



Leonard Bauersfeld, *1997
Marcel Neidinger, *1996

Schule: Hans-Thoma Gymnasium,
Lörrach

Eingang der Arbeit:
September 2013

Zur Veröffentlichung angenommen:
Oktober 2013

Der Kerzenlift

Physikalisch-chemische Untersuchung eines klassischen Experiments

Es ist ein verblüffendes Experiment: Stülpt man ein Wasserglas über ein brennendes Teelicht, das in einer mit Wasser gefüllten Untertasse schwimmt, so erlischt die Kerze nach einigen Sekunden. Doch warum steigt nach dem Erlöschen der Wasserspiegel? Um diesem Phänomen auf die Spur zu kommen, wurde ein Versuchsaufbau realisiert und systematische Untersuchungen durchgeführt.

1 Einleitung

Damit Schiffe Höhenunterschiede in Flüssen überwinden können, verwendet man heutzutage aufwendige Wasserhebewerke, genannt Schleusen. Fast so alt wie die Schifffahrt selbst, ist das von uns untersuchte Phänomen, der sogenannte Kerzenlift. Bei einer Schleuse wird das Wasser in eine Kammer geleitet und drückt das Schiff nach oben. Die dafür verwendete Technik ist kostspielig und wartungsintensiv. Der von uns untersuchte Kerzenlift besteht hingegen aus einfachen Haushaltsmaterialien: einem Teller mit Wasser, einem Teelicht und einem Glas. Nach dem Entzünden des auf dem Wasser schwimmenden Teelichts stülpt man das Glas über die brennende Kerze. Nach kurzer Zeit erlischt die Flamme und das Wasser steigt im Glas nach oben. Wie lässt sich dieser seit langem bekannte, erstmals 1674 erwähnte [1] und doch überraschende Wasseranstieg erklären? Da dieses

Phänomen auch eine Fragestellung des IYPT-Wettbewerbs 2013 (International Young Physicist Tournament) ist, und uns der Versuchsausgang sehr neugierig gemacht hat, haben wir beschlossen, diesen Kerzenlift näher zu untersuchen. Zu Beginn haben wir den Versuch in seiner einfachen Version (im Folgenden stets als „klassischer Kerzenlift“ bezeichnet) näher untersucht. Um der Ursache für den Wasseranstieg auf den Grund zu gehen, realisierten wir nach einer ausführlichen Theoriebetrachtung einen aufwändigen Versuchsaufbau. Mit diesem konnten wir dann die Ursache für den Wasseranstieg eindeutig identifizieren.

2 Der klassische Kerzenlift

Zunächst haben wir einige Experimente zu dem „klassischen Kerzenlift“ durchgeführt. Um Details im Versuchsaufbau zu erkennen, wurden alle Experimente mit einer Videokamera aufgezeich-

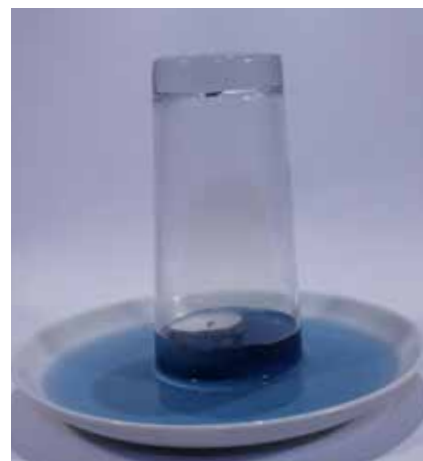


Abb. 1: Der Wasseranstieg beim Kerzenlift.

net. Eines dieser Videos haben wir auf Youtube hochgeladen (<http://www.youtube.com/watch?v=UJ-AxINk0d8>). Damit das Wasser besser sichtbar war, wurde es mit Methylenblau eingefärbt. Es wurden handelsübliche Teelichter und Bechergläser verwendet.

Zunächst wurde das Teelicht angezündet und anschließend in das Wasser gesetzt (siehe Abb. 2, Phase 1). Dann wurde ein 500 ml Becherglas übergestülpt. Dabei konnten wir folgende Beobachtungen machen:

Geschah das Überstülpen schnell, stiegen direkt nach dem Aufsetzen Gasblasen an der Seite des Becherglases auf (siehe Abb. 2, Phase 2). Je schneller das Becherglas aufgesetzt wurde, desto mehr Blasen bildeten sich. Dies liegt vermutlich daran, dass sich die Luft in 2 dem Becherglas durch die Erwärmung des Teelichts ausdehnt. Wird das Becherglas hingegen langsam aufgesetzt, so ist die Erwärmung der Luft in dem Glas vermutlich bereits abgeschlossen. Daher findet keine weitere Volumenausdehnung der Luft statt. Dabei ist zu beachten, dass beim langsamen Aufsetzen das Becherglas stärker erwärmt wird, als bei einem schnellen Aufsetzen des Glases. Solange die Kerze brennt, und das Glas bereits auf dem Wasser aufgesetzt ist, steigt das Wasser im Becherglas in beiden, oben beschriebenen Fällen an. Bereits während des Brennens bildet sich Kondenswasser an den Wänden des Becherglases (siehe Abb. 2, Phase 3).

Etwa 20 Sekunden nach dem Überstülpen erlischt das Teelicht, und das Wasser steigt nun schneller an. Wird das Becherglas nun solange stehen gelassen, bis sich dieses - samt Gas im Inneren - wieder abgekühlt hat, ist ein weiterer Anstieg um etwa 0,5 cm festzustellen. Bei mehreren Versuchen betrug der Anstieg bei diesem 500 ml Becherglas etwa 1,9 cm. Dies entspricht 20 % des Gasvolumens. Das Experiment wurde mit Bechergläsern verschiedener Volumina wiederholt. Dabei ergaben sich die in Tab. 1 dargestellten Ergebnisse.

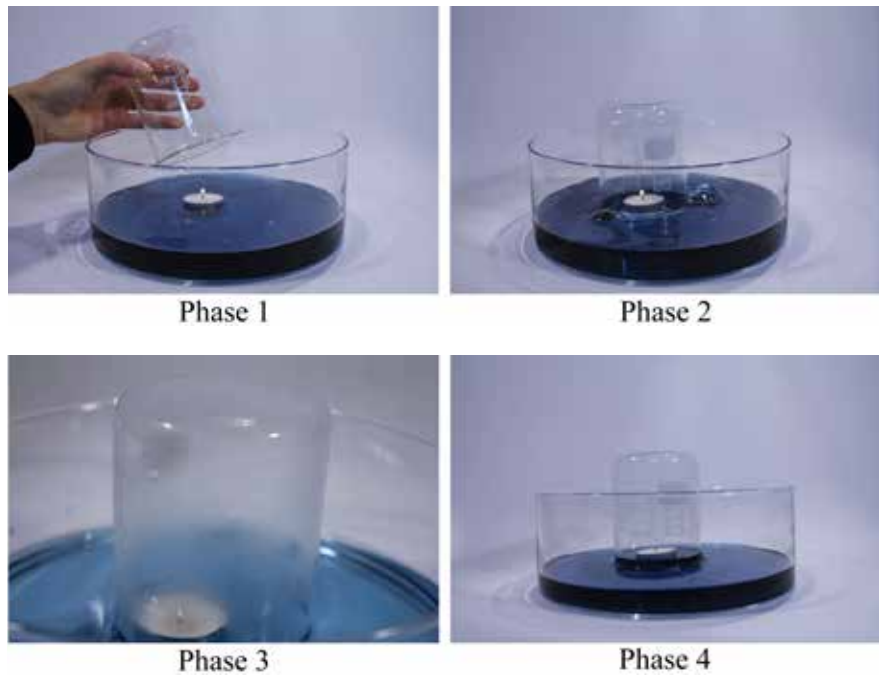


Abb. 2: Die vier Phasen des Kerzenlifts: Überstülpen, Brennen, Erlöschen, Abkühlen.

Nach jedem der in der Tab. 1 angeführten Versuche wurde gewartet, bis sich das Gas abgekühlt hatte. Alle Versuche wurden mit geradwandigen Bechergläsern und bei Raumtemperatur durchgeführt. Erkennbar ist die annähernde Proportionalität der Brenndauer zum Volumen des Becherglases. Dies gilt jedoch nicht bei sehr kleinen Volumina, da dort mehr Sauerstoff verbrannt wird. Der Grund hierfür könnte sein, dass die Konvektion innerhalb eines kleinen Glases deutlich stärker ist, als bei großen Bechergläsern. So könnte mehr Sauerstoff ausgenutzt werden.

Werden Gefäße verwendet, die deutlich höher als breit sind (siehe Tab. 1), ist es wichtig, dass das Teelicht auf einem Fuß steht. Da bei der Verbrennung Kohlenstoffdioxid entsteht und dieses eine größere Dichte als Luft hat, sinken die Kohlenstoffdioxidmoleküle nach unten. Die Folge ist, dass das Teelicht erstickt.

Dieser Effekt ist bei hohen Gefäßen aufgrund ihres großen Volumens im Verhältnis zu ihrem Durchmesser besonders ausgeprägt. Steht das Teelicht aber auf einem Fuß in erhöhter Position, kann es mehr Sauerstoff verbrauchen, da die Flamme nicht vom Kohlenstoffdioxid erstickt wird. In diesem Fall wird die Brenndauer nicht mehr von der Form des Gefäßes beeinflusst.

Wird das Glas langsamer übergestülpt, bewirkt dies eine kürzere Brenndauer, jedoch einen höheren Wasseranstieg. Ursache der kürzeren Brenndauer ist, dass bereits in Phase 1 (siehe Abb. 2) ein Teil des Sauerstoffs im Glas verbraucht wird. Da Phase 1 aber bei langsamem Überstülpen länger dauert, ist die Temperaturdifferenz größer. Somit kann sich das Gasvolumen beim Abkühlen stärker zusammenziehen und verursacht einen geringfügig höheren Wasseranstieg. Aus diesen Vorversuchen lässt sich erkennen,

V_B	$\Delta V[\%]$ $t_{\epsilon} < 1s$	$\Delta V[\%]$ $t_{\epsilon 0} = 20s$	$t_b[s]$ $t_{\epsilon} < 1s$	$t_b[s]$ $t_{\epsilon} = 20s$	$\Delta V[\%]$ $t_{\epsilon} < 1s(Fu\beta)$	$t_b[s]$ $t_{\epsilon} = 1s(Fu\beta)$
130(n)	31	30	5	1	-	-
500(n)	19	20	15	10	16	19
1000(n)	12,4	16,6	34,2	11,1	13,8	33,8
2000(n)	10,8	11,7	69,1	58,3	11,7	71,1
2000(n)	10,1	-	58,5	-	11,1	70,2

Tab. 1: V_B Volumen des Becherglases in ml, (h) Verhältnis des Gefäßes von Höhe/Breite = 5/1, (n) Verhältnis von Höhe/Breite des Gefäßes = 1,25/1, ΔV Wasseranstieg nach dem Abkühlen in Prozent, t_{ϵ} Dauer des Überstülpens, t_b Brenndauer des Teelichts, (Fu β) Teelicht stand auf einem 3,5 cm hohen Fuß.

dass die Dauer des Überstülpens einen kleinen Einfluss auf den Wasseranstieg hat. Aus Tab. 1 lässt sich entnehmen, dass das Volumen des Becherglases der entscheidende Parameter ist. Dabei kann von einer Proportionalität zwischen Volumen und Brenndauer ausgegangen werden.

3 Theoretische Betrachtung

Nach diesen ersten Versuchen haben wir für dieses bekannte Phänomen nach einer Erklärung in der Literatur gesucht. Dabei sind wir auf zwei unterschiedliche Erklärungsansätze gestoßen. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

3.1 Physikalische Erklärung

Die einfache physikalische Erklärung der Literatur (siehe [5]) sagt aus, dass nach dem Erlöschen der Kerze die Temperatur im Gefäß sinkt. Dieses Absinken der Temperatur habe einen geringeren Luftdruck zur Folge. Der höhere äußere Luftdruck drücke daraufhin das Wasser im Glas nach oben. Diese einfache Erklärung scheint naheliegend und zutreffend zu sein, vernachlässigt jedoch die häufig auftretende Blasenbildung (siehe Abb. 2 Phase 2). Das dadurch reduzierte Gasvolumen trägt dann bei der Abkühlung zum scheinbar thermisch bedingten Wasseranstieg bei. Aus physikalischer Sicht sollte daher in einem abgeschlossenen System, bei gleicher Anfangs- und Endtemperatur des Gases keine Änderung des Wasserspiegels zu beobachten sein.

3.2 Chemische Erklärung des Wasseranstiegs

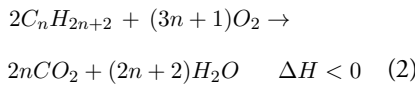
Die einfache „chemische Erklärung“ der Literatur (z. B. [4]) nimmt an, dass die Kerze den in der Luft enthaltenen Sauerstoff verbraucht. Dadurch verringere sich die Teilchenzahl im Glas und der Luftdruck im Inneren sinke. Der äußere Luftdruck drücke nun das Wasser in das Glas. Bei dieser Erklärung werden jedoch die Reaktionsprodukte des Verbrennungsvorgangs ignoriert. Im Folgenden soll daher die Reaktionsgleichung dieses Verbrennungsvorgangs näher betrachtet werden.

Teelichter bestehen aus Paraffin, welches ein Gemisch langkettiger Alkane ist. Verbrennen Kohlenwasserstoffe, entsteht Kohlenstoffdioxid und gasförmiges Wasser. Die allgemeine Formel

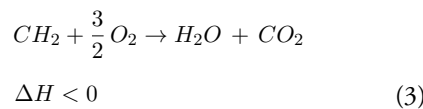
für Kohlenwasserstoffe lautet:



Hierbei gibt n die Anzahl der Kohlenstoffatome an, die eine Kohlenstoffkette bilden. n liegt bei Paraffin zwischen 18 und 24. Reagiert der Kohlenwasserstoff der Kettenlänge n nun mit Sauerstoff, so gilt:



ΔH ist hierbei die Reaktionsenthalpie. Zur Vereinfachung wird die Reaktionsgleichung mit $2n$ gekürzt und kann somit näherungsweise als:



geschrieben werden. In dieser Gleichung wurde C_nH_{2n+2} zu CH_2 vereinfacht. Der dadurch verursachte Fehler kann abgeschätzt werden. Setzt man in Gleichung (2) die Anzahl der benötigten Sauerstoffmoleküle mit der Zahl der entstehenden Kohlenstoffdioxidmoleküle ins Verhältnis, so ergibt sich $2n/(3n+1)$. Im Folgenden wird dieses mit $2/3$ angenähert. Die Abweichung für $n = 18$ zur Näherung $2/3$ beträgt ungefähr 1%.

Bei der Betrachtung der Reaktionsgleichung fällt auf, dass sich die Stoffmenge der gasförmigen Bestandteile vergrößert. 1,5 mol Sauerstoff und 1 mol CH_2 reagieren zu jeweils 1 mol Wasserdampf und 1 mol Kohlenstoffdioxid. Wären alle Reaktionsprodukte gasförmig, hätte dies eine Volumenausdehnung und damit ein Sinken des Wasserspiegels zur Folge. Der entstehende Wasserdampf kondensiert jedoch nach kurzer Zeit an den Wänden des Gefäßes (siehe Abb. 2, Phase 3). Bei diesem Phasenübergang verringert sich das Volumen des Wasserdampfs um das 1700-fache (siehe [2]).

Das bedeutet, dass das Volumen des Sauerstoffs, der zu Wasser reagiert, annähernd wegfällt. Aus gasförmigem Sauerstoff wird somit gasförmiges Kohlenstoffdioxid, während die anderen Stoffe bei dieser Reaktion entweder flüssig oder fest sind. Daher verringert

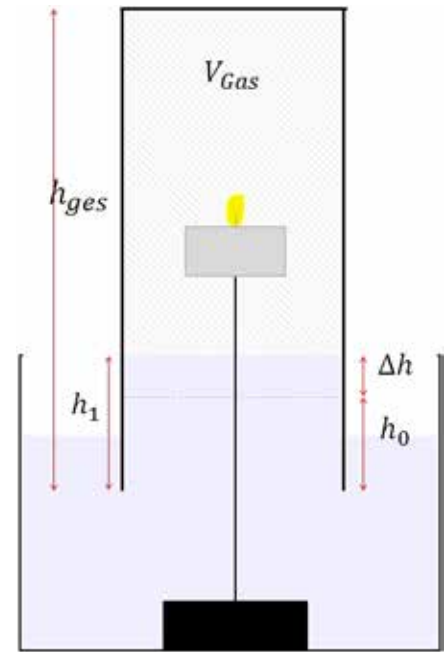


Abb. 3: Parameterskizze mit h_{ges} , Höhe des Zylinders, h_0 Höhe des Wasserspiegels zu Beginn, h_1 Wasserhöhe am Ende des Versuchs.

sich - bezogen auf den verbrauchten Sauerstoff - das Gasvolumen um $1/3$. Das zweite Reaktionsprodukt ist Kohlenstoffdioxid. Dieses Gas kann sich in Wasser lösen und reagiert dort teilweise zu Kohlensäure. Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid ist jedoch sehr gering.

Aufgrund der Reaktionsgleichung lässt sich die Wasserhöhe berechnen. Die folgende Rechnung basiert auf der Annahme, dass $1/3$ des verbrauchten Sauerstoffvolumens zu Wasser reagiert und daher im Gasvolumen nicht mehr zu berücksichtigen ist. Zudem muss die Luft eine Luftfeuchte von 100% besitzen. Außerdem dürfen keine thermischen Effekte (keine Temperaturzunahme) auftreten, und es muss ein abgeschlossenes System vorliegen. Die folgende Formel setzt als Gefäß einen Zylinder mit dem Radius r voraus. Abb. 3 zeigt die relevanten geometrischen Größen. Sind die oben genannten Bedingungen erfüllt, so kann die Endwasserhöhe h_1 theoretisch berechnet werden. Mit ΔO_2 der Abnahme der Sauerstoffkonzentration in % gilt:

$$h_1 = h_0 + (h_{ges} - h_0) \cdot \Delta O_2 \cdot \frac{1}{3} \quad (4)$$

Da bei dem klassischen Kerzenlift sowohl chemische als auch physikalische Effekte gleichzeitig stattfinden, ist dieser „klassische Versuch“ für quantitative

Messungen nicht geeignet. Daher haben wir den folgenden Versuchsaufbau entwickelt. Dieser musste alle wichtigen Parameter (Sauerstoffgehalt, Temperatur, Wasserhöhe) messen können. Zudem war es notwendig, dass Blasenbildung ausgeschlossen werden konnte.

4 Versuchsaufbau

Die Abb. 4 zeigt den Versuchsaufbau mit folgenden Komponenten:

Videotracker: Mithilfe eines selbst geschriebenen Programms, welches auf der freien Programmbibliothek OpenCV und C++ basiert, wird die Position der Kugel aus dem Bild ermittelt. Diese Position der Kugel wird in 100 ms Abschnitten in eine Datei geschrieben.

Plexiglasrohr: Die Röhre war 50 cm lang und hatte einen Durchmesser von 11 cm bzw. 18 cm. Es wurde ein Metalldeckel verwendet, um das Rohr abzudichten, durch welchen die Sensoren geführt wurden. Die unteren 8 Zentimeter des Rohres wurden geflutet.

Deckel: Um die Dichtigkeit des Versuchsaufbaus zu garantieren, wurden zwei Metalldeckel verwendet. Für jedes Messgerät waren Löcher eingelassen, die separat mit Dichtungen abgedeckt waren.

Kompressor: Um nach jedem Versuch gleiche Ausgangsbedingungen herzustellen, wurde ein Kolbenkompressor verwendet. Dieser saugte durch ein Ventil das gesamte Gas aus dem Gefäß. Anschließend konnte neues Gas durch ein Ventil eingeleitet werden. Damit der Kompressor niemals Wasser ansaugt, wurde eine Wasserfalle (10) verwendet. An diese wurde dann der Kompressor angeschlossen. Dieser ist in der Abbildung nicht dargestellt.

Sauerstoffelektrode: Um den Sauerstoffgehalt in dem Plexiglasrohr zu messen, wurde eine Sauerstoffelektrode von Schott-Instruments verwendet. Diese wurde durch den Deckel montiert und an das Messwertaufzeichnungssystem CassyLab angeschlossen. Die Sauerstoffelektrode misst den Sauerstoffgehalt nicht in Prozent, sondern in *mg/l*. Zur Umrechnung des angezeigten Sauerstoffgehalts wurde die Elektrode bei 100 und 0 % Sauerstoff kalibriert. Es

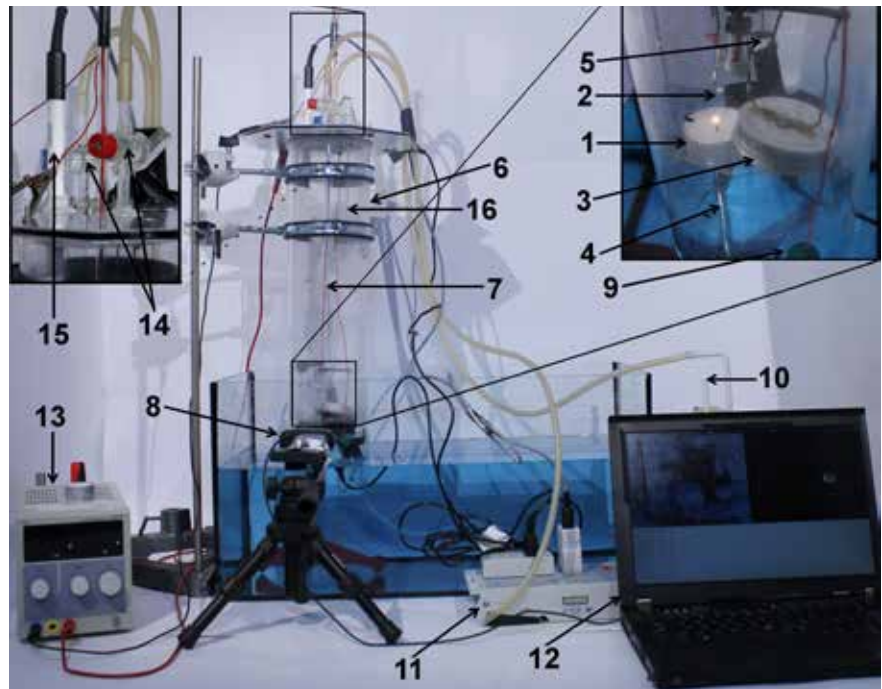


Abb. 4: Der Versuchsaufbau mit

- | | | | |
|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 1 Teelicht | 5 Thermometer | 9 Grüne Kugel | 13 Netzteil |
| 2 Anzünddraht | 6 Plexiglasrohr | 10 Wasserfalle | 14 Ein/Auslassventil |
| 3 Abdeckkappe | 7 Glasrohr | 11 Cassy | 15 O ₂ -Elektrode |
| 4 Fuß | 8 Webcam | 12 Videotracker | 16 Thermometer 2 |

ergab sich ein Umrechnungsfaktor von 13 %* l/ mg.

Kohlenstoffdioxidensor: Der Kohlenstoffdioxidensor musste außerhalb des Gefäßes angebracht sein, da dieser nicht wasserfest ist. Das durch den Kompressor abgesaugte Gas wurde in eine CO₂ Messkammer geleitet. Diese ist nicht im Bild zu sehen.

Thermometer: Zur Messung der Temperatur wurden 2 Thermometer verwendet. Thermometer 1 war oben, Thermometer 2 in der Mitte der Plexiglasröhre angebracht.

Cassy (Messwertaufzeichnungssystem): Computeraufzeichnung von Temperatur, Sauerstoffgehalt, und Kohlenstoffdioxidgehalt.

Abdeckkappe: Damit das Teelicht nicht bei jedem Gasaustausch nass wurde, bedeckte eine Abdeckplatte das Teelicht während des Flutens. Diese war auf einem beweglichen Glasrohr montiert.

Anzünddraht: Zum Anzünden wurde ein Konstantan Draht mit einem Netzteil zum Glühen gebracht. Dessen Hitze entflammte das Teelicht. Nach dem

Anzünden wurde der Draht weggedreht, um das Teelicht nicht beim Brennen zu behindern.

Ball: Um die Wasserhöhe mittels Videotracking aufzeichnen zu können, haben wir einen grünen Ball verwendet. Dieser schwimmt auf der Wasseroberfläche und wird durch eine Schnur horizontal fixiert.

Webcam: Um präzise Messwerte zum Höhenverlauf zu erhalten, wurde ein von uns entwickelter Videotracker verwendet. Dieser erfasst eine grüne Kugel auf der Wasseroberfläche.

Teelicht: Es wurden handelsübliche Teelichter verwendet. Damit die Teelichter ihre Position während des Versuchs nicht ändern, waren sie auf einem Fuß 12 cm über der Unterkante des Rohres befestigt.

5 Experimente

Der in Abb. 4 gezeigte Versuchsaufbau ermöglichte es, die Messungen in einem abgeschlossenen System durchzuführen. Somit war ein Teilchenaustausch zwischen System und Raum nicht möglich. Hiermit konnte der Kerzenlift quantitativ untersucht werden. Die wichtigen Parameter waren die Gaszusammensetzung

zung, die Temperaturverteilung und das Gasvolumen.

Die Kerze wurde im geschlossenen System entzündet. Dadurch war sichergestellt, dass durch die Erwärmung kein Gas das abgeschlossene Volumen verlassen konnte. In diesem Aufbau kann die Höhenänderung des Wasserspiegels nur noch durch eine chemisch bedingte Reduktion der Teilchenanzahl zustande kommen, wenn die Temperatur am Anfang und Ende des Versuchs identisch ist.

5.1 Versuche mit Luft

Zunächst wurde der Kerzenlift bei normaler Atmosphäre (21% Sauerstoff) mit einem Rohrdurchmesser von 11 cm untersucht. Im Folgenden sei exemplarisch eine dieser Messungen ausführlicher diskutiert. Die Brenndauer der Kerze betrug bei diesem Versuch 118 Sekunden. Die Abb. 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Höhe des Wasserspiegels. Deutlich sind in dem Diagramm vier Abschnitte zu erkennen.

Abschnitt I (Anzünden) Der Zünddraht wird etwa 5 Sekunden zum Glühen gebracht, bis das Teelicht entflammt. Während dieses Abschnitts fällt der Wasserpegel sehr stark. Dies ist thermisch bedingt. Der Draht erhitzt ein kleines Gasvolumen auf hohe Temperatur. Dadurch dehnt sich das Gas schnell aus, und der Wasserpegel sinkt rasch. Zudem bleiben bei jedem Fluten des Gefäßes Wassertropfen am Glühdraht hängen. Diese verdampfen. Beim Eintauchen des heißen Drahts in das Wachs wird zusätzlich noch Paraffin verdampft. Der Abfall des Wasserpegels betrug in diesem Versuch 1,2 cm.

Abschnitt II (Brennen) Während die Kerze brennt, verbraucht die Flamme Sauerstoff. Trotzdem steigt der Wasserpegel nur sehr langsam an, da das Gasvolumen erwärmt wird. Die Ausdehnung des Gases wirkt dem Anstieg des Wasserpegels entgegen. Dieser Anstieg beträgt während des Abschnitts II 0,3 cm. Die Abb. 5 zeigt nach 30 Sekunden einen erneuten Abfall des Wasserpegels. Ein solcher Effekt konnte bei verschiedenen Versuchen beobachtet werden, wenn beim Anzünden kleine Wassertropfen auf das Paraffin kamen. Diese verdampfen schlagartig.

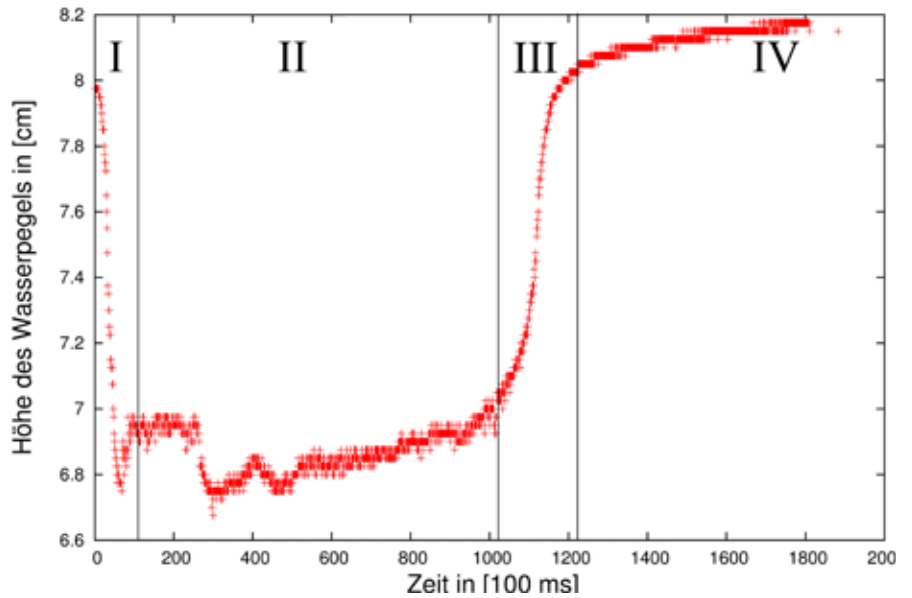


Abb. 5: Wasserhöhe im zeitlichen Verlauf bei einem Versuch mit Luft.

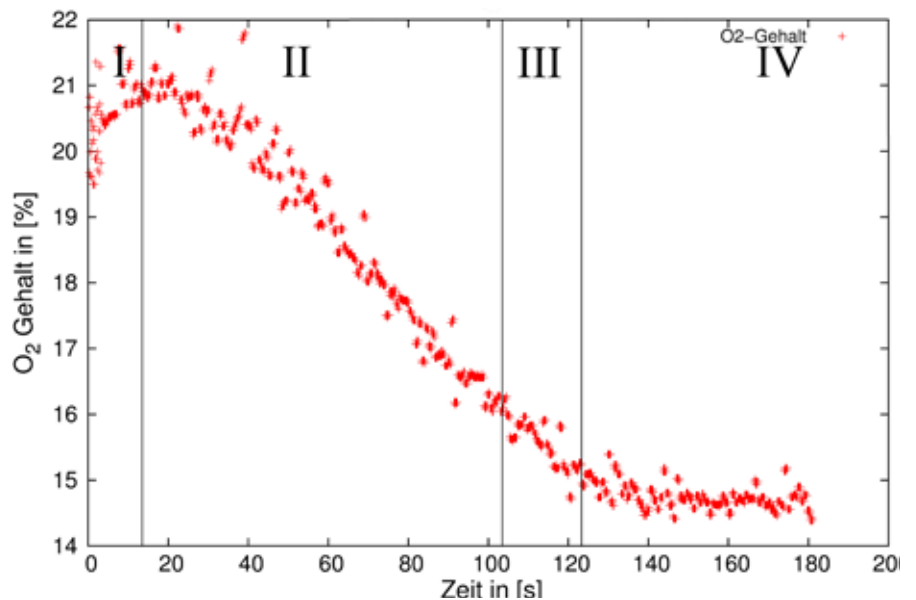


Abb. 6: Sauerstoff-Konzentration bei einem Versuch mit Luft.

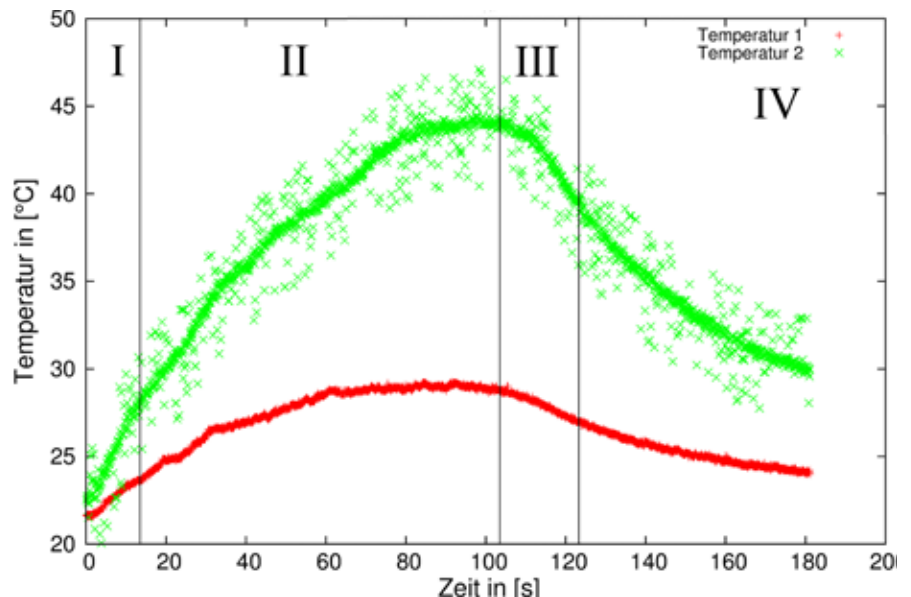


Abb. 7: Temperatur 1 im unteren Teil und Temperatur 2 im oberen Teil der Röhre bei einem Versuch mit Luft.

Abschnitt III (Erlöschen) Die Flamme wird schnell kleiner, und die Kerze erlischt nach etwa 118 Sekunden. Zu diesem Zeitpunkt steigt das Wasser sehr schnell um 1,2 cm an. Der schnelle Anstieg ist auf den Wegfall der Wärmeleistung des Teelichts zurückzuführen. Dieses hat zur Folge, dass sich der heiße Gasraum um das Teelicht schnell abkühlt, und der darin enthaltene Wasserdampf sowie das gasförmige Paraffin kondensieren.

Abschnitt IV (Abkühlen) Nachdem die Kerze erloschen ist, kühlt das Gefäß langsam ab. Dabei steigt das Wasser stetig weiter an. Eine Minute nach dem Erlöschen wurde der Versuch beendet. Somit konnten Löslichkeitseffekte von Kohlenstoffdioxid in Wasser vernachlässigt werden. Bei der Messung des Sauerstoffgehalts ist nur Abschnitt II von Bedeutung, da lediglich beim Brennen der Kerze Sauerstoff verbraucht wird. In Abb. 6 ist der Sauerstoffgehalt in Prozent über der Zeit aufgetragen.

Das Teelicht wurde bei einer Sauerstoffkonzentration von 21 % entzündet und erlosch bei 14,5 %. Es wurden also 6,5 % verbraucht, was einem Volumen von 259,5 ml entspricht. Die Sauerstoffelektrode hat eine Messverzögerung, die bauartbedingt ist. Bei dieser Elektrode muss Sauerstoff durch eine Membran diffundieren und sich anschließend in einer Elektrolytlösung lösen. Aufgrund dieser Messverzögerung ist Abschnitt I für Betrachtungen ebenso ungeeignet wie Abschnitt III. Dies spielt für anschließende Betrachtungen keine Rolle, da nur der Endwert von Bedeutung ist.

Um die Temperatur messen zu können, wurden zwei Thermometer verwendet. Abb. 7 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur in °C. Temperatur 2 ist die Temperatur im oberen Teil der Röhre, Temperatur 1 die im unteren Teil. Die Temperatur beträgt am Anfang bei beiden Thermometern 21,5 °C und am Ende oben 30 °C und in der Mitte 24 °C. Deutlich ist die Maximum der Temperatur bei etwa 44 °C oben und 28 °C in der Mitte zu erkennen.

5.2 Versuche mit erhöhtem Sauerstoffgehalt

Der entscheidende Parameter des Gases ist der Sauerstoffgehalt. Nach der „che-

Sauerstoffgehalt [%]	ΔO_2	Wasseranstieg [cm]	Brenndauer [s]
21,0	6,5	0,2	118
25,0	10,5	0,3	150
45,0	27,0	2,0	480
60,0	42,0	4,5	912

Tab. 2: Wasseranstieg bei verschiedenen Sauerstoffgehalten.

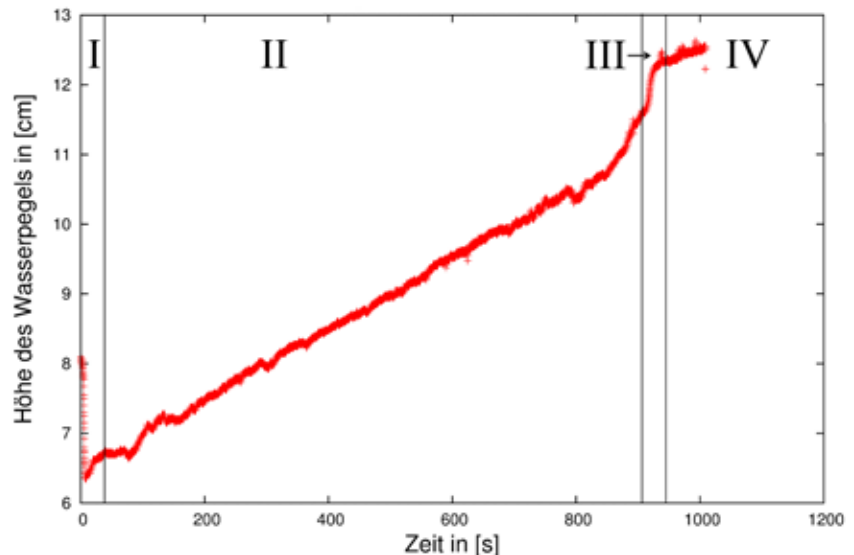


Abb. 8: Höhe der Wassersäule bei einem Sauerstoffgehalt von 60 %.

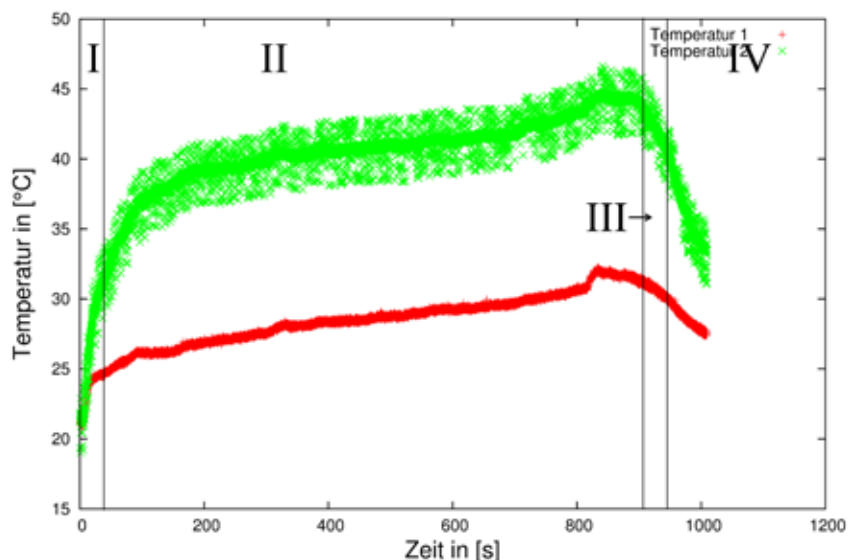


Abb. 9: Temperatur 1 im unteren Teil und Temperatur 2 im oberen Teil der Röhre bei einem Versuch mit 60 % Sauerstoff.

mischen Erklärung“ ist nur diese Größe für den Wasseranstieg verantwortlich. In den folgenden Versuchen wurde daher der Sauerstoffanteil des Gasgemisches variiert. Dies wurde durch das Einleiten von reinem Sauerstoff und Stickstoff in das vollständig mit Wasser geflutete Rohr erreicht. Das Volumen des jeweiligen Gases konnte durch das Absinken des Wasserspiegels bestimmt werden.

In Tab. 2 sind die Messergebnisse für verschiedene Sauerstoffgehalte dargestellt. Der angegebene Wasseranstieg ist die Höhendifferenz von Anfang und Ende des Versuchs. Die Sauerstoffdifferenz gibt an, wieviel Prozent Sauerstoff verbraucht wurden. Alle Messungen mit erhöhtem Sauerstoffgehalt wurden mit einem Rohrdurchmesser von 11 cm durchgeführt.

Aus der Tabelle 2 ist ersichtlich, dass bei höherem Sauerstoffgehalt die Kerze länger brennt und mehr Sauerstoff verbraucht. Dies hat einen höheren Wasseranstieg zur Folge. Dieser Zusammenhang ist in unserem Messbereich annähernd linear. Außerhalb des dargestellten Bereichs wurden keine Ergebnisse erhoben, weil die Kerze bei geringerem Sauerstoffgehalt ausgeht, und bei hohem Sauerstoffgehalt der Versuchsaufbau gefährdet ist. Im Folgenden wird von dieser Messreihe exemplarisch einer der Versuche mit 60 % Sauerstoff näher erläutert.

In diesem Versuch erlosch die Kerze nach 912 Sekunden. In Abb. 8 ist die Höhe des Wasserpegels in Zentimeter über der Zeit aufgetragen.

Abschnitt I (Anzünden): Der Abfall des Wasserpegels zu Beginn der Messung ist nahezu identisch mit dem in Abb. 5.

Abschnitt II (Brennen): Die Kerze brennt mit dem erhöhten Sauerstoffgehalt deutlich länger. Es liegt ein annähernd linearer Anstieg der Höhe zwischen 100 und 800 Sekunden vor. Dieser beträgt 0,05 mm/s. Dies entspricht einer Volumenabnahme des Gases von 0,475 ml/s. Bereits 300 Sekunden nach dem Anzünden übersteigt die Wasserhöhe den Anfangswert, obwohl die Gas-temperatur auch in diesem Versuch deutlich gestiegen ist. Bei 800 Sekunden ist das Wasser soweit gestiegen, dass es die Teelichtunterseite berührt. Die Flamme wird größer, und die Wasserhöhe steigt schneller.

Abschnitt III (Erlöschen): 912 Sekunden nach dem Anzünden geht die Flamme aus. Das Wasser steigt wie bei dem Versuch mit Luft schnell an. Der Anstieg in diesem Abschnitt beträgt 0,8 cm.

Abschnitt IV (Abkühlen): Der Wasseranstieg am Ende des Versuchs fällt steiler und stärker aus als bei den Versuchen mit Luft. Das gesamte Gasvolumen im Versuchrohr ist durch die längere Brenndauer stärker erwärmt, wodurch auch mehr Wärmeverlust auftritt. Über die gesamte Dauer stieg der Wasserpegel um 4,5 cm an. Abb. 9 stellt den Temperaturverlauf einer Messung mit 60 % Sauerstoffgehalt im mittleren und oberen Teil der Röhre dar.

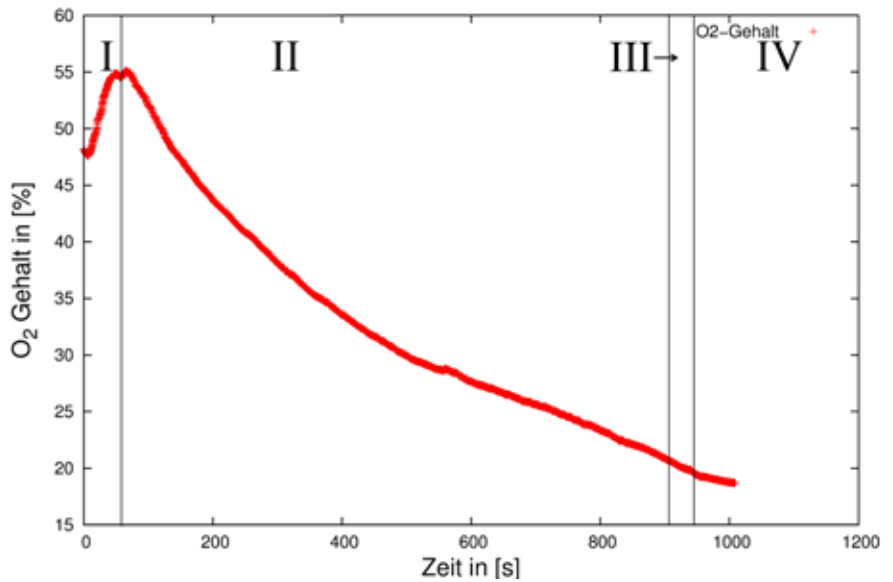


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Sauerstoffgehaltes (Versuch mit 60 % O₂).

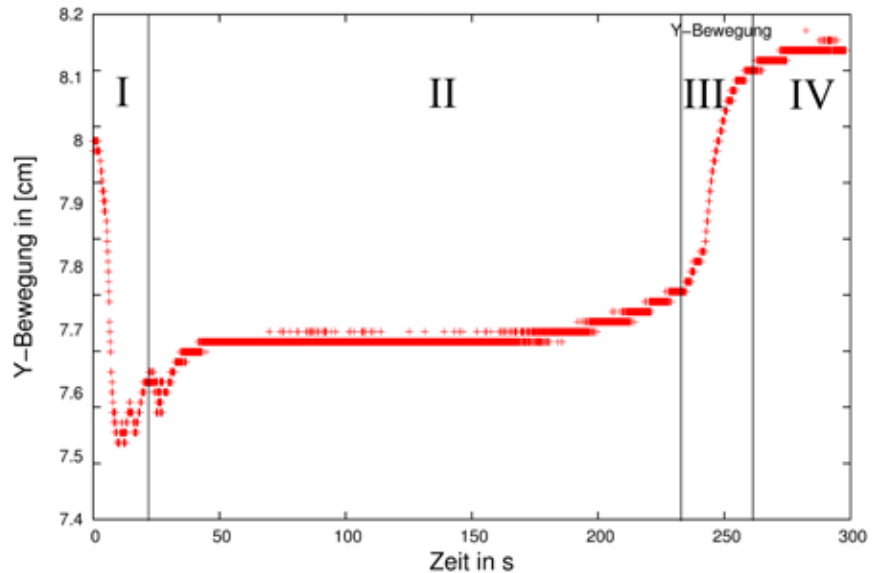


Abb. 11: Verlauf der Wasserhöhe bei einem Rohrdurchmesser von 18 cm (Gasbefüllung Luft).

Der Verlauf der Temperatur ist in den ersten 100 Sekunden mit der Luftmessung vergleichbar. Nach etwa 200 Sekunden erreicht das Gas im oberen Teil der Röhre eine Temperatur von 40°C und zeigt nur noch einen geringfügigen Anstieg. Die untere Temperatur zeigt einen geringfügigen, gleichmäßigen Anstieg über die gesamte Versuchsdauer. Der beobachtete Leistungszuwachs der Kerze bei 800 Sekunden ist auch in der Abb. 9 erkennbar. Auch bei dieser Messung sind Anfangs- und Endtemperatur nicht identisch.

Wie bei der Messung mit Luft erläutert, ist der Sauerstoffverlauf nur im Bereich der Abschnitte II und IV für die Auswertung von Bedeutung. In diesem Bereich ist der Abfall nicht wie angenommen linear, da bei einem höheren

Sauerstoffgehalt der Sauerstoffverbrauch zunimmt. Das Teelicht erlischt bei 20 % Sauerstoff, da es von Kohlenstoffdioxid erstickt wird. Dies geschieht nicht bei Messungen mit geringem Sauerstoffgehalt, da dort weniger Kohlenstoffdioxid entsteht, und der Abstand des Teelichts zum Wasser größer ist.

Bei dem Experiment mit erhöhtem Sauerstoffgehalt ist der Wasserpegel weit über den Anfangswert hinausgestiegen, ohne eine Temperaturabnahme feststellen zu können. Da kein Gas entweichen konnte, ist dies ein qualitativer Beweis für die chemische Theorie.

5.3 Versuche mit verschiedenen Rohrdurchmessern

Nach der Untersuchung des Einflusses des Sauerstoffgehalts auf den Was-

seranstieg wurde nun auch noch der Rohrdurchmesser variiert. Auf Grund der chemischen Theorie darf ein größerer oder kleinerer Rohrdurchmesser keinen Einfluss auf den Endwasserspiegel haben. In Abb. 11 ist exemplarisch eine der Messungen mit Luft bei einem Rohrdurchmesser von 18 cm (Rohr 2) dargestellt. Bei 9 cm Radius beträgt das Volumen des Zylinders 10,7 Liter. Das entspricht dem 2,6-fachen Volumen des dünnen Rohres. Die Brenndauer der Kerze betrug 248 Sekunden.

Abschnitt I (Anzünden): Der Wasserpegel fällt anfangs nur etwa 0,5 cm ab, also etwa um das 2,5-fache weniger als bei der Messung mit Luft im dünneren Rohr. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass sich das Gas im Innern anfangs stets um etwa das gleiche Volumen ausdehnt, und diese Ausdehnung nicht vom Gesamtvolumen des Gefäßes abhängt. Dies stützt die Erklärung, dass dieser Abfall auf die Ausdehnung des Gases sowie auf das Verdampfen von Wassertröpfchen und Wachs durch das Einschalten des Glühdrahts zurückzuführen ist.

Abschnitt II (Brennen): Wie bei den Messungen im dünneren Rohr steigt der Wasserpegel nur minimal während des Brennabschnitts an. Die mittlere Temperatur steigt, solange die Kerze brennt, auch nur um 4 °C an, da das zu erwärmende Gasvolumen erheblich größer ist. Der Sauerstoffgehalt nimmt linear ab und die Kerze erlischt bei 14,5 % Sauerstoff.

Abschnitt III (Erlöschen): Das Wasser steigt, wie in den Versuchen zuvor, schnell im Zylinder nach oben. Der Anstieg fällt dabei geringer aus als im dünnen Rohr ($r = 5,5$ cm). Er entspricht damit betragsmäßig etwa dem Anfangsabfall, was in den meisten Versuchen beobachtet wurde.

Abschnitt IV (Abkühlen): Auch bei dieser Messung wurde nicht erwartet, bis sich das Gas vollständig abgekühlt hat, da dies auf Grund der geringen Temperaturdifferenz und dem großen Volumen sehr lange gedauert hätte. Da die Fläche, an welcher sich Kohlenstoffdioxid lösen kann, größer ist als beim dünneren Rohr, konnte nicht noch länger gewartet werden. Der Wasseranstieg betrug bei dieser Messung 0,15 cm.

ΔO_2 [%]	theoretische Höhe [cm]	experimentelle Höhe [cm]	Abweichung [cm]
6,5	0,9	0,2	0,7
10,5	1,5	0,3	1,2
27,0	3,8	2,0	1,8
42,0	5,9	4,5	1,4

Tab. 3: Vergleich zwischen theoretischen und experimentellen Werten.

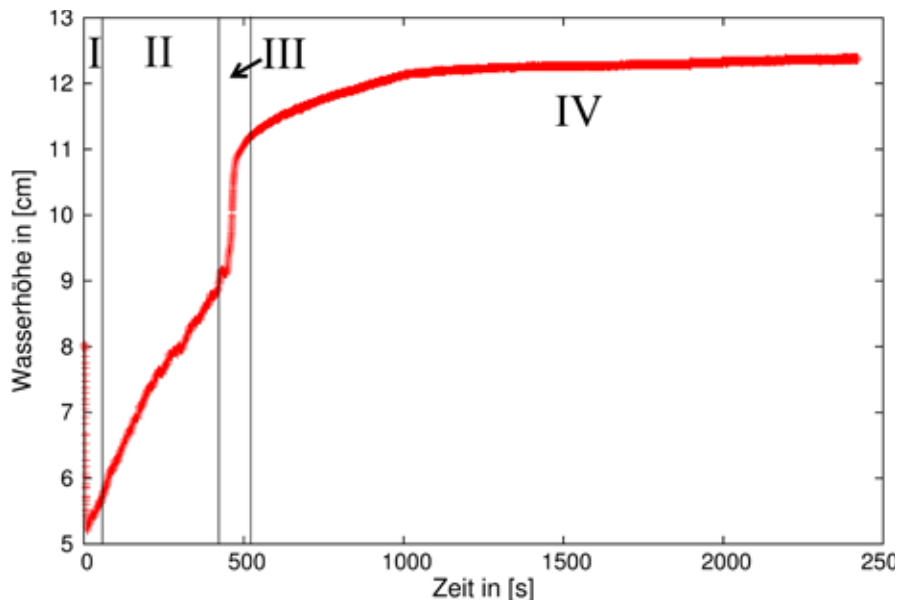


Abb. 12: Wasserhöhe bei langer Abkühlphase (Gasbefüllung 48% Sauerstoff).

6 Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen

Um unsere Theorie quantitativ zu verifizieren, musste diese nun mit den experimentellen Werten verglichen werden. Tab. 3 zeigt den theoretischen und den experimentellen Wasseranstieg für verschiedene Sauerstoffgehalte mit einem Rohrdurchmesser von 11 cm. (Theoretische Werte nach Gleichung 4 berechnet)

Aus der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass die Theorie nicht mit den experimentellen Werten übereinstimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die chemische Theorie nur dann zutreffend ist, wenn die Temperaturen des Gases zu Beginn und Ende des Versuchs identisch sind. Da wir in unseren Experimenten nicht gewartet haben, bis die Temperaturen sich wieder normalisiert haben, müssen die Experimentalwerte mithilfe einer Temperaturbereinigung korrigiert werden. Dabei wird die temperaturbedingte Ausdehnung des Gasvolumens berechnet.

6.1 Temperaturbereinigung

In unserem Rohr besteht ein annähernd isobarer Zustand. In diesem gilt nach der

allgemeinen Gasgleichung für die Ausdehnung eines Gases:

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad (5)$$

Hierbei entspricht V_1 dem Gasvolumen nach der temperaturbedingten Ausdehnung, und V_0 dem ausgedehnten Gasvolumen. Analog dazu ist T_1 die gemessene Temperatur nach der Ausdehnung, und T_0 die Temperatur zuvor. Da wir als Gefäß einen Zylinder verwendet haben, aus dem kein Gas entweichen konnte, gilt:

$$h_g = h_k \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad (6)$$

Mit h_g gemessene Höhe der Gassäule, h_k theoretisch korrigierte Höhe der Gassäule, wenn sich diese nicht ausgedehnt hätte. Die einzige Unbekannte aus Gleichung 6 ist die Temperatur T_1 . Diese entspricht der durchschnittlichen Temperatur aus den Messungen. T_0 ist die Ausgangstemperatur. Diese liegt in unserem Fall bei Zimmertemperatur, also bei 293 K.

Für die durch die Gasausdehnung verursachte Höhendifferenz gilt dann:

$$\Delta h = h_g \cdot \frac{T_1}{T_0} - h_g \quad (7)$$

Diese muss zu den gemessenen Werten addiert werden.

6.2 Überprüfung der Temperaturbereinigung

Da die rechnerische Temperaturbereinigung ein wesentlicher Teil der Erklärung des Versuchs ist, wurde diese experimentell überprüft. Dazu mussten Experimente durchgeführt werden, bei denen die Temperatur am Anfang experimentell der Temperatur am Ende entsprach. Dies erforderte sehr lange Wartezeiten nach dem Erlöschen der Kerze. Damit Löslichkeitseffekte von Kohlenstoffdioxid trotzdem vernachlässigt werden konnten, wurde das Wasser mittels Trockeneis mit Kohlenstoffdioxid gesättigt. Im Folgenden ist eine dieser Messungen mit einem Sauerstoffgehalt von 48 % dargestellt. Die Kerze erlosch bei einem Sauerstoffgehalt von 16 %. Abb. 12 zeigt die Wasserhöhe in Abhängigkeit der Zeit. Abb. 13 zeigt die Temperaturen.

Am Anfang beträgt die Wasserhöhe 8 cm und das Gas hat eine Temperatur von 22 °C. Direkt nach dem Erlöschen der Kerze ist der Wasserpegel auf 10,8 cm angestiegen und das Gas hat sich oben auf 51 °C und unten auf 29 °C erwärmt. Nach der 45 Minuten langen Abkühlungsphase betrug die Wasserhöhe schließlich 12,4 cm bei einer Temperatur von 23 °C. Wird nun die Höhe beim Erlöschen der Kerze wie in den vorangegangenen Messungen temperaturbereinigt, so erhält man eine „bereinigte Höhe“ von 12,5 cm. Vergleicht man diese nun mit dem gemessenen Wert nach der Abkühlung ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Die geringfügige Abweichung von 1 mm bei den Messungen ergab sich aus der nicht konstanten Raumtemperatur und den für das Tracking notwendigen Scheinverfälschungen.

6.3 Quantitative Bestätigung der chemischen Erklärung

Mit Hilfe der vorangegangenen Messungen war es nun möglich, die Messergebnisse mit der Vorhersage auf Grund der „chemischen“ Theorie zu vergleichen. Abb. 14 zeigt die temperaturbereinigten und experimentellen Werte sowie die

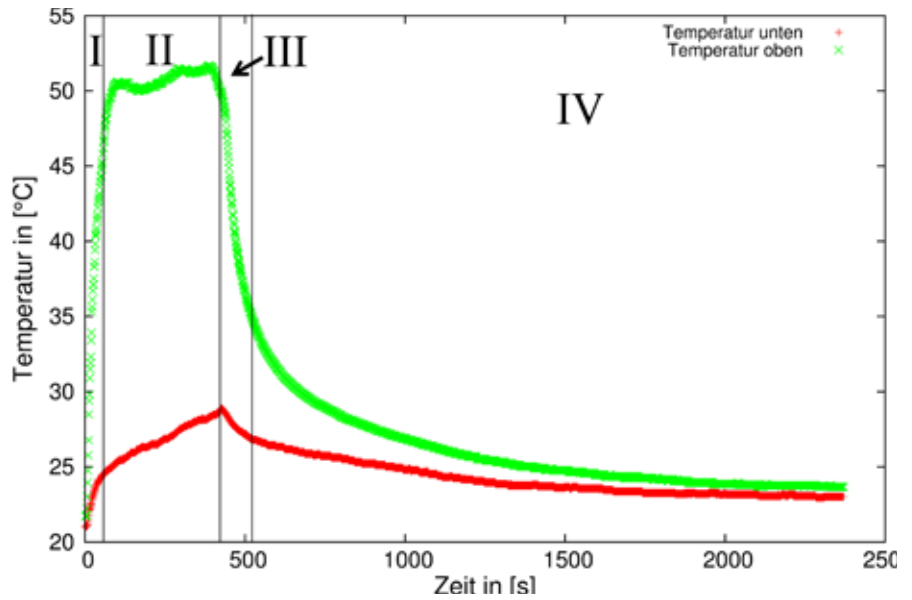


Abb. 13: Temperaturverlauf bei langer Abkühlphase (Gasbefüllung 48 % Sauerstoff).

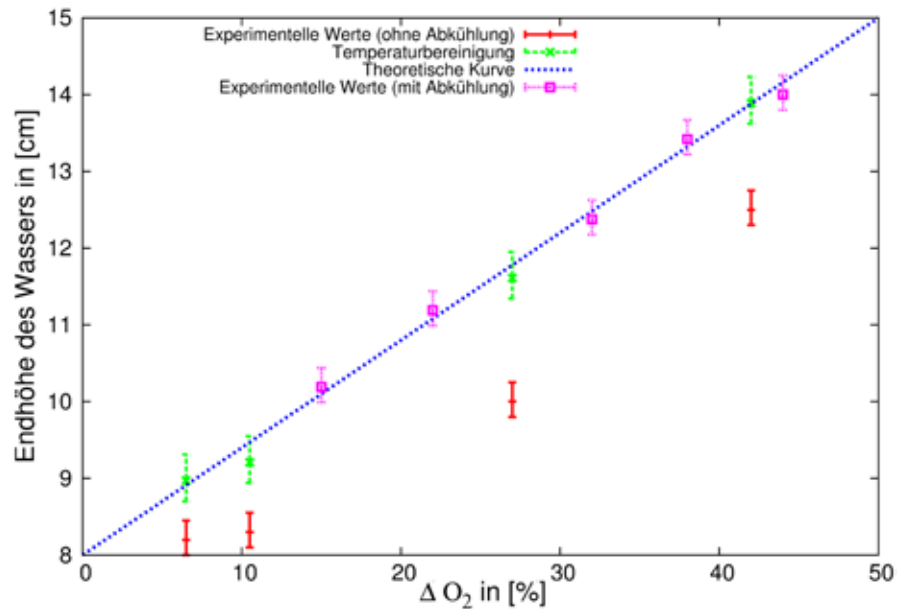


Abb. 14: Vergleich zwischen Theorie und Experiment.

theoretische Kurve. Diese wurden nach Gleichung (4) berechnet. Auf der x-Achse ist der verbrauchte Sauerstoff in % aufgetragen. Die y-Achse zeigt die Endhöhe der Wassersäule. Die roten Punkte sind die tatsächlich am Versuch abgelesenen Werte ohne Abkühlung. Deutlich ist die schon in der Tab. 3 dargestellte Differenz zur blauen Theoriekurve erkennbar. Die grün eingezeichneten bereinigten Messwerte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den vorhergesagten Werten. Alle Abweichungen betragen weniger als 2 mm. Die lila Messpunkte sind die experimentellen Ergebnisse mit Abkühlung nach CO₂ Sättigung des Wassers. Die gute Übereinstimmung der experimentellen Werte mit den theoretisch Vorhergesagten bestätigt unseren theore-

tischen Ansatz, dass die Reduktion der Teilchenzahl im Gas für den Wasseranstieg verantwortlich ist. Trotzdem spielt die Gasausdehnung eine entscheidende Rolle für den Verlauf des Versuchs.

7 Leistung des Teelichtes

Die charakteristische Eigenschaft eines Teelichtes ist seine Brennleistung. Da die abgegebene Energie und demnach auch die Temperatur von dieser Größe abhängen, wurde der Wert für unsere Teelichter bestimmt. Dazu wurde ein entzündetes Teelicht auf eine Waage gestellt und der Massenverlust pro Zeit gemessen. Dieser beträgt 0,53 mg/s. Mithilfe des Heizwertes von Paraffin (49 J/g) ließ sich die Leistung des Teelichtes mit 26 J/s bestimmen.

8 Theoretischer Ansatz

Die chemische Theorie ermöglicht nur eine Vorhersage der Endwasserhöhe, falls die Anfangs- und Endtemperatur des Gases gleich sind. Um die Endhöhe rein theoretisch berechnen zu können, muss die mittlere Gastemperatur in Abhängigkeit der Brenndauer berechnet werden.

8.1 Energetische Temperaturbetrachtung

Die Kerze führt dem System Energie zu. Diese Energie Q_K ist abhängig von der Leistung und Brenndauer der Kerze. Diese Energie fließt in die Erwärmungsenergie Q_E und in Form eines Wärmestroms \dot{Q}_V durch das Plexiglas nach außen. Dabei ist die Erwärmungsenergie:

$$dQ_E = m c_p \frac{dT}{dt} dt \quad (8)$$

Wobei c_p der Wärmekapazität des Gasraumes entspricht und die Masse m durch die Luftdichte ρ und das Volumen V_0 des Zylinders ausgedrückt werden kann.

Für den Wärmestrom gilt:

$$\dot{Q}_V = \alpha A (T(t) - T_U) \quad (9)$$

Dabei ist α der Quotient aus der Wärmeleitfähigkeit λ und Dicke des Plexiglasrohres l . A ist die Fläche des Zylinders, T die Temperatur, und T_U eine konstante Umgebungstemperatur.

Entscheidend sind nun die schon in den Experimenten erkennbaren Abschnitte. In ihnen ändert sich die Leistung des Teelichtes. Im ersten Abschnitt, dem Anzünden, ist die Leistung des Glühdrahtes P_Q der entscheidende Faktor, in der zweiten Phase, dem Brennen, ist der Brennwert der Kerze P_K ausschlaggebend, und nach dem Erlöschen ist die Leistung 0. Für die Leistung P in Abhängigkeit der Zeit ergibt sich:

$$P(t) = \begin{cases} P_Q, & \text{für } t < t_{An} \\ P_K, & \text{für } t_{An} < t < t_{Aus} \\ 0, & \text{für } t_{Aus} < t \end{cases} \quad (10)$$

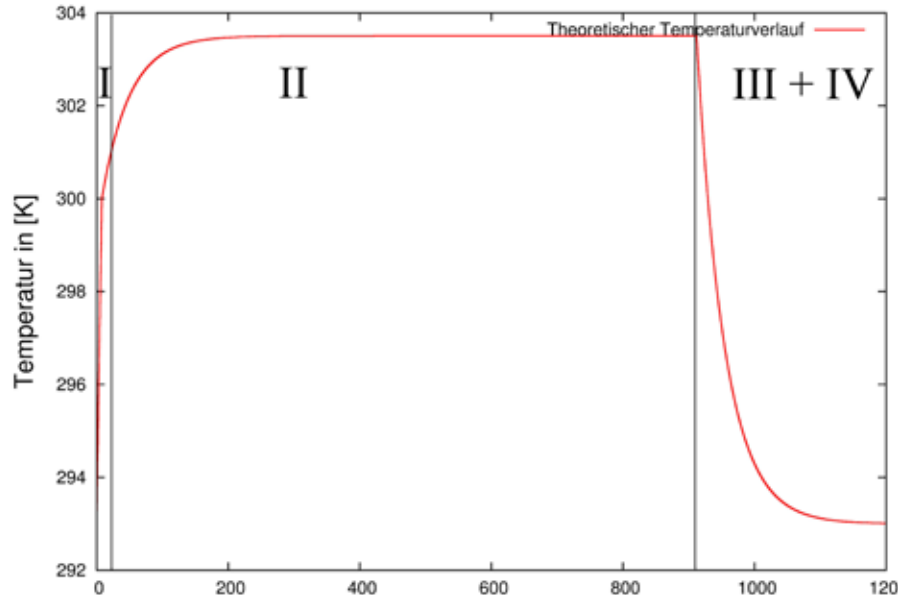


Abb. 15: Simulierter Temperaturverlauf nach Gleichung 13.

Daraus ergibt sich die zu lösende, Differentialgleichung:

$$\rho V_0 c_p \frac{dT(t)}{dt} dt = P(t) - \alpha A (T(t) - T_U) \quad (11)$$

$$\Rightarrow \dot{T} = \frac{1}{\rho V_0 c_p} P(t) + \frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} T_U - \frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} T \quad (12)$$

Dabei ist Anfangsbedingung $T(0) = T_U$.

Bei dieser Gleichung handelt es sich um eine inhomogene lineare Differentialgleichung. Inhomogen bedeutet dabei, dass es einen, nicht von T abhängigen Term in der Gleichung gibt. Die Lösung dieser Gleichung lässt sich in einen homogenen und einen partikulären Teil aufspalten. Die allgemeine Lösung der Gleichung lautet also:

$$T(t) = T_{hom}(t) + T_{part}(t) \quad (13)$$

Die Lösung des homogenen Teils kann bestimmt werden, indem der inhomogene Teil Null gesetzt wird. Es gilt also:

$$\dot{T}_{hom}(t) = -\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} T_{hom} \quad (14)$$

Dies ist eine lineare Differentialgleichung deren Lösung eine e Funktion ist. Es ergibt sich:

$$T_{hom}(t) = T_U \cdot e^{-\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} t} \quad (15)$$

Um nun die allgemeine Lösung der Differentialgleichung (Formel 12) zu berechnen, muss die Lösung des partikulären Gliedes bestimmt werden. In unserem Fall liegt eine lineare Differentialgleichung mit konstantem Koeffizienten der allgemeinen Form $\dot{x} = kx + f(t)$ vor, deren partikuläre Lösung mithilfe der allgemeinen Duhamel-Formel (siehe [11]) gefunden werden kann. Allgemein gilt nach Duhamel mit $\chi_{part}(0)=0$

$$x_{part} = \int_0^t e^{k(t-s)} f(s) ds \quad (16)$$

Auf den partikulären Teil von Formel 12 angewendet, ergibt das:

$$T_{part}(t) = \int_0^t e^{-\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t-s)} \frac{1}{\rho V_0 c_p} (P(s) + \alpha A T_U) ds \quad (17)$$

Mit der Fallunterscheidung für die Leistung (siehe 10) ergibt sich als Lösung für den partikulären Teil: (siehe Kasten unten) (18)

$$T_{part}(t) = \begin{cases} \left(\frac{P_Q}{\alpha A} + T_U \right) \left(1 - e^{-\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} t} \right) & \text{für } t < t_{An} \\ \left(\frac{P_Q}{\alpha A} + T_U \right) \left(e^{\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t_{An}-t)} - e^{-\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} t} \right) + \left(\frac{P_K}{\alpha A} + T_U \right) \left(1 - e^{\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t_{An}-t)} \right) & \text{für } t_{An} < t < t_{Aus} \\ \left(\frac{P_Q}{\alpha A} + T_U \right) \left(e^{\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t_{An}-t)} - e^{-\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} t} \right) + \left(\frac{P_K}{\alpha A} + T_U \right) \cdot \left(e^{\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t_{Aus}-t)} - e^{\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t_{An}-t)} \right) + T_U \left(1 - e^{\frac{\alpha A}{\rho V_0 c_p} (t_{Aus}-t)} \right) & \text{für } t_{Aus} < t \end{cases}$$

Die allgemeine Lösung der Gleichung aus (12) ergibt sich dann durch Einsetzen von (15) und (18) in (13). Abb. 15 zeigt den mit Mathematica berechneten Temperaturverlauf nach Gleichung 13. Tab. 4 enthält die verwendeten Konstanten. Die Anzünddauer t_{An} beträgt 8 Sekunden und die Brenndauer 912 Sekunden.

Physikalisch gesehen ergibt die Gleichung Sinn, da es sich bei unserem Temperaturverlauf um einen Erwärmungs- und Abkühlungsprozess handelt, der nach Newton ([12]) immer durch eine e Funktion beschrieben wird. Eine Grenzwertbetrachtung für $t \rightarrow \infty$ zeigt, dass die Maximaltemperatur nur von der Abstrahlfläche sowie der Leistung der Kerze und nicht von der Wärmekapazität c_p des Systems abhängt. Bei $t = 0$ ist die Gastemperatur gleich der Umgebungstemperatur.

8.2 Simulation eines Versuchsverlaufs

Mit der theoretischen Beschreibung der Temperatur ist es nun möglich, das Verhalten des Gases zeitabhängig zu simulieren. Dazu kann die allgemeine Gasgleichung verwendet werden. Im Fall des Kerzenliftes sind die Temperatur T und die Teilchenanzahl n zeitabhängig. Durch den chemischen Effekt reagieren während des Brennens Sauerstoffmoleküle mit Paraffin zu 2/3 Kohlenstoffdioxid und 1/3 zu Wasser. Die Abnahme Δn ist abhängig von der Kerzensorte und wurde deshalb graphisch aus dem Sauerstoffverlauf bestimmt.

$$n(t) = \begin{cases} n_0 & \text{für } t < t_{An} \\ n_0 - \Delta n(t - t_{An}) & \text{für } t_{An} < t < t_{Aus} \\ n_0 - \Delta n(t_{Aus} - t_{An}) & \text{für } t_{Aus} < t \end{cases} \quad (19)$$

Unter der Annahme, dass es sich bei dem Gas in unserem Rohr um ein ideales Gas handelt, gilt:

$$pV = nRT \quad (20)$$

$$\Rightarrow h = \frac{n(t)R}{p\pi r^2} T(t) \quad (21)$$

Mit dieser Formel ist es nun möglich, einen ganzen Versuch zeitabhängig zu beschreiben.

In den Experimenten entsprach die Wärmekapazität C_p einem Wert von 20.000 kJ * (kg * K)⁻¹. Dieser Wert wur-

de aus den Experimenten abgeschätzt, da er aufgrund der Komplexität des Versuchsaufbaus weder nachgeschlagen noch ermittelt werden kann.

Die Wärmeleitfähigkeit λ unseres Plexiglasrohres liegt bei 0.19 W *(K * m)⁻¹ (siehe [9]). Der Druck ist in dieser Formel mit 1013 hPa als konstant angenommen. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden Messungen mit einem Gasdrucksensor innerhalb des Rohres durchgeführt. Diese Messungen ergaben, dass sich der Druck während eines Versuchs um weniger als 1 % ändert. Daraus ergibt sich auch die Vernachlässigung der Volumenarbeit in der Energiebilanz aus Formel 12.

Abb. 16 zeigt einen nach Formel 21 berechneten Höhenverlauf. Auf der x-Achse ist die Zeit in Sekunden aufgetragen, und die y-Achse zeigt die Wasserhöhe in Metern. Die Anzünddauer t_{An} betrug in dieser Rechnung 8 Sekunden. Die Brenndauer (Abschnitt II) betrug 912 Sekunden. Während unserer Experimente betrug die Umgebungstemperatur etwa 20° C, was 293 Kelvin entspricht.

Die experimentellen Werte sind aus mehreren Messungen gemittelt. Als Grundlage dienten die Messungen mit 60 % Sauerstoff ohne Abkühlung. Erkennbar ist die gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit den Vorhersagen der Theorie. Aus der guten Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie geht hervor, dass die auf Sauerstoffabnahme und Gasausdehnung basierte Theorie für den Kerzenlift in unseren Versuchen ihre Gültigkeit hat.

9 Fazit und Ausblick

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es, die Ursache für den Wasseranstieg herauszufinden. Dazu wurden zuerst die beiden gängigen Theorien aus der Literatur betrachtet. Wir konnten in unserer Arbeit zeigen, dass der klassische Kerzenlift für eine quantitative Untersuchung nicht geeignet ist. Daher haben wir einen umfangreichen experimentellen Aufbau realisiert, der es uns ermöglichte, den Kerzenlift quantitativ zu analysieren. Mit diesem Versuchsaufbau konnten wir die beiden in der Literatur zu findenden Theorien näher untersuchen. Die chemische Theorie geht dabei von einem Verbrauch des Sauerstoffes aus. Die physikalische Theorie basiert

Größe	Wert
T_U	293 K
P_K	26 J/s
P_Q	100 J/s
C_p	20000 kJ/(kg * K)
ρ	1,29 g/l
V_0	3991 cm ³
α	15 W/(m ² *K)
A	1650 cm ²

Tab. 4: Verwendete Konstanten für die Berechnung des Temperaturverlaufs nach Gleichung 13.

auf der Expansion und Kontraktion des Gases. Bei einem Vergleich der mit unserer „chemischen Theorie“ vorhergesagten Werte mit den gemessenen Werten gab es eine gute Übereinstimmung. Deswegen sind wir der Ansicht, dass nur der Verbrauch von Sauerstoff in einem „perfekt“ d. h. ohne entweichenden Gas durchgeführten Kerzenliftversuch die Ursache des Wasseranstiegs ist. So ist es weder die physikalische Erklärung noch die elastische Luft ([7] S.48), die für den Wasseranstieg im abgeschlossenen System verantwortlich ist. Wird der Versuch klassisch durchgeführt, muss das Entweichen von Gas berücksichtigt werden.

Da die Literatur keine theoretische Beschreibung für den Höhenverlauf des Wasserspiegels bietet, haben wir eine Theorie entwickelt. Diese beschreibt alle Abschnitte des Kerzenlifts, und stimmt gut mit experimentellen Werten überein. In unserer Arbeit konnten wir den Kerzenlift theoretisch beschreiben. In der Folgezeit möchten wir den Parameter c_p bestimmen und unsere Theorie dadurch verfeinern. Experimentell möchten wir noch den Verlauf des Kohlenstoffdioxidgehalts mittels neuer Messtechnik erfassen.

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei unserem Fachlehrer Hermann Klein für die unermüdliche Unterstützung bei diesem Projekt bedanken. Ein besonderer Dank gilt dem phänovum Schülerforschungszentrum Lörrach für die Bereitstellung der Materialien. Für die kompetente chemische Unterstützung möchten wir uns bei unserem Chemielehrer Markus Hartmann bedanken. Ein weiterer Dank gilt der Fachschaft Chemie des Hans-Thoma-Gymnasiums Lörrach für die Bereitstellung des Sauerstoffes.

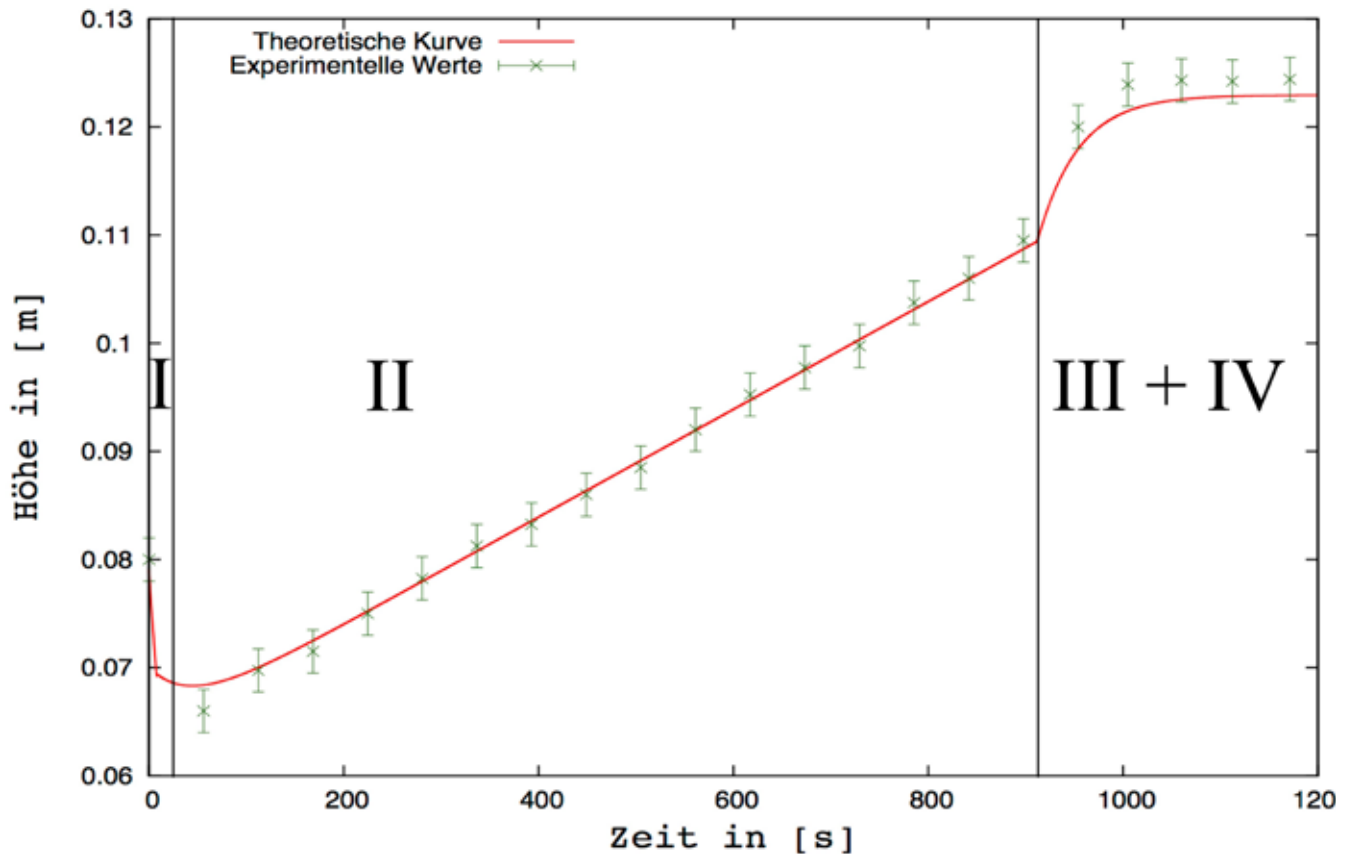


Abb. 16: Mit Mathematica simulierter Höhenverlauf des Wasserpegels im Vergleich mit experimentellen Werten.

Quellenverzeichnis

- [1] Mayow, John: Tractatus Quinque Medico-Physici, 1674
- [2] Schlichting, Hans Joachim: Die Kerzenpumpe In: Praxis der Naturwissenschaften-Physik 43/4(1994), S. 12-15
- [3] <http://opencv.willowgarage.com>, OpenCV 2.4.2 C++ Library Stand: 23.11.2012
- [4] Sauerstoff in der Luft: In: Der Kinderbrockhaus (Experimentearchiv) : http://www.kinderbrockhaus.de/spielen/experimentarchiv_detail.php?experimentId=21, Stand: 27. Dezember 2012
- [5] Pausenberg, Rudolf: Die Kerze unter dem Trinkglas, Stand: April 2008
- [6] Halliday, David et al. :Halliday Physik, WILEY-VCH GmbH, 2009, 2. Auflage
- [7] Brock, William H. et al. : Viewegs Geschichte der Chemie, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1997, 8. Auflage
- [8] <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte>, Luftdichte, Stand: 01.03.2012
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethacrylat#Aufbau> und Eigenschaften, Acrylglas, Stand: 01.03.2012
- [10] <http://www.wolfram.com/mathematica/> Wolfram Mathematica 8 Stand: 27. März 2013
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Duhamel's_integral, Stand: 25.03.2013
- [12] Bernstein, Swanhild: Einfache mathematische Modelle, die nur Funktionen einer Veränderlichen und ihre Ableitung sowie entsprechende Integrale beinhalten, <http://www.mathe.tufreiberg.de/bernstei/HMI/mModelle.pdf>