigkeiten in einer Röhre steigen, abhängig vom Luftdruck ist.

Bevor im Lehrstück Pascals Experiment durchgeführt wird, sollten beide Theorien gleichberechtigt als möglich angenommen werden. Dadurch wird die Bedeutung des Experimentes von Pascal hervorgehoben und der Paradigmenwechsel akzentuiert. Gleichzeitig können die Schüler\*innen, die noch an der Luftdrucktheorie zweifeln, gespannt dem Experiment von Pascal folgen, ohne von einer neuen Vorstellung überwältigt zu werden.

Doch dieses wichtige Experiment ist voraussetzungsreich in Umsetzung und Verständnis. Es lässt sich nur schwierig durchführen, weil die richtigen Rahmenbedingungen gegeben sein müssen. In der Schule muss ein Quecksilberbarometer existieren und es muss auf unkomplizierte Weise möglich sein, größere Höhen zu überwinden, ohne das Quecksilberbarometer zu gefährden, da eingedampfter Quecksilberdampf hochgiftig ist. Beides ist in vielen Schulen leider nicht gegeben. Doch auch wenn die Voraussetzungen gegeben sind, verändert sich die Säule nur um wenige Millimeter.<sup>20</sup> Dieser historisch bedeutsame und spektakuläre Versuch ist dadurch für die meisten Schüler\*innen wenig beeindruckend in der Beobachtung. Es könnte sogar sein, dass einige Schüler\*innen den Effekt überhaupt nicht sehen. Eine weitere Schwierigkeit besteht in den Verstehensgrundlagen des Versuches. Den Schüler\*innen muss bewusst sein, dass der Luftdruck nach oben hin abnimmt. Dies ist notwendig, damit aus der Beobachtung, der sinkenden Quecksilbersäule der Zusammenhang zum sinkenden Luftdruck gezogen wird.

#### Zur Vorstellung, dass der Druck nach oben abnimmt

Es kann hilfreich sein nachzuvollziehen, weshalb Pascal der Überzeugung war, dass der Luftdruck nach oben hin abnimmt. Vielleicht wusste er, dass die Atmosphäre endlich ist und schloss daraus, dass die Luftdichte und damit auch der Luftdruck nach oben hin abnehmen musste. Vielleicht hat er auch die Veränderungen des Drucks beim Besteigen eines Berges gespürt. Sicher wissen wir es nicht, doch beide Erklärungsansätze können den Schüler\*innen helfen, das Phänomen zu verstehen. Hier kann die historische Korrektheit verringert werden, um den didaktischen Nutzen zu stärken.

<sup>20</sup> In Eyers Inszenierung wurden 20 Höhenmeter mit Hilfe eines Aufzuges überwunden, was zu einer Veränderung der Säule um 2 mm führte [13, S. 140].

Eine weitere Vorstellung, die genutzt werden kann, um sich die Druckabnahme mit zunehmender Höhe vorzustellen, ist das Tauchen in die Tiefe. Aus dem Schwimmbad werden viele Schüler\*innen kennen, dass der Druck größer wird, je tiefer sie ins Wasser tauchen. Nach oben wird der Druck geringer. Das gilt auch, wenn man sich aus dem Wasser heraus bewegt und in der Luft in die Höhe steigt. Zudem haben einige Schüler\*innen möglicherweise auch schon einmal den geringeren Druck in einem Flugzeug gespürt.<sup>21</sup>

### Zur Umsetzung des Experimentes

Wenn die Schüler\*innen durchschaut haben, dass der Luftdruck mit der Höhe abnimmt, kann das eigentliche Experiment durchgeführt werden. Hierbei geht es vor allen Dingen um die Symbolik. Das Experiment soll erlebt werden, um durch die Bewegung im Raum zu erfahren, dass die Atmosphäre der entscheidende Faktor ist.

Falls die Voraussetzungen für das Experiment in der Schule gegeben sind, kann es der historischen Weise nachempfunden und mit dem Quecksilberbarometer durchgeführt werden. Der dabei zu beobachtende kleine Effekt reicht aus, um das Experiment und dessen Bedeutung zu besprechen. Die Beobachtungen sollten jedoch später noch einmal mit einem anderen Barometer beziehungsweise größerer Höhe nachempfunden werden. Dies kann in das Lehrstück integriert oder im Anschluss an die Diskussionsrunde geschehen (vgl. [4.3.12.4 Barometer](#)).

Falls in der Schule kein Quecksilberbarometer vorhanden ist, kann ein anderes Barometer verwendet werden, um die Auswirkungen des Luftdrucks nachzuempfinden. In diesem Fall ist es wichtig, die Funktionsweise dieses Barometers zu besprechen. Insbesondere muss der Zusammenhang zwischen dem verwendeten Barometer und dem Wasserschlauch, beziehungsweise Quecksilberbarometer, verstanden sein, damit die gewonnenen Erkenntnisse auf das Ausgangsexperiment bezogen werden können.<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> Der Außendruck um das Flugzeug nimmt vom Boden bis hin zur Reishöhe nach und nach ab (vgl. [2.3.1 Hydrostatischer Druck](#)). Bei einer Reishöhe von ungefähr 10 000 Meter über dem Meeresspiegel beträgt der Außendruck ca. 29000 Pa = 290 hPa, was einem Drittel des Drucks auf Höhe des Meeresspiegels entspricht. In dem Flugzeug wird daher ein künstlicher Überdruck erzeugt, damit die Menschen an Bord genügend Sauerstoff atmen können. Dennoch ist dieser Druck nicht so hoch, wie der Druck auf Höhe des Meeresspiegels. Der im Flugzeug erzeugte Druck liegt üblicherweise bei ungefähr 70000 Pa = 700 hPa, was ungefähr dem Druck auf Höhe der Zugspitze, 2 500 Meter über dem Meeresspiegel, entspricht [27].

<sup>22</sup> Sollte in diesem Teil des Lehrstücks das Wort „Barometer“ verwendet werden, ist es hilfreich, die Etymologie während der Inszenierung des Lehrstücks zu besprechen. Denn bereits in der Bezeichnung steckt die Luftdrucktheorie (vgl. [2.8 Barometer](#)).

Nach Wagenschein ist das Erleben von Phänomenen, also das eigene Durchführen von Experimenten, von zentraler Bedeutung. Wenn möglich, sollte daher ein Gang durch die Atmosphäre zu Fuß geplant werden. Doch nicht in jeder Schule gibt es die Möglichkeit, genügend große Höhen zu überwinden, um den Effekt beobachten zu können. In diesem Fall kann ein Ausflug auf einen nahegelegenen Berg oder ein Hochhaus geplant werden.

Im Schulalltag kann das Durchführen dieses Experimentes dennoch ein sehr hoher, beziehungsweise unrealistischer, Anspruch sein. Eine weitere Umsetzungsidee für das Experiment ist daher das Verwenden einer Drohne mit Kamera.<sup>23</sup> An der Drohne wird ein Goethe-Barometer, das aus einer Spritze gebaut ist, befestigt. Der Pegelstand wird über die Kamera der Drohne beobachtet, während sie steigt. Falls es möglich ist, kann hierzu auch ein Wetterballon zur Hilfe genommen werden, da dieser in noch sehr viel größere Höhen aufsteigen kann. Die heutige Technik ermöglicht das Beobachten des Experimentes in kürzerer Zeit. Dies kann jedoch nur eine Notlösung sein. Da hierbei das Experiment nur indirekt beobachtet werden kann, entspricht dies nicht der Didaktik nach Wagenschein. Kein Hilfsmittel ersetzt die unmittelbare Erfahrung, sich selbst durch die Atmosphäre nach oben zu bewegen.

### 4.3.8 Von Guericke

Otto von Guericke war in erster Linie Politiker. Er hatte ein politisches Interesse, die Menschen aufzuklären und ihnen die Theorie des Luftdrucks näher zu bringen. Die von ihm entwickelte Vakuumpumpe machte es möglich. Doch Guericke war zwar der richtigen Überzeugung, seine Experimente zeigten jedoch nur, dass ein *künstlich* erzeugtes, kontinuierliches Vakuum existieren kann. Seine Experimente können auf unterschiedliche Weise gedeutet werden. Es ist möglich, sie sowohl mit der „Vakuumkraft“ als auch mit dem Luftdruck zu erklären [38, S. 35].

Von Guericke bringt die Wissenschaftstheorie in den Alltag. Entsprechend kann die Verwendung von alltagsnahen Beispielen hilfreich sein. Bei diesen Experimenten sind gezielte Fragen nach den Erklärungen des Phänomens durch die Schüler\*innen sinnvoll. Zum einen, um festzustellen, an welcher Stelle des Verständnisprozesses sie sich befinden

---

Sollen die Schüler\*innen selbst ein Barometer bauen, empfiehlt es sich, dies erst nach der abschließenden Diskussionsrunde zu tun, um den Spannungsbogen des Lehrstücks aufrecht zu erhalten. Anregungen zum Bau eines eigenen Goethe-Barometers sind unter [4.3.12.4 Barometer](#) zu finden.

<sup>23</sup> Vor der Durchführung sollte die rechtliche Lage für Drohnenflüge überprüft und gegebenenfalls eine Erlaubnis eingeholt werden.

und zu anderen, um das neue Konzept des Luftdrucks zu festigen. Anregungen sind im Abschnitt 4.3.12 [Zusatz- und Transferaufgaben](#) zu finden.

### 4.3.9 Boyle

Boyles Rolle in der Erforschung des Luftdrucks ist historisch von großer Bedeutung. Die von Boyle und Hooke erfundene Vakuumpumpe ermöglichte es, Torricellis Quecksilberbarometer in ein Vakuum einzubringen [38, S. 37]. Dadurch konnte Pascals Experiment unter Laborbedingungen nachgestellt werden. Während Boyles Experiment, das Wasserglas unter der Vakuumlöcke, Teil des Lehrstücks ist, tritt Boyle als Person bislang nicht auf.

Aus meiner Sicht bietet es sich an, dass Robert Boyle im Finale des Lehrstücks auftritt. Er könnte als Vermittler beziehungsweise Richter am Ende der Diskussionsrunde [13, S. 119] auftreten und durch sein Experiment die Luftdrucktheorie stärken. Selbstverständlich ist zu diesem Zeitpunkt die Entscheidung eigentlich schon längst zu Gunsten des Luftdrucks gefallen, doch der Auftritt Boyles würde an dieser Stelle ein dramaturgisches Ende für die Diskussionsrunde darstellen. Dabei kann der Zeitpunkt so gewählt werden, dass er didaktisch zu der Diskussion der Schüler\*innen passt.<sup>24</sup>

Boyle ermöglicht zudem den Anschluss zu anderen physikalischen und außerphysikalischen Themenbereichen. Er hat sich unter anderem mit der Beschaffenheit und den Eigenschaften von Luft und Verbrennungsprozessen beschäftigt. Zudem suchte er nach der Antwort auf die Frage, weshalb Lebewesen atmen. Auch hat er sich mit der Ausbreitung von Licht und Schall im Vakuum sowie der Wirkung von Magnetfeldern durch den „leeren“ Raum beschäftigt. Das Sieden und Frieren von Wasser bei unterschiedlichen Drücken wurde von ihm als erstes beobachtet. Zudem beschrieb er die Luft als elastisch [38, S. 41], wodurch eine hervorragende Überleitung zur kinetischen Gastheorie geschaffen werden kann.

---

<sup>24</sup> Hierbei kann zudem Boyles Buch „new experiments physico-mechanical touching the spring of air“ <https://quod.lib.umich.edu/e/eebo/A29007.0001.001?view=toc> als authentische historische Quelle eingebracht werden. Dort sind seine Vakuumpumpe sowie viele der Experimente, die bereits von Guericke durchgeführt hat, aufgeführt.



**Abbildung 4.8:** Das Wasserglasexperiment unter der Vakuumlöcke.

#### 4.3.10 Moderne

Das Lehrstück zeigt die Aristotelik und die klassische Physik sowie den Übergang vom Paradigma des Horror Vacui zur Luftdrucktheorie. Um den gesamten Weg der Wissenschaft aufzuzeigen, die Unterrichtsinhalte in den Entwicklungskontext einzubinden und damit die Relevanz des Themas zu verdeutlichen, ist jedoch zumindest ein Ausblick in die Moderne von Bedeutung. Bei der Einbeziehung der Modernen soll es nicht darum gehen, dass die Schüler\*innen die Erkenntnisse selbst finden. Dafür sind die Inhalte zu komplex. Es geht vielmehr darum, dass die Schüler\*innen von den bestehenden Erkenntnissen hören [13, S. 120] und diese in den aktuellen Stand der Forschung einordnen.

Von Bedeutung ist hierbei die Frage nach der Leere. Einen Raum von Materie zu befreien ist dabei etwas gut Vorstellbares. Doch die Vorstellung sämtliche Strahlung, inklusive der Wärmestrahlung, zu entfernen wird schon schwieriger. Diese Gedanken bieten einen guten Ansatzpunkt für die aktuelle Forschung [13, S. 89]. Auch Boyles Beobachtungen, dass sich Licht und magnetische Felder im Vakuum ausbreiten können, kann als Anhaltspunkt genutzt werden, dass ein Vakuum nicht vollständig leer ist. Anregungen zum aktuellen Stand der Forschung können dem Abschnitt [3.9 Moderne](#) entnommen werden.

### 4.3.11 Paradigmenwechsel

Damit ein Paradigmenwechsel gelingen kann, müssen nach Posner et al. [12, S. 119] vier Bedingungen erfüllt sein. 1. Unzufriedenheit mit den bestehenden Konzepten, 2. Verständlichkeit des neuen Konzeptes, 3. anfängliche Glaubwürdigkeit des neuen Konzeptes, 4. Anwendbarkeit des neuen Konzeptes. Dies gilt dabei nicht nur für die Kulturgeneese, sondern auch für die Individualgenese der Schüler\*innen.

Prinzipiell können Schwierigkeiten mit jeder der Bedingungen auftreten. Ist eine Bedingung nicht erfüllt, wird das neue Konzept, in diesem Fall die Luftdrucktheorie, möglicherweise nicht von den Schüler\*innen akzeptiert. Deswegen möchte ich die einzelnen Bedingungen genauer beleuchten.

Die größten Herausforderungen sehe ich in der Unzufriedenheit mit dem bestehenden Konzept des Horror Vacui (1. Bedingung). Viele Phänomene lassen sich sehr erfolgreich mit dem Horror Vacui erklären. Die Theorie hat sich sehr lange im wissenschaftlichen Diskurs gehalten und ist tief in den Alltagsvorstellungen verwurzelt. Dass dieses Konzept Schwierigkeiten bereitet, verstehen die Schüler\*innen nur, wenn die Bedeutung des Experimentes auf dem Puy de Dôme verstanden wurde.

Wie gut die Verständlichkeit der Luftdrucktheorie (2. Bedingung) gegeben ist, hängt von vielen Faktoren ab. Vorerfahrungen aus Alltag und Schulunterricht sowie die Kreativität für physikalische Vorstellungen sind hierbei entscheidend. Tiefgreifende Vorstellungen des Luftdrucks stellen eine größere Herausforderung dar. Vergleiche zu Alltagsbeispielen, wie Bällen und Fahrradreifen können helfen eine Verbindung zu schaffen. Auch die Vorstellung, sich ständig bewegender Luftteilchen entsprechend der kinetischen Gastheorie kann hilfreich sein.

Die Glaubwürdigkeit der Luftdrucktheorie (3. Bedingung) ist historisch durch die Masse der Luft und das von Pascal vorgeschlagene Experiment auf dem Puy de Dôme gegeben. Dieses Experiment verdeutlicht die Anschauung des „Lebens am Boden eines Meeres aus Luft“ auf eindruckliche Weise. Sind die Rahmenbedingungen für das Experiment nicht gegeben, wird die Plausibilität der Luftdrucktheorie durch die Wiederholung des Ausgangsexperimentes unter der Vakuumblocke verdeutlicht. Dass wir die Luft mit ihrer Masse und den dadurch hervorgerufenen Druck im Alltag nicht spüren, kann allerdings eine große Schwierigkeit für die Glaubwürdigkeit der Theorie sein. Daher ist es gegebenenfalls wichtig, darüber zu sprechen, weshalb wir nicht von dem Luftdruck erdrückt werden (vgl. 2.3.2 [Schweredruck der Luft](#)). Generell ist es hier von großer Bedeutung, nichts

zu überstürzen. Auch geschichtlich hat es lange gedauert, bis sich die Luftdrucktheorie durchsetze. Dementsprechend ist es wichtig, den Schüler\*innen genügend Zeit zu geben, sich selbst von der Luftdrucktheorie zu überzeugen.

Wie erfolgreich das neue Konzept des Luftdrucks angewendet werden kann (4. Bedingung), zeigen die Experimente in dem Lehrstückteil mit von Guericke und die Anwendungs- und Transferaufgaben. Zumindest ist nach Pascals Experiment der Horror Vacui nicht mehr die einfachste Erklärung.

Der Paradigmenwechsel in der Wissenschaftsgeschichte kann akzentuiert werden, indem an jedem Punkt des Lehrstücks deutlich wird, an welcher Stelle man sich gerade geschichtlich und konzeptionell befindet. Dies unterstützt die historische Abfolge und damit die Kulturauthentizität, die Individualgenese und die Dramaturgie des Lehrstücks.

### 4.3.12 Zusatz- und Transferaufgaben

Werden im Anschluss an das Finale weitere Experimente, Gedankenexperimente und Rechnungen durchgeführt, können die Schüler\*innen auf die gesamten Erfahrungen aus dem Lehrstück zurückgreifen und so das neu erlangte Wissen mit zusätzlichen Aufgaben festigen. Dabei ist es wichtig, alltagsnahe Experimente durchzuführen, anhand derer die Luftdrucktheorie beobachtet werden kann. Auch können die beschriebenen Experimente als Anregung zur Klärung offen gebliebener Fragen dienen. Marc Eyer schreibt dazu:

„Bildung ist etwas Privates, Individuelles. Ein Bildungsgewinn ergibt sich erst durch das Implementieren der Forschungsergebnisse, des Wissens, in den eigenen Alltag, in die eigene Lebenswelt. Erst dann wird Forschungswissen zur Bildung. [...] Was bedeuten sie für mich, für mein Leben, für mein Empfinden, für meine Interaktion mit der Umwelt?“

Eyer 2015, S. 147 [13]

Die im Folgenden beschriebenen Ideen sind in erster Linie dafür gedacht, zusätzliche Aufgaben im Anschluss an das Lehrstück zu bieten. Hierzu können unterschiedliche Aufgaben vorbereitet werden, aus denen die Schüler\*innen selbst wählen können. Alternativ kann die Auswahl an Zusatzaufgaben auf die Lerngruppe abgestimmt und von der Lehrkraft vorgegeben werden. Die Beschreibungen der Experimente und Aufgaben sind hier so formuliert, dass sie Lehrkräften genug Informationen bieten, um selbst Material und konkrete Arbeitsaufträge daraus zu erstellen.

#### 4.3.12.1 Experimente

Zusätzliche Experimente und Gedankenexperimente können helfen, die Inhalte zu verstehen, das Erlernete in die Alltagserfahrungen zu integrieren und Transfer zu anderen Phänomenen zu schaffen. Deswegen spielen weitere Experimente eine entscheidende Rolle für das Nachspiel des Lehrstücks. Hier werden die Experimente nur stichwortartig aufgelistet. Detaillierte Beschreibungen der Experimente sind im Anhang zu finden (vgl. [A.2 Experimente als Zusatz](#)).

- Saugnapf
- Vakuumglocke anheben
- Wasserglas verschließen
- Löchrige Flasche
- Saugheber (engl. Siphon)
- Strohhalm
- Druckdifferenzen
- Schokokuss im Vakuum
- In den Bergen
- Im Flugzeug
- Leben ohne Atmosphäre
- Implodierende Dose

#### 4.3.12.2 Luftdruck und Wetter

Für die Beschreibung des Wetters sind im Wesentlichen drei Größen von Relevanz – die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck. Grob gesagt bedeutet ein hoher Luftdruck sonniges Wetter und ein niedriger Luftdruck regnerisches Wetter.

Die Bedeutung des Luftdrucks für das Wetter wird vor allen Dingen von Ueli Aeschlimann hervorgehoben und u.a. von Björn Gemmer aufgegriffen. Im Rahmen dessen werden verschiedene Barometertypen betrachtet sowie über regionale Hoch- und Tiefdruckgebiete und die Entstehung des Windes gesprochen. Anschließend werden die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur hinzugenommen und über globale Hoch- und Tiefdruck-



**Abbildung 4.9:** Eine Wetterstation, die Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Temperatur anzeigt.

gebiete und daraus resultierende Luftströme gesprochen. Weiter Informationen hierzu befinden sich in dem Buch „Pascals Barometer“ [12, S. 79].

Aeschlimann thematisiert das Wetter in Inszenierungen mit Studierenden. Im Lehrstück mit Schüler\*innen wird vor allen Dingen deswegen auf dieses Thema verzichtet, weil damit ein weiteres und sehr umfangreiches Thema eröffnet werden würde.<sup>25</sup> Aufgrund der großen Bedeutung dieses Themas ist es dennoch in jedem Fall sinnvoll, zumindest als Zusatzaufgabe einen Ausblick dahin zu geben. Experimente, die zeigen wie sich Luft bei unterschiedlichen Temperaturen verhält, können hier unterstützend wirken. Björn Gemmer schlägt dazu verschiedene „Physikalische Freihandexperimente“ aus dem Aulis Verlag [4] vor<sup>26</sup> und lässt die Schüler\*innen nach einer ausgiebigen Recherche eine Präsentation erstellen.

<sup>25</sup> Das Lehrstück „Howards Wolken“ beschäftigt sich mit der Wolkenklassifikation. Dort widmet man sich dem Thema Wetter aus einer anderen Perspektive. <https://www.lehrkunst.org/howards-wolken/>

<sup>26</sup> Warme Luft wiegt weniger (Experiment 3.6, S. 372). Die hüpfende Münze (Experiment 3.30, S. 427). [4]

### 4.3.12.3 Rechnungen

Rechnungen und Formeln spielen in dem Lehrstück eine sehr untergeordnete Rolle. Das ist gewollt, damit sich die Konzentration der Schüler\*innen auf die Phänomene und das dahinterliegende Verständnis richtet. Dennoch kann es für einige hilfreich sein, das Gelernte mit Hilfe von Rechnungen von Formeln nochmal von einer anderen Seite zu betrachten. Hierbei sind vielfältige Ideen für Rechnungen möglich. Ein paar davon möchte ich hier erwähnen.

**Magdeburger Halbkugeln:** 16 Pferde haben es nicht geschafft, die Halbkugeln voneinander zu trennen, weil sie durch den Luftdruck aufeinandergedrückt werden. Wie viel Kraft wäre zur Trennung der Kugelhälften notwendig? Welcher Gewichtskraft entspräche das? Gehe dabei von einer kreisförmigen Fläche mit Durchmesser  $d = 42$  cm aus, einem annähernden Vakuum ( $p \approx 0$  bar) in der Kugel und einem atmosphärischen Druck von etwa  $p = 1$  bar.

(Die Idee zu dieser Aufgabe stammt von Björn Gemmer.)

**Der Druck auf uns:** Nach dem gleichen Prinzip ist es möglich abzuschätzen, wie viel Druckkraft auf einen Menschen wirkt.

**Luftdruck mit barometrischer Höhenformel:** Wie groß ist der Luftdruck auf dem Mount Everest (8848 m)? In welcher Höhe ist der Luftdruck halb so groß wie auf Meereshöhe?

(Ideen aus [12, S. 71])

**Luftdruck mit Quecksilbersäule:** Mit Hilfe der Formel  $p = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h$  kann der Umgebungsluftdruck aus der Höhe der Quecksilbersäule berechnet werden. Daraus lässt sich anschließend gut nachvollziehen, wie die Druckeinheit mmHg (Millimeterquecksilbersäule) entstanden ist [13, S. 168].

(Idee aus [12, S. 71])

#### 4.3.12.4 Barometer

Das Barometer gibt dem Lehrstück seinen Namen. Dennoch wird der Begriff nicht explizit besprochen. Dies kann im Anschluss an das Finale nachgeholt und mit dem Bau eines Barometers verbunden werden. Hierbei ist es möglich, unterschiedliche Barometerarten und deren Funktionsweise zu thematisieren. Diese Erweiterung des Lehrstücks würde die werkschaffende Komponente des Lehrstücks unterstützen, welche in der aktuellen Version von Marc Eyer eine untergeordnete Rolle spielt [13, S. 166].

Die Schüler\*innen bauen ein praxistaugliches Werk, mit dem sie den Inhalt des Lehrstücks verbinden können [56, S. 61f]. Dieser Effekt wird besonders dann erzielt, wenn die selbstgebauten Barometer anschließend mit einem Spaziergang in die Höhe verbunden werden, um Pascals Experiment noch einmal auf andere Weise nachzuempfinden.

#### Barometerarten

Im Lehrstück lernen die Schüler\*innen das Quecksilberbarometer und dessen Funktionsweise kennen. Um die Verbindung des Wortes zu dem Lehrstück herstellen zu können, muss die Bedeutung des Wortes Barometer (von altgriechisch *barýs* „schwer, gedrückt“ und *métron* „Maß, Maßstab“) besprochen werden. Anschließend können unterschiedliche Barometer eingeführt werden. Dabei ist es wichtig, dass die Schüler\*innen verstehen, wie diese Barometer funktionieren, was sehr gut durch die Suche nach Analogien und Unterschieden zur Quecksilberröhre von Torricelli und Pascal geschehen kann.

Im Folgenden gehe ich näher auf das Goethe-Barometer ein, da es mit einfachen Mitteln gebaut werden kann und bereits bei relativ geringen Höhenunterschieden beobachtbare Veränderungen zeigt.

#### Goethe-Barometer

Ein Goethe-Barometer kann zum Messen von Druckveränderungen verwendet werden. Absolute Drücke können nicht gemessen werden. Es besteht aus einem Glasgefäß, welches nach oben abgeschlossen ist. Der Schnabel des Gefäßes ist nach oben hin offen. Der Umgebungsluftdruck drückt auf die Öffnung des Schnabels. Bei zunehmendem Druck sinkt der Wasserspiegel im Schnabel. Mit abnehmendem Druck steigt er. Genau andersherum als beim Quecksilberbarometer [35, S. 84].

Ein Problem des Barometers besteht jedoch darin, dass der Pegelstand auch durch Temperaturschwankungen verändert wird, weil die Flüssigkeit ihr Volumen abhängig von der

Temperatur ändert [12, S. 80] [35, S. 84]. Dies sollte im Hinterkopf behalten werden, wenn das Goethe-Barometer genutzt wird, um Druckdifferenzen mit zunehmender Höhe zu beobachten. Dennoch kann es gut für phänomenologische Beobachtungen des Luftdrucks verwendet werden. Eine Beschreibung der Genauigkeit des Goethe-Barometers ist in dem Buch „Spiel, Physik und Spaß“ [35, S. 84f] zu finden.

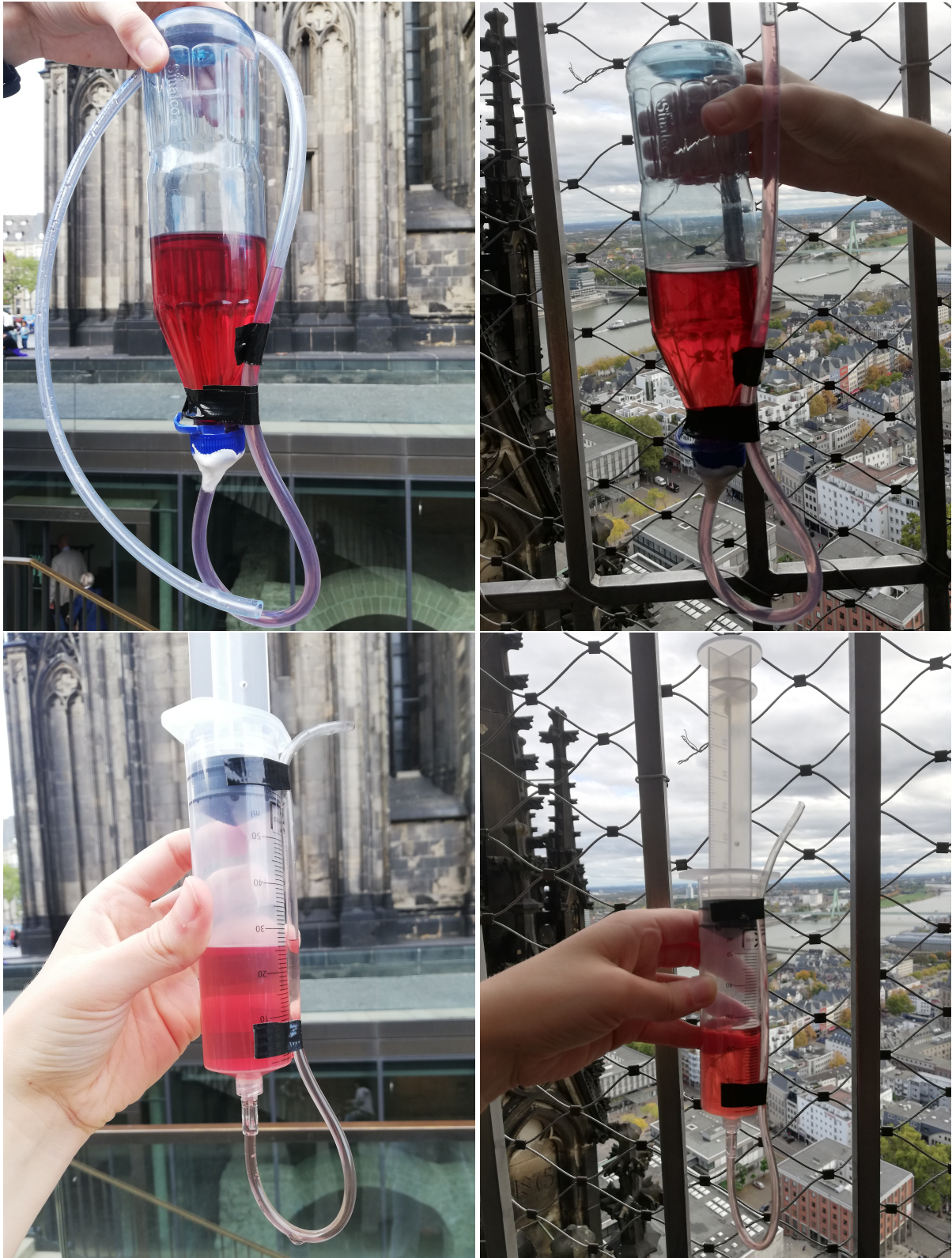
### **Material:**

- Flasche aus Hartplastik
- durchsichtiger Plastikschauch
- Wasser (gefärbt)
- Klebeband
- Bohrmaschine
- Dichtungsmasse (z.B. Knete)

**Bauanleitung:** In den Deckel der Flasche wird ein Loch gebohrt, das gerade groß genug ist, dass der Schlauch hindurchgeführt werden kann. Dieser wird einige Zentimeter tief in den Deckel gesteckt und von innen und außen mit Knete abgedichtet. Nun wird die Flasche etwa zur Hälfte mit (gefärbtem) Wasser gefüllt, der Deckel drauf geschraubt, die Flasche umgedreht und der Schlauch nach oben gerichtet an der Flasche festgeklebt. Damit die Flüssigkeit in Flasche und Plastikschauch zu Beginn des Experimentes die gleiche Höhe haben, kann mit Hilfe einer Spritze oder eines Trichters Wasser in den Schlauch gefüllt werden, sodass sich die Flüssigkeitsspiegel angleichen. Auf diese Weise ist es später einfacher, Unterschiede im Flüssigkeitsspiegel festzustellen.

Es ist auch möglich, das Goethe-Barometer aus einer großen Spritze zu bauen, um so eine handlichere und wasserdichtere Version des Barometers zu erhalten. Die aufgedruckte Skala der Spritze ermöglicht eine direkte Beobachtung der Differenzen der Flüssigkeitsspiegel.

**Durchführung:** Nun kann die Flasche in der Hand gehalten und auf einen Berg beziehungsweise ein hohes Gebäude getragen werden. Diese lassen sich in der Nähe beinahe jeder Schule finden. Dabei wird die Veränderung des Wasserspiegels im Schlauch beobachtet und mit Hilfe des Wissens aus dem Lehrstück erklärt.



**Abbildung 4.10:** Ein Goethe-Barometer bestehend aus einer Flasche und eines aus einer Spritze. Am Eingang des Kölner Doms sowie auf der Aussichtsplattform in ca. 100 Metern Höhe über dem Eingang.

**Kommentar:** Bereits bei einer Höhendifferenz von ca. 50 Metern lassen sich deutliche Unterschiede der Flüssigkeitsspiegel erkennen. Die Messunsicherheiten sind dabei jedoch aufgrund von Temperaturschwankungen und auch der Art, wie die Flasche gehalten wird, das heißt wie viel Druck auf die Flasche ausgeübt wird, sehr groß. Dieses Barometer eignet sich daher nicht für eine quantitative Bestimmung des Luftdrucks, doch das Phänomen kann qualitativ beobachtet werden. Die Tatsache, dass der Flüssigkeitsspiegel mit zunehmendem Druck sinkt und mit abnehmendem Druck steigt, muss behutsam mit den Schüler\*innen besprochen werden. Dies führt sonst möglicherweise zu Verwirrungen.

### 4.3.12.5 Postererstellung

Die Postererstellung am Ende des Lehrstücks dient dazu, dass die Schüler\*innen die Inhalte des Lehrstücks durch eigenes Handeln zusammenfassen. In Marc Eyers Lehrstückversion wurde dieser Teil jedoch neutral und teilweise auch negativ von den Schüler\*innen bewertet [12, S. 108]. Ergebnisse darstellen und präsentieren ist jedoch ein wichtiger Bestandteil des Kernlehrplans.

Dennoch könnte es dieser Stelle das Angebot unterschiedlicher Zusammenfassungen des Wissens gewinnbringend sein. Dazu zählen, neben den digitalen Postern aus Marc Eyers Lehrstückversion, analoge Poster, die Erstellung von Quizzes, das Halten eines Vortrages, die Erstellung von Videos, kurze Theaterstücke sowie die Erstellung eines Zeitstrahls, auf dem die Wissenschaftler sowie die von ihnen vertretenen Theorien zu sehen sind. Der Kreativität sind hier keine Grenzen gesetzt. Es ist beispielsweise auch denkbar, dass den Schüler\*innen verschiedene Varianten der Zusammenfassung angeboten werden, unter denen sie ihre bevorzugte auswählen.

### 4.3.12.6 Fragenspeicher

Eine kleine methodische Ergänzung, die prinzipiell nichts an der Lehrstückgestalt ändert, ist die Einführung eines Fragenspeichers. Die Schüler\*innen können, beispielsweise auf einem großen Plakat, ihre offengebliebenen Fragen notieren. Der Fragenspeicher ermöglicht zum einen, dass eine bessere Identifikation des Verständnisniveaus der Schüler\*innen gegeben ist. Zum anderen kann er am Ende des Lehrstücks genutzt werden, um offengebliebene Fragen zu besprechen.

## 4.4 Eigene Lehrstückversion

Die von mir vorgeschlagene Lehrstückversion orientiert sich an der Version von Marc Eyer. Es folgt eine kompakte Beschreibung meiner Lehrstückversion, welche die vorangegangenen Anregungen berücksichtigt.

**Ouvertüre:** Wasserglasexperiment mit sokratischem Gespräch, in dem darüber gesprochen wird, warum das Wasser im Glas bleibt und Experimentideen der Schüler\*innen durchgeführt werden, um dieses Phänomen zu erforschen.

**1. Akt:** Hier wird das anfängliche Phänomen mit Hilfe von Gasparo Bertis Experiment noch einmal auf eine andere Weise betrachtet. Die Beobachtung kann hierbei sowohl mit dem Horror Vacui, als auch mit der Luftdrucktheorie erklärt werden. Es ist an dieser Stelle sinnvoll, die Schüler\*innen beide mögliche Erklärungen formulieren zu lassen, um sie dadurch gegenüberzustellen.

**2. Akt:** Die beschränkte „Kraft des Vakuums“ wird mit Galilei und seiner *Discorsi* betrachtet. Damit wird die Theorie des Horror Vacui verfolgt.

**3. Akt:** Dieser Akt geht der Luftdrucktheorie nach. Das „Gewicht“ der Luft wird mit Galilei und Evangelista Torricelli betrachtet. Die Auswahl des hierfür geeigneten Experimentes erfolgt dabei lerngruppenabhängig. Anschließend wird das Gewicht der Luft im Klassenzimmer berechnet. Es ist wichtig, die Rolle Galileis klar zu verdeutlichen, da er zwar das Experiment zum Wiegen der Luft vorgeschlagen hat, aber dennoch nicht an den Luftdruck glaubte. Anschließend wird über Torricellis Glaube an die Wirkung der Gewichtskraft der Luft gesprochen und das Quecksilberbarometer eingeführt. Das Bild des Lebens am Grunde eines Meeres aus Luft wird aufgezeigt und unter freiem Himmel wirken gelassen. Historische Gedanken zur Entwicklung der Luftdrucktheorie werden durch Torricelli geäußert.

**4. Akt:** Zunächst werden Horror Vacui und die Luftdrucktheorie noch einmal gegenübergestellt. Es wird der Briefwechsel zwischen Pascal und seinem Schwager Périer gelesen. Da in vielen deutschen Schulen Französisch nicht verpflichtend ist, kann hier alternativ der originale Text lediglich gezeigt und für den weiteren Verlauf die deutsche Übersetzung verwendet werden. Anschließend folgt die Besteigung des Puy de Dôme mit Blaise Pascal. Dieses historisch bedeutsame Experiment stellt den Höhepunkt des Lehrstücks dar und ermöglicht eine Entscheidung zu Gunsten der Luftdrucktheorie.

**5. Akt:** Mit Otto von Guericke wird experimentiert und die Kraft des Luftdrucks dadurch noch einmal auf andere Weise erfahren. Dazu wird das Experiment der Magdeburger Halbkugeln betrachtet und weitere alltagsnahe Experimente durchgeführt.

**Finale:** In der Diskussionsrunde zwischen Gasparo Berti, Galileo Galilei, Evangelista Torricelli, Blaise Pascal und Otto von Guericke wird die Frage, warum das Wasser im Glas bleibt, noch einmal aus den Perspektiven der unterschiedlichen Persönlichkeiten besprochen. Im Anschluss an die Diskussion tritt Robert Boyle auf und führt das Wasserglasexperiment unter der Vakuumglocke vor.

**Epilog:** Erst wird ein kurzer Ausblick in die Moderne gegeben, um die Historie abzurunden. Anschließend werden Zusatz- und Transferaufgaben zu bestimmten Aspekten bearbeitet. Diese können entweder von den Schüler\*innen selbst in Form eines Stationenlernens ausgewählt werden oder eine Lehrperson gibt sie, abgestimmt auf die Lerngruppe beziehungsweise anschließende Themen, vor. Insbesondere sollte hierbei auf die Frage eingegangen werden, warum die Luft uns nicht zerquetscht. Eine wichtige, aber zeitaufwendige Zusatzaufgabe, ist der Bau eines eigenen Barometers sowie ein Ausflug „in die Höhe“, um Pascals Experiment selbst zu erleben. Im Anschluss werden die Ergebnisse durch die Schüler\*innen auf eine von ihnen gewählte oder durch die Lehrperson vorgegebene Weise zusammengefasst.

Während des gesamten Lehrstücks wird der Fragenspeicher von den Schüler\*innen gefüllt. Dieser wird gegen Ende des Lehrstücks verwendet, um sicher zu stellen, dass alle Fragen geklärt wurden. Zudem können an passenden Stellen während des Lehrstücks weitere Experimente eingesetzt werden, um die notwendigen Verstehensgrundlagen für die aufeinander aufbauenden Gedanken des Lehrstücks zu unterstützen.

## 5 Fazit

Durch kleine Anpassungen und Ergänzungen kann das Lehrstück „Pascals Barometer“ noch weiter verfeinert werden. Zusätzliche Hintergründe ermöglichen zudem eine noch umfassendere Betrachtung der Inhalte und erleichtern Lehrkräften das Unterrichten des Lehrstücks.

Die fachlichen Hintergründe, beschrieben in [2 Fachwissenschaft](#), ermöglichen es Lehrkräften, das Lehrstück ohne weitere inhaltliche Recherche zu unterrichten. Die vorgeschlagenen Experimente wirken entgegen möglicher Verständnishürden. Zusätzliche Experimente, Transfer- und Rechenaufgaben können beim Experimentieren mit von Guericke oder im Epilog des Lehrstücks eingesetzt werden, um lerngruppenabhängig weitere Anlässe für einen Alltagsbezug und unterschiedliche Perspektiven auf das Thema zu ermöglichen. So wird unterstützt, dass die Schüler\*innen das gelernte Wissen in ihr Alltagsverständnis integrieren können.

Die gesellschaftlichen Hintergründe in [3 Geschichte](#) helfen darüber hinaus, die Erkenntnisse zur Luft einzuordnen und zu verdeutlichen, vor welchem Hintergrund der Paradigmenwechsel vom Horror Vacui zur Luftdrucktheorie stattgefunden hat. Die Erkenntnisse der Moderne ermöglichen zudem, die aktuelle Relevanz des Themas hervorzuheben. Durch die historische Betrachtung ist eine umfassende Einordnung des Themas in den gesellschaftlichen Kontext möglich. Die Zeittafel illustriert den Erkenntnisprozess auf eine kompakte Weise.

In Bezug auf vorgeschlagene Abwandlungen und Ergänzungen in [4 Didaktik](#) sind insbesondere die Erweiterung der Ahnengalerie um Boyle sowie der Bau eines Barometers zu nennen. Durch den Bau eines Barometers im Epilog des Lehrstücks wird es um eine werkschaffende Komponente ergänzt. Wird anschließend Pascals Experiment bei einem „Ausflug in die Höhe“ noch einmal mit den Barometern der Schüler\*innen durchgeführt, erhalten die Inhalte zusätzlich eine persönliche Bedeutung und werden gefestigt.

Die Schwierigkeit, dass dieser Teil des Lehrstücks viel Zeit in Anspruch nimmt, besteht jedoch weiterhin. Es bleibt eine Herausforderung, diese im Schulalltag zu finden.

Die Integration von Boyle in das Lehrstück ist von großer Bedeutung, da er historisch eine wichtige Rolle in der Entwicklung des Druckbegriffs spielte. Die Vakuumpumpe, die Hooke in Boyles Auftrag entwarf, ermöglichte es, Pascals Experiment auf dem Puy de Dôme unter Laborbedingungen nachzustellen, wie es auch im Finale des Lehrstücks durchgeführt wird. Darüber hinaus bietet Boyle vielfältige Möglichkeiten für physikalische und außerphysikalische Anknüpfungspunkte im Anschluss an das Lehrstück, weil er sich auf vielfältige Weise mit dem Thema Luft, Luftdruck und Vakuum beschäftigte.

Weitere Recherchen sind noch zu der Frage notwendig, warum Menschen, wie Torricelli, auf die Idee der Luftdrucktheorie kamen. Antworten auf diese Frage ermöglichen, dass die Entstehung der Luftdrucktheorie noch authentischer präsentiert werden kann. Ein nächster Schritt zur nochmaligen Verfeinerung des Lehrstücks könnte sein, den Brief von Torricelli an Ricci als italienische Originalquelle zu studieren.

Das Lehrstück „Pascals Barometer“ biete die Möglichkeit, tief in das Thema des Luftdrucks einzusteigen, die Schüler\*innen die Inhalte entdecken zu lassen sowie die Erkenntnisse vor dem historischen Hintergrund zu betrachten, wodurch die Besonderheiten der Entdeckungen unterstrichen werden. Anknüpfungspunkte zu physikalischen und außerphysikalischen Phänomenen ermöglichen den Übergang zu anderen Themengebieten. Aufgrund des engen Stundenrasters und der Tatsache, dass das Inhaltsfeld „Druck und Auftrieb“ im Kernlehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen eine untergeordnete Rolle spielt, ist die Integration des Lehrstücks in den Schulalltag jedoch schwierig. Es eignet sich daher insbesondere für Projektwochen. Wenn nur ein kurzes Zeitfenster zur Verfügung steht, kann eine verkürzte Version des Lehrstücks inszeniert werden.

Lehrstücke sind sehr gut geeignet, um das Curriculum zu bereichern und die Begeisterung von Schüler\*innen zu wecken. Falls nur wenig Zeit zur Verfügung steht, können Lehrstücke als Anregung für lehrkunstartiges, erkenntnisorientiertes und begeisterungsförderndes Unterrichten dienen.

Ich möchte alle Lehrkräfte dazu ermutigen, Lehrstücke und lehrkunstartiges Unterrichten in ihren Unterricht zu integrieren und historische Hintergründe in den Physikunterricht einfließen zu lassen. Ich hoffe, diese Arbeit leistet einen Beitrag dazu, dass das Lehrstück „Pascals Barometer“ noch häufiger inszeniert und stetig weiterentwickelt wird.

# 6 Kommentiertes Literaturverzeichnis

Zu dem Lehrstück „Pascals Barometer“, zum Luftdruck beziehungsweise dem Vakuum und zur Wissenschaftsgeschichte gibt es eine große Vielzahl verschiedener Werke. In diesem kommentierten Literaturverzeichnis gehe ich auf eine Auswahl dieser Werke ein, um eine Orientierung für weiterführende Literatur zu bieten.

## **Literatur zum Lehrstück Pascals Barometer**

„Pascals Barometer – frei nach Martin Wagenschein“ von Marc Eyer und Ueli Aeschlimann

Dieses Buch behandelt das Lehrstück „Pascals Barometer“ detailliert und übersichtlich. In ihm wird sowohl die Lehrstückversion von Marc Eyer als auch die Version von Ueli Aeschlimann besprochen, gegenübergestellt und von „kritischen Freunden“ kommentiert. Auch die historischen Hintergründe werden beleuchtet. Somit bietet dieses Buch einen umfassenden Überblick über das Lehrstück.

„Lehrstückunterricht im Horizont der Kulturgeneese“ von Marc Eyer

Dieses Buch beinhaltet Marc Eyers Lehrstückversion von „Pascals Barometer“. Die Lehrkunst und die Idee des kulturgenetischen Unterrichtens sind darin ausführlich beschrieben, was einen Einblick in das hinter den Lehrstücken steckende Grundprinzip ermöglicht. Zusätzlich beinhaltet es eine detaillierte Beschreibung der Lehrstücke „Fallgesetz nach Galilei“ sowie „Die Spiegeloptik“. Somit ist dieses Buch auch für Leser\*innen interessant, die „Pascals Barometer“ bereits gelesen haben.

## **Literatur zur Wissenschaftsgeschichte**

„Kulturgeschichte der Physik“ von Károly Simonyi

Dieses Buch gibt auf über 500 DinA4 großen Seiten vielfältige Informationen über die verschiedensten Bereiche der Kulturgeschichte der Physik von der Antike bis zum Jahre 1995. Zusatzinformationen und Bilder auf jeder Seite ermöglichen einen visuell ansprechenden Überblick. Das Buch ist größtenteils so geschrieben, dass es auch von Leser\*innen mit wenig physikalischem Hintergrundwissen verstanden werden kann. Je nach Thema beinhaltet es auch einige Formeln und tiefgreifendere physikalische Erklärungen.

„Ein Meer von Luft“ von Gabrielle Walker

Beginnend mit dem Bild des Meeres aus Luft beschreibt Gabrielle Walker die Wissenschaftsgeschichte der Atmosphäre, der Luft und ihrer Rolle auf der Erde auf eine kurzweilige, fesselnde, gut verständlichen Art und Weise. Dabei werden Aspekte der Physik, Chemie, Biologie sowie der gesellschaftlichen Hintergründe betrachtet. Zudem enthält das Buch detaillierte Anmerkungen sowie zahlreiche weitere Literaturempfehlungen für interessierte Leser\*innen.

„Nichts als das Nichts“ von Henning Genz

Neben der historischen Entwicklung beschreibt Henning Genz hauptsächlich die im Jahre 2004 aktuellen Erkenntnisse in Bezug auf den leeren Raum sowie noch offene Fragen. Für Leser\*innen mit fundiertem physikalischem Wissen ist das Buch angenehm zu lesen. Einige Passagen sind dennoch herausfordernd.

# Literaturverzeichnis

- [1] Albring, Werner (1978): *Angewandte Strömungslehre*. Akademie-Verlag, Berlin.
- [2] Berg, Hans Christoph (2009): *Werkdimensionen im Bildungsprozess. Das Konzept der Lehrkundedidaktik - Band 1*. 1. Auflage. Hep-Verlag, Bern. ISBN: 978-3-03551-012-6.
- [3] Berg, Hans Christoph (2004): *Lehrkundedidaktik - Entwurf und Exempel einer konkreten Inhaltsdidaktik*. In: Journal of Social Science Education, Volume 3, Number 1. DOI: [10.4119/jsse-313](https://doi.org/10.4119/jsse-313)
- [4] Berthold, Clemens; Christ, Daniela; Braam, Gunther; Haubrich, Jürgen; Herfert, Markus; Hilscher, Helmut; Kraus, Jürgen und Möller, Christian (2004): *Physikalische Freihandexperimente in 2 Bänden - Band 1*. Aulis-Verlag in Friedrich Verlag GmbH. ISBN: 978-3761425350.
- [5] Boyle, Robert und Sharrock, Boyle (1682): *New experiments physico-mechanical, touching the spring of the air, and its effects*. Dritte Ausgabe: whereunto is added a defence of the author's explication of the experiments, against the objections of Franciscus Linus and, Thomas Hobbs. Gedruckt von Miles Flesher für Richard Davis, Buchverkäufer in Oxford.
- [6] Bühler, Bernd und Hafer, Andreas (2016): *Von Pythagoras zur Quantenphysik – Eine kurze Geschichte der Naturwissenschaften*. Konrad Theiss Verlag. ISBN: 978-3-8062-3387-2.
- [7] Dalin, Bo (2001): *The Primacy of Cognition – or of Perception? A Phenomenological Critique of the Theoretical Bases of Science Education*. In: Science & Education 10, Seiten 453–475. DOI: [10.1023/A:1011252913699](https://doi.org/10.1023/A:1011252913699)
- [8] Demtröder, Wolfgang (2013): *Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme*. 6. neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Verlag: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-642-25465-9. DOI: [10.1007/978-3-642-25466-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25466-6)
- [9] Deutsche Wetterdienst (2015): *Klimagase (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)*. URL: [https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung\\_atmosphaere/spurengase/inh\\_nav/klimagase\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/klimagase_node.html), zugegriffen: 30.09.2022.

- [10] Eckart, Andreas (2018): *The early great debate: a comment on Ibn Al-Haythā's work on the location of the milky way with respect to the earth*. In: *Arabic Sciences and Philosophy*, 28(1), Seiten: 1-30. DOI: [10.1017/S0957423917000078](https://doi.org/10.1017/S0957423917000078)
- [11] Erbrecht, Rüdiger und König, Hubert (Hrsg) (2003): *Das große Tafelwerk interaktiv*. Cornelsen Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-464-57144-6.
- [12] Eyer, Marc und Aeschlimann, Ueli (2013): *Pascals Barometer – frei nach Martin Wagenschein*. Hep Verlag AG, Bern. ISBN: 978-3-0355-0008-0.
- [13] Eyer, Marc (2015): *Lehrstückunterricht im Horizont der Kulturgeneese – Ein Modell für lehrkunstdidaktischen Unterricht in den Naturwissenschaften*. Verlag: Springer Spektrum. ISBN: 978-3-658-10997-4. DOI: [10.1007/978-3-658-10998-1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-10998-1)
- [14] Fédération Aéronautique Internationale (FAI) (2004): *100km Altitude Boundary for Astronautics*. URL: <https://www.fai.org/page/icare-boundary>. Letzte Änderung: 21.06.2004, zugegriffen: 30.09.2022.
- [15] Fischer, Klaus (2015): *Galileo Galilei – Biographie seines Denkens*. 1. Auflage W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-17-021301-2.
- [16] Galilei, Galileo (1632): *Dialogo sopra i due massimi sistemi*. Florenz. Deutsch: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische. Übersetzt und erläutert von Emil Strauss. B.G. Teubner, 1891.
- [17] Galilei, Galileo (1638): *Discorsi e dimostrazioni matematiche*. Leiden. Deutsch: Discorsi – Unterredungen und mathematische Beweisführung zu zwei neuen Wissensgebieten. Übersetzt und herausgegeben von Ed Dellian. Felix Meiner Verlag, Hamburg. Philosophische Bibliothek, Band 678, 2015. ISBN: 978-3-7873-2812-3. DOI:[10.28937/978-3-7873-2812-3](https://doi.org/10.28937/978-3-7873-2812-3)
- [18] Gemmer, Björn und Giersbeck, Michael (2017): *Pascals Barometer – Physik-Projekt für die achte Klasse zur Einführung in die Aero- und Hydrostatik*. Unveröffentlichtes Unterrichtsmanuskript des Landschulheims Steinmühle.
- [19] Genz, Henning (2004): *Nichts als das Nichts – Die Physik des Vakuums*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN 3-527-40319-1.
- [20] Gerlach, Walter (1964): *Physik in Geistesgeschichte und Pädagogik*. Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln.
- [21] Heller, Bruno (1970): *Grundbegriffe der Physik im Wandel der Zeit*. Friedr. Vieweg + Sohn GmbH, Braunschweig. ISBN: 3-528-08285-2.
- [22] IPCC (1990): *Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar1/wg1/>, zugegriffen: 19.06.2020.

- [23] Jackson, Tom (2016): *Physik – 100 Meilensteine in der Geschichte der Physik*. Libero IBP Verlag, Kerkdriel. ISBN 978-90-8998-672-6.
- [24] Kubli, Fritz (2005): *Mit Geschichten und Erzählungen motivieren – Beispiele für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht* Aulis-Verlag Deubner, Köln. ISBN 3-7614-2611-9.
- [25] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2015): *Zusammensetzung der Luft* URL: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/zusammensetzung-der-luft>, zugegriffen: 30.09.2022.
- [26] Mach, Ernst (1912): *Mechanik in ihrer Entwicklung*. F. A. Brockhaus, Leipzig. 7. Ausgabe (Erstausgabe 1883).
- [27] Merkur.de (2017): *Welcher Luftdruck herrscht an Bord von Flugzeugen?* URL: <https://www.merkur.de/reise/welcher-luftdruck-herrscht-an-bord-von-flugzeugen-zr-6835358.html>. Letzte Änderung: 06.09.2017, zugegriffen: 25.02.2023.
- [28] Meschede, Dieter (Hrsg.) (2015): *Gerthsen Physik*. 25. Auflage. Verlag: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-45977-5. DOI: [10.1007/978-3-662-45977-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45977-5)
- [29] Miniaturwunderland (2012): *Die Entdeckung des Vakuums durch Otto von Guericke*. URL: <https://www.miniatur-wunderland.de/wunderland-entdecken/sonderausstellungen/geschichte-zivilisation/1600-1789/>, mit freundlicher Erlaubnis des Miniaturwunderlandes, zugegriffen: 29.11.2022.
- [30] Nickerson, Raymond S. (1998): *Confirmation bias: A ubiquitous phenomenon in many guises*. In: *Review of General Psychology*, 2 (2), Seiten 175–220. DOI: [10.1037/1089-2680.2.2.175](https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.2.175)
- [31] Rößler, Wolfgang (2007): *Eine kleine Nachtphysik – Geschichten aus der Physik*. Korrigierter Nachdruck der ersten Auflage. Birkhäuser Verlag AG, Basel, Boston, Berlin. ISBN: 978-3-7643-7743-4.
- [32] Royal Society (2022): *History of the Royal Society*. URL: <https://royalsociety.org/about-us/history/>, zugegriffen: 05.02.2023.
- [33] Schorn-Schütte, Luise (2019): *Geschichte Europas in der Frühen Neuzeit – Grundzüge einer Epoche 1500-1789*. 3. Auflage (Erstausgabe 2009). Ferdinand Schöningh Verlag. ISBN: 978-3-8252-8740-5.
- [34] Simonyi, Károly (1995): *Kulturgeschichte der Physik*. 2. Deutsche Ausgabe. Verlag Harri Deutsch, Thun/Frankfurt am Main. ISBN: 3-8171-1379-X.
- [35] Ucke, Christian und Schlichting, H. Joachim (2011): *Spiel, Physik und Spaß – Physik zum Mitdenken und Nachmachen*. 1. Auflage. Verlag: Wiley-VCH Verlag, Weinheim. ISBN: 978-3527409501.

- [36] Wackenroder, Heinrich (1849): *Über das wahrscheinliche Gewicht der Atmosphäre*. Archiv der Pharmazie, 110. Jahrgang., Nr. 1, Seiten 4-14.
- [37] Wagenschein, Martin (2009): *Naturphänomene sehen und verstehen*. 4. Auflage. Hep verlag AG, Bern. IBAN 978-3-03905-511-1.
- [38] Walker, Gabrielle (2007): *Ein Meer von Luft – Eine Naturgeschichte der Atmosphäre*. Berlin Verlag GmbH, Berlin. ISBN: 978-3-8270-0595-3.
- [39] Wikimedia (2006): *Bust of Aristotle*. Fotografiert von Jastrow. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aristotle\\_Altemps\\_Inv8575.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aristotle_Altemps_Inv8575.jpg), gemeinfrei, zugegriffen: 18.03.2023.
- [40] Wikimedia (2006): *Portrait of Robert Boyle*. Gezeichnet von Anselm van Hulle. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robert\\_boyle.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Robert_boyle.jpg), gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [41] Wikimedia (2006): *Quecksilberbarometer von Torricelli*. Erstellt von Ruben Castelnuovo. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baro\\_0.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baro_0.png), gemeinfrei, zugegriffen: 22.05.2023.
- [42] Wikimedia (2007): *The Magdeburg Hemispheres*. Gezeichnet von Poul la Cour und Jacob Appel. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2913647>, gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [43] Wikimedia (2008): *Portrait of Galileo Galilei*. Gezeichnet von Justus Sustermans. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Justus\\_Sustermans\\_-\\_Portrait\\_of\\_Galileo\\_Galilei,\\_1636.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Justus_Sustermans_-_Portrait_of_Galileo_Galilei,_1636.jpg), gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [44] Wikimedia (2008): *Illustration zum „Hydrostatisches Paradoxon“*. Erstellt von Werneuchen. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrostatisches\\_Paradoxon2.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrostatisches_Paradoxon2.svg), gemeinfrei, zugegriffen: 18.03.2023.
- [45] Wikimedia (2008): *Illustration zum „Hydrostatisches Paradoxon“*. Erstellt von Werneuchen. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrostatisches\\_Paradoxon4.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrostatisches_Paradoxon4.svg), gemeinfrei, zugegriffen: 18.03.2023.
- [46] Wikimedia (2008): *Illustration zum „Hydrostatisches Paradoxon“*. Erstellt von Werneuchen. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrostatisches\\_Paradoxon6.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrostatisches_Paradoxon6.svg), gemeinfrei, zugegriffen: 18.03.2023.
- [47] Wikimedia (2010): *Atmosphere layers*. Erstellt von NOAA, Mysid, Stefan Haubenthal und Tueftli. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosphere\\_layers-de-3.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmosphere_layers-de-3.svg), gemeinfrei, zugegriffen: 18.03.2023.

- [48] Wikimedia (2011): *Puy de Dôme near Clermont-Ferrand in Auvergne in France*. Fotografiert von Romain. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Puy\\_de\\_D%C3%B4me\\_near\\_Clermont-Ferrand\\_in\\_Auvergne\\_in\\_France.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Puy_de_D%C3%B4me_near_Clermont-Ferrand_in_Auvergne_in_France.jpg), CC BY-SA 3.0, zugegriffen: 19.03.2023.
- [49] Wikimedia (2012): *Portrait of Blaise Pascal*. Kopie eines Gemäldes von Francois II Quesnel. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pascal\\_Blaise.jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pascal_Blaise.jpeg), gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [50] Wikimedia (2013): *Luftdruck  $p$  in Abhängigkeit von der Höhe  $h$  (Barometrische Höhenformel)*. Erstellt von Klaus-Dieter Keller. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pressure\\_air.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pressure_air.svg), CC BY-SA 3.0, zugegriffen: 18.03.2023.
- [51] Wikimedia (2013): *Portrait of Evangelista Torricelli*. Gezeichnet von Lorenzo Lippi. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Evangelista\\_Torricelli\\_by\\_Lorenzo\\_Lippi\\_\(circa\\_1647,\\_Galleria\\_Silvano\\_Lodi\\_%26\\_Due\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Evangelista_Torricelli_by_Lorenzo_Lippi_(circa_1647,_Galleria_Silvano_Lodi_%26_Due).jpg), gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [52] Wikimedia (2015): *Luftdruck  $p$  in Abhängigkeit von der Höhe  $h$  (Barometrische Höhenformel)*. Erstellt von Johannes Schneider. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Ermittlung\\_des\\_absoluten\\_Nullpunktes\\_mit\\_dem\\_Gesetz\\_von\\_Gay-Lussac.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Ermittlung_des_absoluten_Nullpunktes_mit_dem_Gesetz_von_Gay-Lussac.svg), CC BY-SA 4.0, zugegriffen: 29.10.2022.
- [53] Wikimedia (2017): *Picture of an experiment by Gasparo Berti*. Gezeichnet von Gaspar Schott. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gasparo\\_Berti\\_Experiment.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gasparo_Berti_Experiment.jpg), gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [54] Wikimedia (2017): *Martin Wagenschein 1983 in Darmstadt beim Lehrstueck Pascals Barometer*. Fotografiert von Dieter Hermann. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57191416>, CC BY-SA 3.0, zugegriffen: 19.03.2023.
- [55] Wikimedia (2022): *Portrait of Otto von Guericke*. Gezeichnet von Anselm van Hulle. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Otto-von-Guericke-TS.jpg>, gemeinfrei, zugegriffen: 19.03.2023.
- [56] Wildhirt, Susanne (2008): *Lehrstückunterricht gestalten. Das Konzept der Lehrkunstdidaktik - Band 2*. 1. Auflage. Hep-Verlag, Bern. ISBN: 978-3-03551-008-9.
- [57] Zierep, Jürgen und Bühler, Karl (2015): *Grundzüge der Strömungslehre – Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide*. 10. überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-11796-2. DOI: [10.1007/978-3-658-11797-9](https://doi.org/10.1007/978-3-658-11797-9)



# A Anhang

## A.1 Experimente zur Integration in das Lehrstück

Die folgenden Experimente sind dazu gedacht, um in das Lehrstück integriert zu werden. Sie sollen die fachwissenschaftlichen Inhalte verdeutlichen und so das Verständnis fördern.

### A.1.1 Druck als Quotient aus Kraft und Fläche



**Abbildung A.1:** Mit einer Glasflasche und einem Spülschwamm wird der Zusammenhang zwischen Kraft, Fläche und Druck demonstriert.

**Material:**

- Schaumstoff
- Volle Glasflasche

**Durchführung:** Eine volle Flasche wird zunächst mit dem breiten Boden, dann mit der verjüngten Flaschenhalsöffnung auf ein Stück Schaumstoff gestellt.

**Denkaufgabe:** Wie verhält sich der Schaumstoff beim Draufstellen der Flasche? Worin besteht der Unterschied zwischen den beiden Seiten?

**Erklärung:** Die Gewichtskraft der Flasche  $F_G$  ist in beiden Fällen gleich, doch die Auflagefläche  $A$  unterscheidet sich. Das führt zu einem unterschiedlichen Druck  $p$  im Schaumstoff. Je tiefer sich die Flasche in den Schaumstoff eindrückt, desto größer ist der Druck (vgl. [2.3 Druck](#)).

**Kommentar:** Damit die Flasche nicht umfällt, muss sie oben festgehalten werden. Das kann aussehen, als würde die Flasche mit der Hand in den Schwamm gedrückt. Daher ist es wichtig, die Schüler\*innen die Flasche einmal selbst halten zu lassen, damit sie merken, dass die Hand nur zum Stabilisieren der Flasche benötigt wird. Alternativ kann die Stabilisation mit einer Klemme für einen großen Kolben oder ein großes Becherglas aus der Chemiesammlung realisiert werden.

Das Experiment kann sehr gut mit einem Spülschwamm durchgeführt werden. Dadurch können die Schüler\*innen das Experiment auch zu Hause durchführen. Je weicher der Schwamm ist, desto deutlicher ist der Effekt sichtbar.

## A.1.2 Druck wirkt in alle Richtungen

Mit Hilfe einer Vakuumpumpe und eines Luftballons wird gezeigt, dass der Druck Kräfte hervorruft, die gleichermaßen in alle Richtungen wirken.



**Abbildung A.2:** Der Luftballon dehnt sich beim Vakuumieren gleichermaßen in alle Richtungen aus, bis er die Wand der Glasglocke berührt.

### Material:

- Luftballon
- Vakuumpumpe
- (Klebeband)

**Durchführung:** Ein zum Teil aufgeblasener Ballon wird unter die Vakuumpumpe gelegt beziehungsweise an ihr festgeklebt. Dann wird die Glocke evakuiert.

**Denkaufgabe:** Was ist zu beobachten? Wie kann dieses Phänomen erklärt werden?

**Erklärung:** Der Ballon dehnt sich unter der Vakuumlöcke gleichmäßig in alle Richtungen aus, weil die Luft innerhalb des Ballons in alle Richtungen drückt. Wird der Umgebungsluftdruck geringer, sinkt der Widerstand, gegen den die Luft in dem Ballon drückt. Der Ballon dehnt sich aus (2.3.1 Hydrostatischer Druck).

**Kommentar:** Dieses Experiment verdeutlicht die Kraft des Luftdrucks und die Richtungsunabhängigkeit des Luftdrucks auf anschauliche Weise. Mit diesem Experiment kann daher auch erklärt werden, warum der Luftdruck unter freiem Himmel und unter einem Dach gleich ist.

Eine Schwierigkeit bei diesem Experiment ist, dass der Ballon sehr bald die ganze Vakuumlöcke ausfüllt und sich dann nicht mehr in alle Richtungen gleichmäßig ausbreiten kann. Es ist also wichtig, besonders auf den Anfang des Experimentes zu achten.

### A.1.3 Hydrostatisches Paradoxon

Damit Bertis Experiment von den Schüler\*innen richtig eingeschätzt und verstanden werden kann, ist die Erkenntnis essenziell, dass der Druck, den eine Flüssigkeit auf den Gefäßboden ausübt, nur von der Füllhöhe und nicht vom Volumen der abhängt [12, S. 110]. Diese Tatsache ist kontraintuitiv. Daher ist es hilfreich, wenn die Lehrkraft Experimente bereithält, an denen das Phänomen beobachtet werden kann.

#### Experiment 1

Das Wasser in einem Gefäß übt Druck auf den Gefäßboden aus. Dieser Druck kann gemessen werden.

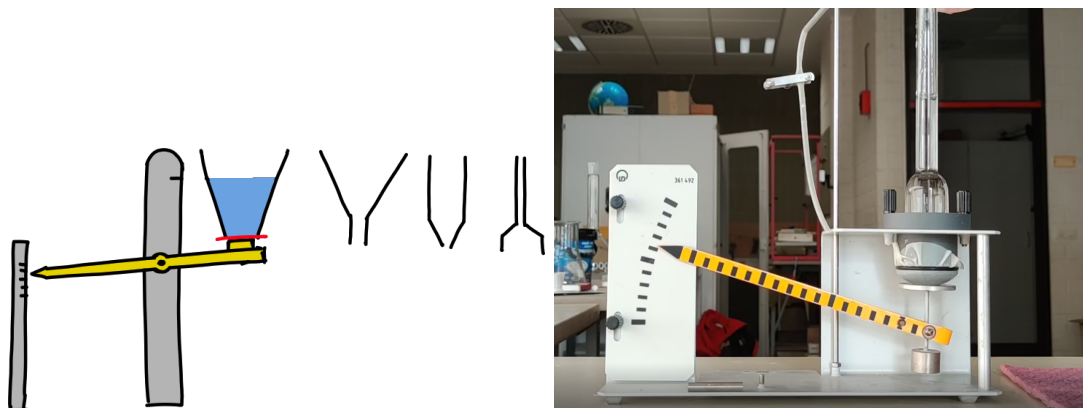


Abbildung A.3: Das Experiment als Skizze (links) und Foto (rechts).

**Material:**

- Gefäße mit unterschiedlichen Volumina und Formen
- Gummimembran
- Gießkanne
- Hebel

**Durchführung:** Die Membran wird am Hebel angebracht. Die unterschiedlich geformten Gefäße werden nacheinander auf die Membran aufgesteckt und jeweils bis zur gleichen Höhe mit Wasser gefüllt. Die Druckkraft kann am Hebel abgelesen werden.<sup>1</sup>

**Denkaufgabe:** Beobachte, wie sich der Druckhebel bei den unterschiedlichen Gefäßen verhält. Wie kannst du dir das erklären?

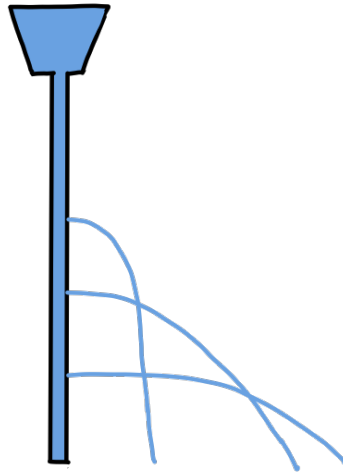
**Erklärung:** Unabhängig von der Form der Gefäße schlägt der Hebel bei gleichem Füllstand gleich weit aus. So wird sichtbar, dass der Druck auf den Gefäßboden nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule und nicht von der Form beziehungsweise vom Volumen abhängt (2.5 Hydrostatisches Paradoxon).

**Kommentar:** Selbstverständlich kann anstelle des Hebels ein Manometer verwendet werden. Der Hebel hat jedoch den Vorteil, dass er die Druckkraft direkter visualisiert.

---

<sup>1</sup> Streng genommen dehnt sich durch den Druck die Membran aus und übt eine Kraft auf den Hebel aus. Gemessen wird also eigentlich die *Druck(-differenz) · Fläche*. Die Membran ist recht flexibel. Dadurch ist die Auflagefläche immer ähnlich groß. Exakt ist diese Methode also nicht, jedoch ist sie didaktisch dennoch nützlich. Insgesamt bleibt die Herausforderung, eine intrinsische Größe zu veranschaulichen.

## Experiment 2



**Abbildung A.4:** Abhängig von der Höhe auf welcher das Loch ist, spritzt das Wasser unterschiedlich weit.

### Material:

- Unten verschlossene Rohre in verschiedenen Dicken mit Löchern auf verschiedenen Höhen
- Trichter
- Wassergefäß (z.B. Gießkanne)

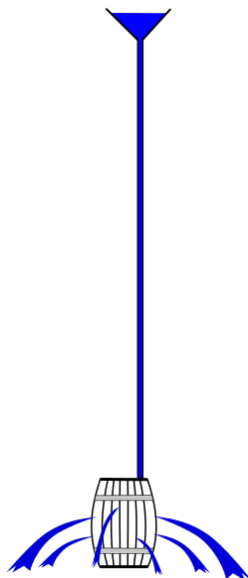
**Durchführung:** In Rohre unterschiedlicher Dicke werden jeweils auf den gleichen Höhen Löcher von 1,5 – 2 mm Durchmesser gebohrt. Zunächst wird ein Rohr von oben mit Hilfe eines Trichters mit Wasser gefüllt. Während der Beobachtung muss konstant Wasser nachgeschüttet werden, sodass der Flüssigkeitsspiegel auf der gleichen Höhe bleibt. Dies wird mit Rohren unterschiedlicher Dicke wiederholt.

**Denkaufgabe:** Wie kann die unterschiedliche Weite der Wasserstrahlen auf unterschiedlichen Höhen erklärt werden? Vergleiche Rohre mit unterschiedlichem Durchmesser. Wie kannst du dir das erklären?

**Erklärung:** Der Strahl reicht unterschiedlich weit, wobei die Entfernung von dem Druck auf der entsprechenden Höhe abhängt. Spritzt das Wasser weiter, ist der Druck größer. Spritzt es weniger weit, ist der Druck geringer. Da der Druck unten größer ist, wird das Wasser unten weiter spritzen. Der Druck ist unabhängig von Rohrdurchmesser. Daher beeinflusst nur die Höhe des Loches, wie weit das Wasser spritzt (2.5 Hydrostatisches Paradoxon).

**Kommentar:** Damit der Versuch gelingt, muss den Schüler\*innen bewusst sein, dass die Weite des Wasserstrahls vom Druck abhängt. Hierzu kann der Vergleich zu einer Wasserpistole hilfreich sein. Um zu verdeutlichen, dass der Druck nicht von dem Volumen der Röhre abhängt, sollten mindestens zwei Röhren mit unterschiedlichen Durchmessern und Löchern auf der gleichen Höhe verwendet werden. So ist zu sehen, dass das Volumen keinen Einfluss hat. Dadurch kann der Übergang von kleinen Gefäßen, über größere Gefäße, hin zum 12 m langen Wasserschlauch besser verstanden werden.

### Gedankenexperiment – Pascals Wette



**Abbildung A.5:** Mit einem hohen dünnen Rohr wird das Fass zum auslaufen gebracht [46]

Im Jahr 1648 soll Blaise Pascal mit Freunden gewettet haben, dass er mit einem Glas Wein ein volles Weinfass zum Auslaufen (nicht zum Überlaufen!) bringen könne. Er gewann diese Wette mit einem Weinfass, in das er eine dünne Röhre steckte (vgl. Abbildung A.5 Pascals Wette). Warum tritt der Wein aus dem Fass aus? Welches physikalische Prinzip hat Pascal verwendet? (Idee von Björn Gemmer)

**Erklärung:** Im Fass wirkt der Druck der Flüssigkeit gleichmäßig in alle Richtungen. Die Fasswände halten dem Druck stand und die Flüssigkeit bleibt im Fass. Doch je höher der Flüssigkeitsspiegel in der Röhre wird, desto größer wird der Druck im Fass. Irgendwann kommt der Punkt, ab dem die Gefäßwände dem Druck nicht mehr standhalten können. Das Fass beginnt auszulaufen und kann

sogar platzen [1, S. 5f] [28, S. 102]. Der Druck ist dabei nur von der Höhe des Flüssigkeitsspiegels und nicht von dem Volumen abhängig (2.5 Hydrostatisches Paradoxon).

**Kommentar:** Dieses Phänomen kann selbstverständlich auch als Experiment durchgeführt werden. Da das dafür notwendige Material jedoch i.d.R. in Schulen nicht vorhanden ist, führe ich es hier als Gedankenexperiment auf.<sup>2</sup>

### A.1.4 Kommunizierende Röhren



**Abbildung A.6:** Miteinander verbundene Gefäße unterschiedlicher Durchmesser und Form.

#### Material:

- Miteinander verbundene unterschiedlich geformte Gefäße
- Wasser (gefärbt)

---

<sup>2</sup> Es ist auch möglich, dieses Experiment als Video zu zeigen. Bei der Suche ist zu beachten, dass durch den Suchbegriff „Pascals Wette“ hauptsächlich seine Überlegungen zur Existenz von Gott zu finden sind. Suchbegriffe wie „Pascal Fass“, „Pascal barrel“ oder „Pascal hydrostatisches Paradoxon“ liefern bessere Ergebnisse.

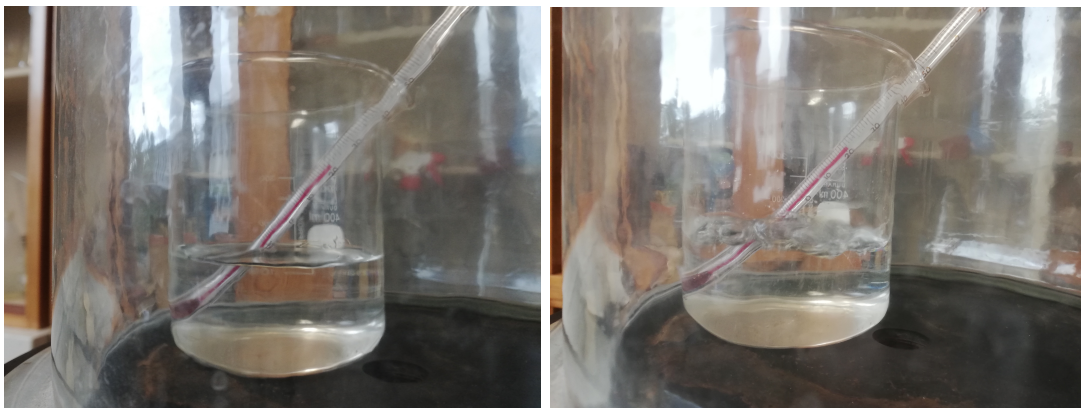
**Durchführung:** Die miteinander verbundenen Gefäße unterschiedlicher Form werden gefüllt mit Wasser gefüllt.

**Denkaufgabe:** Was ist an dem Füllstand zu beobachten? Wie kann das erklärt werden?

**Erklärung:** Der Füllstand wird sich in allen Röhren angleichen, sodass in jeder Röhre der gleiche hydrostatische Druck herrscht (vgl. [2.6 Kommunizierende Röhren](#)).

**Kommentar:** Für das Prinzip der kommunizierenden Gefäße gibt es zahlreiche Anwendungsbeispiele. Einige davon sind Füllstandsanzeigen und Schleusen. Auch in Wassertürmen wird es genutzt, um durch das höherliegende Reservoir den Wasserdruck an den Abnahmestellen zu erhöhen. Es ist also gut möglich, Anwendungsbeispiele herauszusuchen und von den Schüler\*innen beschreiben zu lassen. Dadurch wird die Alltagsrelevanz zusätzlich verdeutlicht.

### A.1.5 Bei geringem Druck kochen



**Abbildung A.7:** Bei geringer werdendem Druck bilden sich Blasen im Wasser.

#### Material:

- Wasserglas
- Thermometer
- Vakuumglocke

**Durchführung:** Ein gefülltes Wasserglas wird zusammen mit einem Thermometer unter die Vakuumglocke gestellt. Diese wird evakuiert.

**Denkaufgabe:** Was passiert beim Evakuieren? Wo bilden sich die Blasen? Wie kann die Blasenbildung in der Flüssigkeit erklärt werden?

**Erklärung:** Die Blasen entstehen in der Flüssigkeit und bewegen sich in Richtung Wasseroberfläche. Sie entstehen aus Gasblasen in der Flüssigkeit. Weil der Druck unter der Vakuumglocke geringer wird, dehnt sich das im Wasser gelöste Gas aus und bildet Blasen. Diese steigen in Richtung der Wasseroberfläche, weil sie eine geringere Dichte haben als das Wasser (vgl. [2.4.3 Bei geringem Druck kochen](#)).

**Kommentar:** Dieses Experiment kann zur Verdeutlichung genutzt werden, weshalb in einem langen Wasserschlauch oder dem Wasserglas unter der Vakuumglocke Blasen zu sehen sind.<sup>3</sup>

Das Thermometer ist für dieses Experiment wichtig, um zu visualisieren, dass die Temperatur gleich bleibt. Anhand des Phasendiagramms für Wasser wird deutlich, dass die zu sehenden Blasen kein Wasserdampf sind, denn Wasser ist bei Raumtemperatur und dem vorliegenden Druck unter der Vakuumglocke noch flüssig. Wird das Wasser jedoch leicht erhitzt, entsteht Wasserdampf.

Das Experiment kann im Anschluss an das Lehrstück einen Übergang zur kinetischen Gastheorie und der idealen Gasgleichung darstellen. So bietet das Lehrstück im Sinne der Exemplarizität Anknüpfungspunkte für weitere Unterrichtsthemen.

---

<sup>3</sup> Wurde der lange Schlauch so weit hochgezogen, dass der Umgebungsluftdruck nicht mehr ausreicht, um das Wasser oben zu halten, entsteht in dem oberen Teil des Schlauches ein Vakuum. Durch das weitere Anheben des Schlauches wird der Luftdruck in dem Teil über dem Wasser immer niedriger, da das Volumen zunimmt, die Temperatur jedoch gleichbleibt (vgl. Boyle-Mariotte Gesetz in [2.4 Kinetische Gastheorie](#)). Dieser niedrige Druck sorgt dafür, dass sich im Wasser im langen Schlauch Bläschen bilden. Wird der Schlauch wieder runtergelassen, steigt der Druck in dem oberen Teil des Schlauches wieder. Das Wasser hört auf zu „kochen“.

## A.1.6 Gewicht der Luft

Die Erkenntnis, dass Luft eine Masse hat, die eine Gewichtskraft ausübt, spielt eine zentrale Rolle in dem Lehrstück. Um dies zu verdeutlichen, können unterschiedliche Experimente verwendet werden (vgl. 4.3.5 Gewicht der Luft).

### Experiment 1



**Abbildung A.8:** Die Dichte der Luft wird mit Hilfe einer Glasflasche und einer Vakuumpumpe bestimmt.

#### Material:

- Glasflasche
- Vakuumpumpe
- Wasserbecken
- Feine Waage (Messbereich bis Milligramm, i.d.R. in Chemiesammlungen zu finden)

**Durchführung:** In Marc Eyers Lehrstückversion wird die Dichte der Luft mit Hilfe einer Flasche bestimmt, die einmal mit Luft gefüllt und einmal evakuiert gewogen wird [13, S. 116f,135ff]. Dazu wird zunächst die mit Luft gefüllte Flasche gewogen. Anschließend wird sie evakuiert, verschlossen und erneut gewogen. Nach dem Wiegen wird sie unter Wasser geöffnet und das Volumen des hereinströmenden Wassers bestimmt. Dies entspricht der Menge an Luft, die beim Evakuieren entnommen wurde.

**Denkaufgabe:** Wodurch entsteht die Massendifferenz zwischen den beiden Messungen? Was bedeutet dies für die Luft in unserem Klassenzimmer?

**Erklärung:** Die Massendifferenz wird durch die Masse der Luft hervorgerufen. Da die Flasche jedoch nie vollständig evakuiert werden kann, wird sie mit dem Flaschenhals nach unten unter Wasser geöffnet. Der Teil der Flasche, der sich dabei mit Wasser füllt, entspricht dem Teil der Luft, der rausgepumpt wurde. So kann die Dichte von Luft berechnet werden. Es gilt  $\rho(\text{Luft}) = \text{Massendifferenz} / \text{Volumen der entfernten Luft}$ .

**Kommentar:** Diese Methode entspricht dem historischen Experiment, welches Galilei zur Messung der Luftmasse nutzte. Zudem kann damit die Dichte der Luft relativ genau bestimmt werden.

Die Schwierigkeit an diesem Experiment besteht darin, dass die Veränderung der Luftmenge in der Flasche nicht direkt beobachtbar ist. Die Flasche verändert ihre Gestalt nicht. Zudem ist nicht trivial, dass die einfließende Wassermenge der zuvor entfernten Luft entspricht. Für die Erklärung ist es wichtig, dass beide Theorien (Horror Vacui und Luftdrucktheorie) gleichberechtigt zur Erklärung verwendet werden. Dies ist notwendig, da zu dem Zeitpunkt des Experimentes noch nicht entschieden wurde, welche Theorie die zutreffendere ist. Möglicherweise kommen die unterschiedlichen Erklärungsansätze direkt aus der Klasse. Anderenfalls braucht es das Geschick der Lehrperson, um beide Erklärungen treffend zu formulieren. Eine Erklärung mit Hilfe des Horror Vacui könnte beispielsweise lauten: Da die Natur das künstlich erzeugte Vakuum verhindern möchte, zieht die „Vakuumkraft“ das Wasser in die Flasche, bis das Vakuum wieder verschwunden ist. Eine Erklärung mit Hilfe der Luftdrucktheorie könnte lauten: Der Umgebungsluftdruck drückt das Wasser in die Flasche, bis die Flasche wieder so voll ist, dass der Druck in der Flasche dem Umgebungsluftdruck entspricht.

## Experiment 2



Abbildung A.9: Die Dichte der Luft wird mit Hilfe einer großen Spritze bestimmt.

### Material:

- Spritze mit luftdichtem Verschluss (beispielsweise Luer-Lock)
- Nagel
- Feine Waage (Messbereich bis Milligramm, i.d.R. in Chemiesammlungen zu finden)

**Durchführung:** Eine etwas direktere Methode ist die Verwendung einer Spritze. Hierzu kann die gleiche Spritze verwendet werden, mit der die „Kraft des Vakuums“ bestimmt wurde. Zunächst wird die Spritze bis zu einem bestimmten Volumen mit Luft aufgezogen und gewogen. Anschließend wird die Luft wieder rausgelassen, die Spritze verschlossen und dann das gleiche Volumen „mit Vakuum aufgezogen“. Dazu wird die Spritze zunächst vorne verschlossen, sodass keine Luft hinein strömen kann und schließlich der Kolben hinausgezogen. Damit sich die Spritze beim Loslassen des Kolbens nicht direkt wieder zusammenzieht, wird zuvor ein Loch in den Kolben gebohrt, durch das ein Nagel

gesteckt wird, um den Kolben beim entsprechenden Volumen zu fixieren. Verschluss und Nagel müssen selbstverständlich in beiden Fällen mitgewogen werden.

**Denkaufgabe:** Wodurch entsteht die Massendifferenz zwischen den beiden Messungen? Was bedeutet dies für die Luft in unserem Klassenzimmer?

**Erklärung:** Die Differenz der gemessenen Massen ergibt sich durch die Masse der Luft. Mit der genaueren Waage, die bis auf 1 mg genau wiegt, erhielt ich eine Dichte von  $1,18 \text{ kg/m}^3$ , was nah an dem Literaturwert von  $1,2 \text{ kg/m}^3$  liegt. Mit der Waage, die bis auf 0,1 g genau wiegt, erhielt ich einen Wert von  $2 \text{ kg/m}^3$ . Dieser ist zwar deutlich weiter von dem Literaturwert entfernt, jedoch stimmt die Größenordnung. Schulen haben in Chemiesammlungen in der Regel Waagen, die bis auf 0,01 g genau wiegen. Somit sind sie hinreichend genau für dieses Experiment.

**Kommentar:** Der Vorteil an dieser Methode besteht darin, dass das Volumen des Vakuums direkt abgelesen werden kann. Zusätzlich ist die „Kraft des Vakuums“ beim Aufziehen der Spritze gut zu merken. So wird die Widersprüchlichkeit und Unklarheit der Erklärung des Phänomens nochmal unterstrichen. Ist es die Kraft des Volumens oder doch das Gewicht der Luft?

Der Nachteil besteht darin, dass im Vergleich zur Messung mit der Flasche eine feinere Waage benötigt wird, um die Differenz der Masse festzustellen, da das Volumen der Spritze geringer ist. Außerdem ist der Unterschied der Massen auf der Waage relativ gering. Der Überraschungseffekt ist dementsprechend nicht sehr groß.

Als Variation kann zuerst die Spritze mit dem Vakuum gewogen werden. Wenn die die Spritze auf der Waage liegt, wird die Waage auf null gesetzt. Dann wird die Spritze mit dem gleichen Volumen Luft gemessen. Die Waage zeigt dann direkt die Differenz an.

### Experiment 3

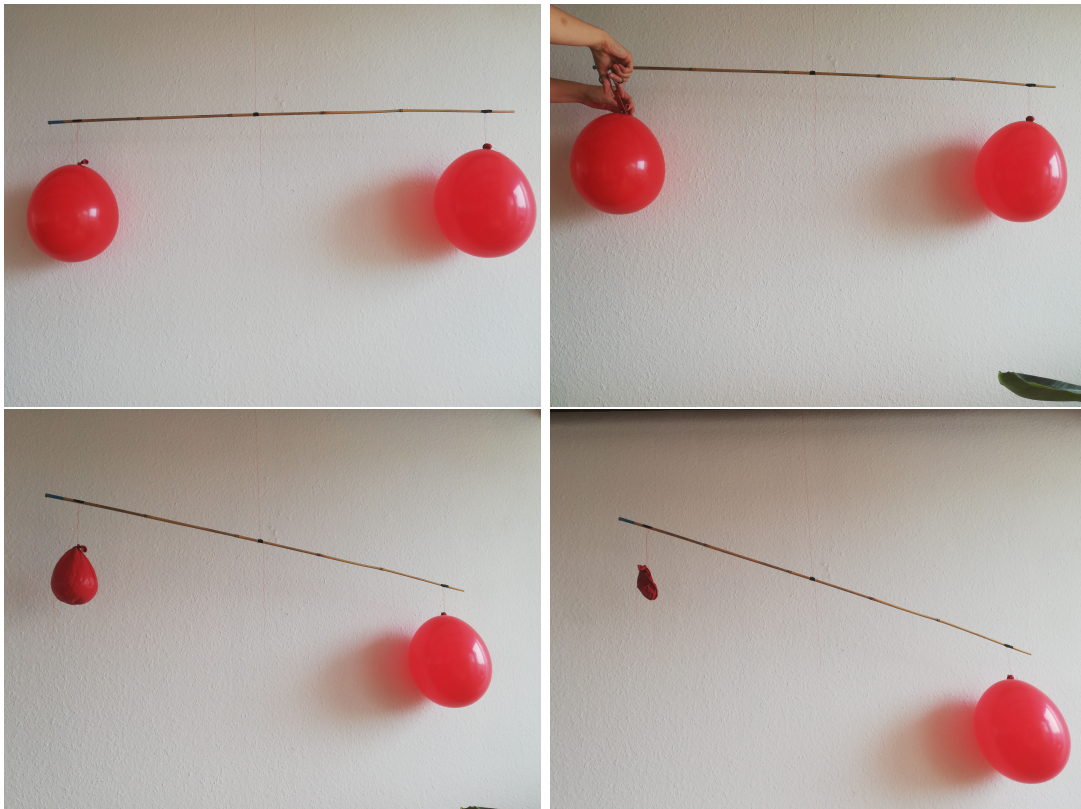


Abbildung A.10: Mit Hilfe von Luftballons und eines Bambusstocks wird verdeutlicht, dass Luft eine Masse hat.

#### Material:

- Bambusstock
- 2 Luftballons
- Klebeband
- Bindfaden
- Schere

**Durchführung:** Eine Bambusstange wird schwenkbar aufgehängt. An beiden Seiten wird ein voll aufgepusteter Ballon angebracht und mit Klebeband befestigt. Anschließend wird die Stange so ausgerichtet, dass beide Seiten im Gleichgewicht sind. Wurde dies erreicht, wird der Faden mit Klebeband an der Stange fixiert. Nun wird vorsichtig die

Luft aus einem Ballon entlassen. Hierzu wird der Ballon mit einer Schere neben dem Knoten eingeschnitten. Es ist wichtig, dass der Ballon dabei nicht platzt, da er sonst Material verliert.

**Denkaufgabe:** Wieso bewegt sich die Bambusstange? Was bedeutet dies für die Luft in unserem Klassenzimmer?

**Erklärung:** Nachdem die Luft rausgelassen wurde, hängt die „Bambuswaage“ schief. Die Massendifferenz zwischen den Ballons wird durch die nun fehlende verdichtete Luft in dem entleerten Ballon verursacht. Es wird sehr deutlich, dass die Luft in dem Ballon eine Masse hat.

**Kommentar:** Der Vorteil von diesem Experiment besteht darin, dass alle Materialien leicht verfügbar sind. Theoretisch können alle Schüler\*innen diesen Versuch zu Hause durchführen. Zudem zeigt das Experiment sehr anschaulich, dass Luft eine Masse hat. Dieses phänomenologische Vorgehen wirkt häufig besonders motivierend für Schüler\*innen, die nicht sehr physikaffin sind. Der Nachteil dieses Experimentes besteht darin, dass die Masse von Luft nicht quantifiziert werden kann.

Anschließend an dieses Experiment können die Dichte der Luft und die Masse der Luft im Klassenzimmer als Wert genannt oder mit Hilfe eines der beiden anderen Experimente bestimmt werden. Um die Masse der Luft vorstellbarer zu machen, könnten die Schüler\*innen nachfolgend Objekte mit einer ähnlichen Masse suchen.

Anstelle der Bambusstange kann ein Kleiderbügel für das Experiment verwendet. Hierbei ist der Effekt jedoch nicht so deutlich, da die Hebelwirkung geringer ist.

## A.2 Experimente als Zusatz

Ab hier folgen Experimente, die für das Experimentieren mit von Guericke und den Epilog des Lehrstücks angedacht sind.

### A.2.1 Saugnapf



Abbildung A.11: Beim evakuieren löst sich der Saugnapf vom Untergrund.

#### Material:

- Saugnapf
- Gefäß mit glattem Glasboden
- Vakuumglocke

**Durchführung:** Saugnapf an einer glatten Oberfläche (beispielsweise am Boden einer Glasschale) befestigen. Anschließend Saugnapf mit Glasboden hochkant unter die Vakuumglocke stellen und evakuieren.

**Denkaufgabe:** Wodurch hält der Saugnapf an der Oberfläche? Warum fällt er runter?

**Erklärung:** Durch das Andrücken des Saugnapfes an die Oberfläche, wird Luft unter ihm rausgedrückt. Wird der Saugnapf wieder losgelassen, wölbt er sich durch seine Form ein wenig von der Oberfläche ab. Dabei entsteht ein Luftdruck zwischen Saugnapf und Oberfläche, der geringer ist als der Umgebungsluftdruck. Aufgrund der Druckdifferenz drückt der Umgebungsluftdruck den Saugnapf auf die Oberfläche.

Es ist wichtig, dass der Untergrund glatt und sauber ist. Ansonsten kann es sein, dass Luft durch Unebenheiten unter den Saugnapf nachströmen kann und er sich wieder von der Oberfläche löst. Den Saugnapf anzufeuchten kann zusätzlich dabei helfen.

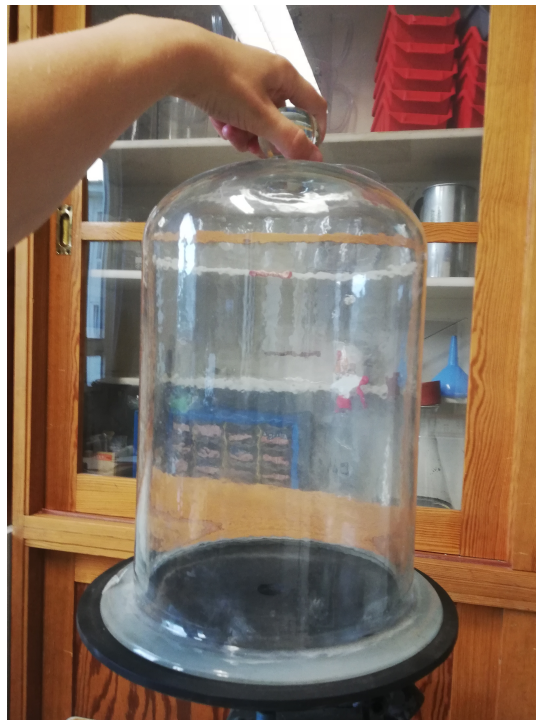
Wird die Glocke evakuiert, ist zu beobachten, dass der Saugnapf abfällt. Dafür ist es wichtig, dass unter dem Saugnapf noch ein wenig Restluft ist, die sich ausdehnen kann. Ansonsten bewirkt Adhäsion, dass der Saugnapf weiterhin am Glas haftet.

**Kommentar:** Inzwischen gibt es vermehrt Saugnapfe, die besonders gut halten sollen. Diese werden mit einer kleinen Handvakuumpumpe evakuiert. Sie werden beispielsweise für Shampoohalterungen in Duschen verwendet.



**Abbildung A.12:** Saugnapf, der mit einer Handvakuumpumpe vakuumiert wird, um besonders gut zu halten.

## A.2.2 Vakuumglocke anheben



**Abbildung A.13:** Eine Vakuumglocke kann nicht angehoben werden, wenn sie vakuumiert ist.

### Material:

- Vakuumglocke

**Durchführung:** Die Vakuumglocke wird evakuiert. Anschließend wird versucht, die Glocke vom Boden zu trennen.

**Denkaufgabe:** Warum ist es nicht möglich, die Vakuumglocke anzuheben?

**Erklärung:** Durch das Evakuieren sinkt der Luftdruck unter der Vakuumglocke. Der Umgebungsluftdruck drückt jedoch weiterhin auf die Oberfläche der Glocke. Die Druckdifferenz ist so groß, dass die Kraft eines Menschen nicht ausreicht, um die Glocke von der Bodenplatte zu trennen.

**Kommentar:** Dieses Experiment ist sehr ähnlich zu den Magdeburger Halbkugeln.

### A.2.3 Wasserglas verschließen



**Abbildung A.14:** Die Karte verschließt das Glas, sodass das Wasser nicht ausfließen kann, obwohl das Glas kopfüber gehalten wird.

#### Material:

- Glas mit glattem Rand
- Laminiertes Zettel oder Postkarte
- Wasser (gefärbt)

**Durchführung:** Ein Glas wird zum Teil mit Wasser gefüllt und die Postkarte wird über die Öffnung gelegt. Nun wird das Glas umgedreht, während die Karte auf den Glasrand gedrückt wird. Ist das Glas umgedreht, wird die Karte losgelassen.

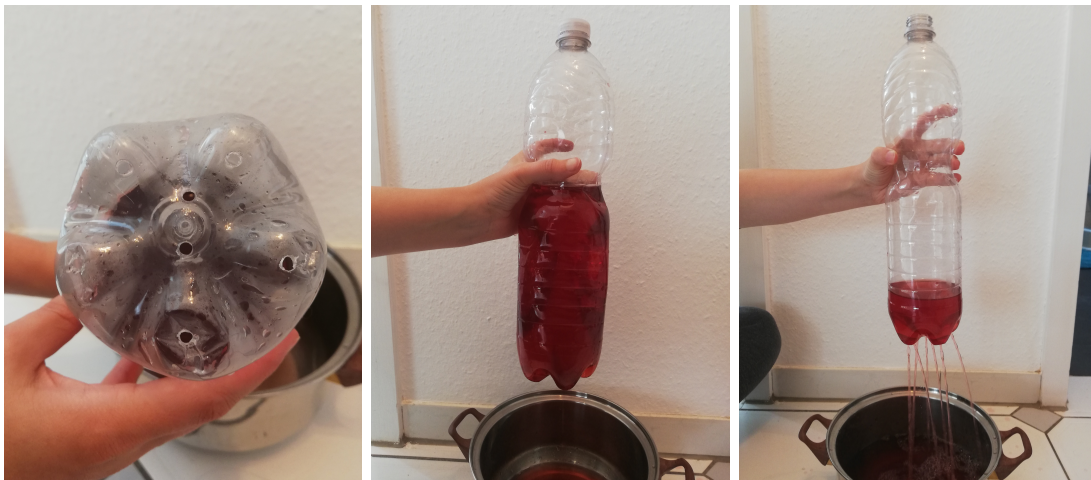
**Denkaufgabe:** Warum fällt die Karte nicht herunter?

**Erklärung:** Auch nach dem Loslassen bleibt die Karte am Glasrand und das Wasser fließt nicht aus. Die naheliegendste Erklärung wäre, dass der Schweredruck des Wassers geringer ist als der Umgebungsluftdruck  $p_{\text{Wasser}} < p_{\text{außen}}$ . Allerdings hatte der Inhalt in dem Glas vor dem Umdrehen den gleichen Druck wie die Umgebungsluft

( $p_{\text{innen}} = p_{\text{außen}}$ ). Nach dem Umdrehen kommt im Glas noch der Schweredruck des Wassers hinzu. Es würde also gelten  $p_{\text{innen}} + p_{\text{Wasser}} > p_{\text{außen}}$ . Der Druck im Glas wäre also größer als der Umgebungsluftdruck und die Karte müsste runterfallen. Warum bleibt die Karte am Glasrand „kleben“? Beim Umdrehen des Glases wird immer ein wenig Wasser herauslaufen. Es kommt jedoch keine neue Luft in das Glas. Dadurch sinkt der Luftdruck im Inneren so, dass  $p_{\text{innen}} + p_{\text{Wasser}} < p_{\text{außen}}$ . Die Karte wird vom äußeren Luftdruck auf den Glasrand gedrückt. Sobald Luft nachströmt, wird sich die Karte lösen.

**Kommentar:** Dieses Experiment veranschaulicht die Kraft des Luftdrucks. Doch die Erklärung für dieses Experiment zu finden, ist mit den Inhalten des Lehrstücks möglich, jedoch nicht ganz einfach. Um die Bedeutung des Luftdrucks für dieses Experiment zu verdeutlichen, kann es mit Hilfe eines Reagenzglases und einem Standfuß unter der Vakuumlöcke wiederholt und betrachtet werden.

#### A.2.4 Löchrige Flasche



**Abbildung A.15:** Aus einer verschlossenen Flasche läuft das Wasser nicht aus den Löchern am Boden der Flasche aus. Erst wenn die Flasche geöffnet wird und Luft nachströmt, fließt das Wasser aus.

#### Material:

- PET-Flasche
- Wasser (gefärbt)
- Bohrmaschine

**Durchführung:** In den Boden einer PET-Flasche werden kleine Löcher gebohrt. Anschließend wird die Flasche mit Wasser gefüllt, mit dem Deckel verschlossen und mit dem Boden nach unten angehoben.

**Denkaufgabe:** Warum bleibt das Wasser in der geschlossenen Flasche?

**Erklärung:** Beim Anheben der Flasche fließt zunächst ein wenig Wasser aus der Flasche. Dadurch wird der Luftdruck in der Flasche oberhalb des Wassers geringer. Neue Luft kann jedoch nicht nachströmen, weil die Oberflächenspannung des Wassers die Oberfläche stabilisiert. Deswegen ist der Druck in der Flasche geringer als der Umgebungsluftdruck. Dieser drückt von außen gegen die Löcher und sorgt so dafür, dass das Wasser in der Flasche bleibt. Wird die Flasche geöffnet, gleicht sich der Druck in der Flasche dem Umgebungsluftdruck an und das Wasser fließt, der Schwerkraft folgend, heraus.

Aus dem gleichen Grund dauert es vergleichsweise lange eine Flasche zu leeren, wenn sie genau mit der Öffnung nach unten gehalten wird. Wasser läuft aus, dadurch verringert sich der Luftdruck innerhalb der Flasche und der Umgebungsluftdruck drückt das Wasser gegen die Erdanziehung so, dass es schlechter ausfließen kann. Durch leichtes Wackeln gelangt dennoch neue Luft in die Flasche und das Wasser fließt weiter. Das Gluckern, was dabei zu hören ist, entsteht durch die hineinströmende Luft. Wird die Flasche etwas schräg gehalten, kann die Luft permanent nachströmen und das Wasser fließt gleichmäßiger.

**Kommentar:** Die Löcher im Flaschenboden sollten klein genug sein. Ansonsten reicht die Oberflächenspannung des Wassers nicht mehr aus und es kann passieren, dass die Luft von außen gluckerd in die Flasche strömt. Diese Erkenntnis ist auch wichtig für den Vergleich zwischen diesem Experiment und [A.2.3 Wasserglas verschließen](#). Dort stellt sich nach diesem Experiment die Frage, warum die Karte nötig ist. Das liegt daran, dass bei dem Glas das Loch extrem groß ist. So groß, dass die Oberflächenspannung nicht mehr ausreicht, um das Wasser zu stabilisieren. Deshalb hilft die Karte, da diese die Oberfläche unterstützt.

## A.2.5 Saugheber (engl. Siphon)



**Abbildung A.16:** Die Flüssigkeit fließt von dem höher stehenden Gefäß in das tieferliegende Ende des Schlauches.

### Material:

- Schlauch oder knickbarer Strohhalm
- 2 Gefäße z.B. Eimer oder Gläser
- Wasser (gefärbt)

**Durchführung:** Das eine Gefäß wird mit Wasser gefüllt und erhöht hingestellt, beispielsweise auf einen Tisch. Das zweite Gefäß wird tiefer gestellt, z.B. auf den Boden. Nun wird der Schlauch in das obere Gefäß eingetaucht und vollständig mit Wasser gefüllt. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass an dem Schlauch gesaugt wird, bis er voll mit Wasser ist. Das eine Ende des Schlauches wird in das Wasser des oberen Gefäßes gehalten. Das andere Ende wird mit dem Daumen verschlossen, dann über das untenstehende Gefäß gehalten. Dann wird der Daumen entfernt.

**Denkaufgabe:** Was ist das Erstaunliche an diesem Experiment? Warum fließt das Wasser in das untere Gefäß?

**Erklärung:** Das Erstaunliche an diesem Versuch ist, dass das Wasser aus dem oberen Gefäß erst im Schlauch nach oben fließt, bevor es, wie gewohnt, nach unten in das zweite Gefäß fließt. Das Wasser fließt in diese Richtung, weil die Ausflussöffnung tiefer ist, als der Wasserspiegel des oberen Gefäßes. Doch warum teilt sich das Wasser nicht am höchsten Punkt und fließt in unterschiedliche Richtungen? Wenn das Experiment startet, ist der gesamte Schlauch mit Wasser gefüllt. Der Luftdruck drückt das Wasser von beiden Seiten in den Schlauch hinein. Er bewirkt, dass das Wasser zusammenhält und das Wasser im kurzen Schlauchende dem Wasser im langen Schlauchende hinterher fließt.<sup>4</sup>

Martin Wagenschein schlägt vor, das „Wunder“ des heraufließenden Wassers mit etwas Bekanntem in Verbindung zu setzen. Er schlägt vor, die Wassersäule als Seil zu betrachten, welches „sich überhängend, selbst von der Tischplatte herunterschafft, auch über eine kleine Erhöhung hinweg“ [37, S. 181]. Denn das Wasser wird durch den Luftdruck ebenso zusammengehalten, wie ein Seil.

Das Wasser fließt so lange, bis entweder das obere Gefäß leer ist oder bis sich die Wasserspiegel angeglichen haben [35, S. 57ff].

**Kommentar:** Im Lehrstück sind alle notwendigen Informationen enthalten, um dieses Experiment zu erklären. Das Ziehen der richtigen Schlüsse bleibt dennoch sehr schwierig. Die Schüler\*innen werden möglicherweise zusätzliche Hilfen benötigen, um die richtige Erklärung für das Phänomen zu finden.

---

<sup>4</sup> Der moose-Verlag hat das Kartenset „50 verblüffende Experimente zum Selbermachen und Stauen“ für Kinder herausgebracht. Es beinhaltet physikalische Experimente, die mit einfachen Mitteln zu Hause durchgeführt werden können. Der Saugheber ist dort ebenfalls enthalten. Dort wird, das „Zusammenhalten“ des Wassers mit der Kohäsionskraft erklärt. Diese spielt auch eine Rolle, ist jedoch gegenüber dem Luftdruck von geringer Bedeutung. Diese Erklärung verdeutlicht noch einmal, wie schwierig die Vorstellung des Luftdrucks ist und wie wenig sie in der alltäglichen Vorstellung angekommen ist. Das Kartenset beinhaltet dennoch viele interessante Experimente, die mit Kindern zu Hause oder im Unterricht durchgeführt und besprochen werden können.

## A.2.6 Strohhalm



**Abbildung A.17:** Beim Trinken mit einem Strohhalm spielt der Umgebungsluftdruck eine entscheidende Rolle.

### **Material:**

- Wasserglas
- Strohhalm
- Wasser (gefärbt)

**Durchführung:** Mit Hilfe eines Strohhalmes aus einem Glas trinken.

**Denkaufgabe:** Wieso gelangt das Wasser in den Mund?

**Erklärung:** Das „Saugen“ erzeugt ein Vakuum im Mund. Der Luftdruck im Mund ist also geringer als der Umgebungsluftdruck. Dadurch kann der Luftdruck auf der Wasseroberfläche das Wasser in den Strohhalm und damit in den Mund drücken.

**Kommentar:** Wie Marc Eyer schreibt, werden die Schüler\*innen das Trinken mit dem Strohhalm auch nach dem Lehrstück damit erklären, dass das Wasser angesaugt wird. Die Vorstellung des drückenden Luftdrucks kommt nur sehr schwierig im Alltag an [13, S. 148f]. Genau deswegen ist es wichtig, Experimente wie dieses durchzuführen, um die Luftdrucktheorie anhand von Alltagsbeispielen zu besprechen.

Auch das Atmen ist ein gutes Alltagsbeispiel, welches mit Hilfe der Luftdrucktheorie erklärt werden kann (vgl. [A.2.9 In den Bergen](#)).

## A.2.7 Druckdifferenzen

Einer der Gründe, wieso der Luftdruck nicht intuitiv für die Erklärung alltäglicher Phänomene genutzt wird, ist, dass der ständig auf uns wirkende Druck sehr groß und in der Regel unbemerkt ist. Genau deswegen ist es wichtig, diesen Aspekt in weiterführenden Experimenten zu adressieren, um dieser kognitiven Dissonanz entgegenzuwirken und so die Luftdrucktheorie plausibel zu machen. Dies gilt insbesondere, wenn Bedenken durch die Lerngruppe geäußert werden [13, S. 131]. Der Diskurs über die Frage, wieso uns der Luftdruck nicht erdrückt, ist auch deswegen von großer Bedeutung, da die Haltung der Wagenschein'schen Naturbeschreibung darin besteht, dass es nicht eine richtige (naturwissenschaftliche) und eine falsche (egozentrische, auf Alltagserfahrung beruhende) Betrachtung und Beschreibung der Welt gibt. Bildung bedeutet, beide Weltbeschreibungen in wechselseitigem Diskurs zu halten. Es gibt den Mond der Poesie und den Mond der Physik. Die Betrachtungsweisen, die sich daraus ergeben sind unterschiedlich, doch beide zulässig (aus einem persönlichen Gespräch mit Marc Eyer).

Mit folgendem Experiment kann gezeigt werden, dass nur die Druckdifferenz entscheidend ist. Ein von allen Seiten gleichmäßig wirkender Druck übt keine effektive Kraft aus. Dies ist der Grund, wieso wir nicht vom Umgebungsluftdruck erdrückt werden.



**Abbildung A.18:** Wenn auf beiden Seiten der Folie die gleiche Kraft aufbewendet wird, verändert sie sich nicht. Erst durch eine einseitige Kraft wird die Folie ausgebeult.

### Material:

- Frischhaltefolie

**Durchführung:** Frischhaltefolie wird von ein bis zwei Schüler\*innen straff gehalten. Eine dritte Person drückt zunächst so fest wie sie kann von beiden Seiten gegen die Folie. Anschließend drückt sie nur mit einer Hand gegen die Folie.

**Denkaufgabe:** Was passiert mit der Frischhaltefolie? Wie kann dies erklärt werden?

**Erklärung:** Wird von beiden Seiten gegen die Frischhaltefolie gedrückt, bleibt sie intakt. Wird nur von einer Seite gedrückt, beult sie sich aus. Bei starkem Druck kann sie sogar reißen. Nur Druckunterschiede können Arbeit verrichten. Der absolute Druck spielt hierfür keine Rolle. Solange von beiden Seiten gleichmäßig gedrückt wird, verändert sich die Frischhaltefolie nicht. Ganz egal, wie viel Kraft ausgeübt wird.

**Kommentar:** In Bezug auf uns bedeutet dies, dass der Umgebungsluftdruck kein Problem darstellt, solange er konstant auf uns wirkt und wir mit gleichem Druck zurückdrücken. Wir werden nicht vom Umgebungsluftdruck zerquetscht, weil große Teile unseres Körpers aus Wasser bestehen und damit inkompressibel sind. Die mit Luft gefüllten Teile unseres Körpers haben den gleichen Druck wie die Umgebung. Wir drücken also genau so stark gegen die Luft, wie sie gegen uns (vgl. [2.3.2 Schweredruck der Luft](#)).

## A.2.8 Schokokuss im Vakuum



**Abbildung A.19:** Ein Schokokuss vergrößert sein Volumen stark, wenn er sich unter einer Vakuumlöcke befindet.

### Material:

- Schokokuss
- Vakuumlöcke

**Durchföhrung:** Ein Schokokuss wird unter die Vakuumlöcke gestellt. Diese wird verschlossen und evakuiert.

**Denkaufgabe:** Warum dehnt sich der Schokokuss aus?

**Erklärung:** Durch das Herauspumpen der Luft wird der Luftdruck um den Schokokuss immer geringer. Der Luftdruck innerhalb der Bläschen im Eischnee entspricht jedoch nach wie vor dem Umgebungsdruck, der vor dem Vakuumieren herrschte. Das ist der Druck, der nötig war, damit der Schokokuss seine Form behält. Wird der Druck um

den Schokokuss geringer, drückt er zu stark nach außen und dehnt sich aus. Ausdehnen kann er sich allerdings nur so lange, wie sich die Luft im Schaum ausdehnt, ohne dass die Luftkammern im Schaum platzen. Wenn die Glocke stark evakuiert wird, platzen die Schaumblasen und der Schokokuss wird nicht mehr größer. Nachdem die Luft zurück in die Vakuumlampe gelassen wurde, hat er dann ein kleineres Volumen als davor.

**Kommentar:** Dieses Experiment ist vergleichsweise einfach zu erklären. Es kann durch einen Umkehrschluss genutzt werden, um die Frage zu beantworten, wieso wir nicht von Luftdruck um uns zerquetscht werden. So lange der Luftdruck mit dem gleichen Druck auf uns drückt, wie wir zurückdrücken, passiert nichts. Erst der Druckunterschied stellt ein Problem dar.<sup>5</sup>

## A.2.9 In den Bergen

**Denkaufgabe:** Warum brauchen Bergsteiger\*innen auf hohen Bergen Luftflaschen?

**Erklärung:** Der niedrige Luftdruck oben auf dem Berg schiebt weniger Luftmoleküle in die Lungen. Die Sauerstoffflasche ist deswegen für untrainierte Bergsteiger\*innen notwendig, um auch hoch oben genug Sauerstoff zu atmen.

**Kommentar:** Dass der Luftdruck oben auf einem Berg geringer ist, kann mit Hilfe einer PET-Flasche beobachtet werden. Diese wird oben auf dem Berg geöffnet, mit Luft gefüllt und wieder verschlossen. Beim Abstieg bleibt die Flasche verschlossen. Im Tal angekommen, wird zu sehen sein, dass die Flasche eingedrückt ist, weil der Umgebungsdruck stärker ist als der Druck in der Flasche [13, S. 110]. Einige Schüler\*innen werden dies möglicherweise schon einmal beobachtet haben. In einigen Schulen wird es sogar die Möglichkeit geben, einen Ausflug auf einen nahegelegenen Berg zu unternehmen, um dies zu beobachten. Bei dieser Gelegenheit können auch selbstgebaute Barometer mit hinaufgenommen werden.

---

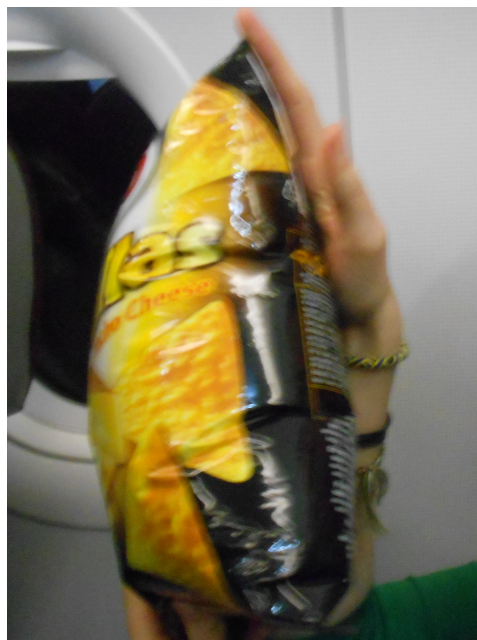
<sup>5</sup> Da wir Menschen zu einem großen Teil aus Wasser bestehen, was nicht durch den äußeren Druck komprimiert wird oder sich ausdehnt, falls der äußere Druck geringer wird, würden wir uns nicht aufblasen, wenn der Umgebungsdruck sinkt. Die Luft in unserem Körper dehnt sich jedoch aus. Falls wir nicht ausatmen, könnte das dazu führen, dass die Lungenbläschen platzen. Im Blut bilden sich Gasbläschen, die sich ausdehnen, wodurch sie Embolien und Thrombosen verursachen. Um dies zu demonstrieren kann das Experiment [A.1.5 Bei geringem Druck kochen](#) genutzt werden.

## A.2.10 Im Flugzeug

**Denkaufgabe:** Warum dürfen die Fenster in einem Flugzeug nicht geöffnet werden?

**Erklärung:** Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe ab. Auf Reishöhe ist der Druck außerhalb des Flugzeugs wesentlich geringer als am Boden. Im Innenraum des Flugzeugs wird daher ein künstlicher Überdruck erzeugt, um eine angenehme Reise zu ermöglichen. Würde ein Fenster geöffnet, würde der Druck in der Kabine rapide sinken. Durch den geringeren Druck strömen weniger Luftmoleküle in unsere Lungen. Deswegen werden für den Notfall Sauerstoffmasken benötigt, die einen erhöhten Sauerstoffgehalt bereitstellen, damit Passagiere und Besatzung bei Bewusstsein bleiben.

**Kommentar:** Trotz der Abdichtung der Flugzeugkabine ist der Luftdruck in einem fliegenden Flugzeug geringer als der Luftdruck am Boden. Dies kann beispielsweise an einer Chipspackungen beobachtet werden. Die Chips wurden bei Umgebungsdruck am Erdboden verpackt. Die Luft in der Packung hat also den gleichen Druck, wie die Umgebungsluft am Erdboden. Wird die Tüte mit in ein Flugzeug genommen, sinkt der Luftdruck außerhalb der Chipspackung. Der Druck in ihr bleibt jedoch gleich. Sie drückt jetzt stärker nach außen als der Umgebungsluftdruck nach innen drückt. Deswegen dehnt sie sich aus.



**Abbildung A.20:** Eine Chipspackung dehnt sich während des Fluges aus.

## A.2.11 Implodierende Dose

Dieses Experiment zeigt, wie der äußere Luftdruck eine Dose zusammendrücken kann.



**Abbildung A.21:** Wasser wird in der Dose erhitzt, bis sie vollständig mit Wasserdampf gefüllt ist. Anschließend wird sie kopfüber in kaltes Wasser getaucht.

### Material:

- Leere Getränkedose
- Bunsenbrenner oder Campingkocher
- Zange zum Halten der Dose
- Kaltes Wasserbad ggf. mit Eiswürfeln

**Durchführung:** Eine leere Dose wird mit einem kleinen Schluck Wasser gefüllt. Dann wird sie mit Hilfe der Zange über den Bunsenbrenner gehalten, bis das Wasser in ihr

kocht. Wenn das Wasser verdampft ist, wird die Dose mit der Öffnung nach unten in das kalte Wasserbad getaucht.

**Denkaufgabe:** Beschreibe, was mit der Dose passiert. Wie kann das erklärt werden?

**Erklärung:** Durch das Erhitzen des Wassers entsteht Wasserdampf, der sich in der Dose ausbreitet. Er verdrängt einen Teil der Luft, die vorher in der Dose war. Wenn das Wasser in der Dose kocht, ist näherungsweise nur noch Wasserdampf in ihr. Die Verdrängung der Luft geschieht hierbei dadurch, dass Wasserdampf unter Normalbedingungen ein ungefähr 1700-fach größeres Volumen einnimmt als das vorher flüssige Wasser. Die Änderung im Volumen wird also durch die Änderung des Aggregatzustandes hervorgerufen. Wird die Dose nun mit der Öffnung nach unten in das kalte Wasserbad gehalten, kühlt der Wasserdampf ab und kondensiert, wodurch sich sein Volumen schlagartig verringert. Weil die Dose in das Wasserbad gehalten wird, kann keine neue Luft nachströmen. Dadurch entsteht ein Vakuum (Unterdruck) in der Dose. Die Druckkraft des Umgebungsluftdrucks ist dadurch deutlich größer als die Druckkraft innerhalb der Dose. Dadurch wird die Dose zusammengedrückt (Luftdrucktheorie). Umgangssprachlich würde man sagen „sie zieht sich zusammen“ (Horror Vacui).

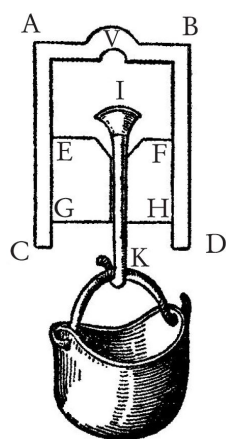
### **A.2.12 Leben ohne Atmosphäre**

Als Gedankenexperiment stellen sich die Schüler\*innen vor, wie ein Leben auf einem Himmelskörper ohne Atmosphäre, also ohne Luftdruck, aussehen würde. Alle hier besprochenen Phänomene würden anders aussehen, beziehungsweise nicht zu beobachten sein. Möglicherweise denken die Schüler\*innen jedoch auch an ganz andere Themen, wie die Abschirmung gegenüber Strahlung aus dem Weltall, stark schwankende Temperaturen oder den fehlenden Sauerstoff. Hier würde es sich möglicherweise auch anbieten, die Schüler\*innen Geschichten schreiben zu lassen. Auch Anknüpfungspunkte zu anderen Themen und Fächern können sich hieraus ergeben.

### A.3 Auszug aus Discorsi

Wenn möglich sollten die *Discorsi* von Galileo Galilei als Buch verwendet werden. Es gibt unterschiedliche Übersetzungen und Drucke des Textes, so dass der entsprechende Ausschnitt in der vorliegenden Version gesucht werden muss [17, S. 25-27]. Falls kein Buch verfügbar ist, kann der folgende Text als Kopiervorlage verwendet werden.

*Salv.* So mag Ihr guter Geist Ihnen beistehen. Ich werde Ihnen zunächst zeigen, wie man die Wirkfähigkeit des Vakuums von der anderen unterscheiden kann, und dann zeige ich Ihnen, wie sie zu messen ist. Zwecks Unterscheidung nehmen wir irgendein homogenes Material, dessen Teile gegen die Zerteilung keinen anderen Widerstand leisten als den durch das Vakuum; so etwas ist das Wasser, wie unser Akademiker in einem bestimmten Aufsatz hinlänglich bewiesen hat. Wenn man nun über einen Zylinder Wassers verfügte, und wenn man einen Widerstand gegen seine Zerteilung spüren würde, sofern man daran ziehen könnte, so könnte man dafür wohl keine andere Ursache finden als eben das Vakuum. Um das durch die Erfahrung überprüfen zu können, habe ich mir eine Vorrichtung ausgedacht, die ich mit einer kleinen Zeichnung besser als mit



dürren Worten erklären kann. CABD sei der Querschnitt eines zylindrischen Gefäßes aus Metall oder aus Glas, innen hohl und sehr sorgfältig gedreht, in dessen Öffnung ein hölzerner Zylinder sehr genau passt, dessen Querschnitt sei EGHF. Dieser Zylinder soll sich auf und ab bewegen können, und er soll in der Mitte durchbohrt sein, so dass ein Eisendraht hindurchgeht, der am Ende K gebogen ist. Das andere Ende soll konisch oder schraubenkopfförmig verdickt sein, und es soll die Durchbohrung des Holzes sich oben in wiederum konischer Form erweitern, so dass das konische Ende I des Eisendrahtes IK genau hineinpasst, wenn man bei K nach unten zieht. Das Holz, oder sagen wir: der Zapfen EH soll in die zylindrische Höhlung von AD so eingeführt werden, dass er nicht die obere Fläche dieses Zylinders berührt, sondern etwa zwei oder drei Fingerbreit darunter bleibt. Dieser

Zwischenraum soll nun mit Wasser gefüllt sein, das man einfüllt, indem man das Gefäß mit der Öffnung CD nach oben hält und das Wasser auf den Zapfen EH gießt, während man den Konus I etwas von der Höhlung im Holz fern hält, so dass die Luft entweichen kann, die auf den Zapfen drücken würde, wenn sie nicht durch die Bohrung im Holz entweichen könnte, welche deshalb etwas weiter ist als der Durchmesser des Eisendrahtes IK. Ist die Luft entfernt und zieht man an dem Eisendraht so, dass sein konisches Ende das Holz vollständig verschließt, so dreht man das ganze Gefäß derart, dass seine Öffnung nach unten zeigt. Nun hängt man am Endhaken K ein Gefäß an, gefüllt mit Sand oder einem anderen schweren Material, und belädt es so weit, bis schließlich die obere Fläche des Zapfens sich von der unteren Fläche des Wassers trennt, mit der sie bis dahin nur durch den Widerstand des Vakuums in Kontakt war. Wiegen wir nun den Zapfen mit dem Eisen, dem Gefäß und seinem Inhalt, so erhalten wir das Maß des Widerstands des Vakuums. Und wenn wir an einen Zylinder aus Marmor oder aus Kristallglas, der so groß ist wie der Zylinder voll Wasser, ein Gewicht anhängen, welches zusammen mit dem jeweiligen Gewicht des Marmors oder des Kristallglases das Gewicht aller genannten Objekte aufwiegt, und der Zylinder zerbricht, so dürfen wir ohne Zweifel folgern, dass allein das Vakuum die Teile des Marmors oder des Kristallglases ursächlich zusammenhält. Reicht das aber nicht aus, so dass wir, bis sie zerreißen, das Vierfache dieses Gewichts anhängen müssen, so wird man sagen können, dass der Widerstand des Vakuums nur ein Fünftel, der andere aber das Vierfache davon ausmacht.

## A.4 Briefwechsel zwischen Pascal und Périer

### A.4.1 Französische Zusammenfassung

Der folgende Text ist eine vereinfachte Version des Briefwechsels zwischen Blaise Pascal und Florin Périer [12, S. 142]. Die vollständigen Briefe im französischen Original sind zu finden in „Pascals Barometer“ [12, S. 135-141].

#### **La preuve du poids de l'air: l'expérience de Blaise Pascal**

Blaise Pascal a refait les expériences de Torricelli, il est sûr que celui-ci a raison et il imagine une expérience qui convaincrait tout le monde. Il faut refaire l'expérience de Torricelli à un endroit où la quantité d'air qui appuie sur toutes choses est plus faible: le sommet d'une montagne.

Si la bonne explication est: «l'eau ou le mercure montent parce que la Nature a horreur du vide» la colonne d'eau ou de mercure doit avoir la même hauteur au pied et au sommet de la montagne. Si la bonne explication est «l'eau ou le mercure montent parce que l'air appuie partout sauf au sommet de la colonne de liquide», la colonne d'eau ou de mercure doit être moins haute au sommet de la montagne qu'au pied.

Blaise Pascal pense à une montagne qu'il connaît bien: le Puy de Dôme et demande à son beau-frère Florin Périer qui habite Clermont-Ferrand de faire l'expérience pour lui et de lui décrire ce qu'il a vu.

Voici un résumé de la lettre de réponse de Florin Périer à Blaise Pascal. Tout d'abord Florin Périer demande à Blaise Pascal de l'excuser parce qu'il n'a pas eu le temps de faire l'expérience plus tôt: Blaise Pascal le lui avait demandé le 15 novembre 1647 et il ne la fait que le 19 septembre 1648.

Il explique ensuite qu'il a pris deux cuvettes de mercure et deux tubes tout à fait identiques, ouverts à une extrémité et fermés à l'autre. À Clermont-Ferrand, dans le jardin du couvent des Minimes près de la place de Jaude, il retourne les deux tubes pleins de mercure chacun sur leur cuvette et remarque que le mercure monte exactement à la même hauteur dans les deux tubes.

Il laisse un des deux tubes à un moine du couvent qui doit le surveiller et noter si la hauteur de mercure varie pendant la journée. Pendant ce temps, il part avec l'autre tube vers le sommet du Puy de Dôme en passant par La Font-de-l'Arbre et, de temps en temps, il mesure la hauteur de la colonne de mercure. Il constate que la hauteur diminue au fur et à mesure qu'il s'élève comme l'avait prédit Blaise Pascal.

Pour être bien sûr de ses conclusions, Florin Périer refait la mesure dans le jardin du couvent avec le tube rapporté du Puy de Dôme, elle donne le même résultat qu'avec le tube resté en bas; le lendemain il refait l'expérience entre le pied et le sommet de la plus haute tour de la cathédrale de Clermont-Ferrand. À sa grande joie, toutes les mesures montrent que la hauteur de mercure dans le tube diminue quand l'altitude augmente «d'une demi-ligne pour sept toises d'élévation» comme il l'écrit lui-même.

À votre tour maintenant de faire la même expérience

#### A.4.2 Deutsche Übersetzung

Der folgende Text ist die deutsche Übersetzung der vorherigen französischen Zusammenfassung der Briefe zwischen Blaise Pascal und Florin Périer.

##### **Der Beweis für das „Luftgewicht“: Das Experiment von Blaise Pascal**

Blaise Pascal hat die Experimente von Torricelli wiederholt, denn er ist sicher, dass dieser Recht hat, und er denkt über ein Experiment nach, das alle überzeugen kann. So überlegt er, dass man das Torricelli-Experiment an einem Ort durchführen müsse, wo die Luftmenge, die auf den Dingen ruht, schwach ist, wie zum Beispiel auf dem Gipfel eines Berges.

Wenn die richtige Erklärung lautet: „Das Wasser oder das Quecksilber steigt, weil die Natur einen »horror vacui« hat“, dann muss die Wasser- oder Quecksilbersäule am Fuße des Berges die gleiche Höhe haben wie auf der Bergspitze. Wenn die richtige Erklärung aber lautet: „Das Wasser oder Quecksilber steigt, weil die Luft

überall auf die Flüssigkeitssäule drückt, außer auf der Bergspitze“, dann wird die Wasser- oder Quecksilbersäule auf der Bergspitze weniger hoch sein als am Fuße des Berges. Blaise Pascal denkt an ein Gebirge, das er gut kennt, den Puy de Dôme, und er bittet seinen Schwager Florin Périer, der in Clermont- Ferrand wohnt, das Experiment für ihn durchzuführen und ihm zu beschreiben, was er gesehen hat. Hier ist die Zusammenfassung des Antwortbriefes von Florin Périer an Blaise Pascal:

Zuerst bittet Florin Périer Blaise Pascal, ihn zu entschuldigen, weil er keine Zeit gefunden habe, das Experiment früher durchzuführen. Pascal hatte ihn nämlich gebeten dies am 15. November 1647 zu tun, und er kam erst am 19. September 1648 dazu.

Er erklärt anschließend, dass er zwei Quecksilberbehälter und zwei identische Röhren genommen hat, die an einer Seite offen und an der anderen Seite geschlossen waren. In Clermont-Ferrant, im Klostergarten von Minimens in der Nähe des Place de Jaude, dreht er die beiden mit Quecksilber gefüllten Röhren in dem jeweiligen Behälter um und bemerkt, dass das Quecksilber in den beiden Röhren gleichmäßig steigt.

Er lässt eine der beiden Röhren bei einem Mönch des Klosters, der sie beobachten und notieren soll, ob die Quecksilbersäule sich im Laufe des Tages verändert. In der Zeit steigt er selbst über den Ort La Fontde-l'Arbre mit der anderen Röhre auf die Spitze des Puy de Dôme und misst von Zeit zu Zeit die Quecksilbersäule. Er stellt fest, dass diese immer weiter sinkt, je höher er steigt, wie es Blaise Pascal vorausgesagt hatte. Um mit seinen Schlussfolgerungen sicher zu gehen, nimmt Florin Périer die Messung in dem Klostergarten mit der Röhre noch einmal durch, die er vom Puy de Dôme mit genommen hat, und sie bringt das gleiche Ergebnis wie die Röhre, die unten geblieben war. Am nächsten Tag führte er das Experiment noch einmal durch, diesmal findet es zwischen dem Fuß und der Spitze der hohen Kathedrale von Clermont-Ferrand statt. Zu seiner großen Freude zeigen alle Messungen, wie er schreibt, dass die Quecksilbersäule mit zunehmender Höhe sinkt.