

# Physik bei der Feuerwehr

SCHRIFTLICHE HAUSARBEIT  
ZUM ERSTEN STAATSEXAMEN  
FÜR DAS LEHRAMT AN GYMNASIEN

von  
**Wolfgang Lutz**

September 2012

BETREUER  
Prof. Dr. Thomas Wilhelm

LEHRSTUHL FÜR PHYSIK UND IHRE DIDAKTIK  
FAKULTÄT FÜR PHYSIK UND ASTRONOMIE  
JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG





„NUR WER SELBST BRENNT,  
KANN FEUER IN ANDEREN ENTFACHEN.“

Augustinus von Hippo  
römischer Philosoph und Kirchenlehrer, 354-430



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2. Feuer</b>	<b>11</b>
2.1. Einordnung des Themas „Feuer“ in den Lehrplan . . . . .	11
2.2. Schülervorstellungen zu Feuer und Verbrennung . . . . .	12
2.3. Definition von Verbrennung . . . . .	13
2.4. Unterschiedliche Verbrennungserscheinungen von Brennmaterialien . . . . .	13
2.5. Voraussetzungen für den Verbrennungsvorgang . . . . .	14
2.6. Versuche zum Thema „Feuer“ . . . . .	15
2.6.1. Brennmaterialien . . . . .	16
2.6.2. Hohe Temperatur . . . . .	18
2.6.2.1. Alurinne . . . . .	18
2.6.2.2. Abgeschnittene Flamme . . . . .	19
2.6.2.3. Ergebnis . . . . .	21
2.6.2.4. Ergänzung . . . . .	22
2.6.3. Sauerstoff . . . . .	22
2.6.4. Unterschiedliches Brennverhalten von Holz . . . . .	25
<b>3. Löschen verschiedener Brennstoffe</b>	<b>29</b>
3.1. Brandklasse A: Brände fester glutbildender Stoffe . . . . .	31
3.2. Brandklasse B: Brände von flüssigen und flüssig werdenden Stoffen . . . . .	31
3.2.1. Versuch zum Thema „flüssige Brennstoffe mit Wasser löschen“ . . . . .	32
3.3. Brandklasse C: Brände von gasförmigen Stoffen . . . . .	34
3.4. Brandklasse D: Metallbrände . . . . .	34
3.4.1. Versuch zum Thema „Metallbrände“ . . . . .	35
3.4.1.1. Verbrennung verschiedener Metalle . . . . .	35
3.4.1.2. Brennendes Magnesium und Wasser . . . . .	36
3.5. Brandklasse F: Fettbrände . . . . .	38
3.5.1. Versuch zum Thema „Ölexplosion“ . . . . .	39
3.6. Besondere Brennstoffe . . . . .	41
3.6.1. Nitrofilme . . . . .	41
<b>4. Wasser als Löschmittel</b>	<b>43</b>

<b>5. Allgemeine physikalische Grundlagen für den Ansaugvorgang</b>	<b>47</b>
5.1. Luft	48
5.1.1. Einordnung des Themas „Luft“ in den Lehrplan	48
5.1.2. Schülervorstellungen zu Luft und Luftdruck	48
5.1.3. Definition Luft	49
5.1.4. Versuch zum Thema „Luft“	51
5.1.4.1. Tauchende Gummibären	51
5.2. Druck	54
5.2.1. Einordnung des Themas „Druck“ in den Lehrplan	54
5.2.2. Schülervorstellungen zu Druck	55
5.2.3. Definition Druck	56
5.2.4. Versuche zum Thema „Luftdruck“	57
5.2.4.1. Umgedrehtes Wasserglas	57
5.2.4.2. Ei in die Flasche	64
5.2.4.3. Implodierende Dose	66
5.2.5. Versuche zum Thema „Schweredruck von Wasser“	69
5.2.5.1. Schweredruck in einer Wasserflasche	69
5.2.5.2. Druckausgleich in verbundenen Gefäßen	72
<b>6. Wasserentnahme</b>	<b>75</b>
6.1. Funktionsprinzip des Ansaugvorgangs	75
6.1.1. Versuche zum Thema „Ansaugen von Wasser“	77
6.1.1.1. Staubsauger vs. Mund	77
6.1.1.2. Schwimmende Kerze im Glas	79
6.2. Die physikalischen und technischen Grenzen beim Ansaugen	81
6.2.1. Herleitung der barometrische Höhenformel	81
6.2.2. Kavitation	84
6.2.3. Herleitung der Clausius-Clapeyron-Gleichung	86
6.2.4. Versuch zum Thema „Kavitation“	89
6.2.4.1. Wasser zum Sieden bringen	89
<b>7. Druckerzeugung in einer Pumpe</b>	<b>93</b>
7.1. Ortsfunktion der Wasseroberfläche rotierender Flüssigkeiten	94
7.2. Druck in rotierenden Flüssigkeiten	96
<b>8. Wasserförderung</b>	<b>99</b>
8.1. Einordnung des Themas „Strömung“ in den Lehrplan	100
8.2. Physikalische Grundlagen der Strömung	100
8.2.1. Laminare reibungsfreie Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	100
8.2.1.1. Kontinuitätsgleichung	101
8.2.1.2. Bernoulli-Gleichung	101
8.2.2. Laminare viskose Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	102
8.2.3. Turbulente Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	105

8.2.4.	Versuch zum Thema „Strömung“ . . . . .	107
8.2.4.1.	Reibungsverluste in einer durchströmten Röhre . . . . .	107
8.3.	Löschwasserversorgung über lange Strecken in der Praxis . . . . .	112
<b>9.</b>	<b>Wasserabgabe</b>	<b>117</b>
9.1.	Maximale Wurfweite eines Strahlrohrs . . . . .	117
9.2.	Einordnung des Themas „Wurfweite“ in den Lehrplan . . . . .	118
9.3.	Flugbahn des Wasserstrahls ohne Luftreibung . . . . .	119
9.4.	Flugbahn des Wasserstrahls mit Luftreibung . . . . .	122
9.5.	Numerische Lösung . . . . .	122
<b>10.</b>	<b>Wärme</b>	<b>125</b>
10.1.	Einordnung des Themas „Wärme“ in den Lehrplan . . . . .	125
10.2.	Schülervorstellungen . . . . .	126
10.3.	Definitionen . . . . .	128
10.3.1.	Temperatur . . . . .	128
10.3.2.	Wärmemenge . . . . .	128
10.3.3.	Wärmekapazität . . . . .	128
10.3.4.	Innere Energie . . . . .	129
10.4.	Wärmeübertragung . . . . .	130
10.4.1.	Wärmeleitung . . . . .	130
10.4.2.	Konvektiver Wärmeübergang . . . . .	132
10.4.3.	Die Wärmestrahlung . . . . .	133
10.5.	Gefahr der Wärmeübertragung beim Löschen eines Brandes . . . . .	134
<b>11.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>
	<b>Anhang</b>	<b>147</b>
<b>A.</b>	<b>Excel-Tabelle zur numerischen Berechnung der Flugbahn eines Wasserstrahles mit Luftreibung</b>	<b>149</b>
<b>B.</b>	<b>Modellierung der Flugbahn eines Wasserstrahles mit und ohne Luftreibung mit dem Programm modellus 4.01</b>	<b>153</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>155</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>157</b>





# 1. Einleitung

Die Weiterentwicklung der Physikdidaktik in der Schule, speziell am Gymnasium steht immer vor der großen Herausforderung, den Unterricht aktuell, anwendungsbezogen, abwechslungsreich, interessant und informativ zu gestalten<sup>1</sup>. Dabei ist es wichtig die Interessensgebiete, Schwierigkeiten und Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler im Kontext naturwissenschaftlicher Fächer zu identifizieren. Zahlreiche Studien haben festgestellt, dass Kinder bis in die sechste Jahrgangsstufe „großes Interesse an naturwissenschaftlichen Unterrichtsinhalten haben“<sup>2</sup>. In höheren Jahrgangsstufen sinkt dieses vor allem im Fach Physik ab. Gründe für diesen Wandel sind, dass viele Schülerinnen und Schüler den „Physikunterricht als zu schwierig, die Unterrichtsinhalte als zu abstrakt und zu lebensfern“<sup>3</sup> empfinden. „Häufig glauben Schüler, die physikalischen Erkenntnisse beziehen sich nur auf ideale Gedanken- und Laborwelten, mit denen man im Alltag nichts anfangen kann“<sup>4</sup>. Aus diesem Grund ist die in den letzten Jahren vermehrte Forderung nach mehr Alltagsbezug im Physikunterricht gerechtfertigt.

Bei der Behandlung des Themas „Physik bei der Feuerwehr“ werden unterschiedliche Möglichkeiten aufgezeigt, „Alltagskontexte in den Physikunterricht“<sup>5</sup> verschiedener Jahrgangsstufen einzubetten. Die Entstehung eines Feuers, die Funktionsweise einer Feuerlöschkreiselpumpe, turbulente Strömungen in einem Druckschlauch und die Wurfweite eines Strahlrohrs beschreiben nur einige Beispiele, wie ein Praxisbezug im Physikunterricht realisiert werden kann. Bei der Verknüpfung von Lerninhalten mit Alltagsbezügen ist darauf zu achten, dass die Schülerinnen und Schüler in der Regel zwar in Alltagserfahrungen tief verankerte Vorstellungen zu Phänomenen, Begriffen und Prinzipien mitbringen, die meisten dieser Vorstellungen jedoch zu den zu lernenden physikalischen Vorstellungen im Widerspruch stehen<sup>6</sup>. Dennoch bilden diese „den Rahmen, in dem Schüler die vom Lehrer gegebenen Informationen interpretieren“<sup>7</sup>: Untersuchungen haben eine Persistenz von falschen Vorstellungen gezeigt, dass „Schülerinnen und Schüler sehr häufig nicht beobachten, was aus der Sicht des Lehrers doch so eindeutig und klar zu sehen ist, sondern was ihnen ihre Vorstellungen erlauben“<sup>8</sup>. Selbst wenn Experimente den Vorstellungen der Schüler widersprechen und kognitive Konflikte bei den Lernenden auslösen, folgt nicht automatisch die Einsicht einer fehlerhaften Vorstellung. Oftmals werden durch eine Reihe

---

<sup>1</sup>Informationen zum Absatz vgl. BELL et al. (2005), S. 3

<sup>2</sup>BELL et al. (2005), S. 3

<sup>3</sup>BELL et al. (2005), S. 3

<sup>4</sup>WILHELM/LÜCK (2011), S. 1

<sup>5</sup>MÜLLER (2007), S. 11

<sup>6</sup>vgl. DUIT (2004a), S. 3

<sup>7</sup>DUIT (2004b), S. 9

<sup>8</sup>DUIT (2004a), S. 6

von Ad-Hoc-Annahmen die Ergebnisse des Versuches an die bestehenden falschen Vorstellungsmodele assimiliert<sup>9</sup>. Umso wichtiger erscheint es deshalb, die Gedankengänge und Betrachtungsweisen der Schülerinnen und Schüler zu erfassen, auf diese einzugehen und die physikalische Sicht durch zahlreiche theoretische Argumente und experimentelle Befunde zu vermitteln und zu untermauern.

---

<sup>9</sup>vgl. DUIT (2004a), S. 7

## 2. Feuer

Feuer prägt seit vielen tausend Jahren das menschliche Leben und ist seit jeher zu einem unverzichtbaren Teil unserer Gesellschaft geworden: „Es spendet Licht und Wärme, ist unverzichtbar bei der Zubereitung von Speisen [und] gehört zu vielen Gemeinschaftserlebnissen dazu“<sup>10</sup>. Über den praktischen Nutzen hinaus sind in vielen Kulturen zahlreiche Bräuche mit Feuer verbunden (z.B. Oster- und Johannisfeuer im Christentum oder Feueropfer im Hinduismus). Dennoch dürfen keinesfalls die Gefahren außer Acht gelassen werden, die mit Feuer einhergehen. Die zerstörende Wirkung eines unkontrollierten Brandes kann durchaus Ausmaße mit verheerenden Folgen annehmen.

Im Laufe des Lebens sammelt jeder Mensch ganz persönliche Erfahrungen mit Feuer. Bereits Kinder können von eigenen Erlebnissen berichten. Durch die Aktivierung solcher Erfahrungen bei den Schülerinnen und Schülern kann Interesse und Neugierde am Element Feuer geweckt werden<sup>11</sup>. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass Kinder den Verbrennungsvorgang im Detail kennen und verstanden haben.

### 2.1. Einordnung des Themas „Feuer“ in den Lehrplan

In allen an der Schule unterrichteten naturwissenschaftlichen Fächern gibt es Versuche, in denen mit Feuer experimentiert wird. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist eine Aufklärung über den richtigen Umgang mit Brennstoffen, die dabei entstehenden Gefahren und deren Folgen unerlässlich. Eine direkte Eingliederung in den Lehrplan des gymnasialen Physikunterrichts ist jedoch nicht zu finden. Lediglich in den Unterrichtsplan zur fünften Jahrgangsstufe ist das Thema Feuer im Kapitel „Luft“ indirekt einbezogen<sup>12</sup>. Dabei ist eine detaillierte Wissensvermittlung gerade in den unteren Jahrgangsstufen wertvoll, um der Ausprägung von Fehlvorstellungen vorzubeugen. Aufgrund fehlenden Wissens und ausgebliebener Erfahrungen sind Kindern - oft auch später noch Erwachsenen - diverse Sachverhalte unklar. So haben beispielsweise „Untersuchungen mit zehn- bis zwölfjährigen Schülerinnen und Schülern [...] gezeigt, dass 99 % von ihnen wissen, dass Holz brennbar ist. Jedoch wussten 77 % dieser Kinder nicht, dass Wachs brennen kann“<sup>13</sup>.

Darüber hinaus belegen diese Untersuchungen, dass Kinder durchaus mit wertvollen persönlichen Erfahrungen und Vorstellungen in den Unterricht kommen. So haben die meisten Kinder bereits im Grundschulalter verinnerlicht, ein Feuer mit Wasser zu löschen<sup>14</sup>. Dass

---

<sup>10</sup>HERAN-DÖRR (2010a)

<sup>11</sup>vgl. KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 123

<sup>12</sup>vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004c)

<sup>13</sup>KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 125

<sup>14</sup>vgl. KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 127

dies nur eine von vielen Löschmethoden darstellt, die zudem nicht immer erfolgreich anzuwenden ist, bedarf der Klärung. Es demonstriert, dass dieses unvollständige Wissen durchaus fatale Auswirkungen haben kann. Durch die Vermittlung theoretischer Grundlagen des Verbrennungsvorganges, ein intensives Eingehen auf das Verbrennungsdreieck sowie die anschauliche Durchführung ausgewählter Versuche soll ein Zuwachs an Wissen und Erfahrung erzielt werden. „Bei der Behandlung des Themas Feuer können Kinder zudem methodische Fähigkeiten und Fertigkeiten beim Experimentieren schulen und naturwissenschaftliches Denken und Arbeiten kennen lernen. ‘Feuer’ bietet damit eine gute Gelegenheit ein Verständnis dafür aufzubauen, dass verschiedene Vorgänge voneinander abhängen und sich gegenseitig beeinflussen (Konzept der Wechselwirkung). Ferner ist die Auseinandersetzung mit Verbrennungen ein erster Anlass, chemische Reaktionen näher zu betrachten und so ein Grundwissen für den Unterricht der Unter- und Mittelstufe aufzubauen“<sup>15</sup>.

## 2.2. Schülervorstellungen zu Feuer und Verbrennung

„Die Mehrzahl der Untersuchungen von Schülervorstellungen zu dem Thema [Feuer und Verbrennung] sind mit Mittelstufenschüler/-innen durchgeführt worden“<sup>16</sup>. Gerade bei älteren Schülerinnen und Schülern liegt der Fokus vieler Studien „auf den Vorstellungen zu beobachtbaren stofflichen Veränderung und dem Verständnis der zugrundeliegenden chemischen Reaktion“<sup>17</sup>. Als Resultat ist eine Bandbreite von Vorstellungen zur Verbrennung festzuhalten, die stark kontextabhängig sind. Typische Charakterisierungen von Verbrennungen sind beispielsweise die Folgenden<sup>18</sup>:

- Verbrennung als Vernichtung: Die Erfahrungen die durch Beobachtungen im Alltag gesammelt werden, prägen die Vorstellung, dass bei einer Verbrennung der ursprüngliche Stoff verbraucht wird. Beispielsweise wird eine brennende Kerze immer kleiner oder Benzin ist nach der Verbrennung weg. Um dieser Vorstellung entgegenzuwirken, ist es wichtig, dass die Schülerinnen und Schüler „zunächst die stoffliche Ebene von der Objekt-Ebene [...] differenzieren“<sup>19</sup>.
- Verbrennung als Änderung der Eigenschaften des Stoffes (Modifikation): Wird beispielsweise ein Stück Stahlwolle in eine Flamme gehalten, so beginnt diese zu brennen (siehe Kapitel 2.6.1). Nach der Verbrennung kann die Stahlwolle immer noch als solche identifiziert werden. Lediglich die Farbe hat sich von grau nach silbrigglänzend geändert. Vielen Schülerinnen und Schülern fällt es deshalb schwer, die Farbänderung alleine als Indiz für das Entstehen eines neuen Stoffes anzusehen.

---

<sup>15</sup>KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 123

<sup>16</sup>STEFFENSKY (2010)

<sup>17</sup>STEFFENSKY (2010)

<sup>18</sup>Informationen zu den Schülervorstellungen vgl. STEFFENSKY (2010)

<sup>19</sup>STEFFENSKY (2010)

- Verbrennung als Transmutation: Einige Schülerinnen und Schüler sind sich bewusst, dass bei einer Verbrennung ein gegebener Stoff (z.B. Holz) in einen neuen Stoff (z.B. Kohlenstoffdioxid) umgewandelt wird. Die ablaufende chemische Wechselwirkung des Brennmaterials mit Sauerstoff wird dabei aber nicht angenommen.
- Verbrennung als chemische Reaktion: Im chemischen Sinne beschreibt eine Verbrennung die Interaktion eines Brennstoffes mit Sauerstoff. Als Produkt entsteht ein neuer Stoff, der im Vergleich zum Ausgangsmaterial andere physikalische und chemische Eigenschaften besitzt. Verkompliziert wird das Verständnis der ablaufenden Reaktion durch die nicht optische und haptische Fassung des Reaktionspartners Luft.

## 2.3. Definition von Verbrennung

„Im engeren Sinne [definiert der Begriff Verbrennung] die Reaktion von Stoffen mit Sauerstoff unter Wärme- und Lichtentwicklung, die nach Erreichen einer bestimmten Entzündungstemperatur sehr rasch verläuft“<sup>20</sup>. Tritt eine Oxidation mit den genannten Erscheinungen auf, so wird dieser Vorgang auch als „Brennen“ bezeichnet<sup>21</sup>. Konsequenterweise werden Stoffe, die bei der Oxidation Licht emittieren, als brennbare Stoffe betitelt.

## 2.4. Unterschiedliche Verbrennungserscheinungen von Brennmaterialien

Eine effektive Brandbekämpfung impliziert die Auseinandersetzung mit den Grundlagen des Verbrennungsvorganges und deren Erscheinungsformen. Eine Untergliederung der Brennmaterialien in gasförmige, flüssige und feste Stoffe liefert erste Hinweise über die auftretenden Lichterscheinungen beim Brennen<sup>22</sup>.

Gasförmig und flüssig entzündliche Substanzen brennen nur mit Flamme. An dieser Stelle sei vermerkt, dass nicht die im flüssigen Aggregatzustand vorliegenden Moleküle verbrennen, sondern lediglich die sich im gasförmigen Zustand befindlichen. Ausschlaggebend für die Entflammung einer Flüssigkeit ist die vorliegende Menge an Dämpfen, die wiederum von der Temperatur und dem bestehenden Druck abhängt. Ausgehend von einem normalen Atmosphärendruck (etwa 1013 *hPa*) ist die Temperatur für die in der Luft befindlichen zündbaren Gase kennzeichnend. Der Temperaturpunkt, ab dem genügend Dämpfe zur kurzen Entflammung vorliegen, wird als Flammpunkt bezeichnet. Der Brennpunkt liegt etwas höher und charakterisiert die Temperatur, ab der „sich Dämpfe in einer solchen Menge bilden, dass ein ständiges Brennen möglich ist“<sup>23</sup>.

---

<sup>20</sup>KILIAN/WEBER (2000b), S. 380

<sup>21</sup>vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 177

<sup>22</sup>Informationen zum Absatz vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 180 ff

<sup>23</sup>SCHOTT/RITTER (2009), S. 180

Bei der Verbrennung fester brennbarer Stoffe ist eine Unterscheidung in drei materialspezifische Verbrennungsarten möglich.

- Stoffe wie Holz, Kohle und Papier brennen mit Flamme und Glut. Die Flammen deuten auf den Austritt von brennbaren Gasen hin, die durch eine Zersetzung des Materials durch Wärme frei werden. „Der nach der Entgasungsphase verbleibende feste Stoff (Kohle) brennt mit Glut“<sup>24</sup>.
- Andere Materialien (beispielsweise Wachs, Stearin und Fett) ändern durch den Einfluss von Wärme ihren Aggregatzustand. Sie verflüssigen und verbrennen demzufolge - wie die bereits beschriebenen flüssigen brennbaren Stoffe - nur mit Flamme.
- Weitere feste brennbare Stoffe wie Koks und Holzkohle, die ihren Aggregatzustand beibehalten und bereits entgast sind, brennen mit Glut. Ebenso verhalten sich brennbare Leichtmetalle, wie z.B. Magnesium.

Zusammenfassend ist in Tabelle 2.1 ein kurzer Überblick über die verschiedenen Verbrennungserscheinungen gasförmiger, flüssiger und fester Stoffe mit ausgewählten Beispielen gegeben.

	<b>Verbrennungserscheinung</b>	<b>Beispiel</b>
<b>Gasförmige Stoffe</b>	Flamme	Feuerzeuggas (Propan, Butan)
<b>Flüssige Stoffe</b>	Flamme (nach Übergang in den Gaszustand)	Benzin, Alkohol, Öl
<b>Feste Stoffe</b>	Glut	Holzkohle, Koks, Eisen
	Flamme (nach Übergang in den flüssigen und gasförmigen Zustand)	Bienenwachs, Kerzenwachs (Stearin)
	Glut und Flamme	Holz, Papier, Kohle

**Tabelle 2.1.:** Überblick über die Verbrennungserscheinungen unterschiedlicher Brennstoffe anhand ausgewählter Beispiele <sup>25</sup>

## 2.5. Voraussetzungen für den Verbrennungsvorgang

Das Entfachen eines Feuers ist durch wesentliche Faktoren geprägt, die gänzlich erfüllt sein müssen<sup>26</sup>. Da eine Verbrennung, wie bereits erwähnt, eine besondere Form der Oxidation ist, liefert eine Analyse der chemischen Reaktionsgleichung erste Anhaltspunkte. Die

---

<sup>24</sup>SCHOTT/RITTER (2009), S. 182

<sup>25</sup>KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 125

<sup>26</sup>Informationen zum Absatz vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 185 ff

Existenz eines brennbaren Materials sowie Sauerstoff erscheint hierbei zunächst trivial. Weiter ist zur Anregung der Reaktion eine bestimmte Temperatur, die Zündtemperatur, notwendig. Sind diese Kriterien erfüllt, so ist das Mengenverhältnis aus Brennmaterial und Sauerstoff ausschlaggebend, ob eine Reaktion entsteht, fortwährt oder erlischt. Für die Verbrennung bedeutet ein günstiges Massen-Sauerstoffverhältnis, dass das für die Reaktion erforderliche Temperaturniveau durch die bei den zuvor oxidierten Teilchen frei werdende Wärmemenge selbst getragen werden kann.

Zusammenfassend stellen folgende drei Faktoren im richtigen Verhältnis das Grundgerüst für den Verbrennungsvorgang dar.

- Brennmaterial (z.B. Holz, Kunststoffe, brennbare Gase, Benzin, ...)
- Hohe Temperatur (mindestens die Zündtemperatur eines Materials). Sie muss während des gesamten Verbrennungsvorganges aufrechterhalten werden (meistens durch die bei der Verbrennung frei werdende Energie gewährleistet).
- Sauerstoff (Sauerstoffgehalt der Luft muss bei mindestens 17 % liegen)

Graphisch lassen sich die für eine Verbrennung erforderlichen Grundlagen im Verbrennungsdreieck, welches Abbildung 2.1 zeigt, darstellen.



Abbildung 2.1.: Das Verbrennungsdreieck

In den folgenden Kapiteln soll durch die schrittweise Erarbeitung aller für die Verbrennung notwendiger Faktoren in Form von unterrichtsgerechten Schülerversuchen ein experimenteller Zugang zum Thema „Feuer“ geschaffen werden.

## 2.6. Versuche zum Thema „Feuer“

Durch eigenständig durchgeführte Experimente sollen die Kinder selbst die Erfahrung machen, was die jeweiligen Bedingungen für die Entfaltung eines Feuers sind. Ihre Beobachtungen sollten dabei stets diskutiert und Ergebnisse dokumentiert werden. Ziel ist es, ein Verständnis für die Entstehung und das Löschen von Bränden zu erlangen und so schrittweise das Verbrennungsdreieck aus Kapitel 2.5 zu entwickeln. Die nachfolgenden

Versuche bauen dabei auf dem Wissensstand und den Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler auf. Zu gefährliche Versuche sind durch die Lehrkraft zu ergänzen.

### 2.6.1. Brennmaterialien

(Schülerversuch<sup>27</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- Feuerfeste Unterlage (z.B. Backblech)
- 1 Teelicht
- Streichhölzer oder Feuerzeug
- 1 Zange oder Holzwäscheklammer
- 1 großes Becherglas mit Wasser
- Stein, Nagel, Holzspießel, Papier, Stahlwolle



Abbildung 2.2.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

Zunächst erhalten die Schülerinnen und Schüler den Arbeitsauftrag, die ihnen vorliegenden Materialien in zwei Klassen (nach brennbar und nicht brennbar) zu kategorisieren. Im Anschluss daran wird das Teelicht entzündet und die zu untersuchenden Objekte der Reihe nach in die Flamme gehalten. Die Aufmerksamkeit der Schülerinnen und Schüler sollte sich bei der Versuchsdurchführung auf das Brennverhalten der jeweiligen Stoffe fokussieren.



Abbildung 2.3.: Versuchsdurchführung

<sup>27</sup>Ideen nach KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 128 f und S. 138



**Darauf ist zu achten:**

Schulhefte und sonstige brennbare Stoffe sollten fernab von der Feuerquelle deponiert werden. Weiter sollte aus sicherheitstechnischen Gründen stets ein gefülltes Wasserglas bereit stehen, um im Falle eines unkontrollierten Brandes schnell eingreifen zu können. Vorsicht ist bei dem Nagel und der Stahlwolle geboten. Beide Materialien sind gute Wärmeleiter. Zur Vermeidung von Verletzungen durch Verbrennungen sollte präventiv an die gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen erinnert werden. Darüber hinaus sollte darauf verwiesen werden, zumindest die metallischen Objekte mit einer Zange bzw. Holzwäscheklammer zu greifen.

**Beobachtung:**

Die Ergebnisse der Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Material	Beobachtung	Material	Beobachtung
Stein	brennt nicht	Holzspreißel	brennt
Nagel	brennt nicht, fängt nur zu glühen an	Papier	brennt
		Stahlwolle	brennt

**Erklärung:**

Nicht alle Stoffe gehen durch Energiezufuhr eine Reaktion mit Sauerstoff unter Lichtentwicklung ein. Aus diesem Grund kann nicht bei allen der genannten Materialien eine Verbrennung beobachtet werden.

**Intention:**

Bei den Schülerinnen und Schülern sollen Alltagserfahrungen aufgegriffen und durch Versuche bestätigt bzw. widerlegt werden. Ein Hauptaugenmerk der Versuche liegt darin, neue Erfahrungen bei der Verbrennung verschiedener fester Materialien zu sammeln. Außerdem soll durch das eventuelle Auftreten von zu den Vorstellungen konträren Ergebnissen kognitive Diskrepanz provoziert werden. Diese soll die Schülerinnen und Schüler motivieren, nach anderen Erklärungen für das beobachtete Phänomen zu suchen<sup>28</sup>.

**Als Ergebnis ist festzuhalten:**

Nicht alle Materialien sind brennbar.  
Feuer benötigt ein Brennmaterial für die Verbrennung.

Der erste Grundbaustein für das Verbrennungsdreieck ist gelegt.

<sup>28</sup>vgl. KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 129

## Brennmaterial

Abbildung 2.4.: Erste Komponente des Verbrennungsdreiecks

### 2.6.2. Hohe Temperatur

#### 2.6.2.1. Alurinne

(Schülerversuch<sup>29</sup>)

##### Benötigte Materialien:

- Feuerfeste Unterlage (z.B. Backblech)
- 1 Bunsenbrenner
- 1 großes Becherglas mit Wasser
- Streichhölzer
- Stückchen Alufolie (ca. 10 x 30 cm<sup>2</sup>)
- Zange oder Holzwäscheklammer



Abbildung 2.5.: Materialien

##### Versuchsbeschreibung:

Die Klasse wird in Gruppen zu je zwei Schülern aufgeteilt. Die einzelnen Gruppen basteln aus einem Stück Alufolie eine Rinne mit einer Länge von 10 cm. In eines der Enden der Rinne wird der Zündkopf eines Streichholzes gelegt. Anschließend wird der Bunsenbrenner entzündet, die Rinne am anderen Ende mit der Zange bzw. Holzwäscheklammer gegriffen und mittig über die Flamme geführt.



Abbildung 2.6.: Versuchsdurchführung

<sup>29</sup>Ideen nach KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 133 und S. 145

**Darauf ist zu achten:**

Die Alufolie sollte nicht zu lange sein, da sonst die nötige Zündtemperatur unter Umständen nicht erreicht wird. In diesem Fall wird zu viel Energie an die Umgebung abgeführt.

**Beobachtung:**

Es lässt sich ein spürbarer, auf die gesamte Alurinne verteilter Temperaturanstieg feststellen. Nach einer kurzen Wartezeit kommt es zur Entfachung des Zündkopfes.

**Erklärung:**

Aluminium ist ein sehr guter Wärmeleiter. Wird die eine Seite der Alurinne über die Flamme gehalten, so kommt es durch Wärmeleitung zu einem thermisch bedingten Energietransport im Material. Als Folge steigt die innere Energie und somit die Temperatur der Alurinne. Erreicht das Aluminium die Zündtemperatur des Zündkopfes, kommt es zur Entfachung des Streichholzes.

**Intention:**

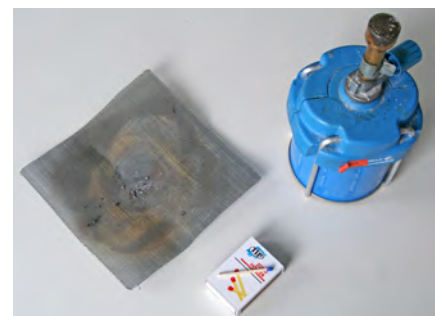
Bei vielen Schülerinnen und Schülern ist die Vorstellung fest verankert, dass für die Entfachung eines Feuers „eine Flamme, vermittelt durch Streichhölzer oder ein Feuerzeug, benötigt und es einen direkten Kontakt zwischen der Flamme und dem Brennmaterial braucht“<sup>30</sup>. Die Initiierung einer Verbrennung durch die Erwärmung eines Materials auf seine spezifische Zündtemperatur ist für viele Schüler deshalb nur schwer fassbar. Somit erschwert die genannte Fehlvorstellung die Ausprägung eines tiefergreifenden Verständnisses der Verbrennung. Durch den beschriebenen Versuch sollen die Schülerinnen und Schüler Erfahrungen und Einsichten gewinnen, um eine Diskrepanz zwischen ihren Vorstellungen und dem tatsächlichen Sachverhalt zu provozieren und schließlich zu lösen.

**2.6.2.2. Abgeschnittene Flamme**

(Lehrerversuch<sup>31</sup>)

**Benötigte Materialien:**

- Bunsenbrenner
- Streichhölzer
- Drahtgewebe aus Stahl
- Hitzebeständige Handschuhe



**Abbildung 2.7.:** Materialien

---

<sup>30</sup>STEFFENSKY (2010)

<sup>31</sup>Ideen nach WEBER

### Versuchsbeschreibung:

Das Drahtgewebe aus Stahl sollte mit hitzebeständigen Handschuhen direkt über den Bunsenbrenner gehalten werden. Der Absperrhahn für das Gas wird geöffnet und das ausströmende Gas mit einem Streichholz entzündet. Langsam wird das Drahtgitter angehoben.



Abbildung 2.8.: Versuchsdurchführung

### Darauf ist zu achten:

Metall stellt einen guten Wärmeleiter dar. Aus diesem Grund besteht beim Greifen des Gitters die Gefahr, sich Verbrennungen zuzufügen. Vorbeugend sollte durch das Anziehen wärmeresistenter Handschuhe diesem Gefahrenpotential entgegengewirkt werden.

### Beobachtung:

Befindet sich das Metallgitter in der Ausgangsposition (siehe Abbildung 2.8 links), so ist eine für einen Bunsenbrenner charakteristische Flamme zu sehen. Wird die Distanz zwischen Drahtgewebe und Bunsenbrenner vergrößert, ist nur oberhalb der Metallfläche eine Flamme zu sehen (siehe Abbildung 2.8 rechts). Obwohl Gas durch den Zwischenraum dringt, tritt dort keine Verbrennung auf.

### Erklärung:

Unterhalb des Metallgitters existieren zwar Sauerstoff und ein brennbares Gas, allerdings wird die nötige Zündtemperatur nicht erreicht. Der Grund hierfür ist, dass die bei der Verbrennung erzeugte Wärmemenge zum größten Teil durch Wärmeleitung an das angrenzende Metallgitter übergeht. Metall stellt einen sehr guten Wärmeleiter dar, so dass besagte Wärmemenge sofort gleichmäßig auf das gesamte Volumen des Gitters verteilt wird. Durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung wird zudem eine Wärmemenge an die Umgebung abgegeben. Auf ein kleines Flächenstück betrachtet, stellt diese Wärmeabgabe nur noch einen Bruchteil dessen dar, was ursprünglich durch die Flamme abgegeben wurde. Diese Wärmemenge wird unter anderem vom aus dem Bunsenbrenner ausströmenden Gas aufgenommen und es kommt zur Steigerung der inneren Energie des Gases (Temperaturerhöhung). Allerdings reicht die übertragene Wärmemenge nicht mehr aus, um das Gas

über die Zündtemperatur zu erhitzen. Daher fängt das Gas nicht zu brennen an.

### Intention:

Ziel ist es, mit den Schülern in einer Diskussion eine Erklärung für diesen Sachverhalt zu finden. Da der beschriebene Versuch dem Experiment „ein Stück Papier über einer Kerze anzünden“<sup>32</sup> nach STEFFENSKY (2010) sehr ähnlich ist, kann mit ähnlichen Erklärungsversuchen des Sachverhaltes gerechnet werden. Ein Beispiel ist die Aussage:

„Die Flamme will durch das Sieb, aber die Löcher sind zu klein“<sup>33</sup>

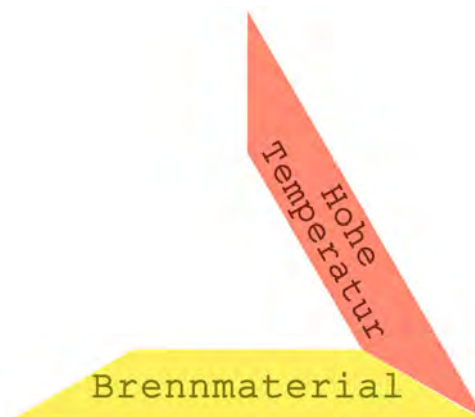
Bei dem Versuch mit dem Papier besteht jedoch die Gefahr, die bereits angesprochene Schülervorstellung zu bekräftigen, dass Stoffe nur dann zu brennen beginnen, wenn ein direkter Kontakt zu einer Flamme besteht. Dieses Missverständnis kann durch den alternativen Versuch mit der „abgeschnittenen Flamme“ vermieden werden, da hier ein direkter Kontakt zwischen Gas (also dem Brennmaterial) und Flamme zu sehen ist. So ist es möglich die Aufmerksamkeit der Schülerinnen und Schüler auf die Temperatur als Ursache zu lenken.

### 2.6.2.3. Ergebnis

Als Ergebnis zu den Versuchen mit Temperatur ist festzuhalten:

Feuer benötigt eine bestimmte Temperatur für die Verbrennung.

Auf diesen Informationen aufbauend, lässt sich das Verbrennungsdreieck um eine weitere Komponente ergänzen.



**Abbildung 2.9.:** Zweite Komponente des Verbrennungsdreiecks

<sup>32</sup>Beim Steffensky-Versuch wird zunächst eine Kerze entzündet und ein Metallsieb in die Flamme geführt. Mit einer Zange wird ein Stück Papier direkt über den Sieb gehalten. Wäre der Metallsieb nicht existent, würde das Papier binnen kürzester Zeit zu brennen beginnen. Aufgrund des Siebes kommt es allerdings nicht zu einer Entzündung des Papiers.

<sup>33</sup>STEFFENSKY (2010)

### 2.6.2.4. Ergänzung

Für viele Schülerinnen und Schüler ist es äußerst schwierig, die Begriffe Temperatur und Wärme voneinander zu trennen. Zurückzuführen ist dies auf die in der Alltagssprache häufig synonyme Verwendung beider Begriffe (nähere Informationen zu Schülervorstellungen zum Thema „Temperatur und Wärme“ siehe Kapitel 10). Aus diesem Grund ist es wichtig die Definitionen beider Begriffe, gemäß Kapitel 10.3 zu kennen und korrekt zu gebrauchen.

Interessant ist es, in diesem Kontext der Frage nachzugehen, was ein Feuer für die Verbrennung benötigt: Temperatur oder Wärme?

Die Feststellung, „Feuer braucht eine bestimmte Temperatur“, bedeutet, dass sich das Brennmaterial in einem bestimmten energetischen Zustand befinden muss, d.h. es muss eine bestimmte Temperatur bzw. eine bestimmte innere Energie haben.

Die zweite Feststellung, „Feuer braucht Wärme“, bedeutet, dass von einem Körper höherer Temperatur Energie in Form von Wärme dem Brennmaterial zufließen muss. Dies erfolgt beispielsweise durch das bereits verbrannte Material, das aufgrund eines chemischen Prozesses eine höhere Temperatur erreicht hat.

### 2.6.3. Sauerstoff

(Schülerversuch<sup>34</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- Feuerfeste Unterlage
- Streichhölzer
- 3 Teelichter
- 3 unterschiedlich große Gläser



Abbildung 2.10.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

Die Klasse wird in Gruppen zu je drei Schülern aufgeteilt. Jede Gruppe benötigt drei unterschiedlich große Gläser und drei Teelichter. Zunächst werden die Teelichter entzündet. Anschließend wird gleichzeitig über alle Teelichter je ein Glas gestülpt und die Zeit bis zum Erlischen jedes Teelichtes gezählt.

---

<sup>34</sup>Ideen nach KAHLERT/DEMUTH (2007), S. 133 f und S. 144



Abbildung 2.11.: Versuchsdurchführung

**Darauf ist zu achten:**

Für einen direkten Vergleich sollten die verwendeten Gefäße in ihrem Volumen signifikante Unterschiede aufweisen. Ebenso ist auf die Verwendung gleicher Brennkörper wie ein gleichzeitiges Überstülpen der Gläser zu achten.

**Beobachtung:**

Die Brenndauer der einzelnen Teelichter ist vom Volumen des jeweils darüber gestülpten Glases abhängig. Das Teelicht, das sich unter dem größten Glas befindet, brennt am längsten. Je kleiner hingegen das Glas ist, desto früher erlischt die Flamme.

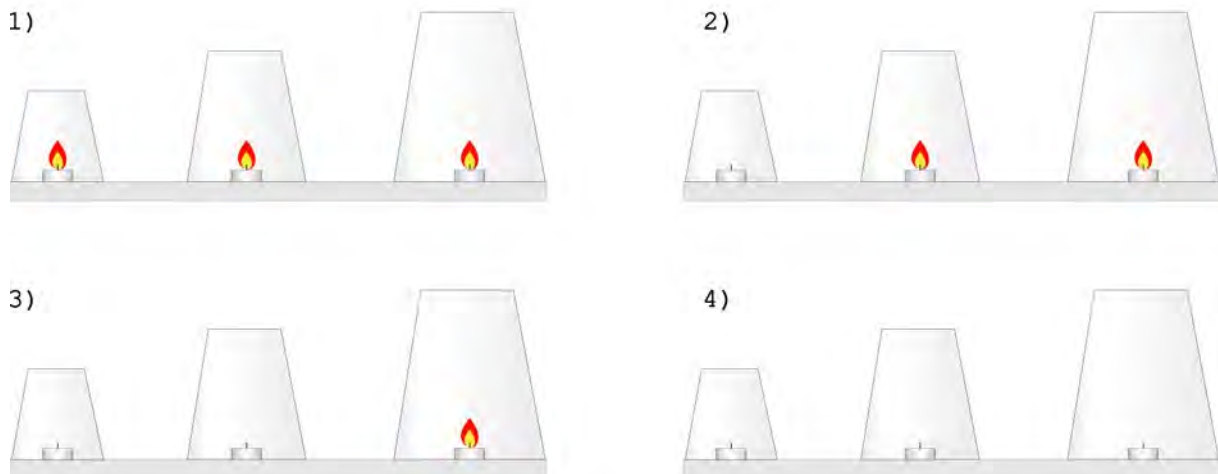


Abbildung 2.12.: Zeitlicher Verlauf des Versuches

**Erklärung:**

Aus den bereits behandelten Kapiteln ist bekannt, dass Feuer ein Brennmaterial sowie eine hohe Temperatur für die Verbrennung benötigt. Die noch fehlende Komponente im Verbrennungsdreieck ist Sauerstoff, welcher bei einer Verbrennung vor allem in Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) umgewandelt wird. Dieser Prozess bewirkt eine Reduktion des Sauerstoffgehaltes in der Umgebung der Flamme. Durch Konvektion steigen die  $CO_2$ -Moleküle



auf und ermöglichen eine weitere Reaktion des Brennmaterials mit Sauerstoff, d.h. das Brennen der Flamme. In abgeschlossenen Systemen ist die Anzahl der Sauerstoffmoleküle allerdings beschränkt, so dass mit fortschreitender Zeit der Sauerstoffgehalt in der Luft abnimmt und schließlich unter 17 % fällt. Ab diesem Zeitpunkt ist „in den meisten Fällen kein Brennen mehr möglich“<sup>35</sup>. Dies erklärt, warum die Teelichter für eine gewisse Zeit im Glas weiter brennen und schließlich erlöschen. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass alle verwendeten Teelichter in den drei Gefäßen im gleichen Maße brennen (chemisch reagieren). Somit verringert sich der Sauerstoffgehalt von anfänglich ca. 21 % in Abhängigkeit der Gefäßgröße unterschiedlich schnell.

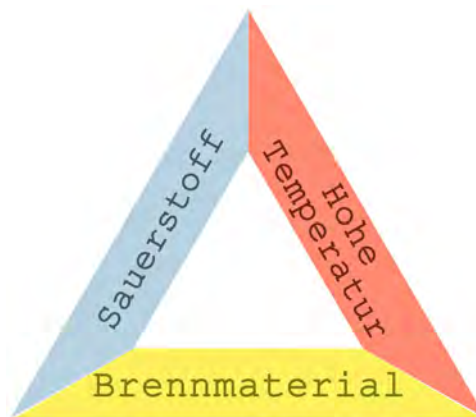
### **Intention:**

Die Versuchsvariante „Kerze unterm Glas“ und das in diesem Zusammenhang errungene Wissen über die Notwendigkeit von Luft bzw. Sauerstoff für die Verbrennung eines Brennstoffes ist vielen Kindern bereits bekannt<sup>36</sup>. Von einem Verständnis für die Interaktion, d.h. der chemischen Reaktion zwischen Brennmaterial und Sauerstoff kann jedoch keinesfalls ausgegangen werden. Ziel ist es, die bereits vorhandenen Kenntnisse der Schülerinnen und Schüler über die Unerlässlichheit von Sauerstoff bei einem Feuer zu aktivieren bzw. neu zu entwickeln.

### **Als Ergebnis ist festzuhalten:**

Feuer benötigt Sauerstoff für die Verbrennung.

Darauf aufbauend lässt sich das Verbrennungsdreieck um die dritte Komponente ergänzen.



**Abbildung 2.13.:** Dritte Komponente des Verbrennungsdreiecks

---

<sup>35</sup>SCHOTT/RITTER (2009), S. 204

<sup>36</sup>vgl. STEFFENSKY (2010)



**Ergänzung:**

Werden die Voraussetzungen für das Brennen eines Feuers mit der Behandlung von Sauerstoff abgeschlossen, so bietet es sich in diesem Zusammenhang an, der Frage nachzugehen, weshalb eine brennende Kerze durch einen kräftigen Luftzug (z.B. Pusten) erlischt. Die Beobachtung erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich zum erarbeiteten Wissen: So müsste die Kerze durch Luft bzw. Sauerstoffzufuhr eigentlich besser brennen. Eine Aufklärung liefert eine genaue Analyse des Vorganges: Beim Pusten werden die Gase, die sich in der Luft befinden, beschleunigt und es entsteht eine Strömung; die heißen Luft- und Kohlenstoffteilchen, die bei der Verbrennung durch Konvektion aufsteigen, erfahren durch diesen Luftstrom eine horizontale Beschleunigung. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass sich die Flamme mit der Strömung verschiebt und solange weiter brennt, bis das ganze Gas verbrannt ist (siehe Abbildung 2.14). Am Ort des Dochtes fehlt in Folge dessen die zum Verdampfen weiteren Wachses notwendige Energie, so dass die Bildung eines brennbaren Gas-Luft-Gemisches ausbleibt. Somit findet am Docht keine Verbrennung mehr statt. Die Flamme erlischt.

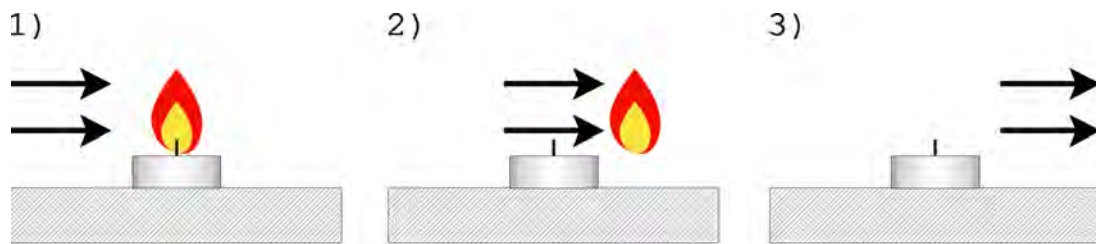


Abbildung 2.14.: Ausblasen einer Kerze

**2.6.4. Unterschiedliches Brennverhalten von Holz**

(Lehrerversuch)

**Benötigte Materialien:**

- Feuerfeste Unterlage (z.B. Metallplatte, Backblech)
- Bunsenbrenner
- Streichhölzer oder Feuerzeug
- dicker Holzklotz, Holzspießel, Holzmehl
- Trichter und Schlauch
- Schutzbrille
- 1 Glas mit Wasser



Abbildung 2.15.: Materialien

**Versuchsbeschreibung:**

Den Schülerinnen und Schülern werden drei unterschiedliche Arten von Holz präsentiert: Ein dicker Holzklötz, ein Holzspreißeßel und ein wenig Holzmehl. Im nächsten Schritt sind sie dazu angehalten, Vermutungen über die Stärke der zu erwartenden Verbrennung anzustellen. Im Anschluss daran wird der Bunsenbrenner entflammt und das Brennverhalten der diskutierten Objekte der Reihe nach analysiert. Es ist zu empfehlen, den Versuch mit dem dicken Holzklötz zu beginnen, mit dem Holzspreißeßel fortzufahren und mit dem Holzmehl abzuschließen. Hierbei werden die ersten beiden Körper für eine kurze Zeit in die Flamme des Bunsenbrenners gehalten, danach entnommen und die Stärke der Verbrennung untersucht. Das Holzmehl wird nicht direkt in die Flamme gegeben, sondern über einen Trichter in einen Schlauch gefüllt. Das eine Ende des Schlauches wird in die Nähe der Flamme des Bunsenbrenners geführt. Am anderen Schlauchende wird einmal kräftig in den Schlauch gepustet, so dass das Holzmehl direkt in die Flamme des Bunsenbrenners gelangt.

**Darauf ist zu achten:**

Gerade der Versuchsteil mit dem Holzmehl stellt ein zu beachtendes Gefahrenpotential dar. Vor der Durchführung dieses Experimentes sollte die Lehrkraft die Schülerinnen und Schüler darauf hinweisen, diesen Teil nicht Zuhause nachzuahmen. Auch bei der Durchführung in der Schule sind wichtige Sicherheitsmaßnahmen einzuhalten: So sollte der Lehrer eine Schutzbrille tragen, eine sichere Entfernung einnehmen und in keinem Fall das Holzmehl in Richtung der Schüler pusten.

**Beobachtung:**

Material	Beobachtung
Holzklötz	Das Holz verrußt in dem Bereich, der sich in der Flamme befindet. Darüber hinaus kann ein Glühen und eventuell das kurzzeitige Aufleuchten einer Flamme festgestellt werden, die jedoch unverzüglich erlischt (siehe Abbildung 2.16 links oben).
Holzspreißeßel	Nach dem Entfernen des Holzspreißeßels aus der Flamme des Bunsenbrenners ist eine Verbrennung mit Flamme und Glut zu beobachten. Der wesentliche Unterschied zum Holzklötz liegt darin, dass die Flammenbildung schneller erfolgt und länger fortwährt. Eine Schwärzung durch Ruß ist ebenso zu beobachten (siehe Abbildung 2.16 links unten).
Holzmehl	Das in die Flammen des Bunsenbrenners gepustete Holzmehl beginnt schlagartig zu brennen und steigt dabei auf. Es entwickelt sich ein Feuerball mit einer auf der Haut spürbaren Wärmestrahlung. Innerhalb kürzester Zeit ist das Holzmehl vollständig verbrannt (siehe Abbildung 2.16 rechts).



Abbildung 2.16.: Beobachtung

**Erklärung:**

Mit den bisherigen Kenntnissen über den Verbrennungsvorgang kann die in allen drei betrachteten Fällen einsetzende Verbrennung erklärt werden. Für ein tieferes Verständnis über die Stärke müssen jedoch weitere physikalische Phänomene berücksichtigt werden. Von entscheidender Bedeutung sind die Wärmeleitung und die innere Energie des Festkörpers. Aus Kapitel 2.4 ist bekannt, dass bei festen Brennstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur brennbare Gase austreten. Erreicht der Körper seine spezifische Zündtemperatur, so treten genügend Gase aus, damit eine Verbrennung mit Flamme stattfinden kann. Wird Holz in die Flamme eines Bunsenbrenners geführt, so geht chemische Energie in thermische Energie über. Auch wenn Holz ein schlechter Wärmeleiter ist, wird ein Teil der Energie von der Oberfläche des Materials in das Innere weitergeleitet. Bei dickeren Objekten wird demnach die zugeführte Wärme auf mehr Teilchen verteilt, als bei dünneren Objekten. Damit erhöht sich die innere Energie und folglich die Temperatur der einzelnen Teilchen bei dünneren Materialien wesentlich schneller. Als Folge treten in kürzerer Zeit mehr brennbare Gase aus, die den Verbrennungsvorgang schneller einleiten.

**Intention:**

Die angeführte Erklärung sollte im Rahmen der Schule nicht aufgegriffen werden, da sie zu komplex ist. Für die Lehrkraft liefert sie allerdings ein solides Hintergrundwissen. Im Unterricht genügt es, auf die unterschiedliche Temperatur zu verweisen, die Körper zum Entzünden benötigen. Es kommt also auf das richtige Verhältnis der Komponenten Temperatur, Sauerstoff und Brennmaterial an, um eine Verbrennung zustande zu bringen. Mit diesem Ergebnis lässt sich das Verbrennungsdreieck mit der letzten Komponente komplettieren.

Als Ergebnis ist festzuhalten:

Es kommt auf das richtige Verhältnis von Sauerstoff, Temperatur und des Brennmaterials an



Abbildung 2.17.: Das vollständige Verbrennungsdreieck

## 3. Löschen verschiedener Brennstoffe

Das Verbrennungsdreieck, wie es Abbildung 2.17 zeigt, bildet die Grundlage für ein detailliertes Wissen über den Verbrennungsvorgang mit deren Hilfe das Zustandekommen und Fortwähren eines Brandes erklärt werden kann.

Auf natürliche Weise erlischt ein Feuer, wenn eine der genannten Komponenten des Verbrennungsdreiecks nicht mehr gegeben ist<sup>37</sup>. Dies kann unter Umständen sehr lange dauern und ist bei unkontrollierten Bränden, bei denen mit jeder Minute des Brennens ein größerer Schaden entsteht, nicht tragbar. Aus diesem Grund ist es die Aufgabe der Feuerwehr, aktiv durch verschiedene Löschmethoden einzugreifen. Prinzipiell werden dieselben Grundsätze, wie beim natürlichen Ausgehen des Feuers, ausgenutzt. Der Unterschied liegt darin, dies gezielt zu tun. Die verschiedenen Löschansätze ergeben sich im Wesentlichen aus der Beseitigung einer der für die Verbrennung notwendigen Komponenten<sup>38</sup>:

- **Löschen durch Ersticken:**

Wird ein brennendes Objekt mit Schaum oder Löschpulver benetzt, so bildet das Löschmittel eine Grenzschicht zwischen Brennstoff und umgebender Luft. Ein direkter Kontakt des Brennmaterials mit Sauerstoff wird auf diese Weise unterbunden und in Folge dessen erlischt das Feuer. Weitere zum Ersticken einsetzbare Löschmittel wie die Löschdecke basieren auf dem gleichen Grundprinzip.

- **Löschen durch Beseitigung des Brennmaterials:**

Bei manchen Brandobjekten ist der Entzug des Brennmaterials die einfachste, sicherste und effektivste Art, das Feuer zu beschwichtigen. Spezielle Löschmittel existieren nicht, da situationsabhängig durch einen mechanischen Vorgang der Brennstoff entfernt wird. Beispielsweise sollte bei einem Gasbrand in erster Linie versucht werden, das Nachströmen von Gas durch das Abdrehen der Gaszuleitung zu unterbinden.

- **Löschen durch Abkühlung:**






Das Löschmittel Wasser eignet sich - mit Ausnahme einiger weniger Brennstoffe (z.B. Magnesium (siehe Kapitel 3.4)) - besonders dazu, die zur Aufrechterhaltung der Verbrennung eines Körpers notwendige Wärme zu entziehen (siehe Kapitel 4). Wird die Zündtemperatur des Brandobjektes unterschritten, so stoppt der Verbrennungsvorgang.

---

<sup>37</sup>Informationen zum Absatz vgl. STAATLICHE FEUERWEHRSSCHULE WÜRZBURG (2010), S. 8

<sup>38</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSSCHULE WÜRZBURG (2010), S. 8 f

Haben die Schülerinnen und Schüler ein Grundverständnis für den Verbrennungsvorgang entwickelt und dabei das Grundkonzept des Verbrennungsdreiecks verinnerlicht, fällt ihnen die Erklärung verschiedener Löschmethoden nicht schwer<sup>39</sup>. Allerdings sind deren Anwendung und Effizienz bezüglich verschiedener Materialien noch näher zu analysieren. Durch eine Kategorisierung nach DIN EN 2 sind fünf Brandklassen zu differenzieren, die Informationen über die je stattfindende Verbrennung und die entsprechend einsetzbaren Löschmittel liefern:

Brandklasse	Beschreibung
 A	Brände fester Stoffe, hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Glutbildung verbrennen z.B. Holz, Papier, Stroh, Textilien, Kohle, Autoreifen
 B	Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen z.B. Benzin, Benzol, Öle, Lacke, Teer, Äther, Alkohol, Stearin, Paraffin
 C	Brände von Gasen z.B. Methan, Propan, Wasserstoff, Acetylen, Erdgas, Stadtgas
 D	Brände von Metallen z.B. Aluminium, Magnesium, Lithium, Natrium, Kalium und deren Legierungen
 F	Brände von Speiseölen und Speisefetten (siehe DIN V 14406-5)

**Tabelle 3.1.:** Brandklassen <sup>40</sup>

In den nachfolgenden Kapiteln werden die fünf genannten Brandklassen auf die Anwendung verschiedener Löschmittel und deren Löscherfolg hin untersucht. Dabei bewährt sich meist die einfache Merkregel aus der Feuerwehrpraxis:

**„Glut muss abgekühlt, Flammen müssen erstickt werden“<sup>41</sup> .**

Der falsche Einsatz von Löschmitteln kann beispielsweise bei Metall- bzw. Fettbränden äußerst gefährlich werden, wie die Abschnitte 3.4 und 3.5 zeigen werden.

---

<sup>39</sup>vgl. STEFFENSKY (2010)

<sup>40</sup>GLORIA GMBH

<sup>41</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2010), S. 9

### 3.1. Brandklasse A: Brände fester glutbildender Stoffe

Feste Brennstoffe unterscheiden sich, wie bereits im Kapitel 2.4 angesprochen, durch drei unterschiedliche Verbrennungserscheinungen (Flamme, Glut, Glut und Flamme), die auf spezifische Materialeigenschaften verweisen. Feststoffe, wie Kerzenwachs, die ausschließlich mit Flamme und ohne Glutbildung brennen, ändern vor ihrer Verbrennung ihren Aggregatzustand von fest nach flüssig. Aus diesem Grund sind sie der Brandklasse B zuzuordnen.

Der Brandklasse A gehören jene brennbare feste Substanzen an, die mit Flamme und Glut oder aber auch nur mit Glut verbrennen. Beispiele hierfür sind Holz, Stroh, Papier und Kohle bzw. Holzkohle und Koks. Dem Grundsatz „Glut muss abgekühlt, Flammen müssen erstickt werden“<sup>42</sup> folgend, sind somit die Löschverfahren Abkühlen und Erstickten bzw. nur Abkühlen anzuwenden. Das in diesem Kontext am häufigsten verwendete Löschmittel ist Wasser. Durch die Benetzung des Brennmaterials mit Wasser wird ein Abkühlprozess eingeleitet, der die Temperatur des Körpers reduziert. Sobald die Zündtemperatur des Materials unterschritten ist, erlischt das Feuer. Durch die Beimischung spezieller Schaummittel kann gleichzeitig eine kühlende wie erstickende Wirkung erzielt werden, da der erzeugte Schaum die Oberfläche des brennenden Objektes bedeckt. So wird Wärme aufgenommen und zugleich die Zufuhr von Sauerstoff verhindert.

### 3.2. Brandklasse B: Brände von flüssigen und flüssig werdenden Stoffen

Flüssige Brennstoffe sind im Alltag in vielen Bereichen gegenwärtig: Benzin, Diesel, Motoröl, Heizöl, Alkohol und Spiritus sind nur einige Beispiele, mit denen wir häufig konfrontiert werden. Eine Kategorisierung in wasserlösliche und nicht wasserlösliche Substanzen gibt Aufschluss, ob das Löschmittel Wasser wirkt oder nicht. Wird Wasser einer brennbaren wasserlöslichen Flüssigkeit (wie Alkohol oder Spiritus) zugesetzt, so reduziert sich die Konzentration der brennbaren Flüssigkeit und in Folge dessen auch die an der Oberfläche austretenden entzündlichen Gase. Das über dem Fluid existente Gas-Luft-Gemisch ist nicht mehr in der Lage zu verbrennen und somit erlischt die Flamme.

Nichtwasserlösliche brennbare Flüssigkeiten (wie Benzin oder Öl) besitzen in der Regel eine im Vergleich zum Wasser verminderte Dichte. Löschversuche mit Wasser sind in solchen Situationen ohne Erfolg, da die zugeführte Wassermenge die brennende Flüssigkeitsschicht durchdringt und lediglich eine weitere Flüssigkeitsschicht unter der brennenden Flüssigkeit bildet. An der Oberfläche des zweiphasigen Fluides tritt daher eine unveränderte Menge an brennbaren Gasen aus. Wird zuviel Wasser zugegeben, so dass die brennende Flüssigkeit die Gefäßwände übersteigt, besteht sogar die Gefahr der Ausweitung des Brandes.

Die sicherste und effektivste Löschmethode für Flüssigkeitsbrände ist entsprechend der Entzug von Sauerstoff (= Erstickten). Bei Kleinbränden kann dies beispielsweise durch das

---

<sup>42</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2010), S. 9

Überstülpen eines geschlossenen Gefäßes erfolgen. In Einsatzszenarien mit großflächigen Bränden wird hingegen die Oberfläche der Flüssigkeit mit einem Schaumgemisch benetzt. Der Austritt von entzündlichen Brandgasen bzw. der Durchlass von Sauerstoff wird so unterbunden - der Schaum stellt also eine Grenzschicht dar. Zugleich kühlt er die Oberfläche des Fluides.

#### 3.2.1. Versuch zum Thema „flüssige Brennstoffe mit Wasser löschen“

(Lehrerversuch)

##### Benötigte Materialien:

- feuerfeste Wanne (am besten aus Glas)
- 4 Petrischalen
- Wasserspritzflasche
- Lunte
- 1 Deckel, der die Petrischalen verschließt
- Feuerzeug
- Spiritus
- Schmieröl (oder Benzin)



Abbildung 3.1.: Materialien

##### Versuchsbeschreibung:

In eine Petrischale wird ein wenig Spiritus gegeben und diese anschließend in der Wanne positioniert. Nun wird der Spiritus entzündet und in einem weiteren Schritt Wasser zugegeben. Mit dem Schmieröl bzw. Benzin wird in einer zweiten Petrischale auf die gleiche Art und Weise verfahren.

Nach diesem Versuchsteil wird erneut je eine Schale mit Spiritus und Schmieröl (oder Benzin) gefüllt und entzündet. Nun wird nicht mit Wasser gelöscht, sondern in beiden Fällen ein Deckel aufgesetzt.

##### Darauf ist zu achten:

In allen Versuchsteilen sollte möglichst wenig flüssiger Brennstoff verwendet werden und aus sicherheitstechnischen Gründen immer eine Löschdecke greifbar sein, um notfalls eingreifen zu können. Bei der Entzündung von Benzin sollte ein sehr langes Feuerzeug oder eine Lunte verwendet werden, da Benzin schon bei Raumtemperatur ein hoch entzündliches Gas-Luft-Gemisch produziert. Die große Glaswanne dient der Sicherheit, damit beim Überlaufen der Petrischale nicht andere Materialien entzündet werden. Aus diesem Grund sollten die Gefäßwände ausreichend hoch sein.



**Beobachtung:**

Durch Zugabe von Wasser steigt der Flüssigkeitsstand in beiden Petrischalen an. Im Gefäß mit dem Spiritus erlischt nach einiger Zeit die Flamme (siehe Abbildung 3.2). Die Verbrennung des Schmieröles findet bei der Zugabe von Wasser hingegen unverändert statt (siehe Abbildung 3.3). Wird zu viel Wasser in die Schale gegeben, so dass der Inhalt des Gefäßes überläuft, kann es sogar zu einer Ausweitung des Brandes kommen. Wird ein Deckel auf die Petrischale mit der brennenden Flüssigkeit gesetzt, so erlischt das Feuer in beiden Fällen innerhalb kürzester Zeit (siehe Abbildung 3.4).



**Abbildung 3.2.:** Versuch: Brennenden Spiritus mit Wasser löschen



**Abbildung 3.3.:** Versuch: Brennendes Lampenöl mit Wasser löschen



**Abbildung 3.4.:** Ersticken einer brennenden Flüssigkeit

**Erklärung:**

Siehe Kapitel 3.2

**Intention:**

Auch wenn in Einzelfällen Wasser als Löschmittel bei Flüssigkeitsbränden wirkungsvoll ist, sollen die Schülerinnen und Schüler lernen, Flüssigkeitsbrände in erster Linie zu ersticken.

### 3.3. Brandklasse C: Brände von gasförmigen Stoffen

Brennbare Gase nehmen in der Energieversorgung der (heutigen) Gesellschaft einen festen Platz ein<sup>43</sup>: So ist beispielsweise die Zahl der erdgasbetriebenen Fahrzeuge in den letzten Jahren angestiegen und gerade im Haushalt werden sehr oft Gasheizungssysteme verwendet. Auch im industriellen Bereich werden brennbare Gase in der Produktion eingesetzt (z.B. beim Schweißen). Gefährlich wird es, wenn eine unkontrollierte Verbrennung des Gases einsetzt. In solchen Situationen ist das richtige Löschen wesentlich, um nicht - im schlimmsten Fall - eine Gasexplosion zu verursachen.

Die Unterbindung nachströmender brennbarer Gase - beispielsweise durch das Verschließen entsprechender Ventile in der Gaszuleitung - stellt in allen Fällen die sicherste Methode der Gasbrandbekämpfung dar. Wird eine Gasflamme auf anderem Wege - also durch Sauerstoffentzug oder Abkühlung - gelöscht und die Gaszufuhr nicht unterbrochen, so breiten sich die austretenden entzündlichen Gase im Raum weiter aus und können durch eine beliebige Zündquelle zur Explosion gebracht werden.

Für die Feuerwehr ist eine Gasausströmung mit brennendem Gas dahingehend als weniger gefährlich einzustufen, da das austretende Gas sofort verbrennt und „sich im Regelfall kein explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch“<sup>44</sup> bildet.

In einem sehr einfachen Schulversuch kann das Löschen durch den Entzug des Brandmittels veranschaulicht werden: Hierzu wird ein Bunsenbrenner oder Campingkocher entflammt und anschließend die Gaszuleitung abgedreht, so dass das Feuer erlischt.

Das gefährliche an Brandgasen ist, dass sie selbst geruchslos sind. Deshalb wird ihnen ein spezieller Duftstoff beigelegt, der als typischer Gasgeruch wahrgenommen wird. Ist in einem Raum ein Gasgeruch zu vernehmen, ohne dass eine Quelle ausfindig gemacht werden kann, so sollten alle im Gebäude befindlichen Menschen schnellstmöglich evakuiert, die Fenster geöffnet und Spezialkräfte der Feuerwehr alarmiert werden.

### 3.4. Brandklasse D: Metallbrände

Bei vielen Nutzungsgegenständen im Alltag werden Metalle aufgrund ihrer hohen Hitzebeständigkeit eingesetzt, so beispielsweise bei Kochtöpfen, Motoren oder auch Heizöfen. Die Vorstellung, dass Metalle brennen können, ist für viele Menschen nicht denkbar und auch kontrovers zu ihren Erfahrungen. In Presseberichten über die Feuerwehr kann jedoch Gegenteiliges nachgelesen werden: „Enschede (dpa) - Über die Ursache für die verheerenden Detonationen in der Feuerwerksfabrik im niederländischen Enschede gibt es bisher nur Vermutungen. Experten nehmen an, dass die Katastrophe entweder durch das Löschwasser in Verbindung mit brennendem Magnesium oder durch die unsachgemäße Lagerung von Kaliumperchlorat und Aluminium, der so genannten Blitzknallbombe, ausgelöst wurde“<sup>45</sup>. Auch wenn Metalle brennbare Festkörper sind, zeigen sie ein zu den der Brandklasse A

---

<sup>43</sup>Informationen zum Absatz vgl. STAATLICHE FEUERWEHRSSCHULE WÜRZBURG (2008), S. 1 ff

<sup>44</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSSCHULE WÜRZBURG (2008), S. 7

<sup>45</sup>HAUPT (2002), Kapitel 55

zugehörigen fossilen Brennstoffen divergentes Brennverhalten und bedürfen entsprechend grundverschiedener Löschmethoden. Der Einsatz falscher Löschmittel kann den existenten Verbrennungseffekt sogar steigern, wie der Zeitungsartikel in seiner Aussage zur Kombination von brennendem Magnesium mit Wasser verdeutlicht. Aus diesem Grund werden Metallbrände einer eigenen Brandklasse (D) zugeschrieben.

Für das Löschen von Metallbränden ist folgende Regel zu beachten: „Den Brand mit Sand oder Zement (natürlich beide trocken!!!) abdecken. Dann ausbrennen lassen, bis Sauerstoff und Stickstoff verbraucht sind“<sup>46</sup>.

### 3.4.1. Versuch zum Thema „Metallbrände“

#### 3.4.1.1. Verbrennung verschiedener Metalle

(Lehrerversuch<sup>47</sup>)

##### Benötigte Materialien:

- feuerfeste Unterlage
- Bunsenbrenner
- Tiegelzange
- Pinzette
- Messer
- Natrium
- Calcium
- Aluminiumpulver oder -späne
- Magnesium

##### Versuchsbeschreibung:

Aus dem vorliegenden Metallen wird jeweils mit dem Messer ein kleines Stück herausgeschnitten, auf eine feuerfeste Unterlage gelegt und mit einem Bunsenbrenner erhitzt.

##### Darauf ist zu achten:

Bei den Versuchen mit Natrium und Calcium ist darauf zu achten, die Verbrennungen unter einem Luftabzug durchzuführen, da dabei ätzender Rauch aufsteigt, der unter keinen Umständen eingeatmet werden darf. Bei der Verbrennung von Aluminium und Magnesium ist ein Abzug nicht zwingend erforderlich. Allerdings ist hier unbedingt auf eine UV-Schutzbrille zu achten. Sollte der Brand außer Kontrolle geraten, darf unter keinen Umständen mit Wasser oder Feuerlöschern gelöscht werden. Für diesen Fall sollte ein kleiner Eimer mit Sand griffbereit stehen, um das Feuer ersticken zu können.

##### Beobachtung:

Alle untersuchten Metalle verbrennen und zeigen dabei die, in Tabelle 3.2 aufgelisteten, Verbrennungserscheinungen.

---

<sup>46</sup>BLUME/WIECHOCZEK (2009b)

<sup>47</sup>Ideen nach BLUME/WIECHOCZEK (2005)

Metall	Flammerscheinung
Natrium	leuchtend gelb
Calcium	ziegelrot
Aluminium	helle Lichtblitze
Magnesium	sehr grelles Licht

**Tabelle 3.2.:** Verbrennungserscheinungen der gegebenen Metalle

#### **Erklärung:**

Mit Ausnahme einiger Edelmetalle reagieren nahezu alle Metalle mit Sauerstoff unter Bildung von normalen Metalloxiden<sup>48</sup>. Die Reaktionen sind dabei unterschiedlich stark ausgeprägt. Elemente der ersten Hauptgruppe (Alkalimetalle) reagieren leicht und besonders intensiv mit Sauerstoff. Eisen hingegen reagiert nicht besonders heftig mit Sauerstoff, was am langsamen Rostprozess beobachtet werden kann.

Die eintretende Oxidation ist nicht nur vom Material, sondern auch von den Reaktionsbedingungen abhängig. Beispielsweise reagiert Eisen bei einem normalen Luftdruck (1013 hPa) und Temperaturen über 600°C mit Sauerstoff unter Bildung von  $FeO$ . Wird Eisen fein verteilt, entsteht bei 500°C  $Fe_3O_4$  und bei Temperaturen über 500°C  $Fe_2O_3$  (Rost ist hydratisiertes  $Fe_2O_3$ ).

#### **Intention:**

Auch wenn die meisten Schülerinnen und Schüler in ihrem alltäglichen Leben nie mit Metallbränden konfrontiert werden, ergeben sich durch die unterrichtliche Behandlung Möglichkeiten, metallische Materialeigenschaften zu analysieren und unterschiedliche Verbrennungserscheinungen zu studieren. Durch die genannten Experimente können die Schüler wertvolles Wissen über Naturphänomene - insbesondere über die Verbrennung metallischer Materialien - erwerben und damit ihren Horizont erweitern.

#### **3.4.1.2. Brennendes Magnesium und Wasser**

(Lehrerversuch<sup>49</sup>)

#### **Benötigte Materialien:**

- feuerfeste Unterlage
- Bunsenbrenner
- Tiegelzange
- Magnesiumblock
- Wanne mit Wasser
- Sand

---

<sup>48</sup>Informationen zum Absatz vgl. BREUER et al. (2009), S3

<sup>49</sup>Ideen und Informationen vgl. BLUME/WIECHOCZEK (2009b) und STALKE (2011)

**Versuchsbeschreibung:**

Ein Magnesiumblock wird mit einer Tiegelzange gegriffen und in die Flamme eines Bunsenbrenners gehalten. Wenn das Magnesium zu brennen beginnt, wird der eigentliche Versuch gestartet und der Block in eine mit Wasser gefüllte Wanne geführt.<sup>50</sup>

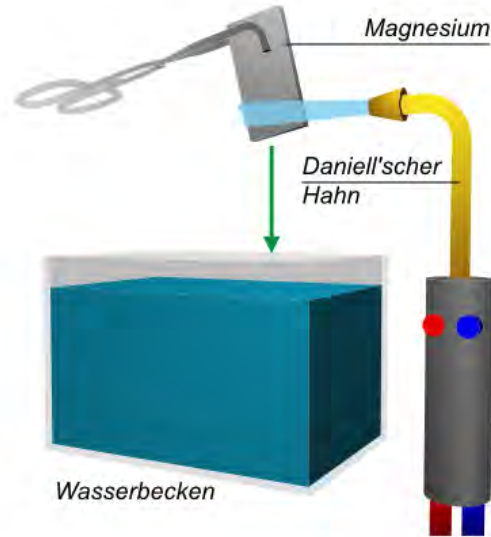


Abbildung 3.5.: Versuchsdurchführung<sup>51</sup>

**Darauf ist zu achten:**

Magnesium verbrennt unter Emission von UV-Strahlung mit einer sehr grellen Flamme. Zum Schutz der Schüler und der Lehrkraft vor Schädigungen der Augen sollten unbedingt Schutzbrillen getragen werden. Der Arbeitsbereich sollte vor der Versuchsdurchführung geräumt werden, damit durch Funkenschläge nicht andere Materialien Feuer fangen. Zum Löschen unbeabsichtigter Brandentwicklungen sollte Sand griffbereit sein.

Für ein Gelingen des Versuches ist eine größere Menge Magnesium erforderlich, um eine ausreichend hohe Reaktionstemperatur zu erreichen. Andernfalls tritt keine Zersetzung des Wassers ein. Als Folge erlischt die Flamme des Magnesiumbrandes unmittelbar, nachdem das Magnesium in das Wasser getaucht wird, da der Abkühlungseffekt durch das Wasser zu groß ist.

**Beobachtung:**

Beim Kontakt des Magnesiumblockes mit Wasser treten Funkenschläge auf und die Verbrennung wird intensiver (siehe Abbildung 3.6). Nach einer kurzen Zeit erlischt der Brand.

<sup>50</sup>Auf der Homepage der Universität Göttingen ist unter dem Link <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/2111> - Zugriff am 20. Juni 2012 ein Video zum beschriebenen Versuch zu finden

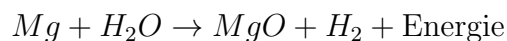
<sup>51</sup>STALKE (2011)



Abbildung 3.6.: Beobachtung <sup>52</sup>

**Erklärung:**

„Die Verbrennung des Magnesiums zu Magnesiumoxid ist so exotherm und heiß, dass nicht nur Luft als Sauerstoffdonor dienen kann, sondern auch in Verbindungen gebundener Sauerstoff“<sup>53</sup>. Wird der Magnesiumblock in Kontakt mit Wasser gebracht, so zersetzt sich das Wasser in Sauerstoff, der unmittelbar mit Magnesium reagiert und elementaren Wasserstoff. Es entsteht Magnesiumoxid und Wasserstoff.



Aus diesem Grund brennt das Magnesium unter Wasser weiter. Dieser Effekt wird bei der Herstellung von Magnesiumfackeln für Taucher ausgenutzt.

**Intention:**

Durch den Versuch soll den Schülerinnen und Schülern die Grenze des Löschmittels Wasser verdeutlicht werden und ins Bewusstsein dringen, dass nicht alle Brände mit Wasser beschwichtigt werden können.

## 3.5. Brandklasse F: Fettbrände

Beim Braten und Frittieren werden Öle bzw. Fette auf Temperaturen von ungefähr 160°C erhitzt. Wird die Temperatur weiter erhöht, so entsteht zunächst ein starker Qualm und das Öl bzw. Fett beginnt zu sieden<sup>54</sup>. In diesem Stadium besteht noch keine direkte Brandgefahr, da die für die Verbrennung nötige Temperatur noch nicht erreicht ist. Durch das Entfernen der Pfanne oder des Topfes von der Heizplatte sowie das Aufsetzen des Deckels kann Schlimmeres vermieden werden. Dennoch ist äußerste Vorsicht geboten, da siedendes Öl bzw. Fett schwerste Hautverbrennungen verursachen kann.

Wird nicht rechtzeitig eingegriffen, so steigt die Temperatur des Öles bzw. Fettes weiter an, bis der Flammpunkt erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt beginnt das Öl bzw. Fett zu

---

<sup>52</sup>STALKE (2011)

<sup>53</sup>STALKE (2011)

<sup>54</sup>Informationen zum Absatz vgl. PIETEREK (2009)

brennen. Auch in dieser Situation sollte der Topf bzw. die Pfanne von der Herdplatte entfernt werden und das Feuer durch das Aufsetzen eines Deckels erstickt werden. Mit Wasser darf unter keinen Umständen gelöscht werden, da hinzugeführtes Wasser beim Kontakt mit dem heißen Fett schlagartig verdampft. Dabei reißt es feinste Tröpfchen der flüssigen Öl- bzw. Fettmasse mit sich, die derart verbrennen, dass ein gewaltiger Feuerball mit einer sehr großen Hitzeausstrahlung entsteht. Bereits wenige Tropfen Wasser können eine solche Öl- bzw. Fettexplosion auslösen. Der nachfolgende Versuch zeigt eine solche Öl- bzw. Fettexplosion.

### 3.5.1. Versuch zum Thema „Ölexplosion“

(Lehrerversuch<sup>55</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- Heizplatte bzw. Bunsenbrenner
- flache Metallschale
- Wasserspritzflasche
- Rohrzange
- Schutzbrille
- feuerfeste Unterlage
- Paraffinöl bzw. Frittierfett



Abbildung 3.7.: Materialien (Versuchsdurchführung im großen Stiel)

#### Versuchsbeschreibung:

In die flache Metallschale wird ungefähr 20 bis 30 ml Paraffinöl gegeben und diese auf der Heizplatte erhitzt. Ist der Flammpunkt des Öles, der bei ca. 250 °C liegt, erreicht, wird die Schale mit der Rohrzange gegriffen, von der Heizplatte entfernt und auf der feuerfesten Unterlage platziert. Im Anschluss daran werden durch einen Bunsenbrenner oder eine Lunte die Dämpfe des Öles entzündet. Aus einer sicheren Entfernung werden einige wenige Wassertropfen auf das brennende heiße Öl gegeben.



Abbildung 3.8.: Versuchsdurchführung

<sup>55</sup>Ideen nach BLUME/WIECHOCZEK (2009a)



**Darauf ist zu achten:**

Vor dem Versuch ist zu prüfen, ob für den Fall einer unbeabsichtigten Ausweitung des Brandes notwendige Löschmittel - wie eine Löschdecke - in Reichweite zur Verfügung stehen. Weiter müssen der Arbeitsbereich mit einer feuerfesten Unterlage ausgelegt und alle anderen Materialien vom Tisch entfernt sein. Während des Versuches ist der Lehrer dazu angehalten, selbst eine Schutzbrille zu tragen sowie die Schüler auf eine sichere Distanz zu halten.

**Beobachtung:**

Bei der Zugabe von Wasser sind ein lautes Zischen sowie die Entstehung eines gewaltigen aufsteigenden Feuerballes zu beobachten. Auf der Haut ist dabei eine intensive Wärmestrahlung zu spüren.



Abbildung 3.9.: Beobachtung

**Erklärung:**

Siehe Kapitel 3.5

**Intention:**

Bei der Zubereitung von Speisen werden häufig Öle verwendet. Kommt es zur Entzündung des Öles, reagieren viele Menschen unangemessen. Sie versuchen den Brand mit Wasser zu löschen und sind sich den damit einhergehenden Gefahren nicht bewusst. Verbrennungen oder gar sich rasch ausbreitende Wohnungsbrände können die Folge sein. Aus diesem Grund sollte es ein wichtiges Anliegen des Schulunterrichts sein, den Schülerinnen und Schülern den korrekten Umgang mit brennenden Fetten und Ölen zu lehren.



## 3.6. Besondere Brennstoffe

In den Bereich der besonderen Brennmaterialien sind jene Stoffe einzuordnen, die im Zusammenhang mit gewissen Löschmitteln ein besonderes Brennverhalten zeigen. Nachfolgend soll zur Veranschaulichung beispielhaft ein solches außergewöhnliches Brennmaterial näher erläutert werden.

### 3.6.1. Nitrofilme

Nitrofilme, die früher in der Fotografie und Filmproduktion eingesetzt wurden, sind aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung „leicht entflammbar und höchst feuergefährlich. Sie brennen außerordentlich schnell unter Bildung einer Stichflamme und starker Hitzeentwicklung ab“<sup>56</sup>. Hat ein solcher Filmstreifen Feuer gefangen, ist er nicht löscherbar. In einem Video des österreichischen Filmarchivs mit Unterstützung der Freiwilligen Feuerwehr Laxenburg ist Mitte der 60er Jahre das Verhalten von brennenden Nitrofilmen gegenüber verschiedenen Löschmitteln dokumentiert worden: Hierbei scheiterte jeglicher Löscher Versuch<sup>57</sup>. Deshalb waren bis zur Entwicklung feuerresistenter Filmstreifen Filmvorführungen äußerst gefährlich: Im Jahre 1897 starben beispielsweise während einer Vorführung anlässlich der Weltausstellung in Paris insgesamt einhundertvierzig Personen in einem Flammeninferno, ausgelöst durch die Entfachung eines Filmstreifens<sup>58</sup>.

Bei der Archivierung von Nitrofilmen sind besondere Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, da die Gefahr der Selbstentzündung besteht: Neuproduzierte Nitratfilme besitzen eine Zündtemperatur von etwa 130°C<sup>59</sup>. Bei ungünstiger Lagerung kann nach einiger Zeit eine Temperatur von nur 38°C zur Selbstzündung der Filme genügen. Mittlerweile fallen Nitrofilme aufgrund ihrer brisanten Zusammensetzung unter das Sprengstoffgesetz und es existieren klare Richtlinien und Vorschriften, die bei Archivierungsarbeiten eingehalten werden müssen. Im Brandfall können lediglich kleine Brände mit einer Löschdecke erstickt werden. Ist dieser Versuch erfolglos, muss gewartet werden bis das Brennmaterial vollständig verbrannt ist.

---

<sup>56</sup>WEBER (2003), S. 3

<sup>57</sup>Der angesprochene Film kann auf der Internetseite <http://video.google.de/videoplay?docid=7892683211336574432> angesehen werden - Zugriff am 04. Januar 2012

<sup>58</sup>vgl. KRAMER (2006)

<sup>59</sup>Informationen zum Absatz vgl. KRAMER (2006)



## 4. Wasser als Löschmittel

„Einer der Hauptvorteile des Löschmittels Wasser besteht darin, dass es mit den heute verfügbaren technischen Hilfsmitteln über jede praktisch vorkommende Entfernung von der Wasserentnahmestelle zur Brandstelle gefördert werden kann“<sup>60</sup>. Wasser wird in den meisten Bereichen der Brandbekämpfung eingesetzt und stellt somit auch das gängigste Löschmittel im Feuerwehreinsatz dar<sup>61</sup>.

Die Löschwirkung von Wasser richtet sich auf den Prozess der Abkühlung. Wird ein brennender Körper mit Wasser benetzt, so kommt es zu einer Energieübertragung zwischen der thermischen Energie des brennenden Körpers und der thermischen Energie des Wassers<sup>62</sup>. Die übertragene Energie (Wärmemenge  $Q$  (siehe Kapitel 10)) sorgt für ein Abkühlen des brennenden Objektes bei gleichzeitiger Erwärmung des Wassers von einer Temperatur  $T_1$  auf eine Temperatur  $T_2$ . Je höher die (spezifische) Wärmekapazität (siehe Kapitel 10.3.3) eines Körpers ist, desto größer ist die benötigte Wärmemenge, um diesen von einer Temperatur  $T_1$  auf eine Temperatur  $T_2$  zu erwärmen. Wasser besitzt im Vergleich zu vielen anderen Substanzen eine sehr hohe Wärmekapazität (siehe Tabelle 10.1), weshalb es sich im besonderen Maße als Kühlmittel eignet.

Treten im Wasser Moleküle aus dem flüssigen Aggregatzustand in den gasförmigen über, so „müssen sie Arbeit gegen die Anziehungskräfte leisten, die die Flüssigkeit zusammenhalten“<sup>63</sup>. Diese Energie, die sich über die Gleichung

$$E = \lambda \cdot m \quad (4.1)$$

$E$	=	Verdampfungsenergie	$\lambda$	=	spezifische Verdampfungsenergie
$m$	=	Masse			

berechnen lässt, wird entweder durch zugeführte Wärme oder durch die Abkühlung (Verdunstungskälte) der Flüssigkeit aufgebracht. In beiden Fällen wird ein Abkühlen des brennenden Objektes erreicht. Je größer die spezifische Verdampfungsenergie  $\lambda$  einer Flüssigkeit ist, desto mehr Energie wird für den Verdunstungsprozess benötigt. Wasser besitzt im Verhältnis zu vielen anderen Substanzen (siehe Tabelle 4.1) eine sehr hohe spezifische Verdampfungsenergie, was die Löschwirkung positiv beeinflusst.

---

<sup>60</sup>SCHOTT/RITTER (2009), S. 385

<sup>61</sup>vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 357

<sup>62</sup>Informationen zum Absatz vgl. GERTHSEN (2010), S. 258f und HALLIDAY/RESNICK/WALKER (2005), S. 536f

<sup>63</sup>GERTHSEN (2010), S. 299

Nachfolgend die spezifischen Verdampfungswärmen  $\lambda$  einiger ausgewählter Substanzen:

Substanz	$\lambda$ in $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
Ethanol	879
Helium	21
Kohlendioxid	573
Quecksilber	296
Wasser	2257

**Tabelle 4.1.:** Spezifische Verdampfungswärmen einiger ausgewählter Substanzen <sup>64</sup>

Da die mitgeführte Wassermenge in den Löschfahrzeugen schnell erschöpft ist, sind Städte und Gemeinden gesetzlich dazu verpflichtet, eine ausreichende Löschwasserversorgung zu gewährleisten. Es werden zwei Arten von Löschwasserentnahmestellen unterschieden:

- die abhängige Löschwasserversorgung
- die unabhängige Löschwasserversorgung

Bei der abhängigen Löschwasserversorgung wird auf das in Gemeinden und Städten vorhandene Trinkwassersystem zurückgegriffen. In festgelegten Abständen besteht die Möglichkeit, Wasser aus Unter- bzw. Oberflurhydranten zu entnehmen: Sie variieren zwischen 100 m (Geschäftsstraßen und Industriegebiet), 120 m (geschlossenes Wohngebiet) und 140 m (offenes Wohngebiet)<sup>65</sup>.

Neben einer flächendeckenden Bereitstellung von Hydranten ist das Sicherstellen einer ausreichenden Wasserversorgung gleichermaßen wichtig. Großräumige Brände bedürfen eines taktischen Vorgehens, bei dem mehrere Feuerwehrtrupps gleichzeitig bei der Brandbekämpfung vorgehen. Infolgedessen wird mehr Wasser benötigt als bei einem einfachen Wohnungsbrand. Um den unterschiedlichen Situationen gerecht zu werden, besitzen die Wasserleitungsrohre zudem unterschiedliche Durchmesser. Schilder, die in der Nähe der Hydranten angebracht sind, kennzeichnen einerseits die Lage der Entnahmestelle, andererseits die Stärke der angeschlossenen Wasserzuleitung. Dies soll dem Einsatzleiter ein Planen und Taktieren ermöglichen, so dass einer Überbeanspruchung der Wasserquelle vorgebeugt werden kann. Sind mehr Abgänge am Hydranten angeschlossen als vorgesehen, kommt es zu einem enormen Druckabfall: Die Fließgeschwindigkeit des Wassers reduziert sich und die Förderleistung ist erheblich eingeschränkt. In einem solchen Fall wird die Sicherheit der Einsatzkräfte erheblich gefährdet. Gerade für den „Innenangriff“ (d.h. für die Personen, die sich in einem brennenden Haus befinden) kann eine solche Situation lebensgefährlich sein: Sie sind hohen Temperaturen von ca. 100 - 150°C Lufttemperatur ausgesetzt und können sich im Falle ausbreitender Flammen nicht ausreichend schützen. Aus diesem wie weiteren Gründen sind Städte und Gemeinden verpflichtet, bei einer zu geringen Löschwasserversorgung durch das Trinkwassersystem für Alternativen zu sorgen.

---

<sup>64</sup>Werte nach TIPLER (2000), S. 544

<sup>65</sup>vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 367

---

Löschwasserbehälter, Löschwasserteiche, Bäche, Flüsse und Seen zählen zur Klasse der unabhängigen Löschwasserversorgung und stellen einige der Möglichkeiten dar, eine ausreichende Wasserversorgung zu garantieren. Eine Unterkategorisierung in erschöpfliche und unerschöpfliche unabhängige Löschwasserentnahmestellen ergibt sich aus einer begrenzt bzw. unbegrenzt zur Verfügung stehenden Wasserkapazität: Erschöpfliche Wasserquellen (wie Behälter) lösen dabei das Problem der kontinuierlichen Wasserversorgung nicht, sondern überbrücken lediglich die Zeitspanne, bis Wasser auf anderen Wegen herbeigeführt werden kann. Ein solcher Wassertransport von einer alternativen Wasserentnahmestelle zur Einsatzstelle kann über einen durch Löschfahrzeuge gewährleisteten Pendelverkehr oder den Aufbau einer langen Schlauchstrecke erfolgen. Im Fachchargon wird letzterer Fall auch als „Förderung über lange Wegstrecken“ bezeichnet, auf welche später (siehe Kapitel 8) detaillierter eingegangen wird.



## 5. Allgemeine physikalische Grundlagen für den Ansaugvorgang

Vor einigen hundert Jahren war es keine Seltenheit, dass Kleinbrände zu großen Brandkatastrophen führten<sup>66</sup>. Gerade durch die Verstärkung wuchs aufgrund der dichteren Bebauung und der Verwendung von teilweise leicht brennbaren Baumaterialien die Brandgefahr. Auch wenn den Menschen die Löschwirkung von Wasser bewusst war, Städte immer in der Nähe von Flüssen gebaut wurden und die Bürgerinnen und Bürger dazu verpflichtet waren, eine Brandabwehr zu leisten, konnte das Abbrennen ganzer Stadtviertel oftmals nicht verhindert werden. Hauptgrund war das Fehlen einer effektiven Löschtechnik, denn die Wasserversorgung erfolgte bis in das 18. Jahrhundert hauptsächlich über Wassereimer, die bei nahegelegenen Flüssen, Bächen oder Seen gefüllt wurden und von Hand bis zur Brandstelle gebracht wurden. Eine ausreichende Wasserversorgung konnte so nicht gewährleistet werden.

Erst durch den Einsatz von handbetriebenen Pumpen - später durch motorisierte Pumpen - konnte eine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet werden. Seitdem bildet die Feuerlöschkreiselpumpe (siehe Abbildung 5.1) die wichtigste Komponente des Löschwasseraufbaus: An ihr werden alle zur Entnahme und Förderung von Wasser nötigen Schläuche angeschlossen. Durch die Erzeugung eines Unterdrucks in den Saugschläuchen bzw. eines Überdrucks in den Förderleitungen wird ein Potentialgefälle geschaffen, das den Fließvorgang von Wasser einleitet. Um das Prinzip des Saugvorgangs zu verinnerlichen, ist ein Verständnis für Gase (vor allem für die Luft) und deren Druck sowie für den Schweredruck von Wasser erforderlich. Auf diesen Grundlagen aufbauend lassen sich die Wasserentnahme mithilfe einer Pumpe erklären sowie in einem weiteren Schritt die Grenzen der maximalen Ansaughöhe bestimmen. An dieser Stelle werden zunächst die fundamentalen physikalischen Begriffe behandelt.



**Abbildung 5.1.:** Bild einer tragbaren Feuerlöschkreiselpumpe <sup>67</sup>

<sup>66</sup>Informationen zum Absatz vgl. WENGEL (2006)

<sup>67</sup>ALBERT ZIEGLER GMBH & CO. KG, S. 3

## 5.1. Luft

Die Erde unterscheidet sich durch ihren immensen Wasserreichtum und die sie umgebende Lufthülle von allen anderen Himmelskörpern unseres Sonnensystems. Diese Einzigartigkeit ermöglichte die Ausprägung und Entwicklung einer großen Artenvielfalt mit unterschiedlichen Lebewesen und Organismen<sup>68</sup>. Nahezu alle Lebewesen sind auf Sauerstoff angewiesen. Auch der Mensch kann ohne den in der Luft enthaltenen Sauerstoff nicht überleben. Über die Atmung gelangt der Sauerstoff in den Kreislauf und zu den einzelnen Organen. Bleibt dieser Stoffwechselprozess aus, sterben einzelne Zellen des Körpers ab. Die dabei eintretenden Schädigungen sind in den meisten Fällen irreparabel. Ein fortwährender Sauerstoffentzug führt zum Tod des Organismus. Bereits fünfjährige Kinder wissen um die Wichtigkeit von Luft für das Leben<sup>69</sup>. Dennoch ist für viele Kinder die Vorstellung, dass Luft nicht Nichts ist und ein Gewicht besitzt, kaum nachvollziehbar.

### 5.1.1. Einordnung des Themas „Luft“ in den Lehrplan

Im bayerischen Lehrplan für das achtstufige Gymnasium ist die Behandlung des Themas Luft für die fünfte Jahrgangsstufe im Fach „Natur und Technik“ vorgesehen<sup>70</sup>. Die Aneignung naturwissenschaftlicher Arbeitsmethoden stellt - wie bereits erwähnt - eines der zentralen Ziele des Unterrichts dar. Die Kinder sollen dabei durch eigenständiges Experimentieren Naturphänomene entdecken, verstehen und erklären können. Im Zusammenhang mit dem Thema Luft sollen sie ein Verständnis für die räumliche Lokalisierung und den materiellen Aufbau von Luft entwickeln. Die Erfassung von Luft als Materie stellt hierbei eine besondere Herausforderung dar. „Schon Säuglinge wissen bzw. erwarten, dass materielle Objekte dauerhaft existieren, [...], dass sie aus solider Substanz bestehen und Effekten wie der Schwerkraft und Trägheit unterliegen“<sup>71</sup>. Aus Alltagserfahrungen und über die Erfassung von Objekten über die Sinnesorgane entwickeln Schüler „ein rudimentäres Verständnis von Materie und Objektkonzepten“<sup>72</sup>, das sie in den Unterricht mitbringen. Luft als Materie anzusehen, wird durch die kaum gegebene visuelle bzw. haptische Erfassbarkeit erschwert.

### 5.1.2. Schülervorstellungen zu Luft und Luftdruck

Bei der Analyse von Vorstellungen, die Kinder mit Luft assoziieren, sind die Arbeiten von Jean Piaget interessant. In seinen Studien hat er Befragungen mit Kindern ab dem vierten Lebensjahr durchgeführt und folgende Vorstellungen in Erfahrung gebracht<sup>73</sup>:

---

<sup>68</sup>vgl. SCHWANKE et al. (2009), S. 5

<sup>69</sup>vgl. HERAN-DÖRR (2010b), S. 1

<sup>70</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004c)

<sup>71</sup>HASSELHORN/MÄHLER (1998), S. 8

<sup>72</sup>HERAN-DÖRR (2010b), S. 1

<sup>73</sup>vgl. SÉRÉ (2004), S. 199 f



- Möchten kleine Kinder ihre Gedanken, Träume und Erinnerungen in Worte fassen, verwenden sie häufig den Begriff Luft in Assoziation mit zirkulierender Luft oder Rauch.
- Auch wenn Kinder Luft nicht sehen, spüren oder anfassen können, wissen sie um deren Existenz und, dass sie Ursache für eine Reihe von Gegebenheiten ist.
- Die Vorstellung, dass sich Luft ausdehnt, ist bei vielen Kindern existent und ergibt sich aus der Wahrnehmung, dass Luft durch jede Öffnung passt und in alle Gefäße eindringt.

In komplexeren Fragestellungen zu unbewegter Luft ist auffällig, dass Kinder in ihren Antworten stets mit bewegter Luft argumentieren. Hier beispielhaft zwei Antworten auf die Frage, ob Luft in einer offenen Flasche enthalten ist<sup>74</sup>:

- „Es ist Luft in dieser offenen Flasche, weil Luft hinein kommen kann.“
- „Es ist keine Luft in dieser offenen Flasche, weil die Luft immer heraus gehen kann.“

### 5.1.3. Definition Luft

„Die Luft ist (wie ihre Einzelbestandteile) ein unsichtbares, geruch- und geschmackloses Gasgemisch, das aus mehreren einzelnen Gasen mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften zusammengesetzt ist“<sup>75</sup>. Die Hauptbestandteile der Luft sind<sup>76</sup>:

- Stickstoff (78 %)
- Sauerstoff (21 %)
- Argon (1 %)

Auch wenn Luft visuell und haptisch nicht wahrgenommen werden kann, beansprucht sie dennoch Raum<sup>77</sup>. Kontinuierlich bewegen sich die einzelnen ungebundenen kleinen Gasteilchen frei und mit sehr hohen Geschwindigkeiten (siehe Geschwindigkeitsberechnungen am Beispiel Luft unten). Infolge von Stößen mit anderen Teilchen bzw. mit umgebenden Objekten ändern sie ihre Flugbahn und gelangen somit mit einer spezifischen Wahrscheinlichkeit an jeden ihnen zur Verfügung stehenden Ort.

Statistische Aussagen über die Geschwindigkeiten sind mit der Maxwell-Boltzmann'schen Geschwindigkeitsverteilung, die wie folgt definiert ist, möglich<sup>78</sup>:

$$f(v) dv = 4\pi \left( \frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-Mv^2/2RT} dv \quad (5.1)$$

<sup>74</sup>Schülerantworten nach SÉRÉ (2004), S. 200

<sup>75</sup>HERAN-DÖRR (2010c), S. 1

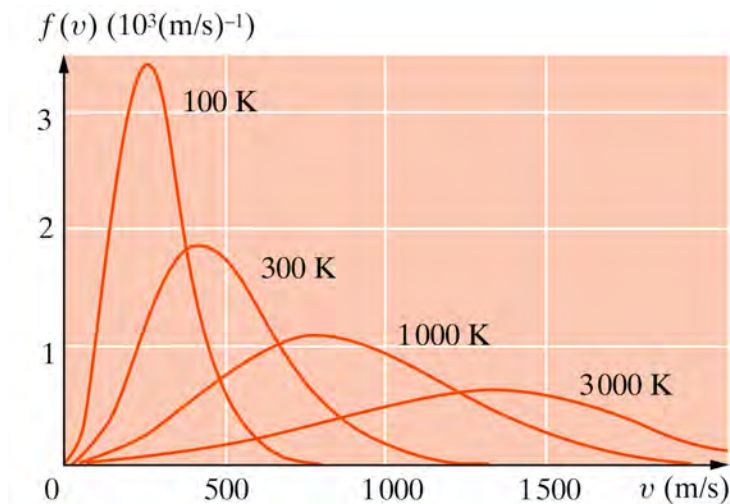
<sup>76</sup>Informationen zum Absatz vgl. KILIAN/WEBER (1999), S. 411

<sup>77</sup>Informationen zum Absatz vgl. HERAN-DÖRR (2010c), S. 2f und EICHLER (2007), S. 88

<sup>78</sup>KURZWEIL/FRENZEL/GEHARD (2008), S. 107

$M$	=	Molare Masse des Gases	$T$	=	Temperatur
$R$	=	allgemeine Gaskonstante	$v$	=	Geschwindigkeit

In Abbildung 5.2 ist die Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten in Luft für vier verschiedene Temperaturen graphisch dargestellt.



**Abbildung 5.2.:** Maxwell-Boltzmann-Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten in Luft für vier verschiedene Temperaturen <sup>79</sup>

Mit der Verteilungsfunktion (Gleichung (5.1)) lassen sich drei charakteristische Geschwindigkeiten in einem Gas berechnen:

- Eine mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}$  (Erwartungswert der Geschwindigkeit):

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (5.2)$$

- Eine quadratisch gemittelte Geschwindigkeit  $\overline{v^2}$  (Erwartungswert der quadratisch gemittelten Geschwindigkeit):

$$\overline{v^2} = \int_0^{\infty} v^2 f(v) dv = \frac{3RT}{M} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (5.3)$$

- Eine wahrscheinlichste Geschwindigkeit  $v_P$  (Maximum der Maxwell-Boltzmann-Verteilung):

$$\frac{df}{dv} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_P = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (5.4)$$

---

<sup>79</sup>GERTHSEN (2010), S. 108

### Geschwindigkeitsberechnungen am Beispiel Luft:

Für die molare Masse von Luft gilt, gemäß der oben beschriebenen Zusammensetzung (78 %  $N_2$ , 21 %  $O_2$ , 1 %  $Ar$ ), Folgendes:

$$\begin{aligned} M_{Luft} &= 0,78 \cdot M_{N_2} + 0,21 \cdot M_{O_2} + 0,01 \cdot M_{Ar} = \\ &= 0,78 \cdot 2 \cdot 14,007 \frac{g}{mol} + 0,21 \cdot 2 \cdot 15,999 \frac{g}{mol} + 0,01 \cdot 39,948 \frac{g}{mol} \approx \\ &\approx 28,97 \frac{g}{mol} \end{aligned}$$

Mittlere Geschwindigkeit, Wurzel aus quadratisch gemittelter Geschwindigkeit und wahrscheinlichste Geschwindigkeit für Luft ergeben sich bei Zimmertemperatur (300 K) nach den Gleichungen (5.2) - (5.4) zu<sup>80</sup>:

$$\bar{v} \approx 468 \frac{m}{s} \quad \sqrt{v^2} \approx 508 \frac{m}{s} \quad v_P \approx 415 \frac{m}{s}$$

## 5.1.4. Versuch zum Thema „Luft“

### 5.1.4.1. Tauchende Gummibären

(Schülerversuch / Lehrerversuch<sup>81</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- große Glasschüssel mit Wasser
- leere Schale eines Teelichtes
- 1-Cent-Münze
- Gummibären
- Watte
- Magnet



Abbildung 5.3.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

Zu Beginn des Versuches wird den Schülerinnen und Schülern die folgende Geschichte vorgelesen.

<sup>80</sup>Werte nach HAMMER/HAMMER/HAMMER (2002), S. 80 und HAMMER/HAMMER/HAMMER (2002), S. 90 f

$$\begin{aligned} R &= 8,3145 \cdot 10^3 \frac{J}{K \cdot kmol} & M_O &= 15,999 \frac{g}{mol} \\ M_N &= 14,007 \frac{g}{mol} & M_{Ar} &= 39,948 \frac{g}{mol} \end{aligned}$$

<sup>81</sup>Ideen nach PICHLER (2005), S. 3

### Die Gummibären:

Es waren einmal drei Gummibären, die von einem unvorstellbar großen Schatz auf dem Grund eines Sees gehört hatten. Voller Abenteuerdrang beschlossen die drei, sich auf die Reise zu machen, um den Schatz zu suchen. Am See angekommen, traute sich aber niemand von ihnen ins Wasser. Man sollte beachten, dass Gummibären nicht ohne Grund sehr wasserscheu sind: Werden Gummibären nass, so saugen sie sich voller Wasser und werden groß und dick [an dieser Stelle kann den Schülerinnen und Schülern ein über die Nacht in ein Wasserglas eingelegter Gummibär gezeigt werden]. Gerade davor fürchteten sich die drei ganz besonders. Ratlos standen sie da und grübelten, wie sie an den Schatz herankommen könnten. Der grüne Gummibär sagte: „Es führt kein Weg daran vorbei. Mindestens einer von uns muss tauchen!“

Aber wie sollte das funktionieren, ohne dabei nass zu werden? Sie entschlossen, sich kurz zu trennen, um das Ufer nach nützlichen Gegenständen abzusuchen. Nach einiger Zeit versammelten sich die drei wieder und zeigten den anderen, was sie gefunden hatten. Der erste Gummibär hatte ein kleines Boot gefunden; der zweite hatte einen Magneten; und der dritte ein leeres großes Glas, das viel zu schwer war, um es alleine zu tragen. Doch was sollten sie damit anfangen? Nach einigem Überlegen kam ihnen eine Idee. Jedoch benötigen sie Hilfe. Wie kann den drei Gummibären geholfen werden, den Schatz zu bergen?

Die leere Schale eines Teelichtes stellt das Boot der Gummibären dar. In diese wird ein kleiner Magnet gegeben. Damit die Gummibären von den Schülerinnen und Schülern besser gesehen werden, kann die Schale mit ein wenig Watte ausgestopft werden. Die Münze wird ungefähr in die Mitte der mit Wasser gefüllten großen Glasschüssel gelegt. Nach den Vorbereitungen wird das Boot mit den Gummibären direkt über der Münze in der Schüssel positioniert. Das Trinkglas wird umgedreht und mit der Öffnung voraus über das Boot gestülpt. Schließlich wird das Glas unter Wasser gedrückt, bis es den Boden erreicht.

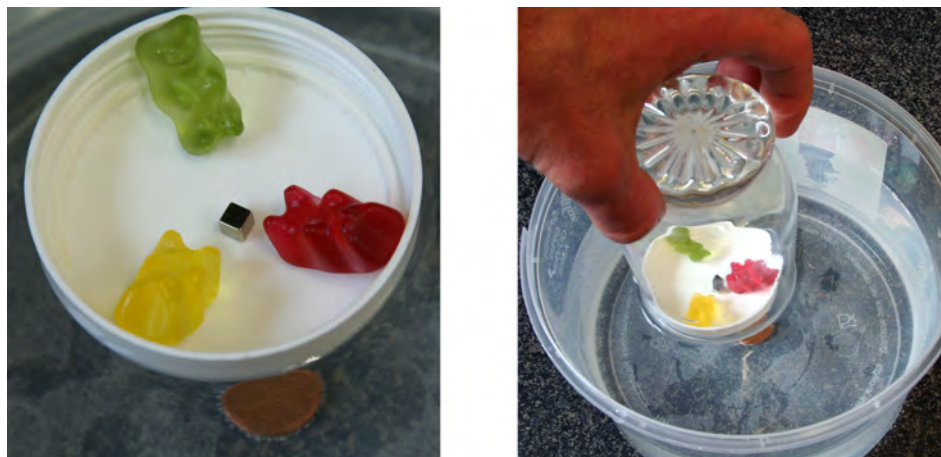


Abbildung 5.4.: Versuchsdurchführung

**Darauf ist zu achten:**

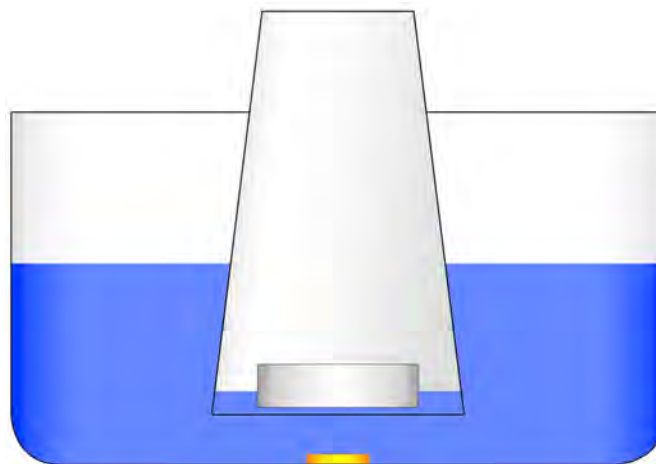
Als Schatz sollte ein Gegenstand benutzt werden, der ferromagnetisch ist (z.B. eine Cent-Münze, die aus Stahl besteht und lediglich mit Kupfer legiert ist). Der im Boot gewählte Magnet sollte nicht zu groß sein, damit das Boot nicht kentert. Neodym-Magnete bieten sich hierbei aufgrund ihrer hohen Magnetisierung hervorragend an.

**Beobachtung:**

Obwohl die Öffnung des Trinkglases unterhalb der Wasseroberfläche ist, gelangt nur ganz wenig Wasser in das Innere des Glases. Die Münze bleibt an der Unterseite des Bootes hängen und kann auf diesem Weg an die Wasseroberfläche befördert werden.

**Erklärung:**

Zu dem Zeitpunkt, ab dem ein direkter Kontakt zwischen Trinkglas und Wasseroberfläche besteht, wird die im Glas befindliche Luft durch die Gefäßwände und die Wasseroberfläche eingeschlossen. Im Trinkglas und in der umgebenden Luft herrscht Atmosphärendruck. In der Flüssigkeit steigt, mit wachsender Tiefe, der Druck. Wird das Glas unter Wasser geführt, so bewirkt der höhere Druck des Wassers eine Kompression der im Glas enthaltenen Luft und somit die Steigerung des Luftdrucks im Glas. Der Prozess stoppt, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen Luft- und Wasserdruck eingestellt hat.



**Abbildung 5.5.:** Die tauchenden Gummibären

**Intention:**

Wäre keine Luft im Glas enthalten, so würde sich das Glas beim Eintauchen immer weiter mit Wasser füllen. Aufgrund der enthaltenen Luft dringt allerdings kaum Wasser in das Glas. Die Schülerinnen und Schüler sollen erkennen, dass Luft Materie ist und daher einen gewissen Raum einnimmt.

### Weitere Versuche zum Thema “Luft ist nicht Nichts“ nach Wilhelm (2003):

- Wasser durch Trichter in Glasflasche (SCHMIDT (2003), S. 64 Nr. 2)
- Luftballon in der Flasche (SCHMIDT (2003), S. 64 Nr. 3)
- Luft in der Fahrradpumpe (SCHMIDT (2003), S. 64 Nr. 4a)
- Flugsamen und Flugfrüchte (SCHMIDT (2003), S. 65 Nr. 5)
- Fallendes Papier (SCHMIDT (2003), S. 65 Nr. 6a)
- Luft von einem Glas in ein anderes umfüllen (SCHLICHTING (1994), S. 19)

## 5.2. Druck

Der Begriff Druck findet heutzutage mit unterschiedlichen Bedeutungen in der Sprache Verwendung: Beispielsweise wird von einem großen Leistungsdruck in der Schule, von Hoch- und Tiefdruckgebieten im Wetterbericht, von einem Blutdruck beim Arzt oder vom Buchdruck in einer Druckerei gesprochen. Die aus physikalischer Sicht im Alltagsverständnis oft falsch verwendete Bedeutung des Wortes im Sinne einer gerichteten Einwirkung auf einen Körper, d.h. die nahezu synonyme Verwendung der Begriffe Druck und Kraft, erschweren einen Zugang zum tatsächlichen Verständnis von Druck. Über viele Jahre hinweg hat sich in der Wissenschaft ein physikalischer Begriff entwickelt, der sich von diesen vielfältigen Alltagsbedeutungen deutlich absetzt<sup>82</sup>: „In der Physik beschreibt Druck [...] den Zustand des Gepresstseins eines Gases oder einer Flüssigkeit“<sup>83</sup>.

### 5.2.1. Einordnung des Themas „Druck“ in den Lehrplan

Vor einigen Jahren war der Themenbereich Druck noch fest im Lehrplan verankert. Im heutigen Lehrplan für das bayerische G8 hingegen ist die Behandlung von Druck in Gasen und Flüssigkeiten nur noch für den Profildbereich des naturwissenschaftlich-technologischen Gymnasiums in der achten Jahrgangsstufe vorgesehen<sup>84</sup> und zählt somit nicht zu den Hauptthemen. Ein Grund sieht Wodzinski, die sich in zahlreichen Arbeiten mit Druck beschäftigte, darin, dass das Thema Druck nicht unbedingt eines der wichtigsten und spannendsten Themengebiete des Physikunterrichts ist<sup>85</sup>. Ein weiterer ist, „dass der Druckbegriff sehr komplex und für Kinder praktisch unbekannt ist, bevor sie im Unterricht Gelegenheit bekommen, selbst Experimente zu diesem Thema durchzuführen“<sup>86</sup>. Die Verwendung verschiedener nichtkonsistenter Begriffe bei der Aufbereitung des Themas in vielen Schulbüchern erschwert die Entwicklung eines klaren Verständnisses für den Begriff zusätzlich. Für das Verständnis und die Interpretation von Experimenten mit Gasen

---

<sup>82</sup>vgl. WODZINSKI (2004), S. 215

<sup>83</sup>WODZINSKI (2004), S. 215

<sup>84</sup>vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004d)

<sup>85</sup>vgl. WODZINSKI (1999), S. 1

<sup>86</sup>SÉRÉ (2004), S. 210

ist es jedoch wichtig, physikalische Begriffe wie Menge, Volumen, Masse, Druck und Temperatur korrekt zu benutzen<sup>87</sup>.

Als besonders schwierig erweist sich in diesem Kontext die Behandlung des Phänomens Luftdruck. Schülerinnen und Schüler haben diesen in ihrem Leben nur in bestimmten Situationen bewusst erlebt - beispielsweise beim Bergsteigen oder im Flugzeug<sup>88</sup>. Das Grundproblem für das Verständnis besteht darin, dass man ihm zu jeder Zeit ausgesetzt ist und er deshalb im täglichen Leben nicht explizit wahrgenommen wird<sup>89</sup>. Nur auf Druckveränderungen reagieren einige Menschen unspezifisch mit Übelkeit, Unwohlsein oder Kreislaufproblemen. Das Fehlen einer direkten Wahrnehmung über die menschlichen Sinne führt bei vielen Schülerinnen und Schülern darüber hinaus zu groben Fehlvorstellungen. Wird als höchstes Ziel des Physikunterrichts eine veränderte Wahrnehmung der Umwelt angesehen, so kann dies vor allem durch die Behandlung des Luftdrucks erreicht werden<sup>90</sup>.

Das Aufgreifen von Freihandversuchen bietet sich in diesem Kontext besonders gut an, gibt es zahlreiche Experimente zu diesem Thema und wird bei der Durchführung „ein Phänomen oder ein Effekt besonders deutlich sichtbar“<sup>91</sup>. Weiter lösen Freihandversuche bei den Schülerinnen und Schülern oftmals Erstaunen und Überraschung aus und werfen Fragen auf, wodurch Interesse am Fach Physik geweckt und Motivation gesteigert werden kann. Die Verwendung von alltäglichen Gegenständen in den Versuchen eröffnet die Möglichkeit, sich von der idealen Gedanken- und Laborwelt - wie sie immer wieder im Physikunterricht zu finden ist - zu lösen und somit einen Bezug vom theoretisch-physikalischen Wissen zur realen Umwelt zu schaffen<sup>92</sup>.

### 5.2.2. Schülervorstellungen zu Druck

Im Bereich der Schülervorstellungen zum Druckbegriff sind gerade die Arbeiten von Séré aufschlussreich<sup>93</sup>: Sie konfrontierte Schülerinnen und Schüler mit ausgewählten Druckexperimenten und richtete ihr Interesse insbesondere auf deren Wahrnehmungen und Erklärungen. In diesem Kontext hat sie unter anderem die Interpretationen von Kindern zu Kräften, die von Gasen ausgeübt werden, näher analysiert und folgende Schwierigkeiten festgestellt<sup>94</sup>:

- Viele Kinder sind der Meinung, dass nur bewegte Gase Kräfte ausüben.
- Nach Schüleraussagen können Gase nur in den Fällen Kräfte ausüben, wenn auf sie selbst eine Kraft oder ein Schub wirkt oder sie erhitzt werden. In ihren Erklärungen zu Kraftwirkungen durch Gase suchen sie stets nach äußeren Ursachen.

<sup>87</sup>vgl. SÉRÉ (2004), S. 199

<sup>88</sup>vgl. HERAN-DÖRR (2010b), S. 2

<sup>89</sup>vgl. WILHELM (2002), S. 13

<sup>90</sup>vgl. WODZINSKI (1999), S. 1

<sup>91</sup>WILHELM (2002), S. 7

<sup>92</sup>vgl. WILHELM (2002), S. 10

<sup>93</sup>Informationen zum Absatz vgl. WODZINSKI (2004), S. 215

<sup>94</sup>Vorstellungen nach SÉRÉ (2004), S. 206f

- Kinder sind oftmals davon überzeugt, dass die durch Gase bedingten Kräfte nur in eine Richtung wirken.

In einem ersten Schritt zur Erarbeitung des Druckbegriffes ist es daher wichtig, zunächst ein Verständnis für die existenten Kräfte in einem Gas zu entwickeln. Im Anschluss daran gilt es, einem weit verbreiteten Fehlkonzept von Druck - das eingangs bereits erwähnt wurde - entgegenzutreten, denn nach Wodzinski sind bei Schülerinnen und Schülern folgende Vorstellungen verbreitet<sup>95</sup>:

Druck ist . . .

- „die Kraft, die auf Gegenstände einwirkt.“
- „eine Kraft, die Gegenstände an die Seite drückt.“
- „eine Kraft, die etwas fortbewegt.“
- „eine Kraft, die auf etwas drückt.“
- „wenn eine Kraft auf eine andere Sache einwirkt.“
- „wenn Kräfte sich gegen Gegenstände oder andere Kräfte drücken.“

In diesen Äußerungen kristallisiert sich das Hauptproblem des physikalischen Druckbegriffes heraus: Die fehlende Differenzierung zwischen Druck und Kraft, welche vielfach selbst nach dem Unterricht bestehen bleibt<sup>96</sup>. Gründe hierfür liegen häufig in der rein quantitativen Fassung von Druck über die Formel  $p = \frac{F}{A}$ , wodurch ein qualitatives Verständnis kaum vermittelt wird.

### 5.2.3. Definition Druck

Druck ist einem Volumen bzw. einem Raumpunkt eines Gases oder einer Flüssigkeit zugeordnet und beschreibt dessen / deren Zustand des Gepresstseins<sup>97</sup>. Druck besitzt keine Richtung und lässt sich quantitativ einem Zahlenwert zuordnen, indem „die Kraft pro Flächeneinheit bestimmt [wird], die das Gas oder die Flüssigkeit auf eine Begrenzungsfläche ausübt“<sup>98</sup>:

$$p = \frac{F}{A} \quad (5.5)$$

$$p \quad = \quad \text{Druck} \qquad \frac{F}{A} \quad = \quad \text{Kraft pro Flächeneinheit}$$

Als Einheit für den Druck ergibt sich:

$$[p] = 1 \text{ Nm}^{-2} = 1 \text{ Pa}$$

---

<sup>95</sup>Vorstellungen nach WODZINSKI (1999), S. 2

<sup>96</sup>Informationen zum Absatz vgl. WODZINSKI (1999), S. 2

<sup>97</sup>Informationen zum Absatz vgl. WODZINSKI (2004), S. 215

<sup>98</sup>WODZINSKI (2004), S. 215



## Schweredruck

Als Schweredruck wird jener Druck bezeichnet, der allein aufgrund der Gravitation entsteht<sup>99</sup>. In Flüssigkeiten ist eine quantitative Berechnung des Schweredrucks bei einer vorgegebenen Tiefe möglich. Zur Vereinfachung wird eine konstante Temperatur und die Inkompressibilität des Fluides angenommen. Daraus resultiert eine in allen Lagen konstante Dichte  $\rho$  der Flüssigkeit. Auf einer Scheibe der Flüssigkeit mit Querschnittsfläche  $A$  lastet die Gewichtskraft  $\rho \cdot g \cdot h \cdot A$  der darüber liegenden Fluidsäule. Nach der Gleichung (5.5) ergibt sich somit der Schweredruck zu:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A}{A} = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.6)$$

$\rho$	=	Dichte des Fluides	$h$	=	Höhe der Fluidsäule
$g$	=	Fallbeschleunigung	$A$	=	Querschnittsfläche

## 5.2.4. Versuche zum Thema „Luftdruck“

### 5.2.4.1. Umgedrehtes Wasserglas

(Schülerversuch / Lehrerversuch<sup>100</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- 1 Glas
- 1 Postkarte
- 1 Blatt Papier
- 1 Mullbinde
- 1 große Wanne
- Wasser

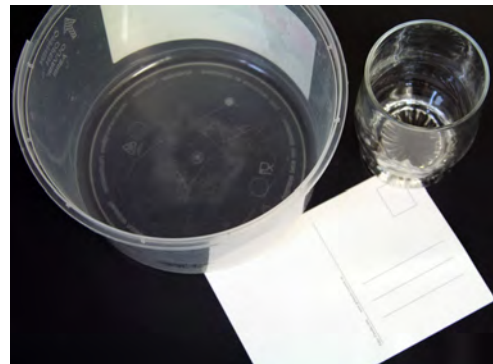


Abbildung 5.6.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

Das Glas wird randvoll mit Wasser gefüllt. Anschließend wird eine Postkarte als Aufsatz auf den Glasrand gelegt und mit einer Hand festgehalten. Mit der freien Hand wird das Glas gegriffen und umgedreht. Nun wird die Postkarte losgelassen. Der gleiche Versuch ist mit einem Blatt Papier und einer Mullbinde zu wiederholen.

Anschließend lässt sich die Versuchsreihe mit einem nur teilweise gefüllten Glas erneut durchführen.

<sup>99</sup> vgl. KILIAN/WEBER (2000b), S. 31

<sup>100</sup> Ideen nach WILHELM (2002), S. 13 ff



**Abbildung 5.7.:** Versuchsdurchführung. Linke Abbildung mit vollem und rechte Abbildung mit teilweise gefülltem Glas

**Darauf ist zu achten:**

Sobald ein wenig Luft in das Glas dringt, löst sich das aufgesetzte Material und der Versuch scheitert. Um eine Überflutung der Arbeitsfläche vorzubeugen, sollten die einzelnen Versuche immer über einer Wanne durchgeführt werden.

**Beobachtung:**

Wird das Glas umgedreht und anschließend das aufgesetzte Material losgelassen, haftet dieses wie ein Deckel weiterhin am Glas und das Wasser läuft nicht aus.

**Erklärung:**

Die Erklärungen für das komplett gefüllte und nur teilweise gefüllte Glas unterscheiden sich.

**1. Das volle Glas:**

Wird ein Glas randvoll mit Wasser gefüllt, ein Deckel aufgesetzt und umgedreht, so lässt sich der im Inneren des Glases am Boden herrschende Druck durch das Aufsummieren des Luftdrucks und des Schweredruckes des Wassers wie folgt berechnen:

$$p = p_L + p_S \tag{5.7}$$

$p$  = Druck  
 $p_L$  = Luftdruck

$p_S$  = Schweredruck des Wassers

Hierbei befindet sich das Wasser „durch den Luftdruck und die entsprechende Reaktionskraft des Gefäßbodens in einem zusammengedrückten Zustand“<sup>101</sup>. Im äußeren Bereich herrscht der Luftdruck  $p_L$ . Aufgrund dieses Druckunterschiedes müsste der Deckel nach dem Loslassen herunterfallen. Dies ist aber nicht zu beobachten, denn beim bzw. nach dem Umdrehen des Glases können folgende Gegebenheiten zu einer Entspannung des Wassers führen:

- Ein Teil des Wassers fließt beim Umdrehen aus.
- Zwischen Abdeckung und Glasrand bildet sich ein dünner Wasserfilm. Hierbei sorgen die Kohäsions- bzw. Adhäsionskräfte von Glasrand und Abdeckung sowie die Oberflächenspannung des Wassers dafür, dass das Wasser nicht ausfließt.
- Saugfähige Materialien (z.B. Papier) nehmen ein Teil des Wassers auf.
- Flexible Abdeckungen krümmen sich konvex nach außen.

In allen Fällen kommt es zu einer Druckminderung im Inneren des Glases. Nach einer kurzen Zeit stellt sich zwischen den Kräften, die auf die Ober- bzw. Unterseite des Deckels wirken, ein Kräftegleichgewicht ein. Dies bewirkt, dass der Aufsatz nicht herunterfällt und folglich kein Wasser ausströmt.

Nachfolgend wird die zum Druckausgleich notwendige Volumenvergrößerung des Wassers berechnet. Hierbei sei der im Anschluss diskutierte Fall, dass beim bzw. nach dem Umdrehen Luft in das Glas einströmt (das Glas also nur noch teilweise gefüllt ist), ausgeschlossen. Zudem sei angenommen, dass lediglich das Anheben des Deckels zu einer Volumenvergrößerung und somit zu einer Entspannung des Wassers beiträgt.

Die Kompressibilität  $\kappa$  von Wasser, die in vielen Fällen zu vernachlässigen ist, spielt bei diesem Versuch eine wichtige Rolle. Für sie gilt<sup>102</sup>:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (5.8)$$

$\kappa$	=	Kompressibilität	$p$	=	statischer Druck
$V$	=	Volumen	$T$	=	absolute Temperatur

Im Fall des Wasserglases bleibt die Temperatur bei Änderung des Volumens und des Druckes konstant. Es folgt die direkte Abhängigkeit des Wasservolumens  $V$  vom Druck  $p$ .

<sup>101</sup>WILHELM (2002), S. 15

<sup>102</sup>vgl. KILIAN/WEBER (1999), S. 276

Somit gilt:

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} &= \kappa \\
 \int_{V_0}^V \frac{1}{V} dV &= \int_{p_0}^p -\kappa dp \\
 \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) &= -\kappa(p - p_0) \\
 \Rightarrow V &= V_0 \cdot \exp(-\kappa(p - p_0))
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Für den Gleichgewichtsfall ( $p = p_L$ ) ergibt sich die Volumenvergrößerung  $\Delta V$  wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= V - V_0 \stackrel{(5.9)}{=} V_0 \cdot (\exp(-\kappa(p - p_0)) - 1) \\
 &= V_0 \cdot (\exp(-\kappa(p_L - (p_L + \rho \cdot g \cdot h))) - 1) \\
 &= V_0 \cdot (\exp(\kappa \cdot \rho \cdot g \cdot h) - 1)
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

**Beispiel:** Ein zylinderförmiges Glas der Höhe  $H = 10 \text{ cm}$  und mit einem Durchmesser von  $d = 5 \text{ cm}$  wird komplett mit Wasser gefüllt und umgedreht. Nach der Gleichung (5.9) ergibt sich eine Volumenvergrößerung von:

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= \pi \cdot \left( \frac{d}{2} \right)^2 \cdot H \cdot (\exp(\kappa \cdot \rho \cdot g \cdot H) - 1) \\
 &= \pi \cdot \left( \frac{0,05 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 0,1 \text{ m} \cdot \left( \exp \left( 0,5 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}} \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,1 \text{ m} \right) - 1 \right) \\
 &\approx 9,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 = 0,096 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Diese Volumenvergrößerung entspricht einer Höhenänderung der Wassersäule von <sup>103</sup>:

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{\Delta V}{A} = 0,1 \text{ m} \cdot \left( \exp \left( 0,5 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}} \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,1 \text{ m} \right) - 1 \right) \\
 &\approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 50 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

Die Rechnung zeigt, dass bereits eine geringe Volumenänderung bzw. Höhenänderung der Wassersäule ausreicht, „um für die notwendige Entspannung des Wassers zu sorgen“<sup>104</sup>. Zudem wird klar, dass die Volumenvergrößerung im Normalfall nicht beobachtet werden kann. Erst ab einer Wassersäule von 10 m ergibt sich nach obiger Rechnung eine merkliche Höhenänderung von ca. 0,5 mm.

---

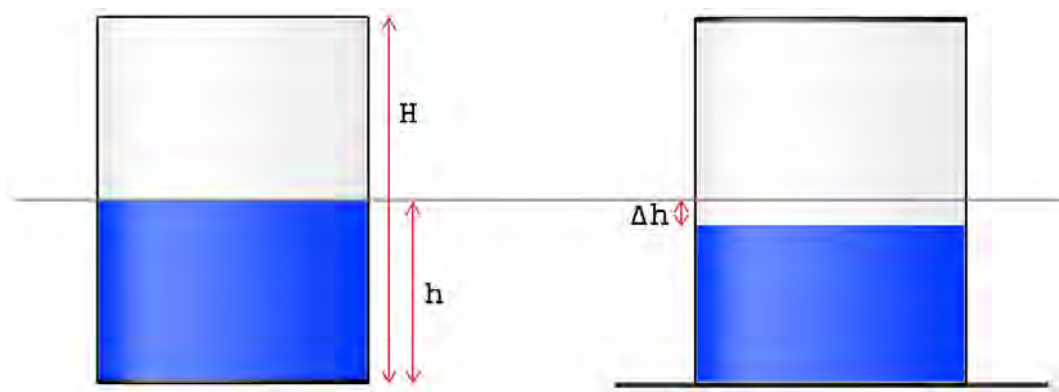
<sup>103</sup>Wert für die Kompressibilität  $\kappa$  von Wasser nach GLEIXNER (1997), S. 140

$$\kappa = 0,50 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}}$$

<sup>104</sup>GLEIXNER (1997), S. 140

## 2. Das teilweise gefüllte Glas:

Wird Wasser bis zum Erreichen einer Wasserhöhe  $h$  in ein Glas der Höhe  $H$  ( $H > h$ ) gegeben, ein Deckel aufgesetzt und umgedreht (siehe Abbildung 5.8), so gelten zunächst die gleichen Bedingungen wie beim vollen Glas: Im Inneren des Glases herrscht am Boden der Druck  $p = p_L + p_S$  und im äußeren Bereich der Luftdruck  $p_L$ . Auch hier müsste der Deckel aufgrund des Druckunterschiedes herunterfallen. Allerdings können die gleichen Gegebenheiten, die beim vollem Wasserglas zu einer Entspannung des Wassers und somit zu einer Druckminderung im Inneren des Glases beitragen, auch hier zu einer Minderung des Druckes im Glas führen. Der Unterschied zum komplett gefüllten Glas liegt nun aber darin, dass nicht die Entspannung des Wassers, sondern die Expansion der im Glas befindlichen Luft ausschlaggebend ist. Auch hier stellt sich nach einer kurzen Zeit zwischen den Kräften, welche auf die Ober- und Unterseite des Deckels wirken, ein Kräftegleichgewicht ein.



**Abbildung 5.8.:** Halb gefülltes Glas mit Wasser. Links vor und rechts nach dem Umdrehen und Ausfließen von Wasser (Wasserabnahme bewusst übertrieben gezeichnet)

Nachfolgend wird die zum Druckausgleich notwendige Volumenvergrößerung der Luft berechnet. Hierbei sei angenommen, dass die im Glas eingeschlossene Luftmasse konstant bleibt und deren Expansion lediglich auf das Ausfließen von Wasser zurückzuführen ist. Zur einfacheren Berechnung wird im Folgenden ein zylinderförmiges Gefäß (Radius  $r$ , Höhe  $H$ ) betrachtet. Der im Inneren des Glases am Boden herrschende Druck ergibt sich wie folgt:

$$p = p_S + p_L = \rho_W \cdot g \cdot h + p_L$$

$p$	=	Gesamtdruck	$g$	=	Fallbeschleunigung
$p_S$	=	Schweredruck des Wassers	$p_L$	=	Luftdruck
$\rho_W$	=	Dichte von Wasser			

Fließt beim bzw. nach dem Umdrehen des Glases ein Teil des darin enthaltenen Wassers aus, so reduziert sich die Höhe der Wassersäule um einen Wert  $\Delta h$  (siehe Abbildung 5.8).

Der verbleibende Schweredruck des Wassers errechnet sich wie folgt:

$$p_{S,n} = \rho_W \cdot g \cdot (h - \Delta h) \quad (5.11)$$

$p_{S,n}$  = Schweredruck nach dem Ausfließen von Wasser

Durch den Ausfluss von Wasser kommt es zur Expansion der im Glas befindlichen Luft, die sich nun auf das Volumen  $V_{L,n}$  verteilt:

$$V_{L,n} = A \cdot (H - h + \Delta h) \quad (5.12)$$

$V_{L,n}$  = Volumen der im Glas befindlichen Luft nach dem Ausfließen von Wasser

$p_{L,n}$  = Grundfläche des Gefäßes

Es kann angenommen werden, dass sich die eingeschlossene Luft als ideales Gas verhält und ihre Temperatur bei der Expansion nicht ändert, so dass nach Boyle-Mariotte und Gleichung (5.12) gilt:

$$\begin{aligned} p_{L,v} \cdot V_{L,v} &= p_{L,n} \cdot V_{L,n} \\ p_{L,v} \cdot A \cdot (H - h) &= p_{L,n} \cdot A \cdot (H - h + \Delta h) \\ \Rightarrow p_{L,n} &= \frac{H - h}{H - h + \Delta h} \cdot p_{L,v} \end{aligned} \quad (5.13)$$

$p_{L,v}$  = Luftdruck vor dem Ausfließen von Wasser (=  $p_L$ )

$V_{L,v}$  = Volumen der im Glas befindlichen Luft vor dem Ausfließen von Wasser

$p_{L,n}$  = Luftdruck nach dem Ausfließen von Wasser

Der nach dem Ausfließen von Wasser im Inneren des Glases am Boden herrschende Druck ergibt sich mit den Gleichungen (5.11) und (5.13) wie folgt:

$$p_n = p_{S,n} + p_{L,n}$$

Damit der Deckel (dessen Masse im Folgenden vernachlässigt wird) nach dem Umdrehen des Glases nicht herunterfällt, muss so viel Wasser ausströmen, dass der im Inneren des Glases am Boden herrschende Druck  $p_n$  dem Luftdruck entspricht. Demnach muss gelten:

$$p_L = p_n$$

Aus dieser Annahme ergibt sich die Abnahme der Wassersäule  $\Delta h$  wie folgt:

$$\begin{aligned}
 p_L &= p_{S,n} + p_{L,n} \\
 0 &= \rho_W \cdot g \cdot (h - \Delta h) + \frac{H - h}{H - h + \Delta h} p_L - p_L \\
 0 &= \rho_W \cdot g \cdot (h - \Delta h)(H - h + \Delta h) + (H - h)p_L - (H - h + \Delta h)p_L \\
 0 &= \rho_W \cdot g \cdot (Hh - h^2 + 2h\Delta h - H\Delta h - \Delta h^2) - p_L \Delta h \\
 0 &= -\rho_W \cdot g \Delta h^2 + (\rho_W \cdot g(2h - H) - p_L) \Delta h + \rho_W \cdot g(Hh - h^2) \\
 \Rightarrow \Delta h &= \frac{-(\rho_W \cdot g(2h - H) - p_L) \pm \sqrt{(\rho_W \cdot g(2h - H) - p_L)^2 + 4(\rho_W \cdot g)^2(Hh - h^2)}}{-2\rho_W \cdot g}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

**Beispiel:** Ein zylinderförmiges Glas der Höhe  $H = 10 \text{ cm}$  und des Durchmessers  $d = 5 \text{ cm}$  wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt, d.h.  $h = \frac{H}{2} = 5 \text{ cm}$ . Gleichung (5.14) vereinfacht sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \Delta h &= \frac{p_L \pm \sqrt{p_L^2 + 4 \cdot (\rho_W \cdot g)^2 \cdot h^2}}{-2\rho_W \cdot g} = \\
 &= \frac{101300 \text{ Pa} \pm \sqrt{(101300 \text{ Pa})^2 + 4 \cdot (10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2 \cdot (0,05 \text{ m})^2}}{-2 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \\
 &\stackrel{105}{=} \frac{101300 \text{ Pa} - \sqrt{(101300 \text{ Pa})^2 + 4 \cdot (10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2 \cdot (0,05 \text{ m})^2}}{-2 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx \\
 &\approx 0,24 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Aus der berechneten Abnahme der Wassersäule ergibt sich die Menge des ausgetretenen Wassers  $V_A$  wie folgt:

$$V_A = A \cdot \Delta h = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot \Delta h \approx 1,9 \text{ ml}$$

Die genannten Erklärungen sind für Schülerinnen und Schüler der achten Jahrgangsstufe zu komplex. Dennoch sollte ein Lehrer bei der Aufklärung nicht auf missverständliche oder sogar falsche Begründungen zurückgreifen. Es ist empfehlenswert, die Wirkung einer durch den Luftdruck bedingten Kraft heranzuziehen<sup>106</sup>.

### Intention:

Ziele dieses Versuches sind, auf eindrucksvolle, doch einfache Art und Weise die Stärke des Luftdrucks zu demonstrieren sowie den Schülerinnen und Schülern ein Experiment an die

<sup>105</sup> $\Delta h$  ist in der Rechnung positiv gewählt. Es folgt die Eindeutigkeit der Lösung.

<sup>106</sup>vgl. WILHELM (2002), S. 15

Hand zu geben, dass sie Zuhause mit wenig Aufwand nachmachen können<sup>107</sup>. Interessant ist darüber hinaus die Erkenntnis, wie kleine Volumenänderungen zu Kräften führen, die hohe Wassersäulen tragen können.

In den meisten Fällen erwarten die Schüler das Ausfließen des Wassers und sind demnach über den Ausgang des Versuches überrascht. Daher ist es möglich, bei ihnen Interesse zu wecken, sich eigenständig näher mit dem Thema Luftdruck zu beschäftigen.

#### 5.2.4.2. Ei in die Flasche

(Schülerversuch / Lehrerversuch<sup>108</sup>)

##### Benötigte Materialien:

- 1 hartgekochtes Ei
- Streichhölzer
- 1 Glasflasche (Öffnung ca. 3 cm Durchmesser, Volumen 0,2 - 0,5 l)



Abbildung 5.9.: Materialien

##### Versuchsbeschreibung:

In einem ersten Schritt ist die Schale des hartgekochten Eies vorsichtig zu entfernen. Das geschälte Ei wird anschließend mit dem spitzzulaufenden Ende voraus auf die Öffnung des Glases, dessen Durchmesser in etwa zwei Drittel des Eidurchmessers betragen soll, gesetzt. Weiter werden zwei Streichhölzer entzündet, das Ei kurz angehoben, die brennenden Hölzer in die Flasche gegeben und unverzüglich das Ei wieder auf den Flaschenhals aufgesetzt.

##### Darauf ist zu achten:

Das hartgekochte Ei darf beim Schälen nicht beschädigt werden, da es sonst den Verformungen beim Durchgang durch den Flaschenhals nicht standhalten würde. Außerdem ist auf ein solides Brennen der Streichhölzer beim Werfen in die Flasche zu achten, um ein vorzeitiges Erlischen der Flammen zu vermeiden.

Die Geschwindigkeit, mit der das Ei in die Flasche gleitet, hängt von Brennmaterial und Volumen der Flasche ab: Je größer die Flasche und je kleiner das Feuer, desto langsamer bewegt sich das Ei in die Flasche.

---

<sup>107</sup>Informationen zum Absatz vgl. HEITHAUSEN/ARNOLDS (2006), S. 117ff

<sup>108</sup>Ideen nach WILHELM (2002), S. 50 f



**Beobachtung:**

Zunächst kann nur ein Brennen der in die Flasche gegebenen Streichhölzer beobachtet werden. Wenig später hebt sich das Ei vom Flaschenhals kurz an, kehrt aber sofort in seine Ausgangslage zurück. Im Anschluss daran wird das Ei in die Flasche gedrückt. Der zum Ei deutlich kleinere Flaschenhalsdurchmesser dehnt das Ei beim Gleiten in die Flasche in die Länge. Beim vollständigen Eindringen des Eies in die Flasche ist ein „Plopp“ zu hören<sup>109</sup>. In diesem Moment nimmt das Ei wieder seine ursprüngliche Form an.

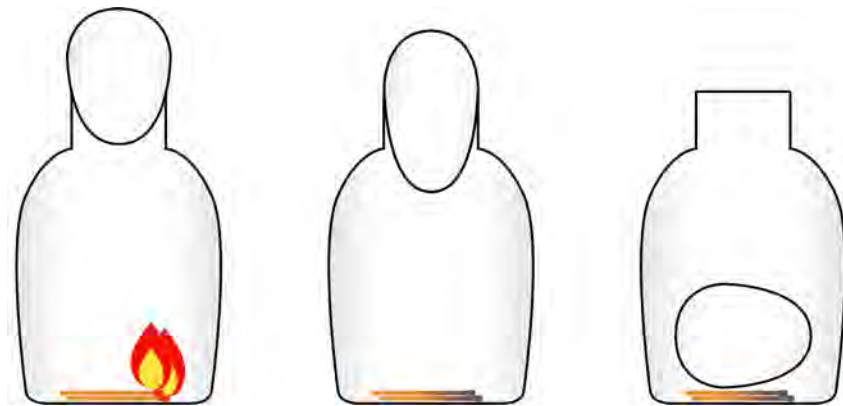


Abbildung 5.10.: Skizze des Versuchablaufes



Abbildung 5.11.: Versuchsdurchführung

**Erklärung:**

Durch die Zugabe der brennenden Streichhölzer in die Flasche wird die vom Glasgefäß eingeschlossene Luft erwärmt. Während dieser Phase ist das Gasvolumen in der Flasche aufgrund der Abdichtung durch das aufgelegte Ei konstant. Folglich kommt es zu einem Druckanstieg (isochorer Prozess). Überschreitet die durch den Luftdruck in der

<sup>109</sup>WILHELM (2002), S. 50

Flasche verursachte Kraft auf die Unterseite des Eies die Summe der entgegenwirkenden Kräfte, hervorgerufen durch den Atmosphärendruck und die Schwerkraft des Eies, so hebt sich das Ei kurz an, Luft entweicht (adiabatischer Prozess) und das Ei verschließt wieder die Öffnung der Flasche. Sobald die Wärmeentwicklung gehemmt ist, das Feuer also am Ausbrennen ist, kühlt die zuvor erwärmte Luft rasch ab und erzeugt einen zum Atmosphärendruck verringerten Druck in der Flasche (isochorer Prozess). Aufgrund dieser Druckdifferenz wird das Ei in die Flasche hineingedrückt.

### Alternative:

Alternativ können statt der brennenden Streichhölzer auch andere Materialien (wie Watte oder Brennspritus) verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Flasche in ein Becken mit heißem Wasser zu stellen, sie nach einiger Zeit herauszunehmen und das Ei aufzusetzen.

### Intention:

Der Versuch liefert die Möglichkeit, die oft in der achten Jahrgangsstufe getrennt voneinander behandelten Themen „Luftdruck“ und „Wärme“ miteinander zu kombinieren. Dadurch kann ein Verständnis für physikalische Zusammenhänge - insbesondere für die Zustandsgleichungen idealer Gase - entwickelt werden.

### 5.2.4.3. Implodierende Dose

(Schülerversuch / Lehrerversuch<sup>110</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- 1 leere Getränkedose (0,33 l)
- 1 Bunsenbrenner
- 1 Dreifuß mit Drahtgestell
- 1 Wanne
- 1 Gefäß mit Wasser
- 1 Schutzbrille
- Baumwollhandschuhe oder Wärmeschutzhandschuhe



Abbildung 5.12.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

Zu Beginn werden die Getränkedose auf ca. 1 cm sowie die Wanne auf einige Zentimeter Höhe mit Wasser befüllt und neben dem Bunsenbrenner positioniert. Im Anschluss wird der Bunsenbrenner entzündet und der Dreifuß so platziert, dass sich das aufgelegte Drahtgestell direkt über der Flamme befindet. Danach wird die Dose auf das Drahtgestell

<sup>110</sup>Ideen nach WILHELM (2002), S15 f und S45 f

gesetzt (siehe Abbildung 5.13). Es kommt zu starker Erhitzung des in der Dose befindlichen Wassers. Nach kurzer Zeit steigt Wasserdampf auf. An dieser Stelle muss ein Moment gewartet werden (ca. eine halbe Minute), damit sich genügend Wasserdampf in der Dose bilden kann. Die nächsten Handlungen sind sehr zügig durchzuführen: Die Dose wird mit Baumwollhandschuhen gegriffen, über der mit Wasser befüllten Wanne gedreht und mit der Öffnung voraus ins Wasser getaucht.

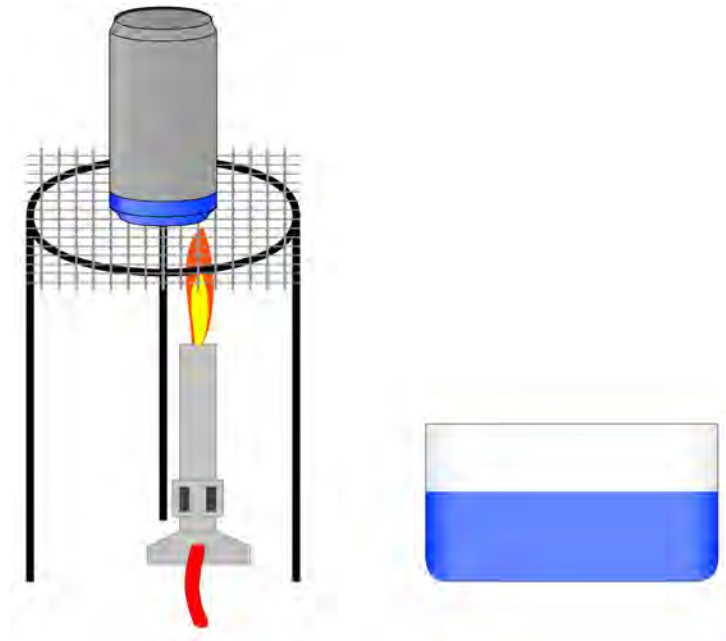


Abbildung 5.13.: Versuchsdurchführung

**Darauf ist zu achten:**

Eine Befüllung der Dose mit Wasser auf etwa 1 cm Höhe ist für den Versuch notwendig. Wird eine zu geringe Menge Wasser zugeführt, entwickelt sich zu wenig Wasserdampf in der Dose. Die Abkühlung des in der Dose befindlichen Wasserdampfes durch das Umdrehen und Eintauchen in das Wasserbecken erzeugt keinen ausreichenden Druckunterschied, so dass die Dosenwand nicht zerbeult wird. Der gleiche Effekt ist zu beobachten, wenn die Dose vorzeitig von der Flamme entfernt wird oder vorab zuviel Wasser in die Dose gegeben wurde. In beiden Fällen ist die eintretende Druckänderung im Inneren der Dose aufgrund der langsamen Temperaturabnahme zu gering. Druckunterschiede werden - wie beim Versuch mit den tauchenden Gummibären (siehe Kapitel 5.1.4.1) - durch das Eindringen von Wasser in die Dose ausgeglichen.

**Beobachtung:**

Sobald die Dose in das kalte Wasser getaucht wird, kommt es zur schlagartigen Deformation der Gefäßwände. Die Dose implodiert augenblicklich mit einem lauten Knall.



Abbildung 5.14.: Beobachtung

**Erklärung:**

Durch die Erwärmung des in der Dose befindlichen Wassers entsteht ein sehr heißer Wasserdampf, welcher die im Gefäß enthaltene Luft verdrängt. Durch das Umstülpen und schnelle Eintauchen der Dose in das kalte Wasser gelangt Wasser durch die Öffnung in das Innere der Dose. Das eingedrungene kalte Wasser beschleunigt den Abkühl- und somit den Kondensationsprozess des Wasserdampfes. „[...] die Abkühlung des Wasserdampfes und damit der Druckabfall [erfolgt] plötzlich und sehr schnell“<sup>111</sup>. Der dabei eintretende Unterdruck im Inneren des Gefäßes kann aufgrund der Trägheit des Wassers nicht ausgeglichen werden, da dieses nicht schnell genug durch die Öffnung in die Dose gelangt. Die Gefäßwände hingegen können dem Druckunterschied zwischen Innen- und Außenseite nicht standhalten und geben nach.

**Alternative:**

Anstelle einer leeren Dose kann auch ein kleiner Blech-Kanister mit Deckel verwendet werden. In diesem Fall wird zunächst genauso wie bei der Dose verfahren, d.h. dem Kanister wird ein wenig Wasser zugegeben und anschließend wird er über einem Feuer erwärmt. Strömt durch die Öffnung des Behälters Wasserdampf aus, so wird diese verschlossen, der Kanister von der Feuerstelle entfernt und mit Wasser gekühlt. Der Blechkanister sollte ebenso wie die Dose implodieren. Allerdings dauert es einige Zeit, bis erste Verformungen zu erkennen sind, und die Deformation setzt nicht so schlagartig wie im Falle der Dose ein. Ein Vorteil dieser Methode ist ein leichteres Verständnis des Vorganges durch die Schülerinnen und Schüler im Vergleich zur Variante mit der Dose.

**Intention:**

Der Versuch mit der implodierenden Dose ist ein weiteres Beispiel dafür, wie man den vom Menschen kaum wahrnehmbaren Luftdruck durch die Schaffung von Druckdifferenzen veranschaulichen kann.

---

<sup>111</sup>WILHELM (2002), S. 16

## 5.2.5. Versuche zum Thema „Schweredruck von Wasser“

### 5.2.5.1. Schweredruck in einer Wasserflasche

(Schülerversuch / Lehrererversuch <sup>112</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- Plastikflasche
- Nagel
- Kerze
- Streichhölzer
- Zange



Abbildung 5.15.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

Für die Durchführung des Versuches ist eine leere Plastikflasche so zu präparieren, dass sie in vertikaler Richtung in etwa gleichen Abständen Löcher aufweist (siehe Abbildung 5.17). Diese werden mit einem heißen Nagel, der über der Flamme einer Kerze erwärmt wurde, in die Plastikflasche gebrannt. Das Greifen des Nagels mit einer Zange schützt hierbei vor Verbrennungen. Anschließend werden die Löcher mit Tesafilm abgeklebt, die Flasche mit Wasser gefüllt und diese auf einem Tisch positioniert. Der Tesafilm wird entfernt und die jeweilige maximale Reichweite der aus den Löchern austretenden Wasserstrahlen beobachtet.



Abbildung 5.16.: Versuchsdurchführung

<sup>112</sup>Ideen nach KAMEIER et al. (2011), S. 57



**Darauf ist zu achten:**

Das oberste Loch sollte nicht zu hoch angesetzt werden, da die oberhalb stehende Wassermenge sonst zu schnell abfließt und das Loch somit nur bedingt zur Beobachtung geeignet ist. Wird das unterste Loches zu tief eingebracht, so trifft der austretende Wasserstrahl bereits nach einer sehr kurzen Entfernung auf den Boden und kann ebenfalls nur bedingt zur Beobachtung genutzt werden.

**Beobachtung:**

Der Wasserstrahl, der auf halber Höhe des Wasserpegels die Flasche verlässt, spritzt am weitesten (siehe Abbildung 5.17).

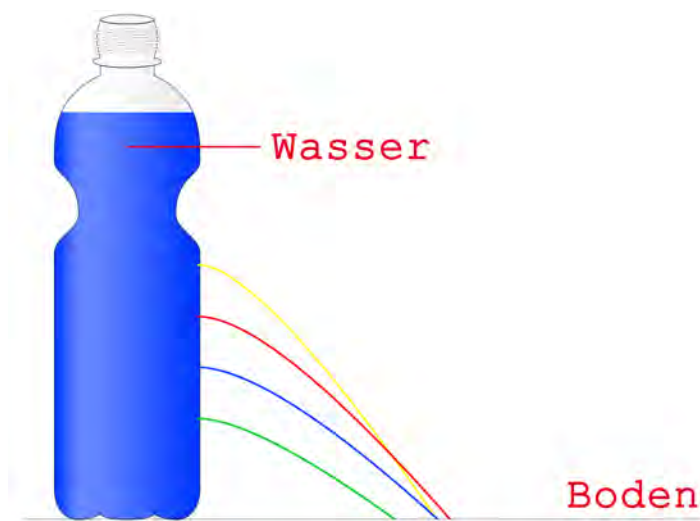


Abbildung 5.17.: Schwereindruck in einer Wasserflasche

**Erklärung:**

Befindet sich in einem mit Wasser gefüllten Behälter in einer Höhe  $h$  unterhalb der Wasseroberfläche ein Loch (siehe Abbildung 5.18), so lässt sich die Bernoulli-Gleichung (siehe Kapitel 8.2.1.2) auf die Flächen  $a$  und  $b$  anwenden.

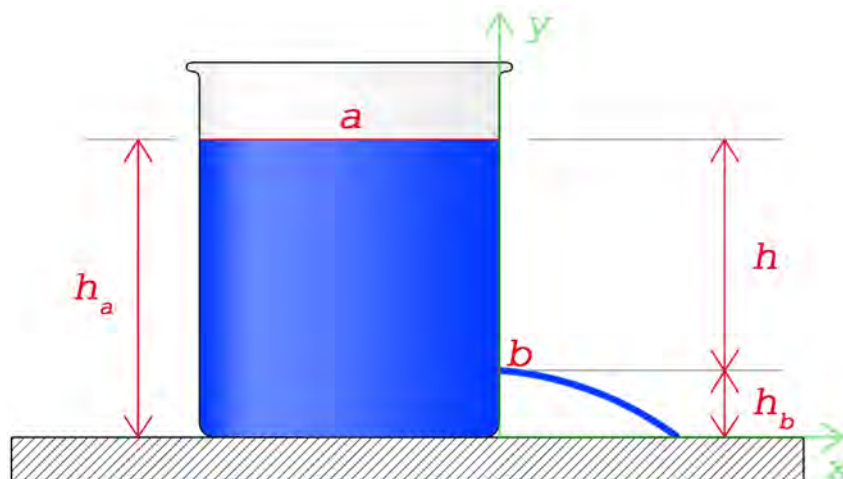


Abbildung 5.18.: Wasserbehälter mit seitlichem Loch

Nach Bernoulli gilt:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_W v_a^2 + \rho_W \cdot g \cdot h_a + p_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot v_b^2 + \rho_W \cdot g \cdot h_b + p_b \quad (5.15)$$

Die Fließgeschwindigkeit der Wasseroberfläche  $v_a$  ist im Vergleich zur Geschwindigkeit  $v_b$  des durch die Fläche  $b$  fließenden Wassers vernachlässigbar gering und wird im Folgenden gleich Null gesetzt ( $v_a = 0$ ). Das im Behälter befindliche Wasser ist nach oben durch die Öffnung des Gefäßes und seitlich durch das Loch bezüglich der Atmosphäre offen. Deshalb entsprechen die entlang den Flächen  $a$  und  $b$  herrschenden Drücke  $p_a$  und  $p_b$  jeweils dem Luftdruck  $p_L$ . Gleichung (5.15) vereinfacht sich zu:

$$\begin{aligned} \rho_W \cdot g \cdot h_a + p_L &= \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot v_b^2 + \rho_W \cdot g \cdot h_b + p_L \\ \rho_W \cdot g \cdot h_a &= \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot v_b^2 + \rho_W \cdot g \cdot h_b \end{aligned}$$

Für die Austrittsgeschwindigkeit  $v_b$  folgt mit  $h := h_a - h_b$ :

$$v_b = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (5.16)$$

Im Folgenden sei angenommen, dass das Wasser nicht als Strahl, sondern in Form von vielen kleinen kugelförmigen Tropfen (Masse  $m$ ) aus dem Behälter ausströmt. Die Ortsfunktionen eines einzelnen Wassertropfens ergibt sich im idealisierten Fall, d.h. bei Vernachlässigung der Luftreibung, zu:

**In x-Richtung gilt:**

$$\begin{aligned} m \cdot a_x &= 0 \\ \Rightarrow v_x(t) &= v_b \\ \Rightarrow x(t) &= v_b \cdot t \end{aligned}$$

**In y-Richtung gilt:**

$$\begin{aligned} m \cdot a_y &= -m \cdot g \\ \Rightarrow v_y(t) &= -g \cdot t \\ \Rightarrow y(t) &= -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + h_b \end{aligned}$$

Die maximale Reichweite des Wasserstrahls  $x_{\max}$  ist zum Zeitpunkt  $T$  erreicht, wenn der Wasserstrahl auf dem Boden auftrifft. Für die Flugdauer  $T$  gilt:

$$\begin{aligned} y(T) &= 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot g \cdot T^2 + h_b &= 0 \\ \Rightarrow T &= \sqrt{\frac{2 \cdot h_b}{g}} \end{aligned}$$

Mit  $h = h_a - h_b$  und  $v_b = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$  ergibt sich  $x_{\max} = x(T)$  zu:

$$x_{\max}(h_a, h_b) = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_a - h_b)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_b}{g}} = \sqrt{4 \cdot h_b \cdot (h_a - h_b)}$$

Die Höhe  $h_b$ , in welcher das aus dem Behälter austretende Wasser die größte Reichweite

erzielt, errechnet sich zu:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dh_b} x_{\max} &\stackrel{!}{=} 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{4 \cdot h_b \cdot (h_a - h_b)}} \cdot (4 \cdot (h_a - h_b) - 4h_b) &= 0 \\ h_a - 2h_b &= 0 \\ \Rightarrow h_b &= \frac{h_a}{2}\end{aligned}$$

Aus der Rechnung ist zu entnehmen, dass das Wasser, welches aus einem Loch in halber Höhe zum Wasserpegel ausströmt, am weitesten spritzt.

### **Intention:**

Die Schülerinnen und Schüler sollten vor der Durchführung dieses Versuches bereits wissen, dass der Schweredruck mit zunehmender Tiefe steigt. Die Beobachtung im Experiment, dass nicht der unterste, sondern der in halber Höhe des Wasserpegels austretende Strahl, die größte Reichweite erzielt, soll die Kinder zum Nachdenken anregen. Wie die Rechnung zeigt, ist zwar nach Gleichung (5.16) der unterste Strahl am schnellsten, jedoch besitzt dieser auch die kleinste Zeit, bis er auf den Boden auftrifft. Die Schülerinnen und Schüler sollen nach obiger Rechnung erkennen, dass in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Fallzeit der mittlere Strahl am weitesten spritzt.

### **5.2.5.2. Druckausgleich in verbundenen Gefäßen**

(Schülerversuch / Lehrerversuch)

#### **Benötigte Materialien:**

- 4 Plastikflaschen (2 x 0,5 l, 1 x 1 l und 1 x 1,5 l)
- 1 Schlauch
- Knetmasse
- Kerze
- Streichhölzer
- 2 Schraubverschlüsse
- 1 Nagel
- Wasser
- Benzin



**Abbildung 5.19.:** Materialien



**Versuchsbeschreibung:**

In die Schraubverschlüsse zweier Wasserflaschen ist jeweils ein Loch mit einem so groß gewählten Durchmesser zu bohren, dass der gegebene Schlauch gerade hindurchpasst. An beiden Enden des Schlauches wird je eine der präparierten Kapseln aufgesetzt und auf diesen aufgeschoben, dass ungefähr zwei Zentimeter des Schlauches überstehen. In dieser Position werden die Verschlüsse mit Knetmasse fixiert. Diese Versiegelungen sorgen zum einen für einen festen Halt und dichten zum anderen den Raum zwischen Schlauch und Lochrändern ab. Mit einem heißen Nagel, der über der Flamme einer Kerze erwärmt wurde, werden kleine Löcher in den Boden der Flaschen gebrannt, die anschließend mit Klebeband verschlossen werden. Zunächst werden zwei gleich große Flaschen gewählt und eine von beiden mit Wasser gefüllt. Im Anschluss daran wird die Schlauch-Verschlusskonstruktion auf die Flaschen geschraubt. Nun werden beide Flaschen gleichzeitig umgedreht und die Klebebandstreifen entfernt.

In einem weiteren Durchlauf wird der beschriebene Versuch mit zwei unterschiedlich großen Flaschen wiederholt. Zudem lässt sich der Versuch auch dahingehend modifizieren, dass die leere Flasche mit einer nichtwasserlöslichen Flüssigkeit (z.B. Benzin) gefüllt wird.

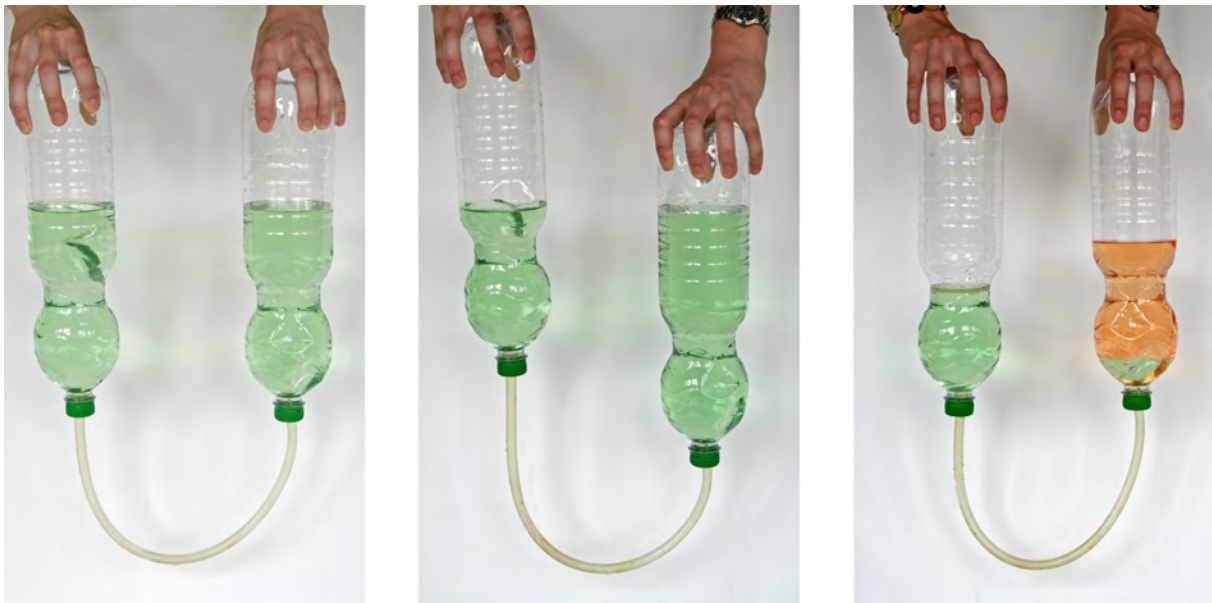


Abbildung 5.20.: Versuchsdurchführung

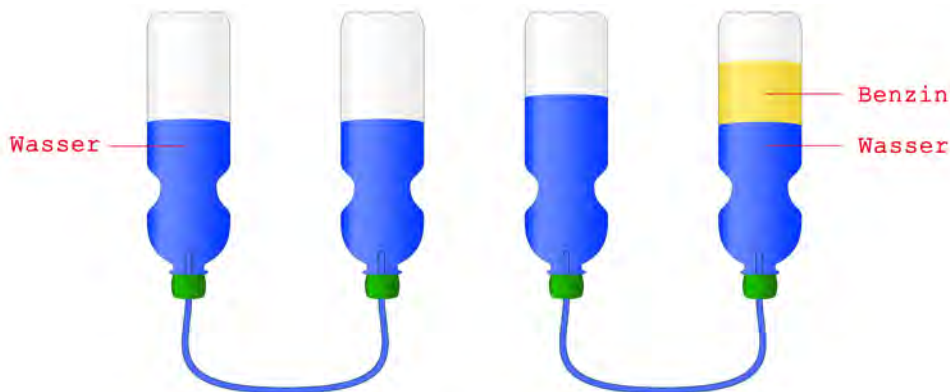
**Darauf ist zu achten:**

Benzin zählt zur Klasse der leicht entflammaren Stoffe. Aus diesem Grund sind alle in der näheren Umgebung des Experimentes befindlichen Zündquellen zu entfernen.

**Beobachtung:**

Sobald beide Flaschen umgedreht sind, fließt Wasser aus der vollen in die leere Flasche. Dieser Prozess währt solange fort, bis der Wasserpegel in beiden Gefäßen das gleiche Niveau erreicht hat. Äquivalentes lässt sich für unterschiedlich große Gefäße beobachten.

Bei dem Zusammenführen von Benzin und Wasser wird auf beiden Seiten eine ungleiche Flüssigkeitshöhe erreicht.



**Abbildung 5.21.:** Druckausgleich in verbundenen Gefäßen.  
Links: Wasser  
Rechts: Wasser und Benzin

**Erklärung:**

Am Gefäßboden der mit Wasser gefüllten Flasche herrscht ein höherer Druck als in der Leeren. Werden beide Behälter umgedreht, so führt dieser Druckunterschied zum Wassertransport aus der vollen in die leere Flasche. Dieser Prozess währt solange fort, bis auf beiden Seiten der gleiche Schweredruck herrscht. Da dieser lediglich von der Wasserhöhe und nicht vom Volumen der Flasche abhängt, stoppt der Fließprozess, wenn beide Wassersäulen gleich hoch stehen. Werden die Flüssigkeiten Wasser und Benzin zusammengeführt, so stellt sich in dem Gefäß, in dem das Benzin enthalten ist, ein höherer Flüssigkeitspegel ein, da Benzin im Vergleich zu Wasser eine verminderte Dichte besitzt und daher einen niedrigeren Schweredruck erzeugt.

**Intention:**

Durch den Versuch sollen die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis für solche Fließvorgänge entwickeln, die durch Druckdifferenzen zustande kommen. Zudem wird durch die Verwendung unterschiedlicher Flaschen veranschaulicht, dass der Schweredruck ausschließlich von der Wasserhöhe und nicht von der Art des Gefäßes abhängt. Die Modifikation des Versuches durch das Zusammenführen von Wasser und Benzin, soll eine Anregung schaffen, sich näher mit dem Schweredruck und der Dichte verschiedener Stoffe auseinanderzusetzen. Ziel ist dabei, die Abhängigkeit des Schweredrucks von der Dichte der Flüssigkeit zu erkennen und zu verstehen.

## 6. Wasserentnahme

In Kapitel 5 wurden die Begriffe eingeführt und erläutert, welche für ein Verständnis der Funktionsweise einer Feuerlöschkreiselpumpe benötigt werden. Im folgenden Kapitel soll eben dieses Verständnis entwickelt werden. Ziel ist es, den Weg des Wassers von einer Löschwasserquelle bis ins Innere der Pumpe nachzuvollziehen (=Ansaugvorgang) sowie die damit zusammenhängenden physikalischen und technischen Grenzen zu analysieren.

Für die Wasserentnahme ist entscheidend, unter welchem Druck das Wasser der Löschwasserquelle steht. So herrscht beispielsweise in den Zuleitungsrohren des in Gemeinden und Städten installierten Hydrantennetzes ein relativer Wasserdruck, der je nach Lage zwischen 2000 und 8000 *hPa* variiert. Ein relativer Wasserdruck von 2000 *hPa* bedeutet, dass der Druck 2000 *hPa* über dem äußeren Luftdruck (1013 *hPa*) liegt. Der absolute Druck beträgt dann 3013 *hPa*. Wird eine Feuerlöschkreiselpumpe über einen Schlauch mit einem Hydranten verbunden und dieser geöffnet, bewirkt die Druckdifferenz zwischen Wasser und Luft ein eigenständiges Fließen des Wassers ins Innere der Pumpe, analog zum Versuch des Ausgleiches der Flüssigkeit in verbundenen Gefäßen aus Kapitel 5.2.5.2. Bei allen anderen Löschwasserquellen, bei denen der Druck im Wasser nicht ausreicht, um einen selbstständigen Fließprozess einzuleiten, werden spezielle Saugschläuche an die Pumpe gekuppelt. Deren Funktionsweise wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 6.1. Funktionsprinzip des Ansaugvorgangs

Die Feuerlöschkreiselpumpe ist in Verbindung mit den an sie angekuppelten Saugschläuchen ein nach außen hin nahezu luftdicht verschlossenes System. Lediglich das ins Wasser eingetauchte Ende der Saugleitung besitzt eine Öffnung (siehe Abbildung 6.1 links). Ein zusätzlich angebrachter Saugkorb verhindert das Eindringen zu groben Schmutzes und somit die Beschädigung der Pumpe. Ventile dichten Pumpe und Schläuche nach außen ab und unterbinden ein Einströmen bereits abtransportierter Luft. Ein Metallgestänge stabilisiert und verstärkt die Innenwände der Saugleitung und garantiert so eine Formstabilität während des gesamten Ansaugvorganges. Über eine spezielle Entlüftungsvorrichtung wird die im Pumpengehäuse und den angeschlossenen Saugschläuchen enthaltene Luft evakuiert. Im Inneren der Pumpe und in der Saugleitung entsteht ein zum Atmosphärendruck verringerter Luftdruck. In Abhängigkeit dieser Druckdifferenz steigt der Wasserpegel in der Saugleitung (siehe Abbildung 6.1 rechts).

<sup>113</sup>Bearbeitetes Bild: Original von BOHL/ELMENDORF (2002), S. 56

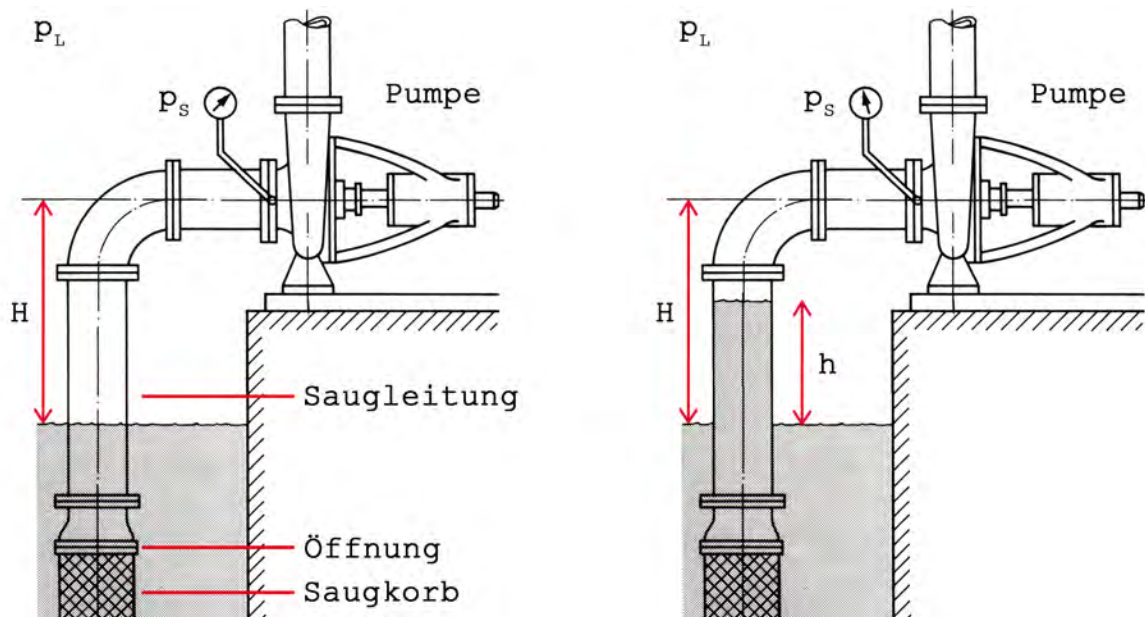


Abbildung 6.1.: Skizze eines Saugvorganges einer Feuerlöschkreiselpumpe <sup>113</sup>

Die maximale Steighöhe des Wassers ist erreicht, sobald der verminderte Luftdruck im Inneren der Leitung in Kombination mit dem sich einstellenden Schweredruck der innerhalb der Leitung gebildeten Wassersäule im Gleichgewicht zum Atmosphärendruck steht. Ist dieser Zustand erreicht, so gilt:

$$p_A = p_S + p_W \stackrel{114}{=} p_S + \rho_W \cdot g \cdot h \quad (6.1)$$

Bei vielen Schülerinnen und Schülern ist die Vorstellung präsent, dass durch die Evakuierung der Luft ein Unterdruck entsteht, der das Wasser ansaugt. In Wirklichkeit gibt es ein Saugen aber nicht, da immer und überall Drücke herrschen. Selbst der verbleibende verringerte Luftdruck im Schlauch drückt das Wasser in die entgegengesetzte Richtung. Entscheidend ist der äußere Luftdruck (bzw. die Differenz zwischen Luftdruck außen und innen  $p_A - p_S$ ), der das Wasser im Saugrohr nach oben drückt. Die Höhe der sich im Schlauch einstellenden Wassersäule ergibt sich nach Gleichung (6.1) zu:

$$h = \frac{p_A - p_S}{\rho_W \cdot g} \quad (6.2)$$

$p_A$	=	Atmosphärendruck	$\rho_W$	=	Dichte von Wasser
$p_S$	=	Luftdruck im Schlauch	$h$	=	Höhe der Wassersäule im Schlauch
$p_W$	=	Schweredruck der Wassersäule			

<sup>114</sup>nach Gleichung (5.6) S. 57

Aufgrund des äußeren Luftdrucks (ca.  $1013 \text{ hPa}$ ), der nicht erhöht werden kann, ist die maximale Höhe der Wassersäule begrenzt und wird theoretisch erreicht, sobald die im Schlauch befindliche Luft vollständig abgeführt ist. Für diesen Fall gilt:

$$h = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 10,33 \text{ m} \quad (6.3)$$

In der Praxis wird diese Höhe allerdings nicht erreicht. In den folgenden Kapiteln gilt es deshalb, die physikalischen und technischen Grenzen bei der Wasserentnahme in der Praxis zu klären, um so auf die maximal erreichbare Ansaughöhe zu schließen.

## 6.1.1. Versuche zum Thema „Ansaugen von Wasser“

### 6.1.1.1. Staubsauger vs. Mund

(Schülerversuch / Lehrerversuch <sup>115</sup>)

#### Benötigte Materialien:

- Staubsauger
- Klebeband
- 2 identische Flaschen (am besten aus Glas)
- zwei 5 m-lange durchsichtige Schläuche
- Maßband
- Wasser

#### Versuchsbeschreibung:

Für die Durchführung dieses Versuches wird eine ausreichende Höhe (ca. 5 m) benötigt, wofür sich beispielsweise ein Treppenhaus eignet. Auf den Boden des Erdgeschosses werden zwei identische, mit Wasser gefüllte Flaschen gestellt. In die Flaschen werden zwei Plastikschläuche gegeben, die ca. 15 cm unterhalb der Wasseroberfläche enden sollten. Zwei Schüler erhalten den Auftrag, mit den Schlauchenden, die nicht in den Flaschen stecken, im Treppenhaus so weit nach oben zu steigen, dass die Schläuche vollständig gestrafft sind. Das obere Ende des einen Schlauches wird ein Stück in die Düse des Staubsaugers geschoben und dort mit Klebeband luftdicht fixiert. Das obere Ende des zweiten Schlauches soll der Lehrer oder ein Freiwilliger in den Mund nehmen. Auf ein Signal hin wird der Staubsauger eingeschaltet und der Lehrer oder der Freiwillige saugt am Schlauch, so fest er kann. Zwischen den zwei Plastikschläuchen kann zum Messen der erreichten Wasserhöhe zusätzlich ein Maßband gespannt werden.

#### Darauf ist zu achten:

Bei der Befestigung des Schlauches mit dem Klebeband an der Düse des Staubsaugers ist auf eine luftdichte Verschiebung zu achten. Andernfalls würde durch eindringende Luft die Erzeugung eines Unterdrucks und somit der Wasseranstieg im Schlauch deutlich

<sup>115</sup>Ideen nach LEITNER/FINCKH/FRITSCHKE

gehemmt. Weiter sollte der ansteigende Wasserpegel im Schlauch während des Saugvorganges kontinuierlich beobachtet werden, so dass der Staubsauger vor dem Eindringen von Wasser ausgeschaltet werden kann.

### Beobachtung:

Mit dem Mund kann das Wasser in höhere Lagen gefördert werden als mit dem Staubsauger. Am Maßband kann die sich einstellende Wasserhöhe abgelesen und mit der Gleichung (6.2) auf Seite 76 der im Schlauch bestehende Luftdruck berechnet werden.

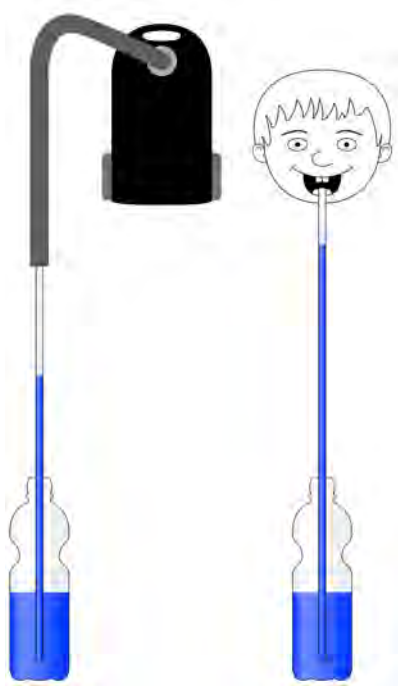


Abbildung 6.2.: Beobachtung

### Erklärung:

Sowohl beim Staubsauger als auch beim Ansaugen mit dem Mund entsteht in den Schläuchen ein zum Atmosphärendruck verminderter Luftdruck. Als Folge dieser Druckdifferenz ist es der äußere Luftdruck, der das Wasser in den Schlauch hineindrückt. Hierbei steigt die Wassersäule solange, bis auf dem Niveau der Wasseroberfläche in der Flasche der Druck im Schlauch dem Atmosphärendruck entspricht. Da mit dem Mund ein deutlich niedrigerer Druck erzeugt werden kann als mit einem Staubsauger, kann im entsprechenden Schlauch ein höherer Wasseranstieg beobachtet werden.

### Intention:

Ziel des Versuchs ist, mit den Lerninhalten Luft- und Schweredruck spielerisch zu experimentieren und somit den Unterricht abwechslungsreich und ansprechend zu gestalten. Die Schülerinnen und Schüler können hier eine Maschine übertreffen, was Neugierde, Interesse und dabei auch intrinsische Motivation wecken soll. Darüber hinaus lernen sie die theoretischen Grundlagen kennen, die sie benötigen, um zu verstehen, wie eine Pumpe Wasser aus tieferen Lagen anheben kann.

### 6.1.1.2. Schwimmende Kerze im Glas

(Schülerversuch / Lehrerversuch )

#### Benötigte Materialien:

- 1 Teelicht
- Streichhölzer
- Kaliumpermanganat
- Glaswanne
- 1 schmales langes Trinkglas
- 1 Suppenteller



Abbildung 6.3.: Materialien

#### Versuchsbeschreibung:

In eine große Glasschüssel wird Wasser gegeben, das mit Kaliumpermanganat gefärbt wird. Ein Teelicht wird entzündet und auf die Wasseroberfläche gesetzt. Anschließend wird ein Trinkglas mit der Öffnung nach unten in einer Entfernung von ca. 2 – 3 cm über die Flamme gehalten. Nach kurzer Zeit wird das Glas weiter nach unten geführt bis es schließlich den Boden der Glasschüssel berührt. In dieser Lage wird das Glas gehalten und abgewartet.



Abbildung 6.4.: Versuchsdurchführung

#### Darauf ist zu achten:

Das verwendete Glas sollte möglichst hoch mit großem Volumen sein.



### Beobachtung:

Nur wenige Sekunden nachdem das Trinkglas über das Teelicht gestülpt ist, erlischt die Flamme. Wasser dringt in das Glas und hebt das Teelicht an.



Abbildung 6.5.: Brennende Kerze unter einem Trinkglas

### Erklärung:

Bei der Verbrennung des Teelichtes erwärmt sich die Luft über der Flamme und steigt aufgrund ihrer geringeren Dichte nach oben. Befindet sich das Trinkglas in einer vorgegebenen Distanz über der Flamme, so verdrängt die warme aufsteigende Luft die im Glas befindliche kalte Luft, die an die Umgebung entweicht. Wird das Glas auf die Wasseroberfläche aufgesetzt, so dichtet das Wasser die im Glas befindliche Luft nach außen ab, so dass dieser Austausch unterbunden wird.

Bei der Verbrennung reagiert Sauerstoff mit Kohlenstoff unter Bildung von Kohlenstoffdioxid, das zur weiteren Reaktion nicht mehr beiträgt, allerdings teilweise in Wasser gelöst werden kann. Dieser Prozess verringert den im Glas enthaltenen Gasanteil, wodurch ein leichter Unterdruck im Glas entsteht. Dieser wird durch einen kaum beobachtbaren Anstieg des Wassers im Inneren kompensiert. Solange die Kerze brennt reduziert sich der in der Luft enthaltene prozentuale Sauerstoffgehalt. Sobald der Sauerstoffanteil eine untere Grenze von 17 % unterschreitet, erlischt die Flamme und es kommt kurze Zeit später zu einem rasantem Anstieg des Wassers. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die warme Luft im Glas abkühlt und sich somit der Luftdruck verringert. Als Folge steigt der Wasserpegel, weil der äußere Luftdruck das Wasser hochdrückt.

### Intention:

Durch den Versuch kann auf eine komplexere Art das Prinzip des Ansaugvorganges bei einer Feuerlöschkreiselpumpe verdeutlicht werden. Zudem kann durch das Experiment das in der achten Jahrgangsstufe erworbene Wissen aus der Wärmelehre aufgegriffen und mit dem Themengebiet Druck verknüpft werden. Insbesondere sollen die Schülerinnen und Schüler versuchen, ihre Beobachtungen mit den ihnen bekannten Kenntnissen zu erklären. Auf diese Weise lernen die Kinder Theorien zu formulieren, sie in gemeinsamen Diskussionen zu prüfen und gegebenenfalls zu überdenken.



## 6.2. Die physikalischen und technischen Grenzen beim Ansaugen

Eine detaillierte Analyse der im Kapitel 6.1 hergeleiteten Formel (Gleichung 6.1)

$$h = \frac{p_A - p_S}{\rho_W \cdot g}$$

mit der die erreichbare Wasserhöhe beim Ansaugen berechnet wird, liefert ausschlaggebende Informationen darüber, wann die technischen und physikalischen Grenzen einer Pumpe erreicht sind. Die Dichte von Wasser  $\rho_W$  kann ebenso wie die Erdbeschleunigung  $g$  als konstant angenommen werden, da hier die Änderungen minimal sind und die erreichbare Ansaughöhe nur geringfügig beeinflussen. Auch die Reibungsverluste in den Saugleitungen sowie die Kohäsions- bzw. Adhäsionskräfte zwischen Schlauch und Wasser können vernachlässigt werden. Entscheidend für die erreichbare Wasserhöhe sind der Atmosphärendruck und der durch die Entlüftungseinrichtung erzeugbare Unterdruck in der Pumpe und den angeschlossenen Saugschläuchen.

### 6.2.1. Herleitung der barometrische Höhenformel

Über die in den Kapiteln 5.2.4 und 6.1.1 genannten Versuche kann ein qualitativer Zugang zum Thema Luftdruck geschaffen werden. Das in den Versuchen zum Kapitel 5.1.4 erworbene Wissen über die Materieeigenschaft von Luft legt die Schlussfolgerung nahe, den Luftdruck auf eine ähnliche Weise wie den Schweredruck einer Flüssigkeit zu berechnen. Solche analogen Gedankengänge sind allerdings nur begrenzt möglich, da Gase und Flüssigkeiten in vielerlei Hinsicht abweichende Merkmale aufweisen. Die Annahme, dass Gase wie auch Wasser inkompressibel seien und somit an jedem Ort eine konstante Dichte aufweisen, lässt sich an einem einfachen Beispiel widerlegen.

Ausgehend von der genannten Hypothese müsste bei konstanter Temperatur, konstanter Dichte und einem normalen Luftdruck von 1013 mbar für die Höhe der Atmosphärenschicht gelten:

$$h = \frac{p}{\rho_L \cdot g} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 8 \text{ km}$$

Somit würde der höchste Berg der Erde, der Mount Everest mit 8844 m<sup>116</sup>, ins Weltall ragen, was jedoch nicht der Fall ist.

Gase sind im Vergleich zu Flüssigkeiten sehr gut komprimierbar. Aus diesem Grund darf im Allgemeinen nicht von einer konstanten Dichte ausgegangen werden. Im Folgenden ist eine detaillierte Herleitung der barometrischen Höhenformel zu finden, die eine genauere Berechnung des Atmosphärendrucks zulässt.

<sup>116</sup>GROTZINGER et al. (2008), S. 6

Nach Boyle-Mariotte sind Druck und Volumen eines idealen Gases bei konstanter Temperatur umgekehrt proportional zueinander. Es gilt:

$$V = \frac{c}{p} \quad \Leftrightarrow \quad V \cdot p = c \quad \text{mit } c \in \mathbb{R} \quad (6.4)$$

$V$  = Volumen des idealen Gases       $c$  = Konstante  
 $p$  = Druck des idealen Gases

Der Vergleich einer bestimmten Menge Luft (Masse  $m$ ) am Boden (Volumen  $V_1$ , Druck  $p_1$ ) und in einer größeren Höhe (Volumen  $V_2$ , Druck  $p_2$ ) liefert nach Gleichung (6.4) den folgenden Zusammenhang:

$$\begin{aligned} V_1 \cdot p_1 &= V_2 \cdot p_2 \\ \frac{m}{\rho_1} \cdot p_1 &= \frac{m}{\rho_2} \cdot p_2 \\ \frac{p_1}{\rho_1} &= \frac{p_2}{\rho_2} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Somit muss bei einem kleineren Druck  $p_2$  in größerer Höhe auch die Dichte kleiner sein. Die Gleichung (5.6) für den Schweredruck in Flüssigkeiten

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

lässt sich folglich bei Luft nur für dünne Schichten der Dicke  $dh$  anwenden.

Da der Druck mit steigender Höhe abnimmt, muss folgende Differentialgleichung (DGL) gelten:

$$dp = -\rho_L \cdot g \cdot dh \quad (6.6)$$

$\rho_L$  = Dichte der Luft

Nach Boyle-Mariotte (Gleichung (6.5)) gilt für  $\rho_L$ :

$$\rho_L = \frac{\rho_{L,0}}{p_0} \cdot p \quad (6.7)$$

$\rho_{L,0}$  = Dichte der Luft auf Meeresniveau       $p_0$  = Luftdruck auf Meeresniveau

Einsetzen von Gleichung (6.7) in die DGL (6.6) liefert:

$$\begin{aligned} dp &= -\frac{\rho_{L,0}}{p_0} \cdot p \cdot g \cdot dh \\ \frac{1}{p} dp &= -\frac{\rho_{L,0}}{p_0} \cdot g \cdot dh \\ \int_{p_0}^p \frac{1}{p} dp &= \int_0^h -\frac{\rho_{L,0}}{p_0} \cdot g \cdot dh \\ \ln \left( \left| \frac{p}{p_0} \right| \right) &= -\frac{\rho_{L,0}}{p_0} \cdot g \cdot h \end{aligned}$$

Da  $\frac{p}{p_0} > 0$  ist, vereinfacht sich  $\left| \frac{p}{p_0} \right|$  zu  $\frac{p}{p_0}$ . Damit ergibt sich ein Druck von

$$\boxed{p(h) = p_0 \cdot \exp \left( -\frac{\rho_{L,0}}{p_0} \cdot g \cdot h \right)} \quad (\text{Barometrische Höhenformel}) \quad (6.8)$$

Die Annahme einer in allen Höhenlagen konstanten Lufttemperatur, die bei der Herleitung der barometrischen Höhenformel vorausgesetzt ist, kann in der Realität nicht getragen werden, da sich mit zunehmender Höhe die Temperatur der Luft verringert. Aus diesem Grund stellt die Gleichung (6.8) nur eine grobe Näherung des tatsächlichen Luftdrucks dar. Genauere Werte liefert die internationale Höhenformel, die wie folgt definiert ist<sup>117</sup>:

$$\boxed{p(h) = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \left( 1 - \frac{6,5}{288 \text{ km}} \cdot h \right)^{5,255}} \quad (\text{Internationale Höhenformel}) \quad (6.9)$$

Der Annahme folgend, Wasser bei einer konstanten Temperatur von 20°C anzusaugen und dabei ein Vakuum in der Saugleitung zu erzeugen, lässt sich die durch den Luftdruck bedingte maximale Steighöhe des Wassers über die Formel

$$h_{max}(h) = \frac{p(h)}{\rho_W \cdot g}$$

berechnen. Nachfolgend ist in einer tabellarischen Übersicht der Luftdruck nach der internationalen Höhenformel und die sich hieraus ergebende maximale Steighöhe von Wasser für ausgewählte Höhenlagen berechnet.

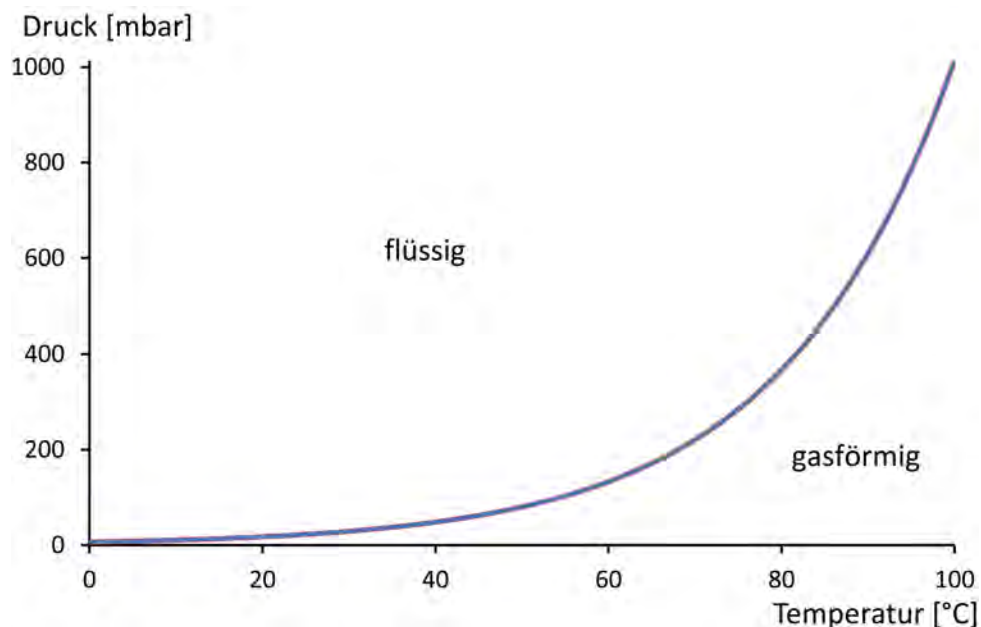
<sup>117</sup>HERING/MARTIN/STOHRER (2007), S. 129

Höhenmeter über Meeresspiegel in $m$	0	100	200	300	400
Luftdruck <sup>118</sup> in $hPa$	1013	1001	989	977	966
maximale Steighöhe des Wassers in $m$	10,35	10,22	10,10	9,98	9,87
Höhenmeter über Meeresspiegel in $m$	500	600	700	800	900
Luftdruck <sup>118</sup> in $hPa$	954	943	932	921	909
maximale Steighöhe des Wassers in $m$	9,75	9,63	9,52	9,40	9,29

**Tabelle 6.1.:** Maximale Steighöhe von Wasser in verschiedenen Höhenlagen <sup>119</sup>

## 6.2.2. Kavitation

Derartige Steighöhen des Wassers können praktisch nicht realisiert werden, da sich durch die Senkung des in der Saugleitung herrschenden Luftdrucks die Siedetemperatur des angesaugten Wassers verringert. Abbildung (6.6) zeigt den Zusammenhang zwischen Siedetemperatur und Druck, der über die Clausius-Clapeyron-Gleichung hergeleitet werden kann (siehe Kapitel 6.2.3).



**Abbildung 6.6.:** Dampfdruckkurve

<sup>118</sup>Berechnet nach der internationalen Höhenformel (Gleichung (6.9))

<sup>119</sup>Werte nach HAMMER/HAMMER/HAMMER (2002), S. 80 ff

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 1013 \text{ mbar}; & g &= 9,81 \frac{m}{s^2} \\
 \rho_{L,0} &= 1,293 \frac{kg}{m^3}; & \rho_W &= 998 \frac{kg}{m^3}
 \end{aligned}$$

Erreicht bzw. unterschreitet der statische Absolutdruck der im Schlauch befindlichen Luft den temperaturabhängigen Dampfdruck, kommt es zur örtlichen Ausbildung von Dampfgebieten, d.h. das Wasser beginnt zu sieden, es wird gasförmig<sup>120</sup>. Dieser Prozess wird als Kavitation bezeichnet. Die beim Sieden entstehenden Dampfblasen werden in der Strömung mitgeführt und implodieren, sobald der Druck die kritische Marke des Dampfdruckes wieder überschreitet. Befindet sich die Blase zu diesem Zeitpunkt in der Nähe einer Wand, so fällt die Blase in Form eines asymmetrischen Kollapses in sich zusammen (siehe Graphik).

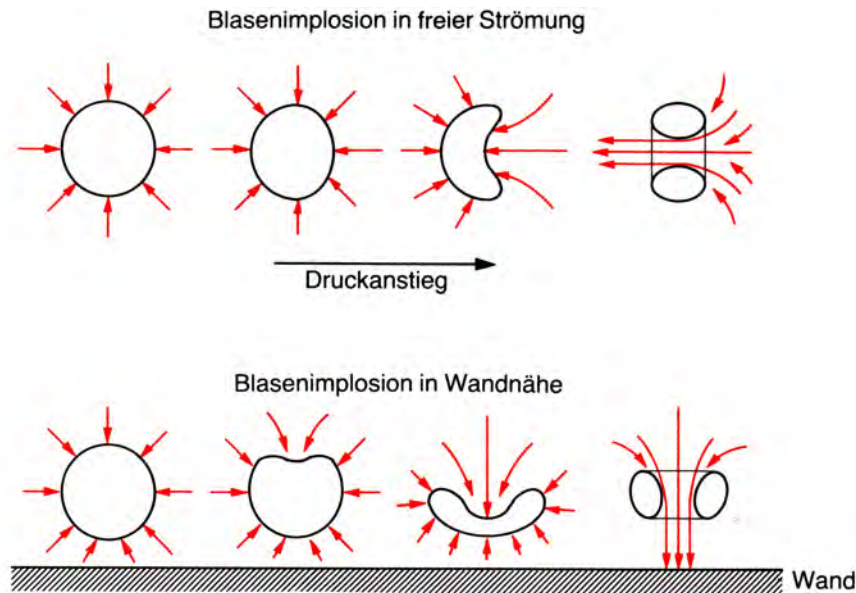


Abbildung 6.7.: Blasenimplosion in freier Strömung <sup>121</sup>

Durch die Druckänderung in der Mitte der Blase erfährt das umgebende Wasser eine Beschleunigung zum Blasenzentrum und schließlich in Richtung Wand. „Dabei entsteht ein mit großer Geschwindigkeit auf die Wand schießender Flüssigkeitsstrahl (Mikrojet), der die Wand mit einer schlagartigen Druckbelastung beaufschlagt“<sup>122</sup>.

„Das Auftreten von Kavitation ist eine Erscheinung, welche die Betriebssicherheit, die Lebensdauer und den Wirkungsgrad von Schiffpropellern, Wasserturbinen und Kreiselpumpen beeinträchtigt“<sup>123</sup>. Zur Vermeidung von Beschädigungen an der Pumpe und zur Gewährleistung einer ausreichenden Wasserversorgung obliegt die Aufgabe des für die Feuerlöschkreiselpumpe zuständigen Feuerwehrdienstleistenden (Maschinist genannt) darin, Ein- und Ausgangsdruck kontinuierlich zu beobachten und gegebenenfalls durch die Steuerung der Pumpendrehzahl einzugreifen.

<sup>120</sup>vgl. BOHL/ELMENDORF (2002), S. 49

<sup>121</sup>BOHL/ELMENDORF (2002), S. 49

<sup>122</sup>BOHL/ELMENDORF (2002), S. 53

<sup>123</sup>DIETZEL (1980), S. 44

### 6.2.3. Herleitung der Clausius-Clapeyron-Gleichung

Temperatur und Druck kennzeichnen den Aggregatzustand eines Stoffes. Generell sind die drei Zustände „fest“, „flüssig“ und „gasförmig“ zu unterscheiden. Häufig ist eine eindeutige Abgrenzung der jeweiligen Phasen allerdings nicht möglich. So besitzen einige Teilchen aufgrund der Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilung genügend Energie, um sich beispielsweise aus bei Raumtemperatur flüssigen Stoffen wie Wasser oder Benzin in den gasförmigen Zustand zu lösen. Der umgekehrte Prozess, d.h. die Bindung einzelner gasförmiger Teilchen an die Flüssigkeit, findet ebenso statt. „Phasengleichgewicht liegt vor, wenn zwei oder mehrere Phasen eines Systems in Berührung und dabei im thermodynamischen Gleichgewicht sind“<sup>124</sup>. In einem Zweiphasensystem sind die chemischen Potentiale von Flüssigkeit und Gas gleich<sup>125</sup>. Es gilt:

$$\mu(p(T), T) = \mu'(p(T), T) \quad (6.10)$$

Im Folgenden werden die Bezeichnungen  $\mu := \mu(p(T), T)$  und  $\mu' := \mu'(p(T), T)$  verwendet. Reversible Umwandlungen bei konstant gehaltener Temperatur und festem Druck bedürfen zumeist einer Zugabe bzw. Abfuhr von Wärme. Diese wird latente Wärme genannt und errechnet sich auf folgende Weise:

$$\delta Q = q\delta n = T(s - s')\delta n \quad (6.11)$$

$\delta Q$	=	latente Wärme	$s$ und $s'$	=	Entropien der beiden Phasen pro Teilchen
$q$	=	Wärmemenge pro umgewandeltem Teilchen	$\delta n$	=	Anzahl der überführten Teilchen
$T$	=	Temperatur			

Zur weiteren Berechnung ist die Einführung der Gibbs-Duhem-Beziehung notwendig. Sie lautet<sup>126</sup>:

$$\mu = e + pV - Ts \quad (6.12)$$

$e$  = Energie pro Teilchen

Aus

$$\frac{d\mu}{dT} = \frac{\partial\mu}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dT} + \frac{\partial\mu}{\partial T} \quad (6.13)$$

<sup>124</sup>BRENIG (1996), S. 139

<sup>125</sup>vgl. BRENIG (1996), S. 139

<sup>126</sup>vgl. BRENIG (1996), S. 110

folgt:

$$\begin{aligned}d\mu &= \frac{\partial\mu}{\partial p} \cdot dp + \frac{\partial\mu}{\partial T} dT \\d\mu &= Vdp - s dT\end{aligned}\tag{6.14}$$

In differentieller Form beschreibt die Gibbs-Duhem-Relation die Abhängigkeit der drei intensiven Variablen  $T$ ,  $p$  und  $\mu$ <sup>127</sup>.

Unter der Annahme eines konstanten Drucks gilt  $dp/dT = 0$ . Gleichung (6.13) kann vereinfacht werden:

$$\frac{d\mu}{dT} = \frac{\partial\mu}{\partial T} = -s \quad \Leftrightarrow \quad s = -\frac{\partial\mu}{\partial T}\tag{6.15}$$

Aus den Gleichungen (6.11) und (6.15) errechnet sich die latente Wärme  $q$ :

$$q = T(s - s') = -T \frac{\partial}{\partial T} [\mu - \mu']_{p=p(T)}\tag{6.16}$$

Eine Umformulierung des Phasengleichgewichts (Gleichung (6.10)) ergibt:

$$\mu = \mu' \quad \Leftrightarrow \quad \mu - \mu' \equiv 0\tag{6.17}$$

Differenzierung der Gleichung (6.17) nach  $T$  ergibt:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dT} (\mu - \mu') &= \frac{\partial}{\partial p} (\mu - \mu') \cdot \frac{dp}{dT} + \frac{\partial}{\partial T} (\mu - \mu') \stackrel{!}{=} 0 \\ \Leftrightarrow \quad -\frac{\partial}{\partial T} (\mu - \mu') &= \frac{\partial}{\partial p} (\mu - \mu') \cdot \frac{dp}{dT}\end{aligned}\tag{6.18}$$

Gleichung (6.18) eingesetzt in Gleichung (6.16) liefert die Differentialgleichung:

$$q = T \frac{\partial(\mu - \mu')}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dT}\tag{6.19}$$

Aus der Gibbs-Duhem-Beziehung (Gleichung (6.12)) lässt sich die partielle Ableitung  $\partial\mu/\partial p$  errechnen. Es gilt:

$$\frac{\partial\mu}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} (e + pV - Ts) = V$$

damit folgt für Gleichung (6.19)

$$q = T(V - V') \cdot \frac{dp}{dT} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{dp}{dT} = \frac{q}{T(V - V')}\tag{6.20}$$

Diese Gleichung wird auch als Gleichung von Clausius und Clapeyron bezeichnet.

<sup>127</sup>vgl. BRENIG (1996), S. 132

Im Spezialfall des Gleichgewichts eines flüssigen Körpers (Volumen  $V'$ ) mit seinem Gas (Volumen  $V$ ) ist das Volumen der Flüssigkeit im Verhältnis zum Volumen des Gases vernachlässigbar gering ( $V' \ll V$ ). Das Verhalten des Wasserdampfes kann entsprechend mit der Formel für das ideale Gas

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$n$  = Stoffmenge

$R$  = allgemeine Gaskonstante

angenähert werden. Sei zudem noch die Temperaturabhängigkeit der Verdampfungswärme  $q$  vernachlässigt, so lässt sich die Differentialgleichung (6.20) entsprechend lösen:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dT} &= \frac{q}{T \cdot V} \quad \text{mit} \quad V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} \\ \frac{dp}{dT} &= \frac{q \cdot p}{n \cdot R \cdot T^2} \\ \int_{p_0}^p \frac{1}{p} dp &= \int_{T_0}^T \frac{q}{n \cdot R \cdot T^2} dT \\ \ln \left| \frac{p}{p_0} \right| &= - \frac{q}{n \cdot R} \cdot \frac{1}{T} \Big|_{T_0}^T \\ p(T) &= p_0 \cdot \exp \left( - \frac{q}{n \cdot R} \cdot \frac{(T_0 - T)}{(T \cdot T_0)} \right) \end{aligned} \tag{6.21}$$

Nachfolgend ist in einer tabellarischen Übersicht der in einer Saugleitung minimal herrschende Luftdruck, so dass ein Sieden von Wasser ausbleibt, nach der vereinfachten Gleichung von Clausius und Clapeyron (Gleichung (6.21)) und die sich hieraus ergebene maximale Steighöhe von Wasser über die Formel

$$h_{max}(T) = \frac{p_0 - p(T)}{\rho_W \cdot g}$$

für ausgewählte Temperaturen berechnet. Der Atmosphärendruck wird hierbei als konstant (1013 hPa) angenommen.



Temperatur in °C	4	10	20	30	40	50
Luftdruck im Saugschlauch in <i>hPa</i>	11	16	28	49	82	133
maximale Steighöhe des Wassers in <i>m</i>	10,22	10,17	10,04	9,83	9,49	8,97
Temperatur in °C	60	70	80	90	100	
Luftdruck im Saugschlauch in <i>hPa</i>	210	322	482	706	1013	
maximale Steighöhe des Wassers in <i>m</i>	8,19	7,05	5,41	3,13	0,00	

**Tabelle 6.2.:** Maximale Steighöhe von Wasser bei verschiedenen Wassertemperaturen <sup>128</sup>

## 6.2.4. Versuch zum Thema „Kavitation“

### 6.2.4.1. Wasser zum Sieden bringen

(Lehrerversuch)

#### Benötigte Materialien:

- 1 Schale mit Wasser
- 1 Thermometer
- 1 Vakuumglocke mit Pumpe

#### Versuchsbeschreibung:

Unter der Vakuumglocke werden eine kleine Schale oder ein Glas mit Wasser sowie ein großes Thermometer platziert, dessen Temperaturfühler im Wasser liegt. Anschließend wird die Vakuumpumpe eingeschaltet und die in der Vakuumglocke enthaltene Luft abgeführt. Ist der maximal erzeugbare Unterdruck in der Glocke erreicht, kann die Pumpe ausgeschaltet werden. Danach wird ein Ventil geöffnet, durch das Luft ins Innere einströmt.

#### Darauf ist zu achten:

Vor der Durchführung des Versuches muss die Vakuumglocke auf Risse oder Sprünge überprüft werden. Wird eine Beschädigung im Glas festgestellt, so darf der Versuch unter

<sup>128</sup>Werte nach STUART/KLAGES (2006), S. 106 und HAMMER/HAMMER/HAMMER (2002), S. 80

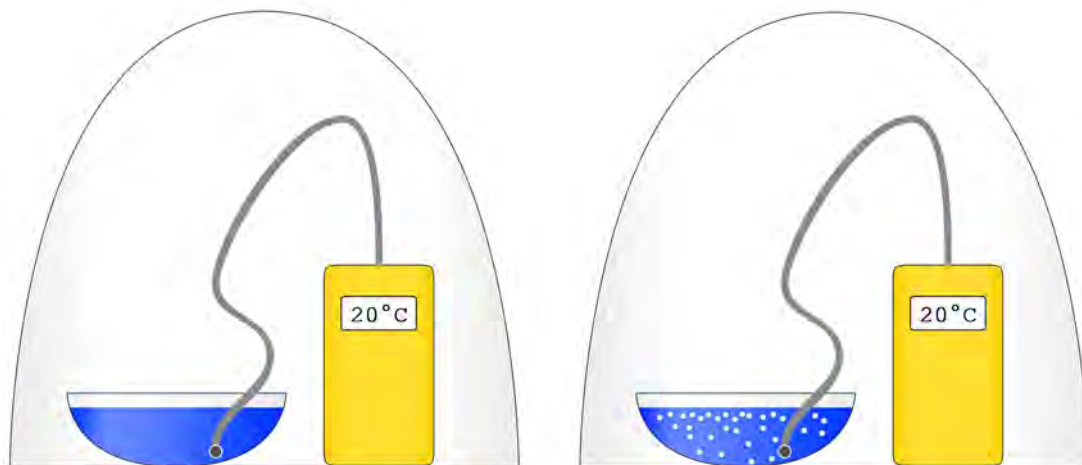
$$\begin{aligned}
 \frac{q}{m} &= 2257 \frac{J}{g} \\
 \frac{q}{n} &= 40,67 \frac{kJ}{\text{mol}} \\
 R &= 8,3145 \cdot 10^3 \frac{J}{K \cdot \text{kmol}}
 \end{aligned}
 \quad (\text{mit } n = \frac{m}{M} )$$

keinen Umständen durchgeführt werden, da die Instabilität des Materials droht. Die Vakuumlöcke kann in diesem Fall den äußerlich wirkenden Kräften nicht standhalten und implodiert. Die Splitter können dabei sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen. Wird eine in der Nähe stehende Person von diesen getroffen, kann es zu schweren bis lebensbedrohlichen Verletzungen kommen.

Beim Experimentieren ist auf eine vollständige Abdichtung der Vakuumlöcke zu achten, denn nur so kann ein ausreichender Unterdruck im Inneren erzeugt werden. Sehr gute Versuchsergebnisse werden bei leicht temperiertem Wasser erzielt.

### Beobachtung:

Nach einiger Zeit steigen Blasen in der Flüssigkeit auf. Wird der Druck in der Vakuumlöcke weiter herabgesetzt, siedet das Wasser. Wird ein Ventil geöffnet, so dass langsam Luft in die Vakuumlöcke einströmt, steigen immer weniger Blasen in der Flüssigkeit auf, bis der Prozess komplett zum Erliegen kommt. Die Temperatur des Wassers ändert sich während des gesamten Experimentes nicht.



**Abbildung 6.8.:** Links: Wasser bei Raumtemperatur und Atmosphärendruck  
Rechts: Wasser bei Raumtemperatur und vermindertem Luftdruck

### Erklärung:

Durch das Evakuieren der Luft aus der Vakuumlöcke sinkt der unter ihr herrschende Luftdruck. Gemäß der mit Gleichung (6.21) berechneten Dampfdruckkurve geht dieser Druckabfall mit einer Siedepunktverschiebung einher. Ist der spezifische Druck erreicht, bei dem der Siedepunkt mit der Wassertemperatur übereinstimmt, beginnt das Wasser zu kochen. Lässt man Luft durch das Absperrventil einströmen, steigt der Luftdruck in der Löcke langsam wieder an. Damit verschiebt sich der Siedepunkt von der Wassertemperatur weg in Richtung höherer Temperaturen. Folglich können keine in der Flüssigkeit aufsteigende Blasen mehr beobachtet werden.

**Intention:**

Durch den Versuch erhalten die Schülerinnen und Schüler einen Einblick in den in einer Pumpe ablaufenden Kavitationsprozess. Das Sieden des Wassers bei Raumtemperatur steht im Widerspruch zur Alltagserfahrung, nach der Wasser ab einer Temperatur von 100°C kocht und erzeugt demzufolge offene Fragen beim Beobachter. Ziel ist auch hier, das Interesse am Thema Druck zu fördern und vorhandenes bzw. erworbenes Wissen mit Phänomenen der Wärmelehre zu verknüpfen.



## 7. Druckerzeugung in einer Pumpe

Neben der Wasserentnahme zählt die Druckerzeugung zu den Hauptaufgaben einer Feuerlöschkreiselpumpe. Für die Erarbeitung eines detaillierten Verständnisses dieser Funktion einer solchen Pumpe ist eine Zerlegung in ihre Bestandteile sowie eine schrittweise Analyse dieser Teile hilfreich. Abbildung 7.1 zeigt den Querschnitt einer Feuerlöschkreiselpumpe.

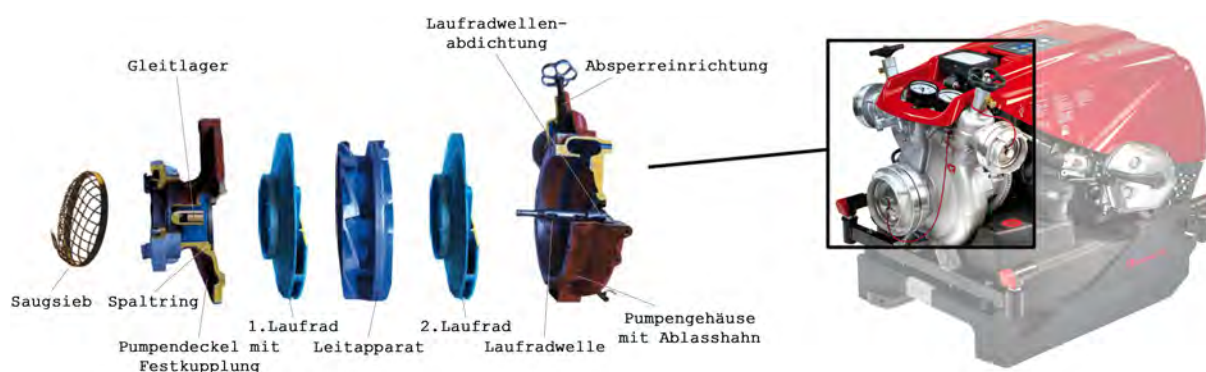


Abbildung 7.1.: Aufbau einer Feuerlöschkreiselpumpe <sup>129</sup>

Die beiden zentralen Bauteile zur Druckerzeugung sind die Laufräder und der Leitapparat. Wasser, das durch den Saugeingang ins Pumpeninnere gelangt, trifft auf ein schnell rotierendes Laufrad und wird von diesem beschleunigt. Durch diesen Prozess wird das Wasser nach außen in den Leitapparat geschleudert. Abbildung 7.2 links zeigt ein Modell dieses Vorganges.

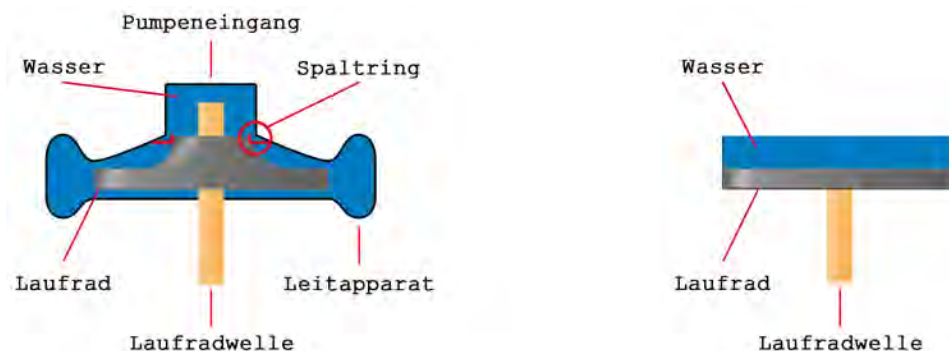


Abbildung 7.2.: Links: Modell einer Feuerlöschkreiselpumpe  
Rechts: Vereinfachte Darstellung <sup>130</sup>

<sup>129</sup>Bearbeitetes Bild: Originale nach STAATLICHE FEUERWEHRSSCHULE WÜRZBURG (2011), S. 8 und ROSENBAUER INTERNATIONAL AG (2007)

<sup>130</sup>Informationen zur Graphik nach STAATLICHE FEUERWEHRSSCHULE WÜRZBURG (2011), S. 12

Zur einfacheren Berechnung des sich im Leitapparat einstellenden Druckes wird das Modell in den folgenden Punkten modifiziert (siehe Abbildung 7.2 rechts):

- Das Laufrad ist eine rotierende Scheibe
- Das Pumpengehäuse hat die Form eines Zylinders
- Die Rotationsachse ist vertikal ausgerichtet
- Die in der Pumpe enthaltene Wassermenge bleibt konstant

## 7.1. Ortsfunktion der Wasseroberfläche rotierender Flüssigkeiten

Wird ein mit Wasser gefüllter Zylinder mit Radius  $R$  um seine vertikale Achse in Rotation versetzt, so lässt sich ein Absinken der Flüssigkeit im Zentrum bei gleichzeitigem Anstieg des Wasserpegels zum Gefäßrand beobachten. Hierbei nimmt die Wasseroberfläche die Form eines Rotationsparaboloids an<sup>131</sup>. Die Tragweite dieses Effektes ist von der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Systems abhängig. In der nachfolgenden Abbildung 7.3 ist der Querschnitt des Oberflächenprofils einer mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotierenden Flüssigkeit als ein Kurvenzug in der  $r$ - $z$ -Ebene skizziert.

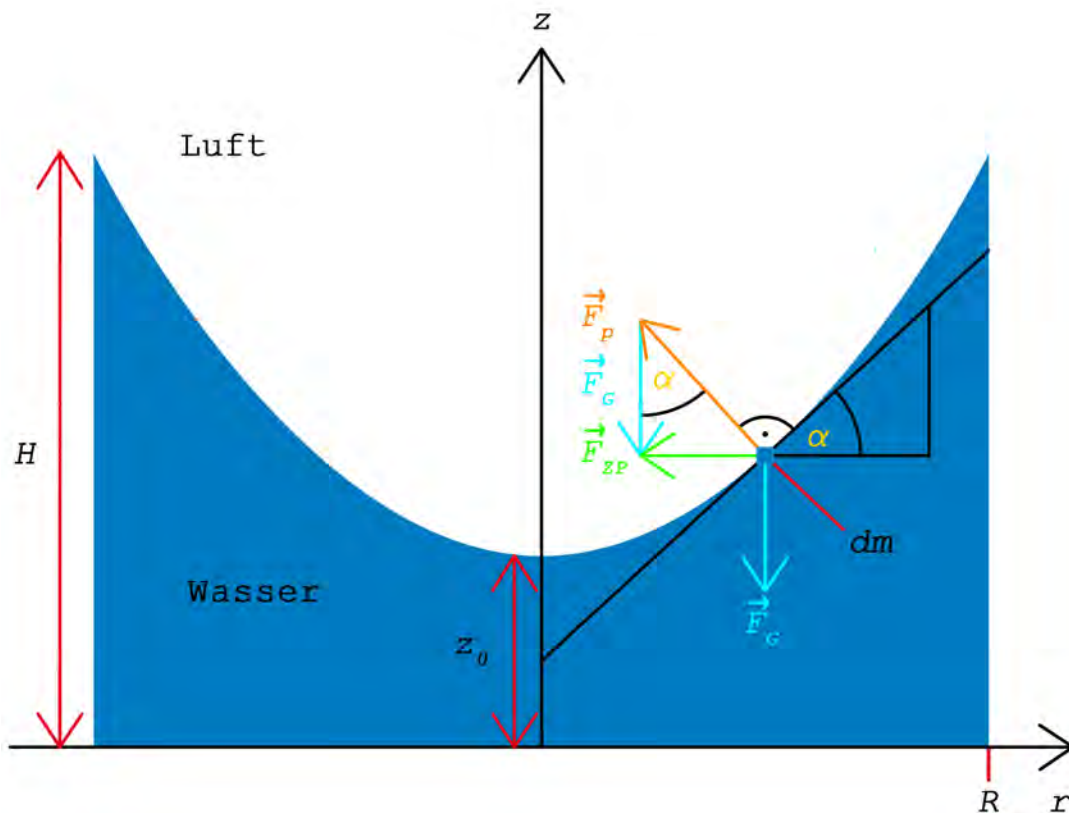


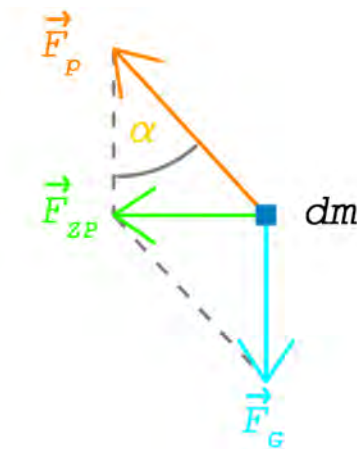
Abbildung 7.3.: Rotationsparaboloid

<sup>131</sup>vgl. STRAUMANN (2011), S. 8

$F_p$	=	Druckkraft	$dm$	=	Massenstück
$F_G$	=	Gewichtskraft	$z_0$	=	Höhe des Wasserpegels im Zentrum
$F_{ZP}$	=	Zentripetalkraft	$H$	=	Höhe des Wasserpegels am Rand

Aus der objektiven Sicht eines außenstehenden Beobachters bewegt sich eine Wassermenge  $dm$  bei Rotation des Zylinders stets auf einer Kreisbahn. Damit sich die Wassermenge entlang der Kreislinie fortbewegt, ist eine Zentripetalkraft  $F_{ZP}$  notwendig, die aus den wirkenden Kräften (Gewichtskraft  $F_G$  und Druckkraft  $F_p$ ) resultiert:

$$\vec{F}_Z = \vec{F}_G + \vec{F}_p$$



**Abbildung 7.4.:** Kräfte auf eine Wassermenge  $dm$  aus der Sicht eines außenstehenden Beobachters

Bezeichnet  $\alpha$  den Winkel zwischen Gewichtskraft  $F_G$  und Druckkraft  $F_p$ , so gilt:

$$\tan(\alpha) = \frac{|\vec{F}_{ZP}|}{|\vec{F}_G|} = \frac{dm \cdot \omega^2 \cdot r}{dm \cdot g} = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \quad (7.1)$$

Die Tangente an die Wasseroberfläche bei  $r$  schneidet die  $r$ -Achse auch unter dem Winkel  $\alpha$  (siehe Abbildung 7.3). Die Steigung dieser Tangente ist:

$$\frac{dz}{dr} = \tan(\alpha) \stackrel{(7.1)}{=} \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$$

Durch Integrieren ergibt sich:

$$\boxed{z(r) = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \cdot r^2 + z_0} \quad (7.2)$$

In der Ortsfunktion (Gleichung (7.2)) beschreibt  $z_0$  den Wasserpegel im Rotationszentrum. Erreicht das Wasser seitlich (also bei  $z(R)$ ) eine maximale Höhe  $H$ , so lässt sich  $z_0$  in Abhängigkeit von  $H$  beschreiben. Dies hat den Vorteil, dass die Wasserhöhe seitlich leichter zu messen ist als im Zentrum.

$$\begin{aligned}
 z(R) &= H \\
 \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \cdot R^2 + z_0 &= H \\
 \Rightarrow \quad &\boxed{z_0 = H - \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \cdot R^2} \tag{7.3}
 \end{aligned}$$

Eingesetzt in Gleichung (7.2) folgt:

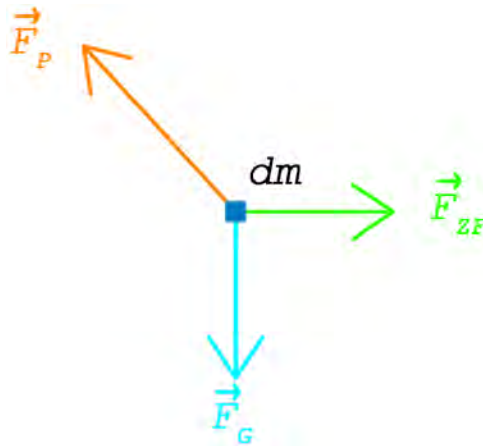
$$\begin{aligned}
 z(r) &= \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \cdot r^2 + H - \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} \cdot R^2 \\
 \Rightarrow \quad &\boxed{z(r) = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{g} (r^2 - R^2) + H} \tag{7.4}
 \end{aligned}$$

## 7.2. Druck in rotierenden Flüssigkeiten

Die Betrachtung einer rotierenden Flüssigkeit aus der Sicht eines außenstehenden Beobachters (Inertialsystem) bringt den Vorteil, dass direkt von den auf einen Körper wirkenden Kräften auf die resultierende Kraft geschlossen und so z.B. die Ortskurve für die Wasseroberfläche - wie Kapitel 7.1 zeigt - hergeleitet werden kann. Zur Bestimmung des in der Flüssigkeit herrschenden Druckes ist die Wahl dieses Bezugssystems jedoch weniger geeignet, da die Bewegung der Flüssigkeit die Berechnung erheblich verkompliziert. Aus diesem Grund ist es günstiger das Bezugssystem zu wechseln und die Flüssigkeit aus der Perspektive eines mitbewegten Beobachters (beschleunigtes Bezugssystem) zu betrachten. Für ihn bewegt sich das Wasser nicht. Die auf eine Wassermenge  $dm$  wirkenden Kräfte müssen sich somit nach dem ersten Newtonschen Gesetz kompensieren. Nun ist aber nur im Fall  $r = 0$  (entlang der Rotationsachse) die Summe aus Gewichtskraft  $\vec{F}_G$  und Druckkraft  $\vec{F}_p$  gleich Null. Für größere Radien ist die Einführung einer Scheinkraft (Zentrifugalkraft  $F_{ZF}$ ) notwendig, so dass gilt:

$$\vec{F}_p + \vec{F}_G + \vec{F}_{ZF} = 0 \tag{7.5}$$





**Abbildung 7.5.:** Kräfte auf eine Wassermenge  $dm$  aus der Sicht eines mitbewegten Beobachters

In der Hydrostatik gilt für die Druckkraft  $F_p$ <sup>132</sup>:

$$\frac{1}{V} \vec{F}_p = -\text{grad } p \quad (7.6)$$

Durch Kombination der Gleichungen (7.5) und (7.6) ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \vec{F}_p &= -\text{grad } p \\ \frac{1}{V} (-\vec{F}_{ZF} - \vec{F}_G) &= -\text{grad } p \\ \frac{1}{V} (\vec{F}_{ZF} + \vec{F}_G) &= \text{grad } p \\ \frac{1}{V} (m \omega^2 r \vec{e}_r - m g \vec{e}_z) &= \text{grad } p \\ \rho \omega^2 r \vec{e}_r - \rho g \vec{e}_z &= \text{grad } p \\ \rho \omega^2 r \vec{e}_r - \rho g \vec{e}_z &= \frac{\partial p}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{e}_z \end{aligned}$$

Durch einen Koeffizientenvergleich folgt:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \omega^2 r \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Durch Integration ergibt sich:

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 + f_1(z) \\ p &= -\rho g z + f_2(r) \end{aligned}$$

<sup>132</sup>GERTHSEN (2010), S. 115

Für den Druck folgt somit:

$$p = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 - \rho g z + C \quad \text{mit } C \in \mathbb{R}$$

Der am Ort  $r = (0, 0)$  herrschende Druck setzt sich aus dem Schweredruck des darüberliegenden Wassers und dem Atmosphärendruck zusammen. Es gilt:

$$C = p(0, 0) = \rho g z_0 + p_A$$

Demnach gilt für den Druck

$$\boxed{p(r, z) = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 - \rho g z + \rho g z_0 + p_A} \quad (7.7)$$

## 8. Wasserförderung

In manchen Einsatzszenarien ist die in der Nähe verfügbare Löschwasserversorgung nicht ausreichend, um eine erfolgreiche Brandbekämpfung gewährleisten zu können. In einem solchen Fall ist es notwendig, Wasser von einer weit entfernten Bezugsquelle zum Einsatzort zu befördern. Für den Transport von Wasser gibt es im Bereich der Feuerwehr verschiedene Druckschläuche, die sich in ihrem Durchmesser voneinander unterscheiden (siehe Tabelle 8.1).

Kurzzeichen	Innendurchmesser in <i>mm</i>	verfügbare Schlauchlängen in <i>m</i>			
		5	15	20	35
D 25	25	5	15		
C 42	42		15	20	
C 52	52		15	20	
B 75	75	5		20	35
A 110	110	5		20	

**Tabelle 8.1.:** Innendurchmesser und Längen verschiedener Druckschläuche <sup>133</sup>

Je nach Einsatzzweck sind unterschiedliche Arten von Schläuchen zu verwenden. Vor- und Nachteile lassen sich sowohl bei der Wasserförderung als auch bei der Wasserabgabe identifizieren. Durch die Verwendung von Schläuchen mit einem größeren Innendurchmesser (A- oder B-Schläuche) kann ein höherer Förderstrom bei einer geringeren Fließgeschwindigkeit erreicht werden, wodurch die Reibungsverluste zwischen Wasser und Schlauchgewebe reduziert werden. Bei der Wasserabgabe ergeben sich allerdings einige Nachteile, da diese Schläuche deutlich schwerer und unflexibler als C- oder D-Schläuche sind und somit den Feuerwehrdienstleistenden eine größere körperliche Anstrengung abverlangen. Beispielsweise muss ein am B-Schlauch angeschlossenes B-Strahlrohr von mindestens drei Einsatzkräften gehalten werden, ein an einem C-Schlauch angeschlossenes C-Strahlrohr hingegen nur von zweien <sup>134</sup>.

Auftretende Reibungsverluste und zu überwindende Höhenmeter schränken die Entfernung ein, über die das Wasser transportiert werden kann <sup>135</sup>. Die Stärke der auftretenden Reibungsverluste ist dabei insbesondere von der Art der Strömung durch die Leitung abhängig. In diesem Kapitel wird daher ein Schwerpunkt auf die unterschiedlichen Strömungsarten und ihren Einfluss auf den Wassertransport gelegt.

<sup>133</sup>Auszug aus einer Tabelle nach SCHOTT/RITTER (2009), S. 342

<sup>134</sup>vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 124

<sup>135</sup>Informationen zum Absatz vgl. WAGNER (2008), S. 13

## 8.1. Einordnung des Themas „Strömung“ in den Lehrplan

In der elften Jahrgangsstufe des bayerischen Gymnasiums sollen die Schülerinnen und Schüler die Kenntnisse, die sie bei der Behandlung verschiedener Teilbereiche der Physik im Unterricht erworben haben, „durch theoretische Grundlagen vertiefen und miteinander verknüpfen“<sup>136 137</sup>. Das Fach Biophysik, das den Schülerinnen und Schülern ab der Oberstufe als Alternative zum „klassischen“ Physikunterricht angeboten wird, ermöglicht ihnen Einblicke in physikalische Modelle und Arbeitsmethoden im Zusammenhang mit biologischen Systemen. Grundlagen der Strömungsmechanik können dabei im Rahmen der Grundlagen der Biomechanik im Wahlbereich behandelt werden. Ein Ziel der elften Jahrgangsstufe liegt in der Bewusstseinsgewinnung für das Vorhandensein verschiedener Komplexitätsgrade im Zusammenhang mit der Beschreibung unterschiedlicher Modelle. Durch die schrittweise Verkomplizierung laminarer Strömungen mit idealen Flüssigkeiten (Kapitel 8.2.1), über laminare Strömungen mit viskosen Flüssigkeiten (Kapitel 8.2.2) bis hin zu turbulenten Strömungen mit viskosen Flüssigkeiten (Kapitel 8.2.3) kann dieses Ziel erreicht werden.

## 8.2. Physikalische Grundlagen der Strömung

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die physikalischen Grundlagen der laminaren reibungsfreien Strömung inkompressibler Flüssigkeiten analysiert. Dabei wird insbesondere auf deren maximale Förderhöhe und -distanz eingegangen. Anschließend werden die Fälle der laminaren und turbulenten viskosen Strömung inkompressibler Flüssigkeiten behandelt und auf diese Weise das Thema Wasserförderung physikalisch komplettiert.

### 8.2.1. Laminare reibungsfreie Strömung inkompressibler Flüssigkeiten

Im Allgemeinen ist die Dichte  $\rho$  in allen Bereichen strömender Flüssigkeiten gleich<sup>138</sup>. In diesen daher als „inkompressibel“ bezeichneten Strömungen ist der Fluss  $\Phi$  konstant Null. Dieser Fluss  $\Phi$  beschreibt die durch eine geschlossene Fläche  $A$  durchtretende Flüssigkeitsmasse pro Zeiteinheit und lässt sich über die Gleichung

$$\Phi = \oint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \stackrel{139}{=} \int_V \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} dV \quad (8.1)$$

berechnen. Derartige divergenzfreie Strömungen werden auch als quellfrei bezeichnet.

---

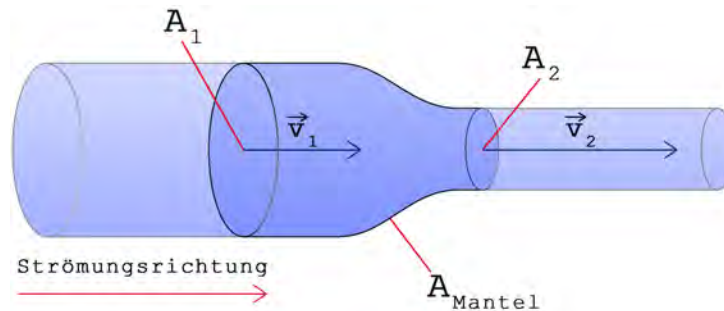
<sup>136</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004b)

<sup>137</sup>BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004b)

<sup>138</sup>Informationen zum Absatz vgl. GERTHSEN (2010), S. 113 ff

<sup>139</sup>Gaußscher Integralsatz

## 8.2.1.1. Kontinuitätsgleichung

Abbildung 8.1.: Strömung in einer sich verengenden Röhre <sup>140</sup>

In einer Stromröhre, wie es Abbildung 8.1 zeigt, kann durch die Wände keine Flüssigkeit ein- oder austreten. Demnach ist der Fluss durch diese Fläche gleich Null. Nach Gleichung (8.1) ergibt sich:

$$\oint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \int_{A_1} \rho \vec{v}_1 \cdot d\vec{A}_1 + \underbrace{\int_{A_{\text{Mantel}}} \rho \vec{v}_{\text{Mantel}} \cdot dA_{\text{Mantel}}}_{=0} + \int_{A_2} \rho \vec{v}_2 \cdot d\vec{A}_2 \stackrel{!}{=} 0$$

$$\Rightarrow \int_{A_1} \rho \vec{v}_1 \cdot d\vec{A}_1 = - \int_{A_2} \rho \vec{v}_2 \cdot d\vec{A}_2$$

$$\Rightarrow \boxed{A_1 v_1 = A_2 v_2} \quad (\text{Kontinuitätsgleichung}) \quad (8.2)$$

Diese Gleichung gilt auch unter Berücksichtigung von Reibungsverlusten.

## 8.2.1.2. Bernoulli-Gleichung

Die in einem System enthaltene Gesamtenergie bleibt unter Ausschluss extern zugeführter Energien unverändert und setzt sich aus

- der kinetischen Energie:  $E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$
- der potentiellen Energie:  $E_{pot} = m g h$
- der Druck-Energie:  $E_{Druck} = p \frac{m}{\rho}$
- und der inneren Energie:  $U$

zusammen<sup>141</sup>. In den meisten Fällen liegen isotherme Zustände vor, so dass eine Änderung der inneren Energie vernachlässigt werden kann. „In einer reibungsfreien Strömung müssen die Summen der einzelnen Energieformen an jeder Stelle im System gleich sein“<sup>142</sup>.

<sup>140</sup>Informationen zur Graphik nach GERTHSEN (2010), S. 115

<sup>141</sup>Informationen zum Absatz vgl. WAGNER (2008), S. 14 ff

<sup>142</sup>WAGNER (2008), S. 14

Addition liefert:

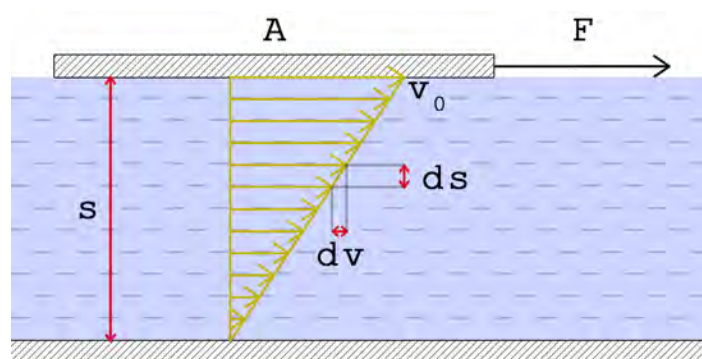
$$\begin{aligned}
 E_{kin} + E_{pot} + E_{Druck} &= konst. \\
 \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h + p \cdot \frac{m}{\rho} &= konst. \\
 \Rightarrow \boxed{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + p} &= konst. \quad (\text{Bernoulli-Gleichung}) \quad (8.3)
 \end{aligned}$$

Wird Wasser in vertikale Richtung befördert, so wird eine maximale Förderhöhe dann erreicht, wenn der im Wasser vorliegende relative Druck aufgehoben ist bzw. der absolute Druck dem Luftdruck entspricht und sich die Fließgeschwindigkeit bis zum Stillstand reduziert hat. In diesem Fall liegt die gesamte im System enthaltene Energie in Form von potentieller Energie vor.

In horizontaler Richtung kann ein nicht-viskoses Fluid theoretisch über eine beliebige Entfernung gefördert werden. Bei Betrachtung einer horizontal verlaufenden Röhre, die ihren Querschnitt wie in Abbildung 8.1 verändert, erhöht sich nach der Kontinuitätsgleichung (8.2) die Geschwindigkeit im schmaleren Teil. Aufgrund der Energieerhaltung, wie sie die Bernoulli-Gleichung charakterisiert, muss die in diesem Bereich gewonnene kinetische Energie aufgrund einer unveränderten Höhe zu einer Verringerung der Druckenergie führen.

### 8.2.2. Laminare viskose Strömung inkompressibler Flüssigkeiten

In realen Strömungen treten immer Reibungsverluste auf, die die Strömungseigenschaften viskoser Flüssigkeiten in Abhängigkeit ihrer Geschwindigkeit beeinflussen<sup>143</sup>. Zu differenzieren sind zwei Arten von Strömungen: Die laminaren Strömungen, die eher bei geringen Fließgeschwindigkeiten auftreten, und Turbulenzen, die in schnellen Strömungen die Berechnung erheblich erschweren. Aufgrund dieser Komplikation werden auftretende Strömungen meistens über Näherungsformeln beschrieben. Zunächst werden laminare Strömungen betrachtet.



**Abbildung 8.2.:** Geschwindigkeitsverteilung in einer viskosen Flüssigkeit zwischen einer bewegten Platte und einer festen Wand <sup>144</sup>

<sup>143</sup>Informationen zum Absatz vgl. GERTHSEN (2010), S. 123 ff

Wird eine Platte auf einer Flüssigkeitsschicht parallel zu einem festen Boden (Entfernung  $s$ ) bewegt (siehe Abbildung 8.2), so tritt in der Flüssigkeit Reibung auf. Um die Platte mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v_0$  entlang der Wasseroberfläche zu ziehen, ist folgende Kraft aufzuwenden<sup>145</sup>:

$$F = A \eta \frac{v_0}{s}$$

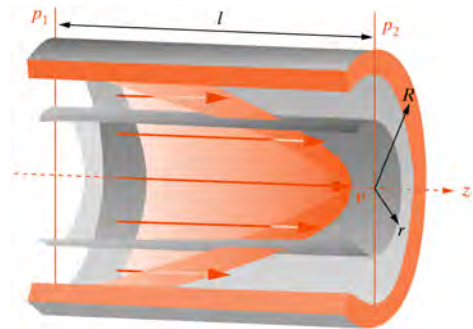
$A$	=	Fläche der Platte	$v_0$	=	Geschwindigkeit der Platte
$\eta$	=	dynamische Viskosität (nur von Temperatur und Druck abhängig)	$s$	=	Abstand zwischen Platte und Boden

Allgemein errechnet sich die Reibungskraft in einer Flüssigkeit, die auf ein Volumenstück  $dV$  wirkt, wie folgt:

$$\boxed{d\vec{F}_R = \eta \Delta\vec{v} dV} \quad (8.4)$$

Soll eine Flüssigkeit mit einer konstanten Geschwindigkeit horizontal durch ein Rohr strömen, so wird durch ein Druckgefälle in Strömungsrichtung eine zur Reibung entgegengesetzt gerichtete Kompensationskraft geschaffen<sup>147</sup>. Die durch das Druckgefälle resultierende Kraft auf ein Volumenelement  $dV$  ergibt sich zu:

$$d\vec{F}_p = -\vec{\nabla}p dV \quad (8.5) \quad \text{Abbildung 8.3.: Laminare Strömung in einem Rohr} \quad ^{146}$$



Damit die Flüssigkeit in einem Rohrabschnitt der Länge  $l$  und dem Radius  $r \leq R$  (siehe Abbildung 8.3) mit einer konstanten Geschwindigkeit fließt, müssen sich alle wirkenden Kräfte kompensieren. Es gilt:

$$\begin{aligned} \vec{F}_R + \vec{F}_p &= 0 \\ \int_V d\vec{F}_R + \int_V d\vec{F}_p &= 0 \\ \int_V \eta \Delta\vec{v} dV - \int_V \vec{\nabla}p dV &= 0 \end{aligned} \quad (8.6)$$

<sup>144</sup>Informationen zur Graphik vgl. BOHL/ELMENDORF (2002), S. 27

<sup>145</sup>vgl. WAGNER (2008), S. 27

<sup>146</sup>GERTHSEN (2010), S. 125

<sup>147</sup>Informationen zum Absatz vgl. GERTHSEN (2010), S. 115 und S124

Die Wahl von Zylinderkoordinaten  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z)$  vereinfacht die Berechnung. Für den Laplace-Operator und den Gradienten gelten dann:

$$\Delta \vec{v} = \Delta v_r \vec{e}_r + \Delta v_\varphi \vec{e}_\varphi + \Delta v_z \vec{e}_z$$

wobei

$$\Delta v_i(r, \varphi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_i}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2}$$

und

$$\vec{\nabla} p = \frac{\partial p}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{e}_z$$

Da die Flüssigkeit nur eine Geschwindigkeitskomponente in  $z$ -Richtung besitzt, sich lediglich in  $r$ -Richtung ändert und nur ein Druckgefälle in  $z$ -Richtung auftritt, vereinfacht sich Gleichung (8.6) zu:

$$\int_V \eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \vec{e}_z dV = \int_V \frac{\partial p}{\partial z} \vec{e}_z dV$$

Im Folgenden wird nur noch die  $z$ -Komponente betrachtet

$$\begin{aligned} \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^r \eta \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) dr d\varphi dz &= \int_0^l \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{\partial p}{\partial z} r dr d\varphi dz \\ 2 \pi l r \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} &= r^2 \pi \underbrace{(p(l) - p(0))}_{=:\Delta p < 0} \\ \Rightarrow v_z(r) &= \frac{r^2 \Delta p}{4 l \eta} + v_0 \end{aligned}$$

Aus der Randbedingung  $v(R) = 0$  folgt:

$$v_0 = -\frac{R^2 \Delta p}{4 l \eta}$$

und schließlich:

$$\boxed{v_z(r) = v_0 \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right)} \quad (8.7)$$

Der Volumenstrom - also die Menge an Wasser, die in einer vorgegebenen Zeit durch eine Fläche  $dA$  fließt - errechnet sich zu:

$$d\dot{V} = v dA$$



Durch das ganze Rohr der Länge  $l$  fließt somit der Volumenstrom:

$$\begin{aligned}
 J_V &= \int_A v \, dA = \int_0^{2\pi} \int_0^R v(r) \, r \, dr \, d\varphi = \frac{2 \pi \Delta p}{4 l \eta} \int_0^R r^3 - R^2 r \, dr = \\
 &= \frac{\pi \Delta p}{2 l \eta} \left( \frac{r^4}{4} - \frac{R^2 r^2}{2} \right)_0^R = \frac{\pi \Delta p}{2 l \eta} \left( -\frac{R^4}{4} \right) \\
 \Rightarrow & \boxed{J_V = -\frac{\pi R^4}{8 l \eta} \Delta p} \quad (\text{Gesetz von Hagen-Poiseuille}) \quad (8.8)
 \end{aligned}$$

Auflösen der Gleichung (8.8) nach  $\Delta p$  liefert den Druckabfall über eine Schlauchlänge  $l$  zu:

$$\boxed{|\Delta p| = \frac{8 l \eta J_V}{\pi R^4}} \quad \text{also} \quad \boxed{\frac{|\Delta p|}{l} = \frac{8 \eta J_V}{\pi R^4}}$$

Die nachfolgende Tabelle listet für einige ausgewählte Förderströme die nach Gleichung (8.8) berechneten Druckverluste einer laminaren Strömung in einem B-Schlauch (Durchmesser 75 mm) auf<sup>148</sup>:

Förderstrom $J_V$ in $l/min$	100	200	400	600	800
Druckverlust in $hPa$ je 100 m B-Schlauchleitung	2	4	9	13	17

**Tabelle 8.2.:** Druckverluste einer laminaren Rohrströmung bei einer viskosen Flüssigkeit in Abhängigkeit ausgewählter Förderströme

### 8.2.3. Turbulente Strömung inkompressibler Flüssigkeiten

In der Realität sind deutlich größere Druckabfälle entlang eines Feuerwehrschauches zu messen. Diese sind auf Turbulenzen zurückzuführen, die durch die hohe Fließgeschwindigkeit der Strömung entstehen und „mit einem starken Anwachsen des Strömungswiderstandes verbunden“<sup>149</sup> sind. Eine Berechnung der Druckverluste über die Hagen-Poiseuille Gleichung (8.8) ist demnach unzureichend. Nach der Gleichung von Darcy-Weisbach setzen sich die Strömungsverluste in Rohrleitungsanlagen „aus den Druckverlusten der geraden Leitungsabschnitte sowie der Summe aus Einzelverlusten, die aus Rohrleitungseinbauten wie Krümmern, Abzweigstücken, Querschnittsänderungen, Apparaten usw. herrühren“<sup>150</sup>, zusammen.

<sup>148</sup>Wert nach BÖSWIRTH (2007), S. 128

$$\eta = 1,00 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}$$

<sup>149</sup>GERTHSEN (2010), S. 129

<sup>150</sup>BÖSWIRTH (2007), S. 177

Es gilt<sup>151</sup>:

$$\Delta p = \frac{\lambda l}{d} \frac{\rho v^2}{2} + \sum \zeta \rho \frac{v^2}{2} \quad (8.9)$$

$\Delta p$	=	Druckverlust	$v$	=	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$\lambda$	=	Rohrreibungszahl	$l$	=	Länge der Rohrleitung
$\rho$	=	Dichte von Wasser	$\zeta$	=	Widerstandsbeiwerte für Einbauten
$d$	=	Rohrdurchmesser			

In einem geraden Rohrleitungstück ohne Einbauten, wie es ein B-Schlauch darstellt, vereinfacht sich Gleichung (8.9) zu:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{v^2}{2} \quad (8.10)$$

In Abhängigkeit von der Reynoldsschen Zahl

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}$$

gibt es unterschiedliche Näherungen für die Rohrreibungszahl  $\lambda$ . Feuerwehrschräuche lassen sich der Klasse der hydraulisch rauen Rohre zuordnen, für die folgende Näherungsformel angewendet werden kann<sup>152</sup>:

$$\lambda = \frac{1}{(2 \lg(3,71 \cdot \frac{d}{k}))^2} \quad (8.11)$$

$k$  = Wandrauigkeit

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Volumenstrom und der Querschnittsfläche des Schlauches zu:

$$v = \frac{J_V}{A} = \frac{J_V}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi} \quad (8.12)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (8.11) und (8.12) in Gleichung (8.10) zeigt auf, wie stark der Druckabfall vom Rohrdurchmesser abhängig ist:

$$\Delta p = \frac{1}{(2 \lg(3,71 \cdot \frac{d}{k}))^2} \cdot \frac{l \rho}{2 d} \cdot \frac{J_V^2 \cdot 16}{d^4 \pi^2} \sim \frac{1}{d^5} \quad (8.13)$$

Die nachfolgenden Tabellen listen für einige ausgewählte Förderströme die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverluste (berechnet nach den Gleichungen (8.12)

<sup>151</sup>vgl. GROTE/FELDHUSEN (2011), S. B49

<sup>152</sup>vgl. BÖSWIRTH (2007), S. 179

und (8.10)) einer turbulenten Strömung in einem B-Schlauch (Durchmesser 75 mm) und einem C-Schlauch (Durchmesser 52 mm) auf<sup>153</sup>:

Förderstrom $J_V$ in $l/min$	100	200	400	600	800
mittlere Strömungsgeschwindigkeit in $m/s$	0,38	0,75	1,51	2,26	3,02
Druckverlust in $hPa$ je 100 m B-Schlauchleitung	17	68	270	609	1082

**Tabelle 8.3.:** Druckverluste einer turbulenten Rohrströmung in einer B-Schlauchleitung in Abhängigkeit ausgewählter Förderströme

Förderstrom $J_V$ in $l/min$	100	200	400	600	800
mittlere Strömungsgeschwindigkeit in $m/s$	0,78	1,57	3,14	4,71	6,28
Druckverlust in $hPa$ je 100 m C-Schlauchleitung	115	460	1841	4142	7364

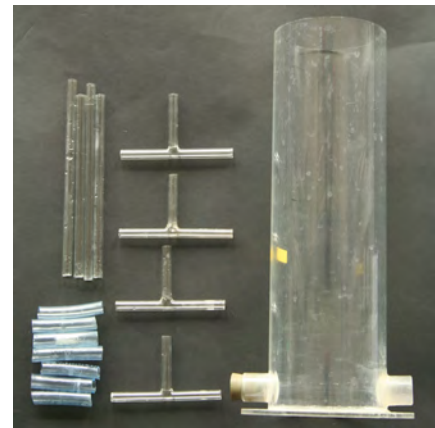
**Tabelle 8.4.:** Druckverluste einer turbulenten Rohrströmung in einer C-Schlauchleitung in Abhängigkeit ausgewählter Förderströme

## 8.2.4. Versuch zum Thema „Strömung“

### 8.2.4.1. Reibungsverluste in einer durchströmten Röhre

Benötigte Materialien:

- 4 dünne und lange Glasrohre
- 4 T-Stücke aus Glas
- Verbindungsschläuche aus Plastik
- 1 Gummistopfen
- 2 Bechergläser (Volumen ca. 700 ml)
- Wasser
- Kaliumpermanganat oder Eosin oder Lebensmittelfarbe
- Glaszylinder mit Ausflussöffnung unten



**Abbildung 8.4.:** Materialien

<sup>153</sup>Werte nach HAMMER/HAMMER/HAMMER (2002), S. 80 und LNTERTHAL/WILSKI (2004), S. 594

$$\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$$

$$k = 0,05 \text{ mm}$$

### Versuchsbeschreibung:

Aus den gegebenen Materialien ist ein Versuchsaufbau, wie in Abbildung 8.5 dargestellt, zu fertigen. Die kurzen Schlauchstücke dienen hierbei als Verbindungen der Glaselemente. Der fertige Versuchsaufbau ist so auf einem Tisch zu platzieren, dass das mit dem Gummistopfen verschlossene Ende der horizontalen Röhre wenige Zentimeter über die Tischkante hinausragt. Direkt darunter wird das leere Becherglas zum Auffangen der später austretenden Flüssigkeit gestellt. Das zweite Becherglas wird mit Wasser gefüllt und zur Färbung ein wenig Kaliumpermanganat hinzugegeben. Anschließend wird der Inhalt in das große Gefäß gefüllt. Nachdem die Flüssigkeit zur Ruhe gekommen ist, kann der Gummistopfen entfernt werden.

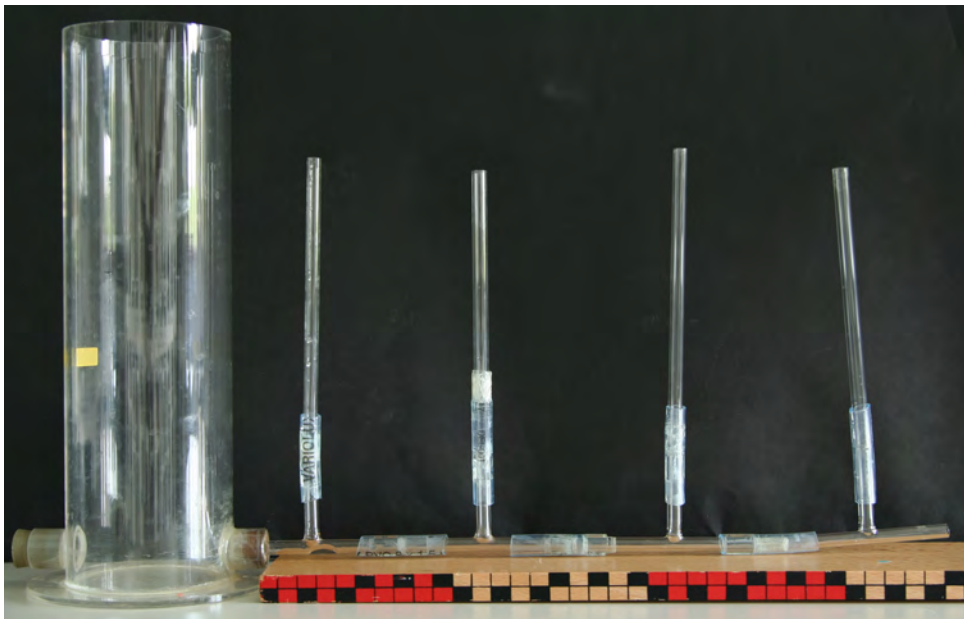


Abbildung 8.5.: Versuchsaufbau

### Darauf ist zu achten:

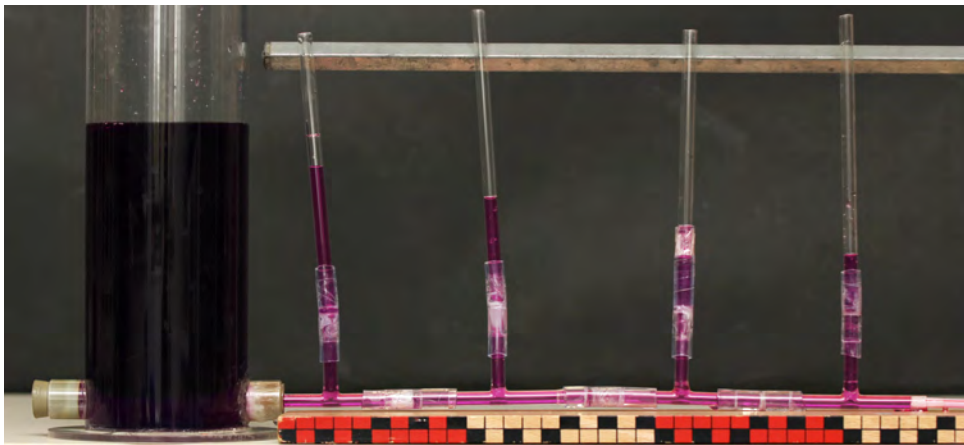
Ein sehr gutes Abdichten aller Steckverbindungen ist äußerst wichtig, um ein Überfluten der Arbeitsfläche und das Auftreten ungewollter Druckabfälle zu vermeiden. Durch die mehrfache Umwicklung der Glasenden mit Tesafilm vor dem Einführen in die Schlauchstücke kann dies erreicht werden.

### Beobachtung:

Zunächst ist der Wasserstand in allen fünf Gefäßen gleich. Nach dem Entfernen des Gummistopfens stellt sich unverzüglich gemäß Abbildung 8.7 ein linearer Abfall der Wassersäulen vom großen Behälter über die vier weiteren Gläser ein. Sobald der Gummistopfen die Austrittsöffnung wieder verschließt, gleicht sich der Wasserstand in allen Gefäßen wieder aus.



**Abbildung 8.6.:** Links: Druck entlang einer Röhre mit einer ruhenden Flüssigkeit  
Rechts: Druck entlang einer Röhre mit einer strömenden Flüssigkeit



**Abbildung 8.7.:** Versuchsdurchführung

**Erklärung:**

Sobald das Wasser zu fließen beginnt, treten - wie in den vorausgegangenen Kapiteln beschrieben - Reibungsverluste auf, die durch einen Druckabfall in der Flüssigkeit, veranschaulicht durch den Wasserstand in den Gläsern, entlang der durchströmten Röhre kompensiert werden.

**Intention:**

Der beschriebene Versuch eignet sich im besonderen Maße dazu, die Themengebiete „Druck“ und „Strömung“ mit dem anwendungsorientierten Fall der Druckverluste bei der Wasserförderung im Bereich der Feuerwehr zu verknüpfen und zu erklären. Insbesondere bietet es sich an, den Versuch per Video aufzuzeichnen und anschließend am PC zu analysieren. Im Folgenden wird dies am Beispiel des Programmes *measure dynamics* gezeigt.

**Auswertung des Versuches mit *measure dynamics*:**

In einem ersten Schritt ist die aufgezeichnete Videodatei zu importieren und eine Skalierung vorzunehmen. Nach der Wahl eines geeigneten Koordinatenursprungs (siehe Abbildung 8.8) und eines passenden Maßstabes (gegeben durch das eingeblendete Lineal) kann in einem nächsten Schritt mit der Videoanalyse begonnen werden.

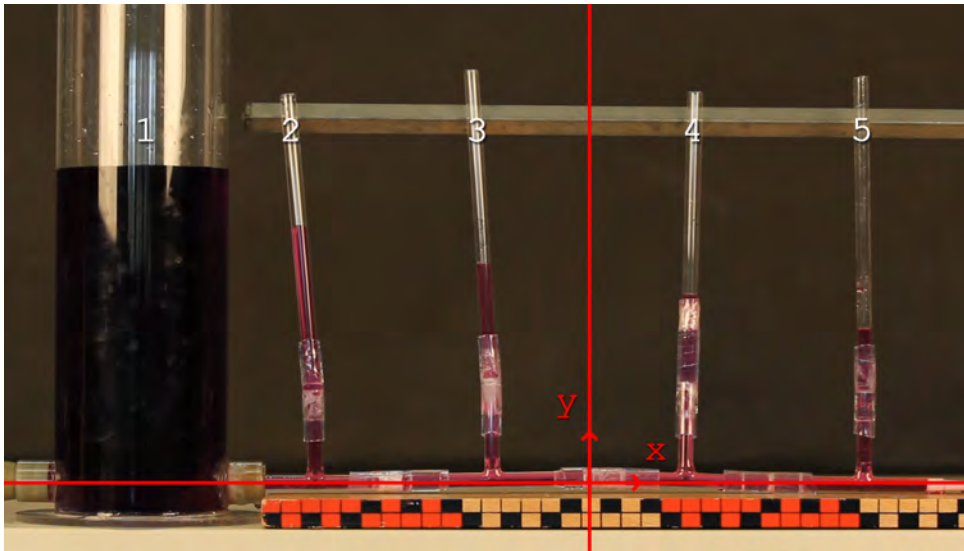


Abbildung 8.8.: Wahl des Koordinatenursprungs

Von Interesse sind jeweils die Abnahmen der einzelnen Wassersäulen in den fünf miteinander verbundenen Gefäßen. Werden die Wasseroberflächen in den jeweiligen Röhren nicht automatisch erkannt, so empfiehlt es sich die Schrittweite des Videos zu vergrößern und die Messpunkte manuell zu setzen. In einem Diagramm lassen sich die ermittelten Werte für die Höhen der Wassersäulen in Abhängigkeit von der Zeit visualisieren (siehe Abbildung 8.9). Es ist zu erkennen, dass die Abnahme der Wassersäulen in allen fünf Gefäßen linear erfolgt.

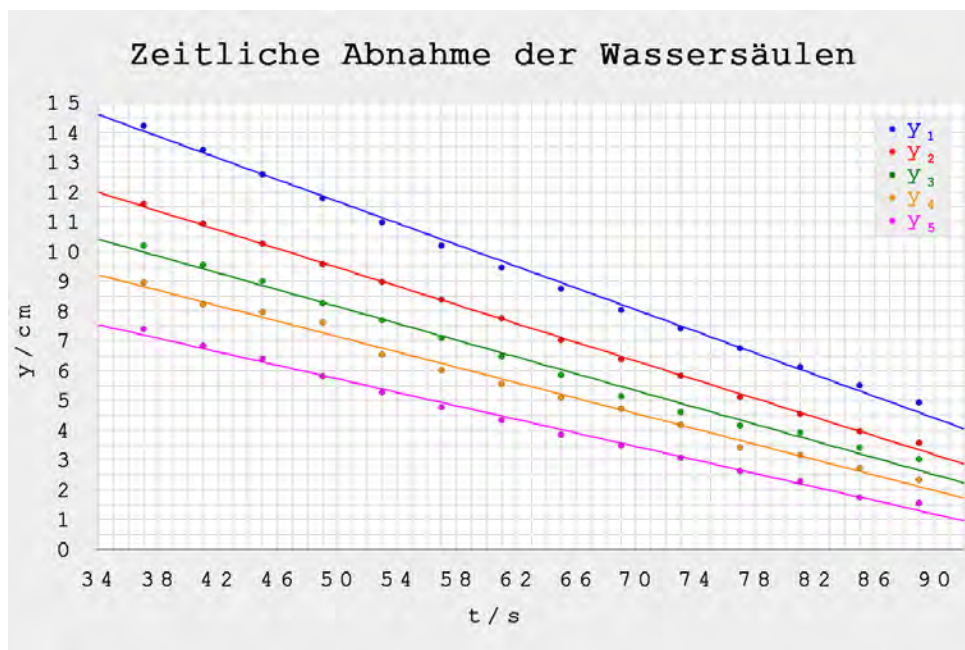
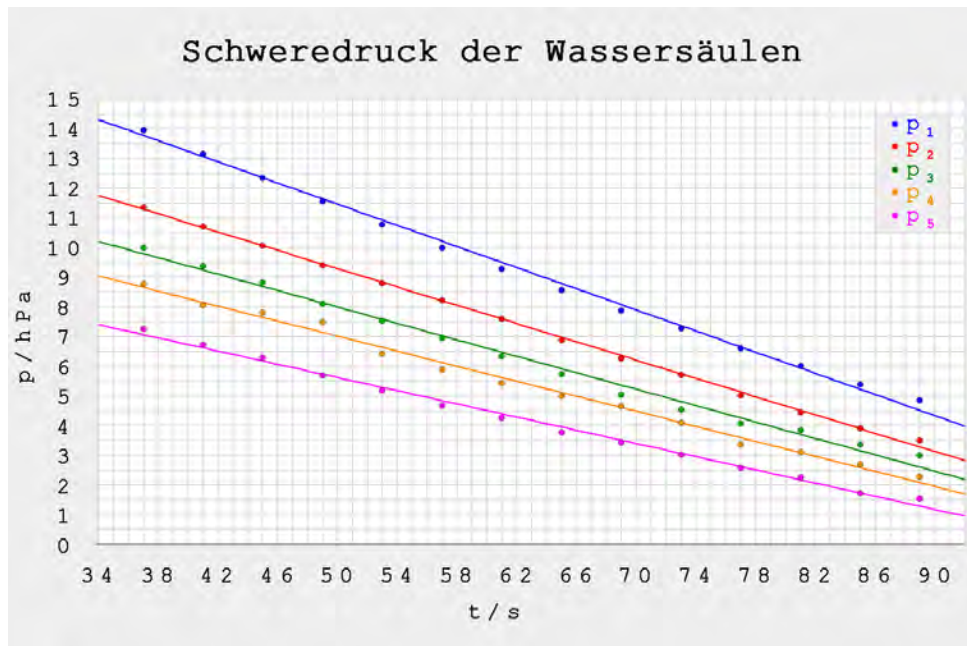


Abbildung 8.9.: Zeitliche Abnahme der Wassersäulen.  $y_i$  kennzeichnet hierbei den Wasserstand im  $i$ -ten Gefäß.



Über den Zusammenhang  $p = \rho \cdot g \cdot h$  ist es möglich, den Schweredruck am Boden der fünf Gefäße aus den gegebenen Werten zu errechnen. Eine Auftragung dieser Werte über die Zeit ergibt das folgende Diagramm:



**Abbildung 8.10.:** Schweredruck der Wassersäulen.  $p_i$  kennzeichnet hierbei den Schweredruck im  $i$ -ten Gefäß.

Zu Beginn des Versuches ist der Anteil des ausfließenden Wassers vermehrt auf die dem Ausgang naheliegende Gefäße zurückzuführen und nimmt mit zunehmender Entfernung ab. So verlieren die Wassersäulen vor allem in den Gefäßen 4 und 5 schnell an Höhe, der Wasserstand im Gefäß 1 bleibt hingegen nahezu unverändert. Nach diesem plötzlichen „Absacken“ ändert sich der Wasserpegel in allen Gefäßen nur noch langsam. Da die Gefäße 2 bis 5 im Versuch lediglich zur Druckmessung dienen und demnach sehr klein gewählt sind (dünne lange Röhren), kann davon ausgegangen werden, dass das im weiteren Verlauf des Versuches ausströmende Wasser hauptsächlich aus dem Gefäß 1 stammt. Nach der Kontinuitätsgleichung (8.2) lässt sich die Fließgeschwindigkeit  $v$  des in der horizontalen Röhre strömenden Wassers dann, wie folgt, annähern:

$$v = \frac{v_1 \cdot A_1}{A}$$

$v$	=	Fließgeschwindigkeit des Wassers in der horizontalen Röhre	$v_1$	=	Fließgeschwindigkeit des Wassers im 1. Gefäß
$A$	=	Querschnittsfläche der horizontalen Röhre	$A_1$	=	Querschnittsfläche des 1. Gefäßes

Der Druckabfall zwischen dem ersten und den folgenden Gefäßen lässt sich über die Beziehung

$$|\Delta p| = |p_i - p_1|$$

berechnen. Eine Auftragung der Druckabfälle über das Quadrat der Fließgeschwindigkeit ergibt das in Abbildung 8.11 dargestellte Diagramm.

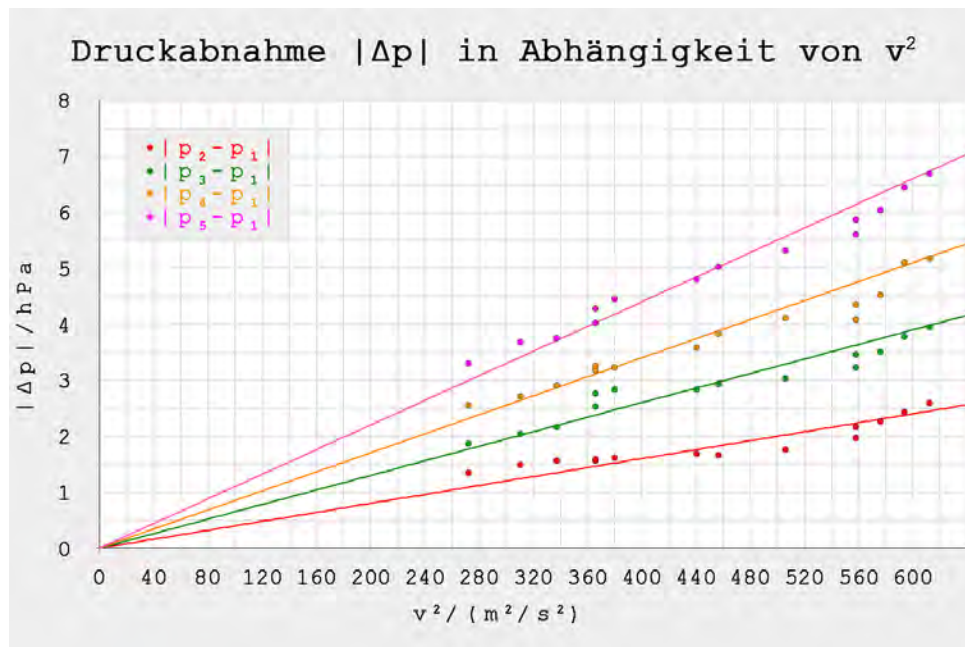


Abbildung 8.11.: Druckabnahme  $\Delta p$  in Abhängigkeit von  $v^2$

Es ist zu erkennen, dass die Druckdifferenz, wie nach Gleichung (8.10) zu erwarten war, im Rahmen der Messgenauigkeit direkt proportional zum Quadrat der Fließgeschwindigkeit ist.

### 8.3. Löschwasserversorgung über lange Strecken in der Praxis

Bei der Löschwasserförderung über weite Strecken ist für eine kontinuierliche Aufrechterhaltung des Enddrucks am Strahlrohr (ca. 5000 - 6000 hPa<sup>154</sup>) zu sorgen. Wie in den vorausgehenden Kapitel gezeigt, reduziert sich aber der Druck entlang des Weges. Zu einem gewissen Grad kann diese Druckreduktion durch eine Erhöhung des Ausgangsdrucks an der Pumpe kompensiert werden. Ist die Leistungsgrenze der Pumpe jedoch erreicht, müssen je nach Bedarf zusätzliche Pumpen in die Förderstrecke eingebaut werden. Schematisch gleicht der Aufbau der Schlauchstrecke der folgenden Skizze.

<sup>154</sup>vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 386



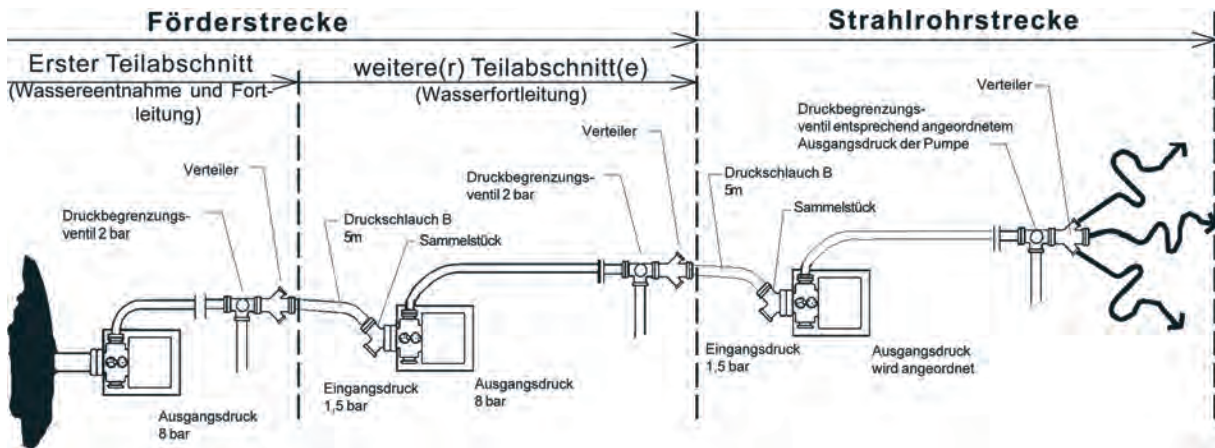


Abbildung 8.12.: Schaltschema für eine Wasserförderung über lange Schlauchstrecken <sup>155</sup>

Der Einbau eines Druckbegrenzungsventils vor jeder der folgenden Pumpen sorgt für einen konstanten Eingangsdruck des in die Pumpe fließenden Wassers. Dies ermöglicht die Erzeugung eines gleichbleibenden Ausgangsdrucks, wodurch Druckschwankungen verhindert werden, die zum Platzen von Schlauchleitungsstücken führen können. Durch den direkt an das Druckbegrenzungsventil angebauten Verteiler kann das Einströmen von Wasser in die nachfolgende Pumpe unterbunden werden. Dies ermöglicht es, defekte Pumpen auszutauschen.

Für eine möglichst effektive Positionierung einzelner Pumpen entlang einer Schlauchstrecke orientieren sich die Feuerwehreinsatzkräfte an Schätztabelle, die Informationen über den Förderstrom und die Druckverluste liefern. Beispielweise kann durch das Aufsummieren der verwendeten Strahlrohre der notwendige Förderstrom über die nachfolgende Tabelle bestimmt werden.

Druck am Strahlrohr in <i>hPa</i> :		4000	5000	6000	8000
		Förderstrom je Strahlrohr in <i>l/min</i>			
<b>C-Strahlrohr</b> <sup>156</sup>					
Ø	9 mm (mit Mundstück)	105	120	130	150
Ø	12 mm (ohne Mundstück)	190	215	235	270
<b>B-Strahlrohr</b> <sup>156</sup>					
Ø	16 mm (mit Mundstück)	340	380	415	480
Ø	22 mm (ohne Mundstück)	640	715	785	905

Tabelle 8.5.: Schätzwerte für Förderströme von C- und B-Strahlrohren <sup>157</sup>

<sup>155</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2009), S. 7

<sup>156</sup>Auf jedem Strahlrohr ist ein Mundstück aufgeschraubt, das wahlweise entfernt werden kann. Dabei weitet sich der Strahlrohrdurchmesser. Aus diesem Grund ist der Volumenstrom bei Strahlrohren mit Mundstück stets kleiner als bei Strahlrohren ohne Mundstück

<sup>157</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2009), S. 4

Aus dem Förderstrom ergeben sich schließlich die Druckverluste infolge von Reibung zu:

Förderstrom in $l/min$	600	800	1000	1200
Druckverlust in $hPa$ je 100 m B-Schlauchleitung	700	1200	1700	2400

**Tabelle 8.6.:** Schätzwerte für Druckverluste je 100 m B-Schlauchleitung <sup>158</sup>

Außerdem müssen Höhenunterschiede entlang der Schlauchleitung berücksichtigt werden. Ein Höhenunterschied von zehn Metern führt bei Steigungen zu einem Druckabfall von ca. 1000  $hPa$  und bei Gefällen zu einem Druckanstieg von ca. 1000  $hPa$ <sup>159</sup>. Ein weiteres Hilfsmittel neben den Tabellen stellen zudem Schätzlineale dar (siehe Abbildung 8.13). Diese helfen auf einfache und vor allem schnelle Weise, die Standorte für den Einbau von Pumpen zu bestimmen. Mit diesen Informationen lässt sich der Aufbau der Wasserversorgungsstrecke relativ schnell und zuverlässig planen.



**Abbildung 8.13.:** Schätzlineal für B-Druckschläuche gummiert <sup>160</sup>

In Gemeinden und Städten sind die Gebiete, an denen örtlich Löschwasser nur im begrenzten Maße vorhanden ist, in den meisten Fälle bekannt<sup>161</sup>. Die Feuerwehren sind dazu angehalten, für diese Regionen präventiv Einsatzpläne auszuarbeiten, die im Ernstfall aufgegriffen werden können. Ausmessungen, theoretische Berechnungen und die Realisierung einer solchen Langstreckenversorgung dienen der möglichst exakten Bestimmung

<sup>158</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2009), S. 6

<sup>159</sup>vgl. STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2009), S. 6

<sup>160</sup>STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2009), S. 26

<sup>161</sup>Informationen zum Absatz vgl. STAATLICHE FEUERWEHRSCHULE WÜRZBURG (2009), S. 8f

und Kennzeichnung der Standorte für den Einbau von Pumpen und Schläuche. In angemessenen zeitlichen Abständen gilt es, solche Pläne zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren.



# 9. Wasserabgabe

## 9.1. Maximale Wurfweite eines Strahlrohrs

Die bisherigen Kapitel beschrieben den Weg des Wassers von einer Löschwasserquelle bis zum Strahlrohr. In diesem Kapitel wird der Austritt des Wassers aus dem Strahlrohr behandelt. Dafür ist insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Wurfweite die Geschwindigkeit des ausströmenden Wassers kennzeichnend. Durch eine Verengung der Querschnittsfläche des Strahlrohrs wird eine höhere Fließgeschwindigkeit des Wassers erreicht (siehe Kapitel 8.2.1.1). Diese lässt sich aus dem Volumenstrom und dem Strahlrohrdurchmesser, wie folgt, berechnen:

$$v = \frac{4 \cdot J_V}{d^2 \cdot \pi} \quad (9.1)$$

$v$  = Fließgeschwindigkeit des Wassers       $J_V$  = Volumenstrom  
 $d$  = Strahlrohrdurchmesser

In der nachfolgenden Tabelle sind die Durchmesser verschiedener Strahlrohre, deren Volumenstrom sowie die nach Gleichung (9.1) berechneten Austrittsgeschwindigkeiten aufgelistet.

Strahlrohr <sup>162</sup>	Ø Strahlrohröffnung d in mm	Volumenstrom $J_V$ in $\frac{1}{\text{min}}$	Austrittsgeschwindigkeit $v_0 = \frac{4 \cdot J_V}{d^2 \cdot \pi}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
D	m.M.	4	33,16
	o.M.	6	29,47
C	m.M.	9	26,20
	o.M.	12	29,47
B	m.M.	16	33,16
	o.M.	22	35,08

**Tabelle 9.1.:** Volumenströme und Austrittsgeschwindigkeiten verschiedener Strahlrohre <sup>163</sup>

<sup>162</sup>Auf jedem Strahlrohr ist ein Mundstück aufgeschraubt, dass wahlweise entfernt werden kann. Dabei weitet sich der Strahlrohrdurchmesser. Aus diesem Grund ist der Volumenstrom bei Strahlrohren mit Mundstück (m.M.) stets kleiner als bei Strahlrohren ohne Mundstück (o.M.)

<sup>163</sup>Informationen zur Tabelle vgl. SCHOTT/RITTER (2009), S. 387

Die Berechnung der exakten Flugbahn des Wassers ist aufgrund von Luftwiderstand, Verformungen des Strahls durch Geschwindigkeitsänderungen und dem Abreißen des Strahls zu einzelnen Tropfen sehr komplex. Daher wird zur einfacheren Berechnung ein einzelner kugelförmiger Wassertropfen betrachtet, der seine Form während des gesamten Fluges nicht ändert.

Im Kapitel 9.3 wird in einer ersten Näherung der Einfluss der Luftreibung vernachlässigt, um so ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Flugbahn zu erstellen. Anschließend werden für verschiedene Strahlrohre die theoretisch erreichbaren maximalen Wurfweiten mit den Werten, die Hersteller von Strahlrohren angeben, verglichen.

In einer zweiten Näherung (siehe Kapitel 9.4) wird der Einfluss der Luftreibung berücksichtigt. Zur Aufstellung eines mathematischen Modells ist eine Klassifikation der aus dem Strahlrohr austretenden Wassertropfen durchzuführen, da diese in Abhängigkeit ihrer Größe unterschiedliche Flugeigenschaften aufweisen. Kleine und langsame Tropfen werden nach dem Stokesschen Reibungsgesetz durch die Kraft<sup>164</sup>

$$F_R = -6 \pi \eta v r \quad (9.2)$$

$\eta$	=	dynamische Viskosität von Luft	$v$	=	Geschwindigkeit des Wassertropfens
$r$	=	Radius des Wassertropfens			

gebremst. Auf schnelle oder aber auch größere Tropfen wirkt die Newtonsche Reibungskraft<sup>165</sup>:

$$F_R = \frac{1}{2} c_W \rho_L A v^2 \quad (9.3)$$

$c_W$	=	Widerstandsbeiwert	$A$	=	Stirnfläche Wassertropfen
$\rho_L$	=	Dichte der Luft	$v$	=	Geschwindigkeit des Tropfens

Die hohen Geschwindigkeiten (ca.  $30 \frac{m}{s}$ , siehe Tabelle 9.1) der aus dem Strahlrohr austretenden Wassertropfen legen den Schluss nahe, dass diese durch Newtonsche Reibung verlangsamt werden. Eben dieser Fall sei bei der zweiten Näherung angenommen.

## 9.2. Einordnung des Themas „Wurfweite“ in den Lehrplan

Im Lehrplan des achtstufigen bayerischen Gymnasiums bietet es sich an, in der zehnten Jahrgangsstufe mehrdimensionale Bewegungen am Beispiel des waagrechten Wurfes ohne Luftreibung zu behandeln<sup>166</sup>. Die Betrachtung der Flugbahn eines aus einem Strahlrohr

<sup>164</sup>vgl. KILIAN/WEBER (2000b), S. 175

<sup>165</sup>vgl. KILIAN/WEBER (2000a), S. 103

<sup>166</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004a)

austretenden Wassertropfens (bei Vernachlässigung der Luftreibung; siehe Kapitel 9.3) basiert auf den gleichen physikalischen Grundüberlegungen wie der waagrechte Wurf. Darüber hinaus schafft er die Möglichkeit, dass die Schülerinnen und Schüler die ihnen bekannten mathematischen Beschreibungen für idealisierte Bewegungen eigenständig auf neue Problemstellungen übertragen.

Ein Ziel bei der Analyse der auf den Tropfen wirkenden Kräfte ist die Einsicht, „dass die [sich] aus der Gesamtkraft und dem 2. Newton’schen Gesetz [...] ergebende Bewegungsgleichung gelöst werden muss, um Vorhersagen für die Bewegung zu ermöglichen“<sup>167</sup>. In einem weiteren Schritt ist den Schülern aufzuzeigen, dass das betrachtete Modell einen idealisierten Fall darstellt, der in der Realität nur bedingt anzuwenden ist. Spätestens durch den Vergleich der theoretisch berechneten Werte für die Wurfweiten unterschiedlicher Strahlrohre mit den Herstellerangaben (siehe Tabelle 9.2) wird dieser Sachverhalt augenscheinlich verdeutlicht.

Eine genauere Beschreibung des Bewegungsablaufes wird durch die Berücksichtigung der Luftreibung erzielt<sup>168</sup>. Allerdings stellen die zur Lösung der Bewegungsgleichung notwendigen mathematischen Mittel Anforderungen an den Unterricht, die im Rahmen des Lehrplans wie der den Schülern zur Verfügung stehenden mathematischen Kenntnissen nicht bewältigt werden können. Dieses Problem kann umgangen werden, indem die Bewegungsgleichung durch ein einfaches numerisches Verfahren (z.B. Eulerverfahren) gelöst wird. Dieses Verfahren ist ebenfalls Teil des Lehrplans für die zehnte Jahrgangsstufe. Ein weiterer Vorteil dieser Methode liegt in der Reduktion der mathematischen Schwierigkeiten. Durch die Vereinfachungen können komplexe Phänomene aus Natur und Technik für den Unterricht aufbereitet werden, die eigentlich das Schulniveau überschreiten und deshalb bislang nicht behandelbar waren.

In der konkreten Umsetzung bedeutet dies, dass die Schülerinnen und Schüler „zunächst ohne Computer, aber mit Hilfe von Taschenrechnern, [...] ein Rechenformular erstell[en]“<sup>169</sup> müssen, um die Theorie hinter dem Verfahren zu verstehen. In einem weiteren Schritt werden in einem Tabellenkalkulationsprogramm oder einer Modellbildungssoftware die Rechenoperationen definiert, um umfangreiche Berechnungen dem Computer zu überlassen. Der große Vorteil dieser Methodik gegenüber der Verwendung fertiger Simulationsprogramme liegt darin, „dass die Schüler die physikalischen Annahmen für das Modell selbst formulieren müssen“<sup>170</sup>.

### 9.3. Flugbahn des Wasserstrahls ohne Luftreibung

Zur Berechnung der Flugbahn werden horizontale und vertikale Bewegung separat betrachtet (Superpositionsprinzip).

---

<sup>167</sup>BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004a)

<sup>168</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004a) und SCHECKER/WESSELS (2000), S. 1 ff

<sup>169</sup>SCHECKER/WESSELS (2000), S. 1

<sup>170</sup>SCHECKER/WESSELS (2000), S. 3

In x-Richtung gilt:

$$\begin{aligned} F_x &= 0 \\ m \cdot a_x &= 0 \\ \Rightarrow v_x(t) &= v_{x,0} \\ \Rightarrow x(t) &= v_{x,0} \cdot t \end{aligned}$$

In y-Richtung gilt:

$$\begin{aligned} F_y &= F_G \\ m \cdot a_y &= -m \cdot g \\ \Rightarrow v_y(t) &= -g \cdot t + v_{y,0} \\ \Rightarrow y(t) &= -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_{y,0} \cdot t \end{aligned}$$

Durch Kombination beider Ortsgleichungen ergibt sich für die y-Komponente des Ortes in Abhängigkeit der x-Komponente des Ortes der folgende Zusammenhang:

$$y(x) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{g}{v_{x,0}^2} \cdot x^2 + \frac{v_{y,0}}{v_{x,0}} \cdot x \quad (9.4)$$

Die Darstellung dieser Bahnkurve gleicht einer Parabel, die nachfolgend skizziert ist.



**Abbildung 9.1.:** Flugbahn eines Wassertropfens ohne Luftreibung.

Nachdem der Wassertropfen das Strahlrohr verlassen hat, bewegt er sich also auf einer parabelförmig Bahn (siehe Abbildung 9.1) und trifft nach einer Zeit  $T$  auf dem Boden auf. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Tropfen in der Höhe  $y(T) = 0$ . Die Flugdauer  $T$  errechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} y(T) &= 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot g \cdot T^2 + v_{y,0} \cdot T &= 0 \\ \stackrel{T \neq 0}{\Rightarrow} T &= \frac{2 \cdot v_{y,0}}{g} \end{aligned}$$

Somit ergibt sich eine maximale Wurfweite  $x_{max}$  zu:

$$\boxed{x_{max}(v_{x,0}, v_{y,0}) = x(T) = v_{x,0} \cdot \frac{2 \cdot v_{y,0}}{g}} \quad (9.5)$$



Nach dem Satz von Pythagoras besteht zwischen  $v_{x,0}$ ,  $v_{y,0}$  und  $v_0$  der Zusammenhang:

$$v_0^2 = v_{x,0}^2 + v_{y,0}^2 \quad \Rightarrow \quad v_{y,0} = \sqrt{v_0^2 - v_{x,0}^2}$$

Demnach lässt sich die maximale Wurfweite umformulieren zu

$$x_{max}(v_{x,0}) = v_{x,0} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{v_0^2 - v_{x,0}^2}}{g} \quad (9.6)$$

Von Interesse ist, unter welchem Winkel das Wasser das Strahlrohr verlassen muss, um eine maximale Reichweite zu erzielen. Eine Extremwertbetrachtung der Gleichung (9.6) liefert:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial v_{x,0}} x_{max} &= \frac{2 \cdot \sqrt{v_0^2 - v_{x,0}^2}}{g} - \frac{2v_{x,0}^2}{g \cdot \sqrt{v_0^2 - v_{x,0}^2}} \stackrel{!}{=} 0 \\ & \quad (v_0^2 - v_{x,0}^2) - v_{x,0}^2 = 0 \\ & \quad \Rightarrow v_{x,0} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Eine maximale Reichweite wird demnach genau dann erreicht, wenn vertikale und horizontale Geschwindigkeit gleich groß sind. Dies ist bei einem Abschusswinkel von  $45^\circ$  gegeben. Für die maximale Wurfweite ergibt sich somit der nachfolgende Wert.

$$\boxed{x_{max} = \frac{v_0^2}{g}} \quad (9.7)$$

Ausgehend von Gleichung (9.7) und Tabelle (9.1) ergeben sich die in Tabelle 9.2 aufgeführten Wurfweiten. Vergleicht man die berechneten Werte für die Wurfweite mit den Herstellerangaben, ergeben sich sehr große Abweichungen. Dies zeigt deutlich, dass weitere extern wirkende Kräfte einen großen Einfluss ausüben.

Strahlrohr	Ø Strahlrohröffnung in mm	Wurfweite nach Berechnung in m	Wurfweite nach Hersteller in m
D m.M.	4	112	14
	6	89	16
C m.M.	9	70	24
	12	89	26
B m.M.	16	112	30
	22	125	37

**Tabelle 9.2.:** Wurfweiten verschiedener Strahlrohre <sup>171</sup>

<sup>171</sup>Berechnung der Wurfweiten nach Gleichung (9.7) und Tabelle 9.1. Herstellerangaben vgl. AWG - FITTINGS GMBH (2011), S. 1

## 9.4. Flugbahn des Wasserstrahls mit Luftreibung

Unter Berücksichtigung der Luftreibung verkompliziert sich das mathematische Modell für den schiefen Wurf. Im Folgenden sei - wie bereits im Kapitel 9.1 angeführt - angenommen, dass die aus dem Strahlrohr austretenden Wassertropfen durch Newtonsche Reibung gebremst werden. Zur Berechnung der Flugbahn einzelner Tropfen werden auch hier horizontale und vertikale Bewegung separat betrachtet (Superpositionsprinzip).

**In x-Richtung gilt:**

$$F_x = F_{Luft,x}$$

$$m a_x = -\frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \frac{v_x}{v}$$

**In y-Richtung gilt:**

$$F_y = F_G + F_{Luft,y}$$

$$m a_y = -m g - \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \frac{v_y}{v}$$

Das explizite Lösen dieser Differentialgleichungen ist theoretisch möglich, erfordert allerdings einen sehr großen Rechenaufwand und mathematische Kenntnisse, die den Rahmen des Unterrichts weit übertreffen. Aus diesem Grund wird in Kapitel 9.5, anstelle einer expliziten Berechnung der Flugbahn, eine Methode vorgestellt, wie derartige Probleme im Physikunterricht behandelt werden können.

## 9.5. Numerische Lösung

Den Schülerinnen und Schülern ist nach dem 2. Gesetz von Newton bekannt, dass die auf einen Körper wirkende Kraft sich durch die Gleichung:

$$F = m \cdot a$$

beschreiben lässt. Im Rahmen der Schule wird im eindimensionalen Fall in der Regel von einer mittleren Beschleunigung  $a$  über ein Zeitintervall  $\Delta t$  ausgegangen, die über:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

definiert ist. Es folgt für die Geschwindigkeit  $v_2$  zum Zeitpunkt  $t_2$ :

$$v_2 = v_1 + a \cdot \Delta t$$

Über die Betrachtung aller wirkenden Kräfte lässt sich auf die Beschleunigung, wie folgt, schließen:

**In x-Richtung gilt:**

$$F_x = F_{Luft,x}$$

$$m a_x = -\frac{1}{2} c_w \rho A v_1^2 \frac{v_{x,1}}{v_1}$$

$$\Rightarrow a_x = -\frac{1}{2} \frac{c_w \rho A}{m} v_1^2 \frac{v_{x,1}}{v_1}$$

$$\Rightarrow v_{x,2} = v_{x,1} - \frac{1}{2} \frac{c_w \rho A}{m} v_1^2 \frac{v_{x,1}}{v_1} \Delta t$$

**In y-Richtung gilt:**

$$F_y = F_G + F_{Luft,y}$$

$$m a_y = -m g - \frac{1}{2} c_w \rho A v_1^2 \frac{v_{y,1}}{v_1}$$

$$\Rightarrow a_y = -g - \frac{1}{2} \frac{c_w \rho A}{m} v_1^2 \frac{v_{y,1}}{v_1}$$

$$\Rightarrow v_{y,2} = v_{y,1} - g - \frac{1}{2} \frac{c_w \rho A}{m} v_1^2 \frac{v_{y,1}}{v_1} \Delta t$$

Ebenso wie die Beschleunigung ist auch die Geschwindigkeit im eindimensionalen Fall meistens über ein Zeitintervall  $\Delta t$  gemittelt. Es gilt:

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1}$$

Für den Ort  $r_2$ , an dem sich der Körper zur Zeit  $t_2$  befindet, gilt somit:

$$r_2 = r_1 + v \cdot \Delta t$$

Dementsprechend ergibt sich für die Ortskomponente ...

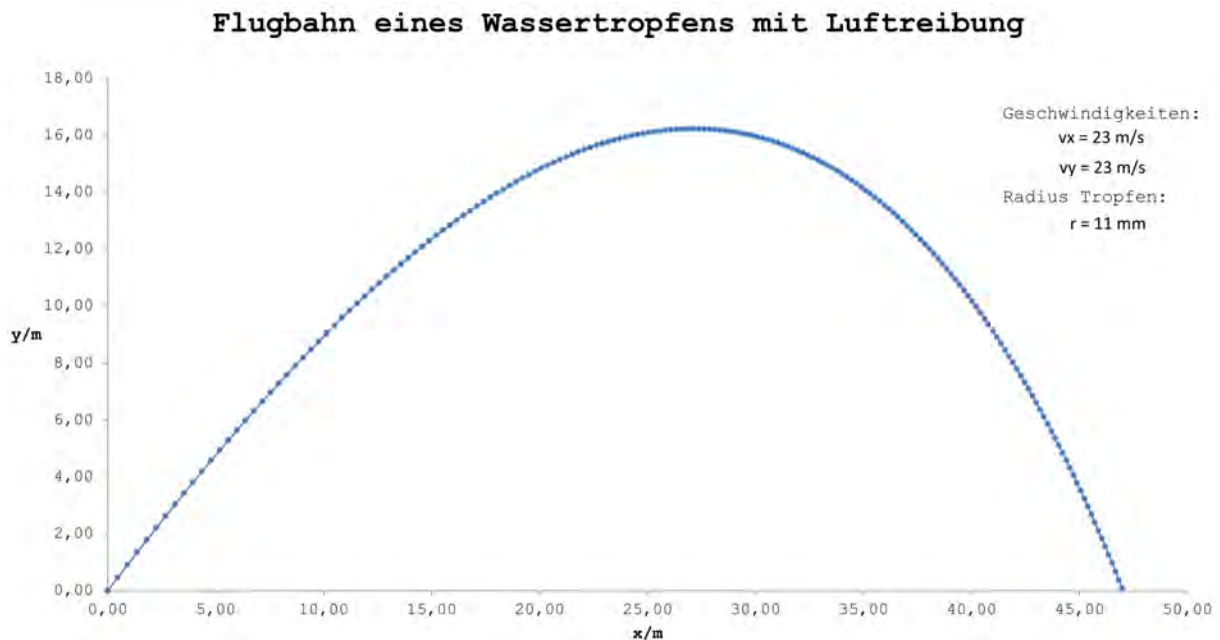
**in x-Richtung:**

$$x_2 = x_1 + v_{x,1} \cdot \Delta t$$

**in y-Richtung:**

$$y_2 = y_1 + v_{y,1} \cdot \Delta t$$

Mit den genannten Gleichungen lassen sich die Geschwindigkeiten und Orte nach dem Zeitintervall  $\Delta t$  berechnen. Bei wiederholter Anwendung erhält man entsprechende Werte für alle weiteren Zeitintervalle. Wird der Algorithmus in einem Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Excel, wie im Anhang auf Seite 150 beschrieben) definiert, so lassen sich schnell einige Werte ermitteln, womit die Flugbahn relativ genau bestimmt werden kann. Die Ergebnisse lassen sich graphisch in einem Diagramm, wie es Abbildung 9.2 zeigt, darstellen.



**Abbildung 9.2.:** Flugbahn eines Wassertropfens mit Luftreibung.

Haben die Schülerinnen und Schüler die Methode hinter diesem Verfahren verstanden und entsprechende Werte mit einem Tabellenkalkulationsprogramm bestimmt, so kann in einem nächsten Schritt ein Modellbildungsprogramm genutzt werden<sup>172</sup>. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler durch eigenständiges Modellieren „Ideen und Hypothesen über physikalische Zusammenhänge entwickeln“<sup>173</sup>. Die Berechnungen der aufgestellten Modelle übernimmt der Computer, so dass Ergebnisse unmittelbar in einem Diagramm ausgegeben werden können. Durch die Darstellung des Modellablaufes erhalten die Schülerinnen und Schüler zur Beurteilung ihrer Vorstellungen und Überlegungen ein nützliches Feedback. Diskrepanzen zwischen Modell und Realität sind zu klären: „Waren die eigenen Vorstellungen richtig, ist die Umsetzung in das Modell stimmig, wo wurden Aspekte wie die Richtungen von Kräften vergessen“<sup>174</sup>? Das selbstständige Modellieren und die im Anschluss folgende Diskussion der Ergebnisse kann somit „als dynamische[r] Erkenntnisprozess und als iterative[r] Prozess“<sup>175</sup> angesehen werden. Außerdem ist durch die Nutzung von Modellbildungsprogrammen die Behandlung authentischer Probleme des Alltages im Physikunterricht möglich. Dadurch kann eine Lösung von der bei vielen Schülerinnen und Schülern bestehenden Vorstellung, dass die ideale Gedanken- und Laborwelt nichts mit der Realität zu tun habe, erreicht werden. Der Fall des aus dem Strahlrohr austretenden Wassertropfens stellt eine solche Situation dar und lässt sich beispielsweise mit dem Programm *modellus 4.01* modellieren (siehe Anhang S. 154). Gerade durch den direkten Vergleich der Flugbahnen eines Wassertropfens ohne und mit Luftreibung unter Einbezug von Schiebereglern wird der Einfluss von Luftwiderstandsbeiwert, Radius des Tropfens, Anfangsgeschwindigkeit und Abschusswinkel deutlich.

---

<sup>172</sup>Informationen zum Absatz vgl. WILHELM/LÜCK (2011), S. 1

<sup>173</sup>WILHELM/LÜCK (2011), S. 1

<sup>174</sup>WILHELM/LÜCK (2011), S. 1

<sup>175</sup>WILHELM/LÜCK (2011), S. 1

# 10. Wärme

„Die Entwicklung des physikalischen Wärmebegriffs in der Geschichte der Wissenschaft kann man als langsame und schrittweise Differenzierung des Alltagsbegriffs ‘Wärme’ in Aspekte ansehen, die wir heute mit Temperatur, Energie und Entropie beschreiben“<sup>176</sup>. Auch wenn die Schülerinnen und Schüler mit einem Inventar an Begrifflichkeiten in den Unterricht kommen, bedeutet dies nicht, dass die in ihrem Alltags-Sprachgebrauch verwendeten Konzepte mit den jeweiligen physikalischen Definitionen übereinstimmen. Beispielsweise charakterisiert Wärme für viele Jugendliche (und Erwachsene) einen Zustand verhältnismäßig hoher Temperatur<sup>177</sup>.

In einer Untersuchung von Engel konnte gezeigt werden, dass Schülerinnen und Schüler sehr häufig das Begriffspaar Temperatur und Wärme synonym verwenden und ihnen deshalb die Trennung beider Worte schwer fällt<sup>178</sup>. Auch eine Studie von Duit mit Schülern am Ende der Sekundarstufe I belegt diese Problematik<sup>179</sup>: In einem Versuch hat er zwei gleiche Portionen von Alkohol und Wasser mit dem gleichen Bunsenbrenner von 20°C auf 30°C erwärmt. Anschließend hat er die Schülerinnen und Schüler in Interviews befragt, welche Stoffportion mehr Wärme erhalten habe und welche am Ende demnach mehr Wärme enthalte. Das Ergebnis der Untersuchung war, dass viele Schülerinnen und Schüler mit der Frage nicht zurechtgekommen sind.

Aufgrund didaktischer und sachstruktureller Überlegungen wurde daher auch schon überlegt, „daß der Temperaturbegriff in der Einführung in die Wärmelehre eine zentrale Rolle spiel[t] und der Begriff Wärme nicht eingeführt und benutzt werden sollte“<sup>180</sup>.

## 10.1. Einordnung des Themas „Wärme“ in den Lehrplan

Im Lehrplan des bayerischen Gymnasiums ist die Behandlung der Wärmelehre für die achte Jahrgangsstufe vorgesehen<sup>181</sup>. In diesem Zusammenhang sollen die Schülerinnen und Schüler „natürliche Phänomene und technische Abläufe [...] selbstständig untersuchen und zugehörige Erklärungen finden“<sup>182</sup>. Auf die Einführung des Wärmebegriffes kann dabei entgegen der oben angeführten Erwägung nicht verzichtet werden, da die Schülerinnen

---

<sup>176</sup>DUIT (2004a), S. 4

<sup>177</sup>vgl. DUIT (2004c), S. 195

<sup>178</sup>vgl. WIESNER/STENGL (2004), S. 84

<sup>179</sup>Informationen zur Studie vgl. DUIT (2004a), S. 5

<sup>180</sup>WIESNER/STENGL (2004), S. 83

<sup>181</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004d)

<sup>182</sup>BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UNTERRICHT UND KULTUS (2004d)

und Schüler die Änderung der inneren Energie durch Arbeit oder Wärme verstehen, wie lernen sollen. Hierzu ist ein tiefgreifendes Verständnis für Wärme erforderlich, um die Begriffe Temperatur und Wärme klar voneinander trennen zu können.

Für die Unterrichtsplanung und -durchführung sind auf Lehrerseite Kenntnisse über Schülervorstellungen essentiell wichtig<sup>183</sup>. Denn für ein erfolgreiches Lehren ist es entscheidend, „den ‘Standpunkt’ des Schülers oder der Schüler in allen Einzelheiten zu kennen“<sup>184</sup>.

## 10.2. Schülervorstellungen

Im Bereich der Wärmelehre hat Erickson in zahlreichen Untersuchungen interessante Erkenntnisse über Vorstellungen von Kindern im Alter von zwölf Jahren gewonnen. Mithilfe von Interviews hat er die nachfolgenden Schülervorstellungen feststellen können<sup>185</sup>:

- Zum Thermometermodell:  
Eine erwärmte Flüssigkeit steigt auf, da sie leichter wird.
- Zum Temperaturbegriff:  
Das Schmelzen eines großen Eiswürfels dauert im Vergleich zu einem kleineren länger, da der größere gegenüber dem kleineren eine kältere Temperatur besitzt.
- Wärme und Kälte als Substanz:
  - Schüler erfassen Wärme, ähnlich wie Luft oder Dampf, als eine Substanz.
  - Jeder Körper besitzt eine bestimmte Menge an Wärme und Kälte.
  - In einem einseitig erhitzten Stab staut sich zunächst lokal die Wärme. Sobald die Wärme an dieser Stelle nicht mehr gehalten werden kann, bewegt sie sich entlang des Stabes und heizt diesen auf.

Shayer und Wylam erforschten den Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Vorstellungen bzgl. Wärme und Temperatur und den Entwicklungsstufen Piagets. Im Folgenden sind ihre Ergebnisse zusammengefasst<sup>186</sup>:

- Stufe des frühen bis mittleren konkreten Denkens:  
Kinder dieser Altersstufe assoziieren Wärme häufig mit Phänomenen wie Brennen, Schmelzen oder dergleichen. Bezüglich der Ausdehnung von Gasen argumentieren sie mit aufsteigender warmer Luft. Darüber hinaus erkennen sie eine wechselseitige Beeinflussung warmer und kalter Objekte sowie das Bestreben zum Temperatureausgleich.

---

<sup>183</sup>vgl. WIESNER/STENGL (2004), S. 83

<sup>184</sup>JUNG (2004), S. 15

<sup>185</sup>Schüleraussagen vgl. WIESNER/STENGL (2004), S. 83

<sup>186</sup>Informationen zu den Entwicklungsstufen vgl. WIESNER/STENGL (2004), S. 84

- Stufe des späten konkreten Denkens:  
In der Stufe des späten konkreten Denkens entwickeln Kinder ein Verständnis für „den proportionalen Zusammenhang zwischen Temperatur- und Längenänderung der Flüssigkeitssäule beim Thermometermodell“<sup>187</sup>. Sie akzeptieren, dass mehr Wärme einen größeren Effekt zur Folge hat und dass die Ausdehnung beim Erwärmen ein reversibler Prozess ist. Die Begriffe Wärme und Temperatur werden häufig synonym, meistens im Sinne des physikalischen Temperaturbegriffes, verwendet. Eine Modellvorstellung von Wärme (z.B. Teilchenmodell) ist noch nicht vorhanden.
- Stufe des frühen formalen Denkens:  
Diese Entwicklungsstufe ist von der Ausprägung konkreter Vorstellungen von einer „Wärmeflüssigkeit“ gezeichnet, die zur Differenzierung der Begriffe Wärme, Masse und Temperatur beitragen. Etwa 1/5 der Schülerinnen und Schüler im Alter zwischen 11 und 13 Jahren nutzen bei der Erklärung der Wärmeleitung und der Ausdehnung von Gasen Gedankenansätze, die auf dem Teilchenkonzept basieren. Die Kinder sind in der Lage, Naturphänomene, die nicht ihren Erwartungen entsprechen, durch theoretische Überlegungen zu erklären. Beispielsweise kann das unterschiedliche Empfinden gleichtemperierter Materialien auf das Vorliegen ungleicher Wärmeleitfähigkeiten der Stoffe zurückgeführt werden.

Engel beschäftigte sich in seinen Arbeiten zur Wärmelehre mit Temperaturprognosen, die Schüler bei Mischversuchen unterschiedlicher Wassertemperaturen aufstellen. Beispielsweise füllte er zwei Gefäße jeweils mit der identischen Menge an gleichtemperierten Wasser und schüttete im Anschluss beide Inhalte in ein großes Gefäß zusammen. In einer Befragung an die Schüler, welche Temperatur das Gemisch besäße, eruierte er das folgende Resultat<sup>188</sup>:

53 % der befragten zwölfjährigen Kinder gaben an, dass das Gemisch die gleiche Temperatur habe. Über 25 % addierten die Temperaturen.

Die aus zahlreichen Untersuchungen zur Wärmelehre gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen, dass die Entwicklung eines physikalischen Verständnisses des Begriffes Wärme schwierig ist und deshalb einer intensiven unterrichtlichen Vertiefung bedarf. Insbesondere ist es die Aufgabe der Lehrkraft, auf eine präzise Wortwahl beim Erklären und Diskutieren zu achten, damit die Schülerinnen und Schüler lernen, die Begriffe voneinander zu trennen und selbst korrekt zu verwenden.

---

<sup>187</sup>WIESNER/STENGL (2004), S. 84

<sup>188</sup>WIESNER/STENGL (2004), S. 83f

## 10.3. Definitionen

### 10.3.1. Temperatur

Als Temperatur  $T$  wird eine „intensive thermodynamische Zustandsgröße zur qualitativen Erfassung des Wärmehaltes eines Systems“<sup>189</sup> bezeichnet. Mit anderen Worten ist die Temperatur „ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Moleküle“<sup>190</sup> in einem Körper. Für die mittlere Translationsenergie der Teilchen gilt dabei<sup>191</sup>:

$$\overline{E}_{trans} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k T \quad (10.1)$$

$\overline{E}_{trans}$	=	mittlere Translationsenergie der Moleküle	$m$	=	Masse des Körpers
$\overline{v^2}$	=	quadratisch gemittelte Geschwindigkeit der Moleküle	$T$	=	Temperatur des Gases
			$k$	=	Boltzmann-Konstante

Gleichung (10.1) beschreibt die „allgemeinste und vollständigste Definition der Temperatur“<sup>192</sup>. Für den Fall  $\overline{E}_{trans} = 0$  folgt unmittelbar die Existenz eines absoluten Nullpunkts der Temperatur ( $T = 0 \text{ K}$ ).

### 10.3.2. Wärmemenge

Energie, die zwischen einem System und seiner Umgebung allein durch einen Temperaturunterschied übergeht, wird in der Thermodynamik als Wärmemenge  $Q$  bezeichnet<sup>193</sup>. „Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt [...] [sie] stets in Richtung fallender thermodynamischer Temperatur über die Systemgrenze“<sup>194</sup>. Eine Wärmemenge kann in einem Körper nicht gespeichert werden und stellt keine Zustandsgröße wie die innere Energie dar<sup>195</sup>.

### 10.3.3. Wärmekapazität

Über die Wärmekapazität  $C$  wird der Zusammenhang zwischen Wärmeaufnahme und Temperaturerhöhung bestimmt<sup>196</sup>. Sie ist, wie folgt, definiert<sup>197</sup>:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (10.2)$$

<sup>189</sup>KILIAN/WEBER (2000b), S. 263

<sup>190</sup>TIPLER (2000), S. 509

<sup>191</sup>GERTHSEN (2010), S. 253

<sup>192</sup>GERTHSEN (2010), S. 253

<sup>193</sup>vgl. BAEHR/STEPHAN (2008), S. 1

<sup>194</sup>BAEHR/STEPHAN (2008), S. 1

<sup>195</sup>vgl. DUIT (2004c), S. 195

<sup>196</sup>vgl. STÖCKER (2005), S. 615

<sup>197</sup>vgl. STÖCKER (2005), S. 621



$$\begin{array}{ll}
 C & = \text{Wärmekapazität} & \Delta T & = \text{Temperaturänderung} \\
 \Delta Q & = \text{Wärmemenge}
 \end{array}$$

Aufgrund der Abhängigkeit der Wärmekapazität von der Stoffmenge<sup>198</sup> ist die Einführung der spezifischen Wärmekapazität  $c$  notwendig, um Stoffe direkt miteinander vergleichen zu können. Für sie gilt<sup>199</sup>:

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad (10.3)$$

$$\begin{array}{ll}
 c & = \text{spezifische Wärmekapazität} & m & = \text{Gesamtmasse} \\
 \Delta Q & = \text{Wärmemenge} & \Delta T & = \text{Temperaturänderung}
 \end{array}$$

Nachfolgend sind in Tabelle 10.1 die spezifischen Wärmekapazitäten einiger ausgewählter Substanzen aufgelistet.

Substanz	$c$ in $\frac{kJ}{kg \cdot K}$
Aluminium	0,900
Blei	0,128
Eis (-10°C)	2,05
Ethanol	2,4
Kupfer	0,386
Wasser	4,18

**Tabelle 10.1.:** Spezifische Wärmekapazitäten einiger ausgewählter Substanzen <sup>200</sup>

Je höher die Wärmekapazität eines Körpers ist, desto größer ist die benötigte Wärmemenge, um diesen von einer Temperatur  $T_1$  auf eine Temperatur  $T_2$  zu erwärmen. Wasser besitzt im Vergleich zu vielen anderen Substanzen eine sehr hohe Wärmekapazität (siehe Tabelle 10.1), weshalb es sich im besonderem Maße als Kühlmittel eignet.

#### 10.3.4. Innere Energie

Die innere Energie  $U$  kennzeichnet „die gesamte Energie eines thermodynamischen Systems, die allein durch den inneren Zustand des Systems bestimmt ist. Sie setzt sich zusammen aus der kinetischen Energie der Wärmebewegung, der Wechselwirkungsenergie zwischen den Molekülen, sowie aus innermolekularen Anteilen (z.B. Schwingungsenergie)“<sup>201</sup>.

<sup>198</sup>vgl. STÖCKER (2005), S. 621

<sup>199</sup>vgl. STÖCKER (2005), S. 624

<sup>200</sup>Werte nach TIPLER (2000), S. 541

<sup>201</sup>KILIAN/WEBER (1999), S. 131

Die Änderung der inneren Energie eines Systems erfolgt nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik durch den Austausch von Arbeit und Wärme<sup>202</sup>. Infinitesimale Zustandsänderungen lassen sich durch die Gleichung (10.4) beschreiben<sup>203</sup>:

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (10.4)$$

„Die Schreibweise  $\delta Q$  und  $\delta W$  anstelle von  $dQ$  und  $dW$  soll darauf hinweisen, dass es integrale Zustandsgrößen  $Q$  und  $W$  nicht gibt“<sup>204</sup>.

## 10.4. Wärmeübertragung

In den meisten Lehrbüchern werden drei Arten von Ursachen für Wärmeübertragung genannt:

- Wärmeleitung
- konvektive Wärmeübergang
- Wärmestrahlung

Einem Aufsatz von Nußelt zufolge ist jedoch zu beachten, dass die Wärmeabgabe in Leitung und Konvektion keine unabhängigen Erscheinungen sind<sup>205</sup>. Er postuliert, dass die Wärmeübertragung nur auf zwei Arten erfolgt: Durch Wärmeleitung und Strahlung.

### 10.4.1. Wärmeleitung

„Wärmeleitung erfolgt nur in Materie“<sup>206</sup> und beschreibt den „Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten“<sup>207</sup>. Hierbei sind örtliche Unterschiede in der Molekülenergie (also ein Temperaturgefälle) grundlegend<sup>208</sup>. Der auftretende Energietransport erfolgt „durch Wechselwirkung zwischen Atomen oder Molekülen, die selbst nicht transportiert werden“<sup>209</sup>, und wird in einem wärmeleitenden Material durch das Vektorfeld der Wärmestromdichte

$$\vec{\dot{q}} = \vec{\dot{q}}(\vec{x}, t)$$

charakterisiert<sup>210</sup>. Dadurch lässt sich in Abhängigkeit der Zeit durch den Ortsvektor  $\vec{x}$  Stärke und Richtung des Energiestroms beschreiben. Die Definition der Wärmestromdichte  $\vec{\dot{q}}$  folgt aus dem Zusammenhang zwischen Wärmestrom  $d\dot{Q}$  und einem beliebig orientierten

---

<sup>202</sup>vgl. STÖCKER (2005), S. 635

<sup>203</sup>vgl. GREULICH (1999), S. 271

<sup>204</sup>GREULICH (1999), S. 271

<sup>205</sup>VON BÖCKH/WETZEL (2006), S. 3

<sup>206</sup>GERTHSEN (2010), S. 270

<sup>207</sup>BAEHR/STEPHAN (2008), S. 2

<sup>208</sup>vgl. GERTHSEN (2010), S. 270

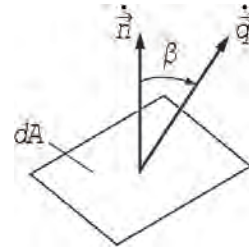
<sup>209</sup>TIPLER (2000), S. 546

<sup>210</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAEHR/STEPHAN (2008), S. 3

Flächenelement  $dA$  zu:

$$d\dot{Q} = \vec{q}(\vec{x}, t) \cdot \vec{n} \cdot dA = |\vec{q}| \cdot \cos(\beta) \cdot dA$$

- $d\dot{Q}$  = Wärmestrom  
 $\vec{q}$  = Wärmestromdichte  
 $\vec{n}$  = Einheitsvektor in Richtung der  
 Flächennormalen  
 $dA$  = Flächenelement  
 $\beta$  = Winkel zwischen  $\vec{q}$  und  $\vec{n}$



**Abbildung 10.1.:** Flächenelement mit Normalvektor  $\vec{n}$  und Wärmestromdichte  $\vec{q}$ <sup>211</sup>

In der Wärmeübertragung kommt es (mit Ausnahme der Wärmestrahlung) auf den Nullpunkt der thermodynamischen Temperatur nicht an. Entscheidend sind dagegen Temperaturdifferenzen, die durch  $\vartheta := T - T_0$  definiert werden.

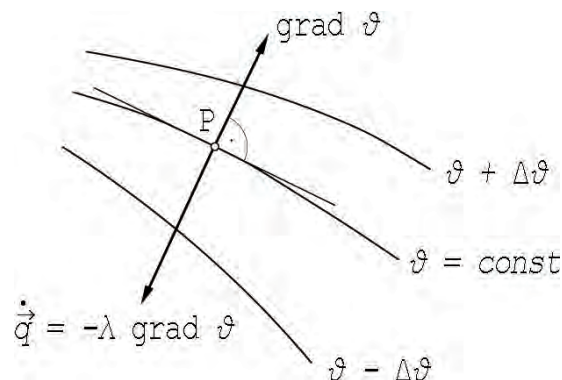
„Ursache des Energietransports durch Wärmeleitung sind Temperaturgradienten im Material“<sup>212</sup>. Im Allgemeinen sind diese ort- und zeitabhängig und bilden somit instationäre Temperaturfelder:

$$\vartheta = \vartheta(\vec{x}, t) \quad (10.5)$$

Im Sonderfall der Zeitunabhängigkeit wird von einem stationären Temperaturfeld gesprochen. Alle Punkte eines Körpers, die zu einer vorgegebenen Zeit die gleiche Temperatur  $\vartheta$  aufweisen, können gedanklich als eine Fläche betrachtet werden. Durch diese Isotherme werden Bereiche höherer Temperatur als  $\vartheta$  von denen niedrigerer Temperatur getrennt. Der Temperaturgradient repräsentiert dabei die stärkste Temperaturänderung und ist durch

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \vec{e}_z$$

gegeben ( $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$  und  $\vec{e}_z$  beschreiben hierbei die Einheitsvektoren).



**Abbildung 10.2.:** Punkt P auf der Isotherme  $\vartheta = \text{const}$  mit dem Temperaturgradienten  $\text{grad } \vartheta$  und dem Vektor  $\vec{q}$ <sup>213</sup>

<sup>211</sup>Bearbeitetes Bild: Original nach BAEHR/STEPHAN (2008), S. 3

<sup>212</sup>BAEHR/STEPHAN (2008), S. 3

Wird ein Punkt P auf einer Isotherme betrachtet, so steht der Gradienten-Vektor immer senkrecht zur Fläche und zeigt in die Richtung des stärksten Temperaturanstieges. Werden Temperaturgradienten als Ursache für Wärmeströme in wärmeleitenden Materialien angesehen, so liegt der Schluss nahe, einen einfachen Proportionalitätsfaktor zwischen Ursache und Wirkung anzunehmen. Es ergibt sich der Zusammenhang<sup>214</sup>:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (10.6)$$

Gleichung (10.6) beschreibt das Grundgesetz der Wärmeleitung nach Fourier. Die materialspezifische Proportionalitätskonstante  $\lambda$  wird auch als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet und ist zudem von Temperatur und Druck abhängig. Für sie gilt:

$$\lambda = \lambda(\vartheta, p)$$

Nachfolgend sind Wärmeleitfähigkeiten ausgewählter Stoffe aufgeführt:

Stoff	$\lambda$ in $W/Km$	Stoff	$\lambda$ in $W/Km$
Silber	427	Wasser	0,598
Kupfer	399	Mauerwerk	0,5 ... 1,3
Aluminium (99,2 % )	209	Schaumstoffplatten	0,02 ... 0,09
Eisen	81	CO <sub>2</sub>	0,0162
Legierte Stähle	13 ... 48	Luft	0,0257

**Tabelle 10.2.:** Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Stoffe bei 20°C und 1000 hPa <sup>215</sup>

### 10.4.2. Konvektiver Wärmeübergang

In Festkörpern breitet sich Wärme ausschließlich durch Wärmeleitung aus. In Flüssigkeiten und Gasen spielt daneben der Prozess des konvektiven Wärmeübergangs eine wichtige Rolle, der durch makroskopische Bewegungen in Flüssigkeiten oder Gasen entsteht.

Lokale Temperatur- und damit einhergehende Dichteunterschiede bewirken durch den Auftrieb wärmerer Teilchen eine Strömung<sup>216</sup>. Die mitgeführten wärmeren Teilchen gelangen durch diese Bewegung an andere Stellen<sup>217</sup>. Stellt man sich eine ortsfest aufge-spannte Fläche in einem Fluid vor, so fließt durch diese aufgrund eines Temperaturgradienten Wärme durch Leitung und Energie als Enthalpie und in Form kinetischer Energie des Fluids, das diese Fläche durchströmt. Dabei wird die Überlagerung von Wärmeleitung und Energietransport durch das strömende Fluid im Fachjargon als konvektiver Wärmeübergang bezeichnet<sup>218</sup>.

<sup>213</sup>Bearbeitetes Bild: Original nach BAEHR/STEPHAN (2008), S. 4

<sup>214</sup>vgl. BAEHR/STEPHAN (2008), S. 4

<sup>215</sup>BAEHR/STEPHAN (2008), S. 5

<sup>216</sup>vgl. GERTHSEN (2010), S. 276

<sup>217</sup>vgl. GERTHSEN (2010), S. 270

<sup>218</sup>vgl. BAEHR/STEPHAN (2008), S. 11

### 10.4.3. Die Wärmestrahlung

Jeder Körper entsendet aufgrund seiner positiven thermodynamischen Energie permanent durch Umwandlung von innerer Energie elektromagnetische Wellen an seine Umgebung<sup>219</sup>. Diese Art der Energieabgabe wird als Wärmestrahlung bezeichnet. In umgekehrter Richtung absorbiert ein Körper einen Teil der auf ihn treffenden elektromagnetischen Wellen (der Rest wird reflektiert oder durchgelassen). Bei diesem Prozess wird die absorbierte Strahlung in innere Energie überführt. Ein Körper befindet sich somit in einem ständigen Wechselspiel zwischen Energieabgabe und -aufnahme mit seiner Umgebung.

Die Besonderheit der Wärmestrahlung liegt dabei in der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Diese ist von Materie unabhängig und führt deshalb zu einem Energietransport, der selbst im Vakuum möglich ist. Außerdem ermöglicht die Strahlung einen Energieaustausch zweier Körper über sehr große Entfernungen. Auf diese Art und Weise wird beispielsweise ein Teil der Energie der Sonne auf die Erde übertragen.

Bei Gasen und Flüssigkeiten finden Emissions- und Absorptionsprozesse im gesamten Volumen des betrachteten Körpers statt. In Festkörpern hingegen wird die Strahlung bereits nach dem Durchdringen sehr dünner Schichten (wenige Mikrometer) vollständig absorbiert. Aus diesem Grund beschränkt sich die Emission auf eine sehr dünne Oberflächenschicht. Die im Festkörper emittierte Strahlung dringt nicht nach außen. Oft wird von strahlenden und absorbierenden Flächen gesprochen.

Die größtmögliche Wärmestrahlung ist lediglich von der Temperatur  $T$  des strahlenden Körpers abhängig. Das Naturgesetz von Stefan Boltzmann beschreibt „die maximal mögliche Wärmestromdichte der von der Oberfläche eines Körper ausgesandte[n] Wärmestrahlung [...] durch“<sup>220</sup>:

$$\dot{q}_s = \sigma T^4 \quad (10.7)$$

$\dot{q}_s$  = maximale Wärmestromdichte                       $T$  = Temperatur  
 $\sigma$  = Stefan-Boltzmann-Konstante

Ein Körper, der diesen Extremwert erreicht, wird als „Schwarzer Körper“ bezeichnet und stellt einen idealen Strahler dar. Seine spezifische Ausstrahlung kann durch keinen anderen Körper gleicher Temperatur übertroffen werden. Zudem wird jede auf den Körper treffende Strahlung vollständig absorbiert. Ein schwarzer Körper ist somit auch ein idealer Absorber.

Die Wärmestromdichte eines wirklichen Strahlers lässt sich durch die Einführung eines Korrekturfaktors  $\varepsilon(T) \leq 1$  wie folgt beschreiben:

$$\dot{q}_s = \varepsilon(T) \sigma T^4 \quad (10.8)$$

$\varepsilon$  = Emissionsgrad

<sup>219</sup>Informationen zum Absatz vgl. BAEHR/STEPHAN (2008), S. 28f

<sup>220</sup>BAEHR/STEPHAN (2008), S. 29

Der Emissionsgrad ist nicht nur von der Temperatur, sondern auch vom Material, der Farbe, dem Zustand der Oberfläche, usw. abhängig. Nachfolgend sind einige Werte für  $\varepsilon$  aufgelistet:

Stoff	$T$ in $K$	$\varepsilon$	Stoff	$T$ in $K$	$\varepsilon$
Beton, rauh	293	0,94	Nickel, poliert	373	0,053
Holz, Eichee	293	0,90	Eisen, blank geätzt	423	0,158
Ziegelstein, rot	293	0,93	Kupfer	403	0,725
Aluminium, walzblank	443	0,049			

**Tabelle 10.3.:** Emissionsgrade  $\varepsilon(T)$  ausgewählter Materialien <sup>221</sup>

## 10.5. Gefahr der Wärmeübertragung beim Löschen eines Brandes

Auch wenn der Mensch tagtäglich Umgang mit Feuer hat, kommt es vor, dass ihm die Kontrolle über die Flammen entgleitet oder er durch die spontane Entwicklung eines Brandes überrascht wird. Binnen kürzester Zeit kann ein kleines Feuer zu einem unvorstellbar großen Flammenmeer heranwachsen, das sämtliche Rettungswege versperrt und damit eine Selbstrettung unmöglich macht. In einer solchen Situation reichen Löschversuche aus einer sicheren Entfernung alleine nicht aus.

Sind Menschenleben bedroht, so dringt die Feuerwehr in das Innere eines brennenden Gebäudes ein und setzt alles daran, Bewusstlose oder Verletzte zu retten und durch den gezielten Einsatz von Wasser lokal und effektiv zu löschen. Der eigene Schutz (vor dem vom Brand ausgehenden Gefahrenpotential) muss während des gesamten Einsatzes zu jeder Zeit gewährleistet sein. Dazu gehört das Tragen einer entsprechenden Schutzkleidung, die sich „aus dem im Brandfall konkret vorliegenden Beanspruchungsparametern bzw. den Brandkenngrößen“<sup>222</sup> ableitet. Eines besonderen Schutzes bedarf die Haut des Menschen, da sie ein sehr hitzeempfindliches Organ ist. Ist die Wärmezufuhr zur Haut größer als die Wärme, die durch den Blutstrom in der Haut abtransportiert wird, führt dies zu einem Wärmestau und damit zu einer Erhöhung der Hauttemperatur. Nach nur wenigen Sekunden kann der physiologisch schädliche Grenzwert erreicht und überschritten werden, was zu Verbrennungen führt<sup>223</sup>. Tabelle 10.4 zeigt die zeitliche Wirkung von Kontakttemperaturen auf die menschliche Haut und deren Folgen.

<sup>221</sup>BAEHR/STEPHAN (2008), S. 30

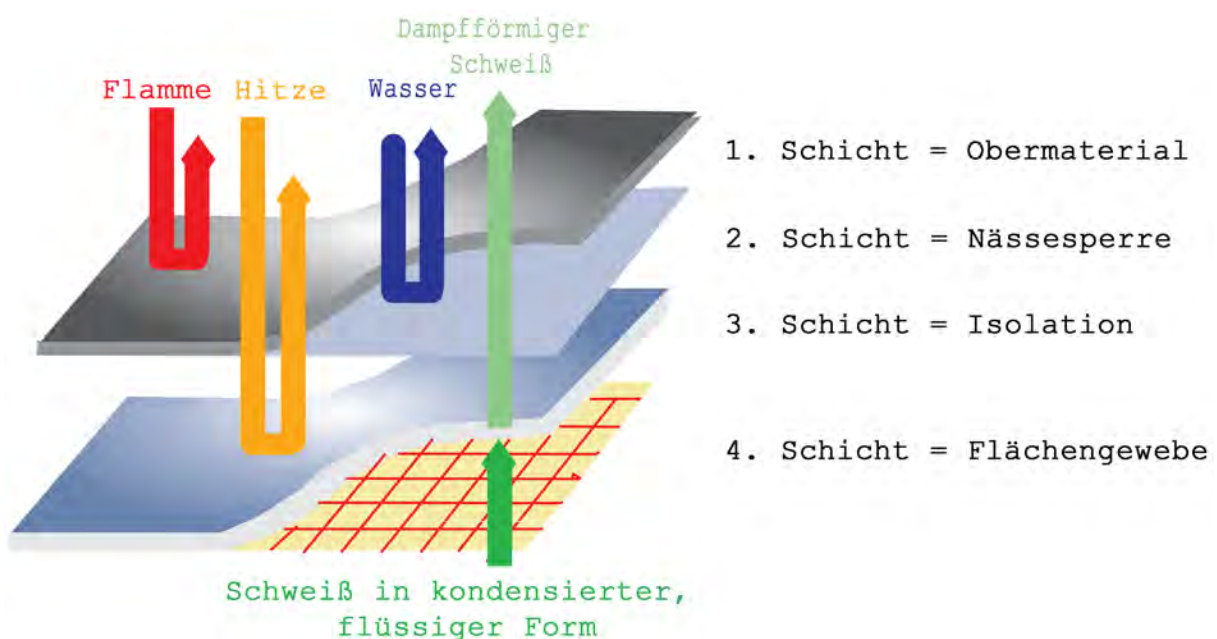
<sup>222</sup>PASCH (1994), S. 1

<sup>223</sup>vgl. PASCH (1994), S. 25

Hauttemperatur in °C	Oberflächliche Verbrennungen	Tiefe Verbrennungen
50	nach 2 min	nach 4 min
55	15 s	25 s
60	3 s	5 s
65	1 s	2 s
70	0,4 s	1 s

**Tabelle 10.4.:** Wirkung von Kontakttemperaturen auf die menschliche Haut <sup>224</sup>

Eine Analyse des Aufbaus einer Feuerwehrsutzkleidung lässt erkennen, wie die Haut vor einer zu großen Temperaturentwicklung geschützt werden kann. Dieser Schutz wird durch eine Kombination unterschiedlicher Materialien in einem sehr diffizilen Aufbau (siehe Abbildung 10.3) erreicht<sup>225</sup>.



**Abbildung 10.3.:** Aufbau einer Feuerwehrsutzjacke <sup>226</sup>

Die Anforderung an die oberste Schicht, das Obermaterial, ist nach der EN 469:2005 die begrenzte Flammausbreitung<sup>227</sup>. Beispielsweise darf die Kleidung nach einer direkten Beflammungszeit über eine Zeitdauer von zehn Sekunden nicht länger als zwei Sekunden nachbrennen bzw. nachglimmen, es dürfen keine Löcher entstehen und Verschlusselemente müssen funktionsfähig bleiben.

Die zweite Schicht hält äußere Feuchtigkeit ab. Dies ist insbesondere für den Erhalt der Isolation (dritte Schicht) notwendig. Oft besteht die Isolationsschicht nämlich nur aus Abstandshaltern, die den Einschluss von Luft sicherstellen<sup>228</sup>. Da Luft eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt (siehe Tabelle 10.2), ist die durch Wärmeleitung an die

<sup>224</sup>PASCH (1994), S. 25

<sup>225</sup>vgl. HF SICHERHEITSKLEIDUNG (2012), S. 4 f

<sup>226</sup>Bearbeitetes Bild: Original nach HF SICHERHEITSKLEIDUNG (2012), S. 5

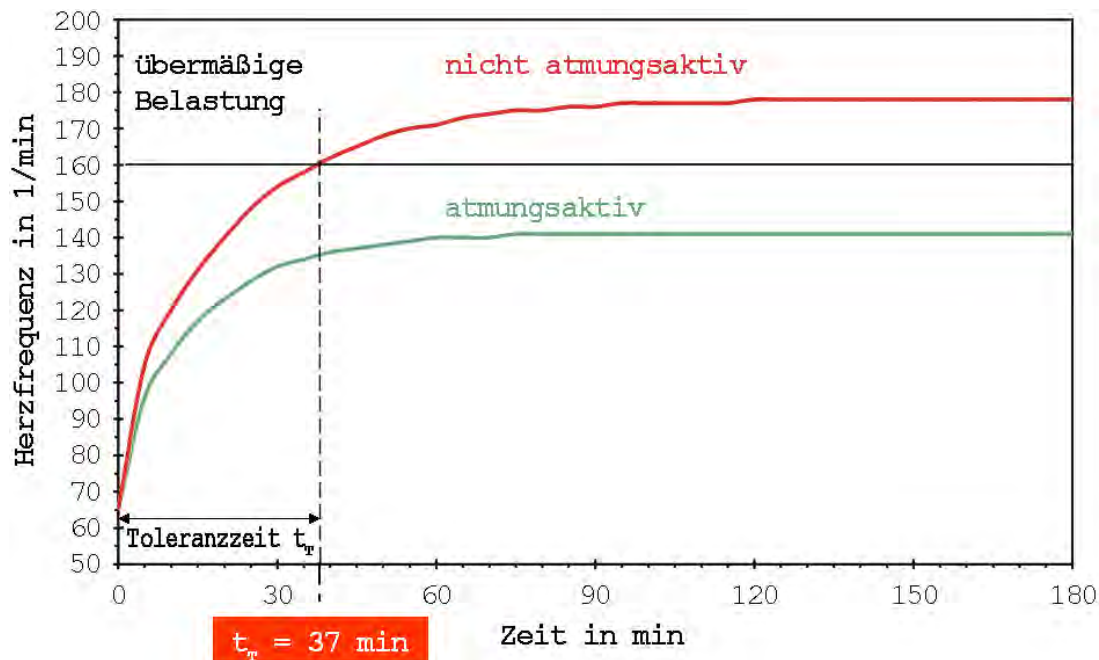
<sup>227</sup>Informationen zum Absatz vgl. SCHROBSDORFF (2011)

<sup>228</sup>vgl. SCHROBSDORFF (2011)

Haut übertragene Wärmemenge gering. Füllt sich dieser Bereich jedoch mit Wasser, ist eine vermehrte Wärmeleitung, aufgrund einer größeren Wärmeleitfähigkeit des Wassers, die Folge. Ein ausreichender Schutz der Haut ist in einer solchen Situation nicht mehr gewährleistet. Es drohen Verbrennungen.

Je nach Hersteller besteht der Aufbau einer Schutzkleidung noch aus weiteren Schichten. Allen gemeinsam ist, dass die unterste und letzte Schicht, welche im direkten Kontakt mit der Haut ist, immer ein Futtermaterial bildet<sup>229</sup>.

Moderne Kleidung besteht zudem aus atmungsaktiven Materialien, d.h. der beim Schwitzen am Körper entstehende Wasserdampf gelangt nahezu ungehindert durch die Kleidungsschichten nach außen<sup>230</sup>. Dies ist wichtig, da die Einsatzkräfte der Feuerwehr oft unter einer schweren körperlichen und psychischen Belastung stehen und deshalb vermehrt Schweiß produzieren. Wird dieser nicht abgeführt, so überhitzt der Körper mit der Zeit und das Herz-Kreislaufsystem wird enorm belastet (siehe Abbildung 10.4).



**Abbildung 10.4.:** Physiologische Wirkung der Schutzkleidung bei einer schweren körperlichen Anstrengung <sup>231</sup>

<sup>229</sup>vgl. SCHROBSDORFF (2011)

<sup>230</sup>Informationen zum Absatz vgl. SCHROBSDORFF (2011)

<sup>231</sup>Bearbeitetes Bild: Original nach SCHROBSDORFF (2011)



# 11. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Thematisierung der Feuerwehr im Physikunterricht ergeben sich viele Möglichkeiten, Lerninhalte des bayerischen Lehrplans für Schülerinnen und Schüler unterschiedlicher Jahrgangsstufen interessant und attraktiv aufzubereiten.

So werden in den Kapiteln 2 und 5 Schülerversuche für die fünfte Jahrgangsstufe vorgeschlagen, die der Behandlung der Themen Feuer und Luft dienen. In eigenständig durchzuführenden Experimenten sollen die Kinder ein Grundverständnis für die Entstehung und Aufrechterhaltung eines Brandes entwickeln und auf diesem Wissen aufbauend, die Prinzipien verschiedener Löschmethoden kennenlernen. Durch die in Kapitel 5 dargestellten Versuche zum Thema Luft, sollen die Schülerinnen und Schüler lernen, Luft als Materie wahrzunehmen.

Darüber hinaus werden in Kapitel 5 zahlreiche Freihandversuche zum Thema Druck beschrieben. Über sie sollen die Schülerinnen und Schüler der achten Jahrgangsstufe einen Zugang zum Luftdruck und zum Schweredruck von Wasser erhalten. Auf diesem Wissen aufbauend wird in den Kapiteln 6 und 7 der Aufbau und die Funktionsweise einer Feuerlöschkreiselpumpe beschrieben.

Im Rahmen der Behandlung mehrdimensionaler Bewegungen in der zehnten Jahrgangsstufe, kann beispielsweise die Flugbahn eines aus einem Strahlrohr austretenden Wassertropfens betrachtet werden. In Kapitel 9 ist dies zunächst für den idealisierten Fall gezeigt. In einem weiteren Schritt kann das Modell durch ein numerisches Verfahren besser an die Wirklichkeit angepasst werden.

Im Kapitel 8 werden Strömungen thematisiert, die im bayerischen Lehrplan der elften Jahrgangsstufe im Bereich der Biophysik zuzuordnen sind. Anhand eines Modells werden - unter der Verwendung einer Videoanalyse - die entlang einer durchströmten Röhre auftretenden Druckverluste untersucht, um so eine Analogie zur Wasserförderung im Bereich der Feuerwehr herzustellen .

Das Aufgabenspektrum der Feuerwehr ist sehr vielfältig und umfasst neben der Brandbekämpfung zahlreiche weitere Gebiete. Zum Abschluss dieser Arbeit sind zur Anregung ein paar Internetverweise als Beispiele weiterer interessanter Themen aus dem Einsatzbereich der Feuerwehr, die im Physikunterricht thematisiert werden können, gegeben.

- Die Brandbekämpfung im Bereich von elektrischen Anlagen:  
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/i-8677.pdf> - Zugriff am 4. September 2012
- Die Impulserhaltung bei Verkehrsunfällen im Bereich der technischen Hilfeleistung:  
[http://www.elsenbruch.info/ph11\\_down/Station\\_Kreuzung.pdf](http://www.elsenbruch.info/ph11_down/Station_Kreuzung.pdf) - Zugriff am 4. September 2012  
<http://www.ureko.de/downloads/veroeffentlichungen/57> - Zugriff am 4. September 2012
- Der Einsatz des Defibrillators im Bereich der medizinischen Versorgung:  
<http://www.uni-jena.de/unijenamedia/Downloads/presse/Defibrillator/Defihinweis8.pdf> - Zugriff am 4. September 2012  
<http://www.aschke.net/bm2zf/node45.html> - Zugriff am 4. September 2012

# Literaturverzeichnis

- Albert Ziegler GmbH & Co. KG:** Ziegler PFPN 10-1500 Ultra Power. Giengen: Albert Ziegler GmbH & Co. KG (URL: [http://www.ziegler.de/uploads/media/TS\\_Ultra\\_Power.pdf](http://www.ziegler.de/uploads/media/TS_Ultra_Power.pdf)) – Zugriff am 6. Februar 2012
- AWG - Fittings GmbH:** Wasserdurchfluss und Wurfweiten für Strahlrohre, Spritzen und Pistolen. Giengen / Brenz: AWG - Fittings GmbH, 2011 (URL: [http://www.awg-fittings.com/data/pdf/datasheet/de\\_221724.pdf](http://www.awg-fittings.com/data/pdf/datasheet/de_221724.pdf)) – Zugriff am 01. März 2012
- Baehr, Hans Dieter/Stephan, Karl:** Wärme- und Stoffübertragung. 6. Auflage. Berlin / Heidelberg: Springer, 2008
- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus:** Lehrplan für das Gymnasium in Bayern - Jahrgangsstufe 10 - Physik. München: Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, 2004a (URL: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26439&PHPSESSID=fb150effed9fad358cde129938c12ad3>) – Zugriff am 04. April 2012
- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus:** Lehrplan für das Gymnasium in Bayern - Jahrgangsstufe 11 - Physik. München: Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, 2004b (URL: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=27147>) – Zugriff am 29. Februar 2012
- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus:** Lehrplan für das Gymnasium in Bayern - Jahrgangsstufe 5 - Natur und Technik. München: Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, 2004c (URL: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26334>) – Zugriff am 17. Januar 2012
- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus:** Lehrplan für das Gymnasium in Bayern - Jahrgangsstufe 8 - Physik. München: Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, 2004d (URL: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26437>) – Zugriff am 23. Januar 2012
- Böckh, Peter von/Wetzel, Thomas:** Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis. 2. Auflage. Berlin / Heidelberg: Springer, 2006

- Bell, Thorsten et al.:** Förderung der Motivation und der Selbstständigkeit im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. Hamburg: Freie und Hansestadt Hamburg - Behörde für Bildung und Sport, 2005 (URL: <http://www.mint-hamburg.de/Handreichungen/Physik.pdf>) – Zugriff am 30. Juli 2012
- Blume, Rüdiger/Wiechoczek, Dagmar:** Professors Blumes Bildungsserver für Chemie - Versuch: Metalle brennen. Berlin: Cornelsen Verlag GmbH, 2005 (URL: <http://www.chemieunterricht.de/dc2/gefahr/vmetallb.htm>) – Zugriff am 12. Januar 2012
- Blume, Rüdiger/Wiechoczek, Dagmar:** Professors Blumes Bildungsserver für Chemie - Modellversuch zum Friteusenbrand. Berlin: Cornelsen Verlag GmbH, 2009a (URL: [http://www.chemieunterricht.de/dc2/gefahr/gefv\\_02.htm](http://www.chemieunterricht.de/dc2/gefahr/gefv_02.htm)) – Zugriff am 05. Januar 2012
- Blume, Rüdiger/Wiechoczek, Dagmar:** Professors Blumes Bildungsserver für Chemie - Wie man brennende Metalle löscht. Berlin: Cornelsen Verlag GmbH, 2009b (URL: <http://www.chemieunterricht.de/dc2/gefahr/me-brand.htm>) – Zugriff am 16. Januar 2012
- Bohl, Willi/Elmendorf, Wolfgang:** Strömungsmaschinen: Aufbau und Wirkungsweise. 8. Auflage. Würzburg: Vogel Fachbuch, 2002, Kamprath-Reihe
- Brenig, Wilhelm:** Statistische Theorie der Wärme: Gleichgewichtsphänomene. 1. Auflage. Springer, 1996
- Breuer, Isabel et al.:** Oxidation von Metallen und Nichtmetallen - eine Versuchssammlung. Reutlingen: Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung, 2009 (URL: <http://www.seminare-bw.de/servlet/PB/show/1250232/nwa-tag-2009-oxidation-metalle-nichtmetalle.pdf>) – Zugriff am 17. Januar 2012
- Böswirth, Leopold:** Technische Strömungslehre - Lehr- und Übungsbuch. 7. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007
- Dietzel, Fritz:** Turbinen, Pumpen und Verdichter. 1. Auflage. Würzburg: Vogel, 1980
- Duit, Reinders:** Alltagsvorstellungen berücksichtigen. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004a, S. 3 – 7
- Duit, Reinders:** Schülervorstellungen - von Lerndefiziten zu neuen Unterrichtsansätzen. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004b, S. 8 – 14

- Duit, Reinders:** Wärmeverstellungen. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004c, S. 195 – 198
- Eichler, Jürgen:** Physik - Grundlagen für das Ingenieursstudium kurz und prägnant. 3. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn, 2007
- Gerthsen, Christian:** Gerthsen Physik. 24. Auflage. Heidelberg / Dordrecht / London / NewYork: Springer, 2010
- Gleixner, Christian:** Halbwahrheiten im Physikunterricht - Das umgedrehte Wasserglas. In Physik in der Schule 35 Berlin: Pädagogischer Zeitschriftenverlag, 1997, S. 137 – 142
- GLORIA GmbH:** Brandklasseneinteilung nach DIN EN 2. Wadersloh,  $\langle$ URL: [http://www.gloria.de/utcfs/ws-446/Assets/086226-02\\_Brandklassen\\_7.0.pdf](http://www.gloria.de/utcfs/ws-446/Assets/086226-02_Brandklassen_7.0.pdf) $\rangle$  – Zugriff am 09. Januar 2012
- Greulich, Walter:** Lexikon der Physik Band 2. Heidelberg: Spektrum, 1999
- Grote, Karl-Heinrich/Feldhusen, Jörg:** Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. 23. Auflage. Berlin / Heidelberg: Springer, 2011
- Grotzinger, John et al.:** Allgemeine Geologie. 5. Auflage. Berlin / Heidelberg: Springer, 2008
- Halliday, David/Resnick, Robert/Walker, Jearl:** Physik. 1. Auflage. Weinheim: WILEY-VCH, 2005
- Hammer, Anton/Hammer, Hildegard/Hammer, Karl:** Physikalische Formeln und Tabellen. München: J. Lindauer Verlag (Schaefer), 2002
- Hasselhorn, Marcus/Mähler, Claudia:** Wissen, das auf Wissen baut: Entwicklungspsychologische Erkenntnisse zum Wissenserwerb und zum Erschließen von Wirklichkeit im Grundschulalter. In **Joachim, Kahlert (Hrsg.):** Wissenserwerb in der Grundschule. Perspektiven erfahren, vergleichen, gestalten. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 1998, S. 7 – 89
- Haupt, Peter:** Die Chemie im Spiegel einer Tageszeitung. Oldenburg: Bibliotheksund Informationssystem der Universität Oldenburg, 2002
- Heithausen, Andreas/Arnolds, Konrad:** Das umgedrehte Wasserglas - ein einfaches Experiment zur Untersuchung des Luftdrucks. In **Freie Universität Berlin (Hrsg.):** PhyDid - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule. Berlin: Freie Universität Berlin, 2006, Nr. 5 (2006) Band 2  $\langle$ URL: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/download/49/49> $\rangle$  – Zugriff am 06. März 2012, S117 – 122

- Heran-Dörr, Eva:** SUPRA - Sachunterricht praktisch und korrekt - Einheit 1: Feuer / Vorbereitung. Bamberg, 2010a [⟨URL: http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/lernfeld-natur-und-technik/verbrennung/einheit-1-feuer.html?start=2⟩](http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/lernfeld-natur-und-technik/verbrennung/einheit-1-feuer.html?start=2) – Zugriff am 06. Dezember 2011
- Heran-Dörr, Eva:** SUPRA - Sachunterricht praktisch und korrekt - Luft / Fachdidaktische Informationen. Bamberg: Otto Friedrich-Universität, 2010b [⟨URL: http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/images/stories/Luft/doks/fachdidakt\\_infos.pdf⟩](http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/images/stories/Luft/doks/fachdidakt_infos.pdf) – Zugriff am 06. Dezember 2011
- Heran-Dörr, Eva:** SUPRA - Sachunterricht praktisch und korrekt - Luft / Sachinformationen für die Lehrkraft. Bamberg: Otto Friedrich-Universität, 2010c [⟨URL: http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/images/stories/Luft/doks/sachinfos\\_lehrkraft.pdf⟩](http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/images/stories/Luft/doks/sachinfos_lehrkraft.pdf) – Zugriff am 20. Dezember 2011
- Hering, Ekbert/Martin, Rolf/Stohrer, Martin:** Physik für Ingenieure. 10. Auflage. Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- HF Sicherheitskleidung:** Was der Spezialist für Schutzkleidung in Ihrer Feuerwehr über unsere Schutzkleidung wissen sollte. Vohburg: HF Sicherheitskleidung, 2012 [⟨URL: http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CFkQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.hf-sicherheitskleidung.de%2Findex.php%3Fid%3D33%26no\\_cache%3D1%26cid%3D210%26did%3D113%26sechash%3D37269a8e&ei=AH1aUNL5NvTS4QSZwIGADw&usg=AFQjCNEETJrOUTa7GcEdKXEuxm9nNRsrRw⟩](http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CFkQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.hf-sicherheitskleidung.de%2Findex.php%3Fid%3D33%26no_cache%3D1%26cid%3D210%26did%3D113%26sechash%3D37269a8e&ei=AH1aUNL5NvTS4QSZwIGADw&usg=AFQjCNEETJrOUTa7GcEdKXEuxm9nNRsrRw) – Zugriff am 02. August 2012
- Jung, Walter:** Alltagsvorstellungen und das Lernen von Physik und Chemie. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004, S. 15 – 19
- Kahlert, Joachim/Demuth, Reinhard:** Wir experimentieren in der Grundschule Teil 1. Köln: Aulis-Verlag Deubner, 2007
- Kameier, Frank et al.:** Freihandversuche zur Kinderfachhochschule - Eine Zusammenstellung von Experimenten. Düsseldorf: Fachhochschule Düsseldorf, 2011 [⟨URL: http://mv.fh-duesseldorf.de/d\\_pers/Kameier\\_Frank/i\\_Fahrradphysik/sammlung\\_freihandversuche290311.pdf⟩](http://mv.fh-duesseldorf.de/d_pers/Kameier_Frank/i_Fahrradphysik/sammlung_freihandversuche290311.pdf) – Zugriff am 14. März 2012
- Kilian, Ulrich/Weber, Christine:** Lexikon der Physik Band 3. Heidelberg: Spektrum, 1999
- Kilian, Ulrich/Weber, Christine:** Lexikon der Physik Band 4. Heidelberg: Spektrum, 2000a

- Kilian, Ulrich/Weber, Christine:** Lexikon der Physik Band 5. Heidelberg / Berlin: Spektrum, 2000b
- Kramer, Klaus:** Allgemeine Richtlinien für die Langzeitarchivierung von fotografischem Material in Museen und Archiven - Schadenserkenkung und Begrenzung bei Foto- und Filmmaterial, u.a. Behandlung von Nitrat-Filmmaterial und Glasnegativen. Aichhalden, 2006 [URL: http://www.klauskramer.de/Richt/ric\\_top.html#Brandgef?hrlicher%20Nitratfilm](http://www.klauskramer.de/Richt/ric_top.html#Brandgef?hrlicher%20Nitratfilm) – Zugriff am 04. Januar 2012
- Kurzweil, Peter/Frenzel, Bernhard/Gebhard, Florian:** Physik Formelsammlung. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2008
- Leitner, Ernst/Finckh, Uli/Fritsche, Frank:** Welchen Unterdruck erzeugt ein Staubsauger. Breitbrunn / München: Ernst Leitner und Uli Finckh [URL: http://www.leifiphysik.de/web\\_ph08\\_g8/heimversuche/11druck/staubsauger/staubsaug.htm](http://www.leifiphysik.de/web_ph08_g8/heimversuche/11druck/staubsauger/staubsaug.htm) – Zugriff am 26. Januar 2012
- Interthal, Werner/Wilski, Hans:** Die Verminderung des Reibungswiderstandes von Flüssigkeiten durch Zusatz von Polymeren. In **GmbH, Verlag Chemie (Hrsg.):** Chemie Ingenieur Technik. Weinheim: Verlag Chemie GmbH, 2004, Volume 54 [URL: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330540609/pdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.330540609/pdf) – Zugriff am 23. März 2012, S592 – 595
- Müller, Rainer:** Physik in interessanten Kontexten. Kiel: Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) an der Universität Kiel, 2007 [URL: https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/physik-in-interessanten-kontexten-rmueller.pdf](https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/ifdn-physik/physik-in-interessanten-kontexten-rmueller.pdf) – Zugriff am 30. Juli 2012
- Pasch, Ulrich:** Brandschutzforschung - Untersuchungen zur Simulation ausgewählter Brandkenngrößen und deren Wirkung auf die persönliche Schutzausrüstung des Feuerwehrangehörigen. Heyrothsberge: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1994 [URL: http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK\\_Ber.\\_Nr.\\_91.pdf](http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._91.pdf) – Zugriff am 25. Januar 2012
- Pichler, Wilhelm:** Forscherheft - Luft und Wasser. Seckau, 2005 [URL: http://www.wilhelmpichler.at/download/forscherhefte/luft\\_wasser.pdf](http://www.wilhelmpichler.at/download/forscherhefte/luft_wasser.pdf) – Zugriff am 17. Januar 2012
- Pieterek, Karl:** Fettbrand - eine Gefahr für Haus und Familie. München: Bayerisches Staatsministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (StMJV), 2009 [URL: http://www.vis.bayern.de/produktsicherheit/praevention/verhalten/fettbrand.htm](http://www.vis.bayern.de/produktsicherheit/praevention/verhalten/fettbrand.htm) – Zugriff am 11. Januar 2012
- Rosenbauer International AG:** Fox - Premium Tragkraftspritze. Leonding: Rosenbauer International AG, 2007 [URL: http://www.rosenbauer.com/index](http://www.rosenbauer.com/index).

php?USER=f5fee0d47d629552a63353bc8665e2df&node\_id=7746#s) – Zugriff am 7. Februar 2012

**Schecker, Horst/Wessels, Johannes:** Dienstanweisung zum Umgang, zur Bearbeitung und Lagerung von Nitrofilmen (Zellhorn) im Bundesarchiv-Filmarchiv. Bremen: Institut für Didaktik der Physik, 2000 (URL: [http://didaktik.physik.uni-bremen.de/cpu/mat\\_mbs/numerisch.pdf](http://didaktik.physik.uni-bremen.de/cpu/mat_mbs/numerisch.pdf)) – Zugriff am 05. April 2012

**Schlichting, Hans Joachim:** Leere - nichts als Luft. In Praxis der Naturwissenschaften - Physik 49. Köln: Aulis-Verlag Deubner, 1994, Nr. 4, S. 18 – 19

**Schmidt, Bärbel:** NAWigator 5 Natur und Technik Bayern. Stuttgart: Klett Verlag, 2003

**Schott/Ritter:** Feuerwehr Grundlehrgang FwDv 2/2. 16. Auflage. Marburg: Wenzel-Verlag, 2009

**Schrobsdorff, Barbara:** Schutzkleidung für die Brandbekämpfung EN 469: 2005 und HuPF:2006 - Aufbau, Prüfung, Korrelation zur Praxis und Tipps für die Beschaffung. Bönningheim: Hohenstein Institute, 2011 (URL: [http://www.hohenstein.de/de/inline/pressrelease\\_10439.xhtml](http://www.hohenstein.de/de/inline/pressrelease_10439.xhtml)) – Zugriff am 02. August 2012

**Schwanke, Karsten et al.:** Naturkatastrophen: Wirbelstürme, Beben, Vulkanausbrüche - Entfesselte Gewalten und ihre Folgen. 2. Auflage. Berlin / Heidelberg: Springer, 2009

**Séré, Marie-Geneviève:** Der gasförmige Zustand. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004, S. 199 – 214

**Staatliche Feuerweherschule Würzburg:** Winterschulung 2008 / 2009 - Thema: Einsatzgrundsätze bei Gasausströmungen. Würzburg: Staatliche Feuerweherschule Würzburg, 2008 (URL: [http://www.sfs-w.de/lehrmittel/\\_pdf/winterschulung/winterschulung2008.pdf](http://www.sfs-w.de/lehrmittel/_pdf/winterschulung/winterschulung2008.pdf)) – Zugriff am 02. Januar 2012

**Staatliche Feuerweherschule Würzburg:** Wasserförderung über lange Schlauchstrecken: Merkblatt für die Feuerwehren Bayern. Würzburg: Staatliche Feuerweherschule Würzburg, 2009 (URL: [http://www.sfs-w.de/lehrmittel/abwehrenderbrandschutz/05\\_008\\_2011-07-19.pdf](http://www.sfs-w.de/lehrmittel/abwehrenderbrandschutz/05_008_2011-07-19.pdf)) – Zugriff am 01. März 2012

**Staatliche Feuerweherschule Würzburg:** Wissenstest 2010 - Brennen und Löschen. Würzburg: Staatliche Feuerweherschule Würzburg, 2010 (URL: [http://www.sfs-w.de/lehrmittel/\\_pdf/wissenstest/wissenstest\\_2010.pdf](http://www.sfs-w.de/lehrmittel/_pdf/wissenstest/wissenstest_2010.pdf)) – Zugriff am 09. Januar 2012

**Staatliche Feuerweherschule Würzburg:** Feuerlöschkreiselpumpen und Entlüftungseinrichtungen. Würzburg: Staatliche Feuerweherschule Würzburg,



- 2011  $\langle$ URL: [http://www.sfs-w.de/lehrmittel/fzgunaetkunde/08\\_06\\_2011-07-22.pdf](http://www.sfs-w.de/lehrmittel/fzgunaetkunde/08_06_2011-07-22.pdf) $\rangle$  – Zugriff am 6. Februar 2012
- Stalke, Dietmar:** Magnesium verbrennt unter Wasser. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen, 2011  $\langle$ URL: <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/2111> $\rangle$  – Zugriff am 20. Juni 2012
- Stöcker, Horst:** Taschenbuch der Physik. 5. Auflage. Frankfurt: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2005
- Steffensky, Mirjam:** Fachdidaktische Informationen - Feuer und Verbrennung. In **Heran-Dörr, Eva (Hrsg.):** SUPRA - Sachunterricht praktisch und konkret. Bamberg: Otto Friedrich-Universität, 2010  $\langle$ URL: <http://www.supra.grundschuldidaktik.uni-bamberg.de/lernfeld-natur-und-technik/verbrennung/fachdidaktische-informationen.html> $\rangle$  – Zugriff am 06. Dezember 2011, –
- Straumann, Ulrich:** Statik und Dynamik der Gase und Flüssigkeiten. Zürich: Universität Zürich, 2011  $\langle$ URL: <http://www.physik.uzh.ch/~strauman/physik-a/Hydrodynamik.pdf> $\rangle$  – Zugriff am 16. Februar 2012
- Stuart, Herbert/Klages, Gerhard:** Wärmelehre. In Kurzes Lehrbuch der Physik Springer, 2006, Springer-Lehrbuch, 83–114
- Tipler, Paul A.:** Physik. 3. Auflage. Heidelberg / Berlin: Spektrum, 2000
- Wagner, Walter:** Strömung und Druckverlust: Mit Beispielsammlung. 6. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag Und Druck, 2008
- Weber, Hartmut:** Dienstanweisung zum Umgang, zur Bearbeitung und Lagerung von Nitrofilmen (Zellhorn) im Bundesarchiv-Filmarchiv. Berlin: Bundesarchiv, 2003  $\langle$ URL: [http://www.bundesarchiv.de/imperia/md/content/abteilungen/abtfa/filmtechnik\\_konservierung\\_restaurierung/dienstanweisung\\_nitro.pdf](http://www.bundesarchiv.de/imperia/md/content/abteilungen/abtfa/filmtechnik_konservierung_restaurierung/dienstanweisung_nitro.pdf) $\rangle$  – Zugriff am 04. Januar 2012
- Weber, Judith:** Abgeschnittene Flamme. Witten,  $\langle$ URL: <http://www.physikanten.de/shows/alle-experimente/abgeschnittene-flamme?PHPSESSID=dhab38j1ogtkip572hmje05gr2> $\rangle$  – Zugriff am 01. Januar 2012
- Wengel, Andrea:** Zeitreise: Geschichte der Feuerwehr. SWR Fernsehen, 2006  $\langle$ URL: <http://www.swr.de/odyssey/-/id=1046894/nid=1046894/did=2258990/150kpa3/index.html> $\rangle$  – Zugriff am 02. April 2012
- Wiesner, Hartmut/Stengl, Dagmar:** Vorstellungen von Schülern der Primarstufe zu Temperatur und Wärme. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004, S. 83 – 89

- Wilhelm, Thomas:** Beispiele für Freihandversuche zu ausgewählten Themen des Physikunterrichts am Gymnasium (Physik). München: Bayerischer Philologenverband, 2002
- Wilhelm, Thomas:** Exemplarisches Vorstellen eines physikalischen Themas: Luftdruck. Würzburg, 2003 (URL: <http://www.thomas-wilhelm.net/Vortraege/luft.pdf>) – Zugriff am 04. Juli 2012, RLFB-Tagung „Natur und Technik“
- Wilhelm, Thomas/Lück, Stephan:** Modellierung physikalischer Vorgänge am Computer. Würzburg, 2011 (URL: <http://www.thomas-wilhelm.net/veroeffentlichung/Modellbildung.pdf>) – Zugriff am 25. Juli 2012
- Wodzinski, Rita:** Neuere Konzepte zur Behandlung des Drucks in der Sekundarstufe I - Vortrag auf dem Erlanger Physik-Wochenende, 9. Oktober 1999. München, 1999 (URL: [http://www.leifiphysik.de/web\\_ph08\\_g8/lehrerseiten/11druckgedanken/wodzinski.pdf](http://www.leifiphysik.de/web_ph08_g8/lehrerseiten/11druckgedanken/wodzinski.pdf)) – Zugriff am 07. Dezember 2011
- Wodzinski, Rita:** Zustandsgröße Druck - Zur Einführung des Druckbegriffs in der Sekundarstufe I. In **Müller Rainer, Wodzinski Rita, Martin Hopf (Hrsg.):** Schülervorstellungen in der Physik. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2004, S. 215 – 217

# Anhang



**A. Excel-Tabelle zur numerischen  
Berechnung der Flugbahn eines  
Wasserstrahles mit Luftreibung**

A. Excel-Tabelle zur numerischen Berechnung der Flugbahn eines Wasserstrahles mit Luftreibung

<b>Flugbahn mit Luftreibung</b>	$F = m \cdot a$ (Newton)
<b>Kraft</b>	
<b>Mittlere Beschleunigung im Zeitintervall <math>\Delta t</math></b>	$a = \Delta v / \Delta t = (v_2 - v_1)$
<b>Kräfte</b>	
<b>Luftwiderstandskraft</b>	$F_L = c_W \cdot A \cdot \rho_L \cdot v_1^2 / 2$ mit $v_1 = \text{sqrt}(v_{x,1}^2 + v_{y,1}^2)$
<b>Gewichtskraft</b>	$F_G = m \cdot g$
<b>Bewegungsgleichungen</b>	
<b>in x-Richtung</b>	$\Delta v_x = (F_{L,x} / m) \cdot \Delta t$ $\rightarrow v_{x,i+1} = v_{x,i} + \Delta v_x$ $\Delta x = v_{x,i} \cdot \Delta t$ $\rightarrow x_{i+1} = x_i + \Delta x$
<b>in y-Richtung</b>	$\Delta v_y = (-g + (F_{L,y} / m)) \cdot \Delta t$ $\rightarrow v_{y,i+1} = v_{y,i} + \Delta v_y$ $\Delta y = v_{y,i} \cdot \Delta t$ $\rightarrow y_{i+1} = y_i + \Delta y$
<b>Anfangsbedingungen</b>	$x_0 / m = 0$ $y_0 / m = 0$ $v_{x,0} / (m/s) = 23$ $v_{y,0} / (m/s) = 23$
<b>Abhängige Größen</b>	$A / m^2 = 0,00038$ $m / kg = 0,00558$ $A = \text{Stirnfläche Tropfen}$ $m = \text{Masse Tropfen}$
<b>Konstanten</b>	$\rho_W / (kg / m^3) = 1000$ $\rho_L / (kg / m^3) = 1,2$ $g / (m/s^2) = 9,81$ $\rho_W = \text{Dichte Wasser}$ $\rho_L = \text{Dichte Luft}$ $g = \text{Fallbeschleunigung}$
<b>Variable Größen</b>	$r / mm = 11$ $c_W = 0,45$ $\Delta t / s = 0,02$ $r = \text{Radius Tropfen}$ $c_W = \text{Luftwiderstandsbeiwert}$ $\Delta t = \text{Zeitintervall}$
<b>Anfangsbedingungen</b>	$x_0 = \text{Startpunkt (x-Komp.)}$ $y_0 = \text{Startpunkt (y-Komp.)}$ $v_{x,0} = \text{Anfangsgeschwindigkeit (x-Richtung)}$ $v_{y,0} = \text{Anfangsgeschwindigkeit (y-Richtung)}$

Abbildung A.1.: Excel-Tabelle zur Berechnung der Flugbahn eines Wassertropfens unter Berücksichtigung der Luftreibung

Berechnete Werte

i	$\tau / s$	$E_L / N$	$E_{Lz} / N$	$E_{Ly} / N$	$v_{x, i} / (m/s)$	$v_{y, i} / (m/s)$	$x / m$	$y / m$
0	0,00	0,10659	-0,07678	-0,07678	23,00	23,00	0,00	0,00
1	0,02	0,10509	-0,07463	-0,07399	22,72	22,53	0,46	0,46
2	0,04	0,10174	-0,07257	-0,07131	22,46	22,07	0,91	0,91
3	0,06	0,09852	-0,07058	-0,06873	22,20	21,61	1,36	1,35
4	0,08	0,09543	-0,06867	-0,06626	21,94	21,17	1,81	1,78
5	0,10	0,09246	-0,06684	-0,06388	21,70	20,74	2,25	2,21
6	0,12	0,08960	-0,06507	-0,06160	21,46	20,31	2,68	2,62
7	0,14	0,08686	-0,06337	-0,05940	21,22	19,90	3,11	3,03
8	0,16	0,08422	-0,06173	-0,05729	21,00	19,49	3,53	3,43
9	0,18	0,08168	-0,06015	-0,05526	20,78	19,08	3,95	3,82
10	0,20	0,07924	-0,05863	-0,05330	20,56	18,69	4,37	4,20
11	0,22	0,07688	-0,05716	-0,05141	20,35	18,30	4,78	4,57
12	0,24	0,07461	-0,05574	-0,04960	20,14	17,92	5,19	4,94
13	0,26	0,07243	-0,05438	-0,04784	19,94	17,55	5,59	5,30
14	0,28	0,07032	-0,05306	-0,04616	19,75	17,18	5,99	5,65
15	0,30	0,06829	-0,05178	-0,04453	19,56	16,82	6,38	5,99
16	0,32	0,06634	-0,05055	-0,04296	19,37	16,46	6,78	6,33
17	0,34	0,06445	-0,04936	-0,04144	19,19	16,11	7,16	6,66
18	0,36	0,06262	-0,04821	-0,03997	19,01	15,77	7,55	6,98
19	0,38	0,06086	-0,04709	-0,03856	18,84	15,43	7,93	7,29
20	0,40	0,05917	-0,04601	-0,03719	18,67	15,09	8,30	7,60
21	0,42	0,05753	-0,04497	-0,03587	18,51	14,76	8,68	7,90
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
160	3,20	0,02436	-0,01369	0,02015	8,66	-12,74	43,71	5,62
161	3,22	0,02460	-0,01368	0,02045	8,61	-12,87	43,88	5,37
162	3,24	0,02484	-0,01367	0,02074	8,56	-12,99	44,05	5,11
163	3,26	0,02508	-0,01366	0,02104	8,51	-13,11	44,23	4,85
164	3,28	0,02532	-0,01364	0,02133	8,46	-13,23	44,40	4,59
165	3,30	0,02556	-0,01363	0,02163	8,41	-13,35	44,56	4,32
166	3,32	0,02581	-0,01361	0,02192	8,36	-13,47	44,73	4,05
167	3,34	0,02605	-0,01360	0,02222	8,32	-13,59	44,90	3,79
168	3,36	0,02629	-0,01358	0,02251	8,27	-13,71	45,07	3,51
169	3,38	0,02654	-0,01356	0,02281	8,22	-13,82	45,23	3,24
170	3,40	0,02678	-0,01354	0,02310	8,17	-13,93	45,40	2,96
171	3,42	0,02702	-0,01353	0,02340	8,12	-14,05	45,56	2,68
172	3,44	0,02727	-0,01350	0,02369	8,07	-14,16	45,72	2,40
173	3,46	0,02751	-0,01348	0,02398	8,02	-14,27	45,88	2,12
174	3,48	0,02776	-0,01346	0,02428	7,98	-14,38	46,04	1,83
175	3,50	0,02800	-0,01344	0,02457	7,93	-14,49	46,20	1,55
176	3,52	0,02825	-0,01342	0,02486	7,88	-14,60	46,36	1,26
177	3,54	0,02849	-0,01339	0,02515	7,83	-14,71	46,52	0,97
178	3,56	0,02874	-0,01337	0,02544	7,78	-14,81	46,68	0,67
179	3,58	0,02898	-0,01334	0,02573	7,74	-14,92	46,83	0,37

Abbildung A.2.: Excel-Tabelle zur Berechnung der Flugbahn eines Wassertropfens unter Berücksichtigung der Luftreibung





**B. Modellierung der Flugbahn eines  
Wasserstrahles mit und ohne  
Luftreibung mit dem Programm  
modellus 4.01**

B. Modellierung der Flugbahn eines Wasserstrahles mit und ohne Luftreibung mit dem Programm modellus 4.01

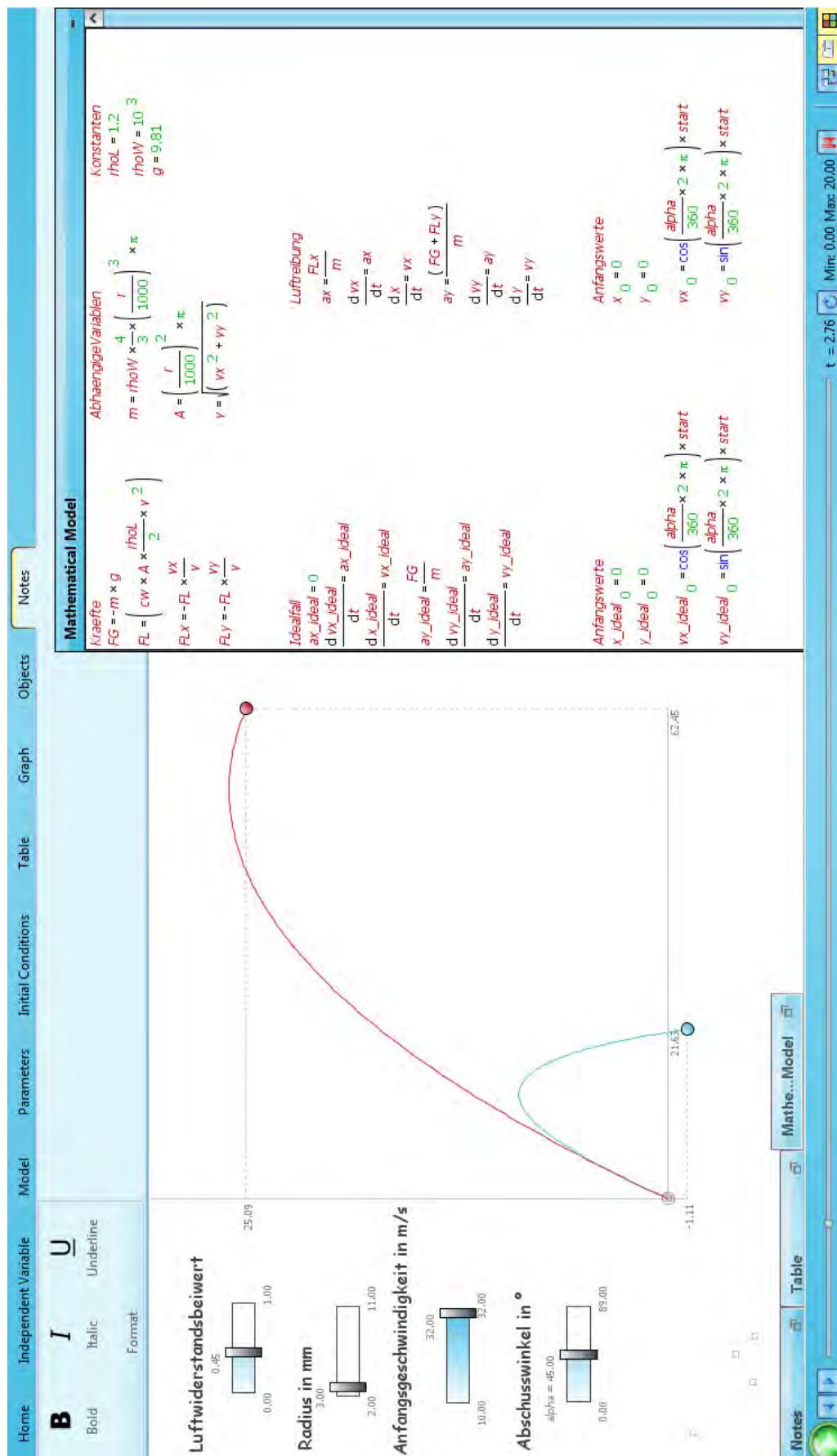


Abbildung B.1.: Simulation der Flugbahn eines Tropfens mit (blau) und ohne (rot) Luftreibung in Abhängigkeit des Abschusswinkels mit dem Programm Modellus 4.01. Aus Übersichtlichkeitsgründen wurden die Eingaben im Mathematical Model über ein Bildbearbeitungsprogramm zusammengeführt.

# Danksagung

Abschließend möchte ich mich herzlich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

- **Herrn Prof. Dr. Thomas Wilhelm** für die Möglichkeit, dieses sehr interessante Thema zu bearbeiten. Für die sehr gute Betreuung, dafür dass er immer Zeit für meine Fragen hatte und mich mit zahlreichen anregenden Ratschlägen, Literaturverweisen und konstruktiven Feedback unterstützt hat.
- **Herrn Dr. Stephan Lück** für die Unterstützung durch sein Fachwissen und seine Erfahrung im Bereich der Strömungslehre.
- **Markus Sauer, Sabrina Keith und Stefan Saftenberger** für die sehr gute Arbeitsatmosphäre, zahlreiche physikalische Diskussionen und die Hilfestellungen beim Layouten meiner Arbeit.
- **Felix und Lukas Götz** für das Korrekturlesen und die konstruktive Kritik.
- **Der freiwilligen Feuerwehr Margetshöchheim** für die Durchführung einer Fettexplosion.
- Meiner Familie und meinen Freunden, die mich während meiner Arbeit stets unterstützten haben.



# Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die diesen Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder sinngemäß entnommenen Ausführungen als solche kenntlich gemacht habe. Alle Abbildungen und Tabellen habe ich, soweit nicht anders angegeben, selbst erstellt.

Würzburg, den

---

---

Wolfgang Lutz