

Neues zum Kerzenversuch

D. Plappert

Der Kerzenversuch, ein weit verbreitetes Freihandexperiment, wird oft gegensätzlich interpretiert – chemisch bzw. physikalisch. Anhand einer sehr gelungenen Jugend-forscht-Arbeit wird gezeigt, welchen Platz beide Erklärungsmuster beim Verständnis dieses sehr komplexen Versuches haben.

In einer bei „Jugend forscht“ ausgezeichneten Arbeit wird der Kerzenversuch untersucht, der heute häufig schon im Kindergarten durchgeführt und erklärt wird (siehe [1]). In der Sonntagsausgabe der Schwarzwälder Post (siehe [2]) wird das Ziel der Arbeit folgendermaßen beschrieben: „Die jungen Forscher wollten herausfinden, welche der beiden in der Literatur vertretenen Erklärungen für den Wasseranstieg im Glas richtig ist: die ‚physikalische‘ (nach dem Erlöschen der Kerze kühlt die Luft im Glas ab, dadurch sinkt der Luftdruck im Glas ab und der höhere Außenluftdruck drückt das Wasser nach oben) – oder die ‚chemische‘ (der Luftdruck im Glas sinkt deshalb, weil die Flamme Sauerstoff verbraucht und dadurch die Zahl der im Glas enthaltenen Teilchen sinkt). Ihre theoretische Vorhersage (nämlich dass die ‚chemische‘ Erklärung für den Wasseranstieg die Zutreffende ist) wurde experimentell bestätigt.“

Ist das so, dass die „chemische“ Erklärung tatsächlich allein für den Wasseranstieg die zutreffende ist?

Den folgenden Ausführungen liegt die bemerkenswerte Jugend-forscht-Arbeit von *Leonard Bauersfeld* und *Marcel Neidinger* zugrunde.

1 Der klassische Kerzenversuch

- Das Umstülpen des Glases zu Beginn des Versuchs kann sehr schnell oder sehr langsam erfolgen. Beim schnellen Überstülpen (siehe [3]) treten im Gegensatz zum langsamen Überstülpen (siehe [4]) zunächst Gasblasen aus. Die kühle Luft im Glas dehnt sich nach dem Überstülpen anfangs aus.
- Unabhängig von der Art des Überstülpens steigt das Wasser nach dem Erlöschen der Kerze schnell an, bei einem 500-ml-Becher um etwa 2 cm.
- Das Erlöschen der Kerze wird bei Gläsern mit höherer Form durch das tiefer liegende Kohlendioxid verursacht.

Der Kerzenlift

Physikalisch-chemische Untersuchung eines klassischen Experiments

jugend forscht 2013

Leonard Bauersfeld und Marcel Neidinger



Abb. 1: Titelblatt der „Jugend-forscht“-Arbeit

- Beim Verschwinden von 1,5 mol Sauerstoff entsteht bilanzmäßig bei der Verbrennung 1 mol Wasserdampf und 1 mol Kohlenstoffdioxid.
- Der entstandene Wasserdampf kondensiert teilweise an den Wänden des Gefäßes. Dabei verringert sich „sein Volumen“ um das 1700-Fache.
- Das Volumen des Sauerstoffs, der zu Wasser reagiert, fällt durch das Verbrennen annähernd weg. Der Anteil, der zu Kohlenstoffdioxid reagiert, bleibt erhalten. Kohlenstoffdioxid kann sich in Wasser zwar lösen und zu Kohlensäure reagieren. Die Löslichkeit ist jedoch sehr gering. Das Gasvolumen reduziert sich bilanzmäßig durch das Verschwinden des Sauerstoffs durch die Verbrennung etwa um 1/3.

2 Der Messversuch von Lenard Bauersfeld und Marcel Neidinger

In einem Messversuch, der sich vom klassischen Kerzenversuch in wesentlichen Punkten unterscheidet, wird der Kerzenversuch quantitativ untersucht: Das System ist abgeschlossen, während des Versuchs ist also kein Gasaustausch mit der Umgebung möglich. Außerdem hat die Luft zu Beginn des Versuchs im Gefäß Raumtemperatur. Die Kerze schwimmt dann zu Beginn auf einer Ausgangshöhe von etwa 8 cm. Die Kerze wird elektrisch von außen gezündet. Außerdem wird bei den Betrachtungen angenommen, dass die Temperatur der Luft im Glas vor und nach dem Versuch dieselbe ist. Im Messversuch wird also nur die Auswirkung der chemischen Stoffumsetzung bei der Ver-

brennung auf das im Glas eingeschlossene Gasvolumen betrachtet.

Das erste Diagramm (Abb. 3) zeigt die Höhe des Wasserpegels für Luft mit Normalbedingungen. Ausgangspunkt etwa 8 cm.

Der Versuchsablauf wird in vier Phasen geteilt:

I Anzünden: Der Wasserspiegel sinkt schnell um 1,2 cm. Interpretation: Die Temperatur der eingeschlossenen Luft steigt, die Luft dehnt sich aus, es entsteht ein Überdruck.

II Brennen: Der Wasserspiegel schwankt etwas, sinkt um etwa 0,2 cm und steigt langsam um insgesamt 0,3 cm an. Die Temperatur im Gesamtsystem steigt. Interpretation: Die Schwankungen zu Beginn können durch Wassertropfen im flüssigen Paraffin erklärt werden. Die Höhe des Wasserspiegels bleibt in etwa konstant, da das thermische Ausdehnen und das Zusammenziehen der Luft durch das Kondensieren des Wasserdampfes sich gegenseitig offensichtlich ausgleichen.

III Erlöschen: Das Wasser steigt schnell um etwa 1,2 cm an. Interpretation: Die Temperaturabnahme der Luft hat einen Druckabfall zur Folge. Zwei Effekte addieren sich: das verstärkte Kondensieren des Wasserdampfes und das Zusammenziehen der Luft.

IV Abkühlen: Der Wasserspiegel steigt langsam weiter an. Interpretation: wie bei III, nur langsamer, da auch die Temperatur langsamer sinkt. Zu Versuchsende liegt der Wasserspiegel etwa 0,2 cm höher als zu Beginn des Versuches.

Zusatz: Die Messungen haben ergeben, dass der Sauerstoffgehalt der Luft von 21% auf 14,5% gesunken ist.

Die jungen Forscher ziehen das folgende Fazit: „Mit diesem Versuchsaufbau konnten wir nun die beiden in der Literatur zu findenden Theorien näher untersuchen. Bei einem Vergleich der mit der „chemischen Theorie“ vorhergesagten Werte mit den gemessenen Werten gab es eine große Übereinstimmung. Deswegen sind wir der Ansicht, dass nur der Verbrauch von Sauerstoff in einem perfekt durchgeführten Kerzenliftversuch die Ursache des Wasseranstiegs ist. So ist es weder die physikalische Erklärung noch die elastische Luft, die für den Wasseranstieg im abgeschlossenen System verantwortlich ist. Wird der Ver-

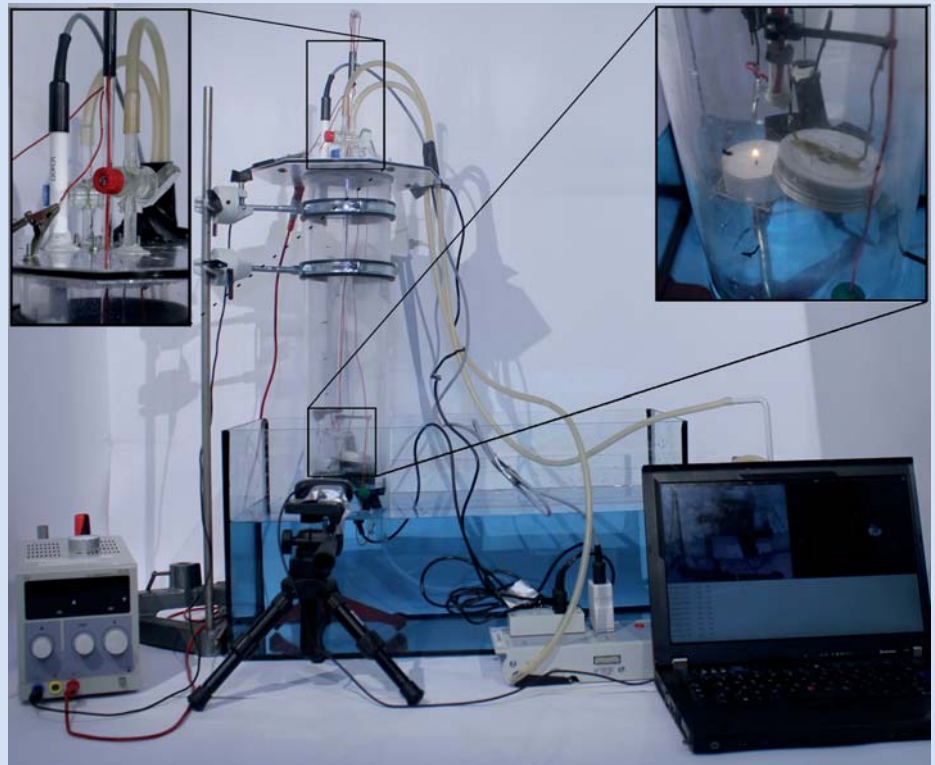


Abb. 2: Der komplexe Versuchsaufbau

Höhe des Wasserspiegels in cm

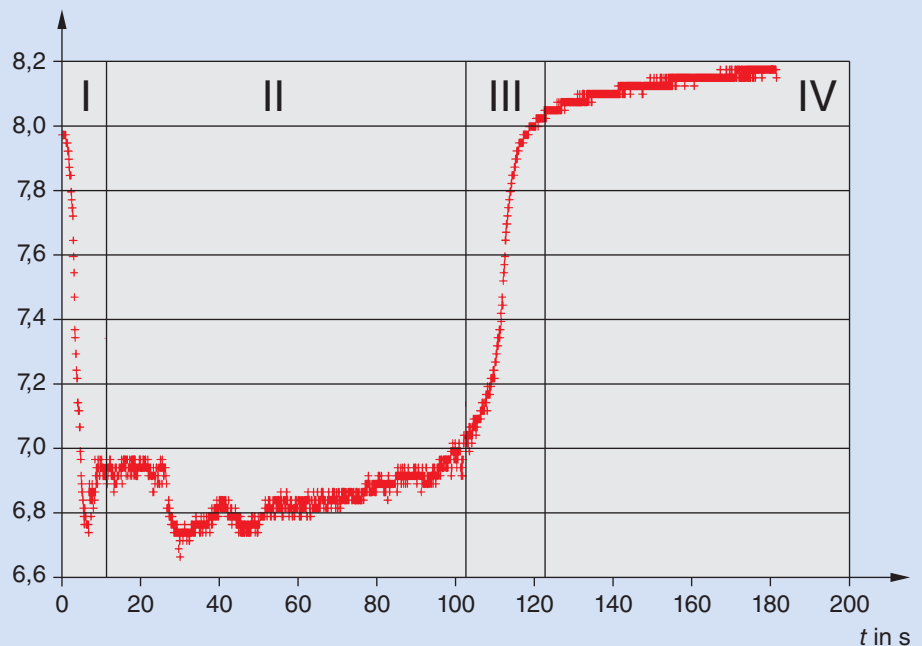


Abb. 3: Wasserhöhe im zeitlichen Verlauf

sich klassisch durchgeführt, muss die Erwärmung der Luft vor dem Überstülpen berücksichtigt werden.“

3 „Ist die „chemische“ Erklärung also allein für den Wasseranstieg die zutreffende?“

Interessant ist, wie die verschiedenen Naturwissenschaften bei komplexen Phänomenen oft miteinander zusammenspielen. Der Kerzenversuch ist hierfür ein besonderes deutliches Beispiel. Der Ablauf des Ver-

suchs hängt extrem von der Art der Versuchsdurchführung ab. Im Extremfall erlischt beim Überstülpen des Glases, wenn es zuvor mit „Abgasen“ der Verbrennung gefüllt wurde, die Flamme sofort und der Wasserspiegel steigt im selben Augenblick, ohne dass „Sauerstoff“ nach dem Überstülpen verschwunden ist (siehe [5]), oder wenn, wie von Patrick Bronner gezeigt, der „Kerzenversuch“ sogar ohne Kerze, nur mit heißer, vorgewärmter Luft in einem Tee-glas, durchgeführt wird (siehe [6]).

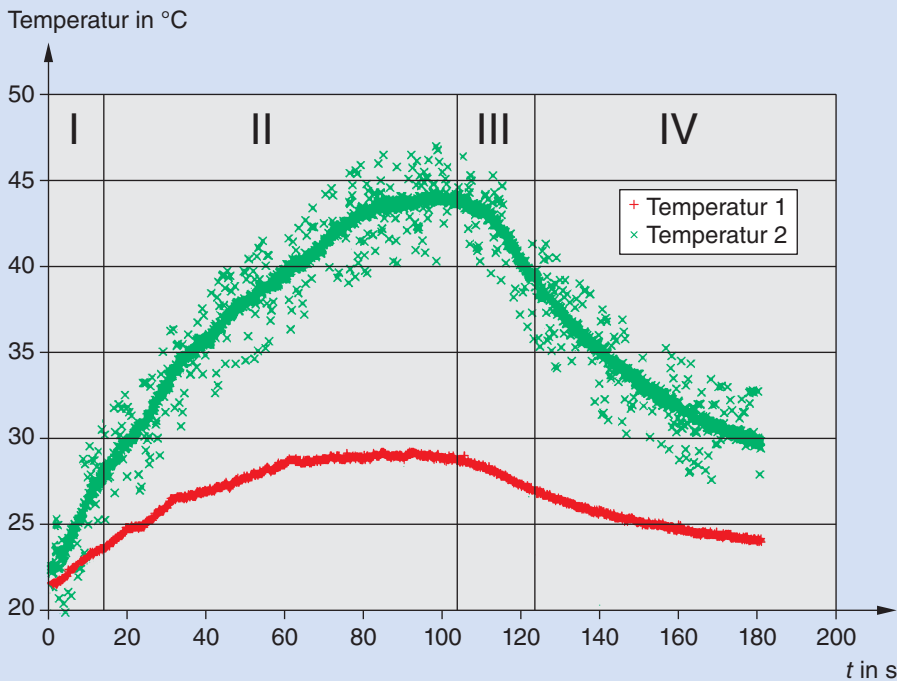


Abb. 4: Temperatur im oberen und mittleren Teil der Röhre

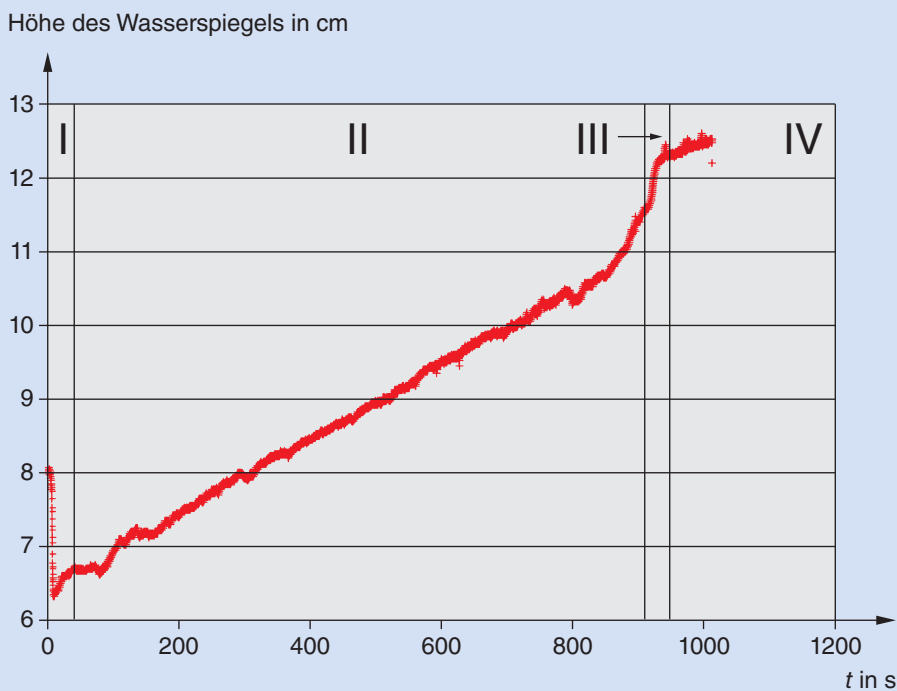


Abb. 5: Höhe der Wassersäule bei 60 % Sauerstoff

Stellen wir die Ausgangsfrage präziser, dann löst sich der polarisierende Konflikt auf:

Bei der „chemischen Version“ des Kerzenversuchs könnte die **Frage** lauten:

„Wie kann man bei abgeschlossener Versuchsdurchführung den Anstieg des Wasserspiegels am Ende im Vergleich zum Anfang (0,2 bzw. 0,9 cm) erklären, wenn Anfangs- und Endtemperatur übereinstimmen?“

Antwort: Durch eine Stoff- und Volumenbilanz der chemischen Reaktionspartner, wie in der Arbeit von *Lenard Bauersfeld* und *Marcel Neidinger* gezeigt.

Eine andere **Fragestellung** könnte lauten:

„Wie kann man den raschen und starken Anstieg des Wasserspiegels (1,2 cm in kurzer Zeit) nach dem Erlöschen der Kerze erklären?“

Antwort: Durch das Zusammenziehen der Luft und die gleichzeitig stattfindenden Kondensationseffekte bedingt durch die Temperaturabnahme (siehe Phase III).

Beim Kerzenversuch als Freihandversuch spielen beide Erklärungsmuster ineinander. Das Glas ist dabei anfangs schon mit erwärmter Luft mit hohem Wasserdampf-

gehalt gefüllt bzw. wird die zunächst kalte Luft in der ersten Phase des Versuchs erwärmt, sodass Luftblasen austreten. Der starke Anstieg des Wasserspiegels nach dem Erlöschen der Flamme beruht dann fast ausschließlich auf thermischen, also physikalischen Effekten. Dieser spektakuläre Anstieg des Wassers steht im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit der Beobachter. Dass nach Ende des Versuchs der Wasserspiegel gehoben bleibt, tritt selten ins Bewusstsein. Die Ursache hierfür sind sowohl chemische (Stoffbilanz) als auch thermische Effekte (erwärmte Luft zu Versuchsbeginn bzw. Gasverlust). Beim Sauerstoffgehalt der Luft im Normalzustand überwiegen auch hierbei die thermischen Effekte.

Wie in der Arbeit *Lenard Bauersfeld* und *Marcel Neidinger* gezeigt, hängt der Ablauf des Versuchs auch wesentlich vom Sauerstoffgehalt der Luft ab. Beim Sauerstoffgehalt von 60 % überwiegen die chemischen Effekte: während des Brennens der Kerze steigt der Wasserspiegel stetig an und am Ende ist der Wasserspiegel deutlich höher als zu Versuchsbeginn.

Zum Abschluss möchte ich mit großer Hochachtung dem Forscherteam zu ihrem großen Einfallsreichtum und der großartigen experimentellen Umsetzungen gratulieren. Es freut mich, dass ihre Arbeit durch „Jugend forscht“ entsprechend gewürdigt wurde (siehe [7]).

Literatur

- [1] *Dieter Plappert*: „Alles klar! Der Sauerstoff verschwindet, das Wasser steigt!“ Irrwege und Wege der naturwissenschaftlichen Bildung vom Kindergarten- bis ins Erwachsenenalter; *Praxis der Naturwissenschaft* 4/61. Jg. 2012
- [2] *Schwarzwälder Post*, 25./26. April 2014
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=UJ-AxlNkod8>
- [4] http://www.plappert-freiburg.de/Ph%E4no/MVI_7642_MPEG_.mpg&feature=youtu.be
- [5] http://www.plappert-freiburg.de/Ph%E4no/MVI_7644_MPEG_.mpg
- [6] http://www.plappert-freiburg.de/o2_Experiment_ohne_Kerze_Version_2_Zeitraffer.wmv
- [7] *Leonard Bauersfeld* und *Marcel Neidinger* hatten sich durch ihre Erfolge im Landeswettbewerb von „Jugend forscht“ für die Reise zum Intel ISEF-Finale in Los Angeles qualifiziert. Sie errangen dort einen Grand Award (zweiter Platz, 1500 US-Dollar Preisgeld) in der Kategorie Physik.

Anschrift des Verfassers

Prof. Dieter Plappert, Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien), Oltmannsstraße 22, 79100 Freiburg
E-Mail: dieter@plappert-freiburg.de