

# Die Kerzenpumpe

H. Joachim Schlichting

*In der Flamme eines Lichts sind alle Naturkräfte tätig*

Novalis

## Das Phänomen

In einer mit Wasser gefüllten Schale steht oder schwimmt eine Kerze. Ein Glas wird langsam über die Kerze gestülpt. Die Kerzenflamme erlischt allmählich (Bild 1). Schon während die Flamme kleiner wird, beginnt das Wasser im Becherglas zu steigen, und legt nach dem Erlöschen der Flamme noch einen kräftigen Anstieg zu. Mit Hilfe der Kerze gelingt es gewissermaßen, Wasser hochzupumpen. Wir wollen daher kurz von Kerzenpumpe sprechen.

Manchmal tritt dieser Versuch auch in Varianten auf. Eine dieser Varianten besteht darin, in das leere Glas beispielsweise einen Spiritus getränkten und zum Brennen gebrachten Wattebausch zu werfen und das Glas, unmittelbar nachdem die Flamme erloschen ist, mit der Öffnung nach unten in die Wasserschale zu stellen. In diesem Fall wird der Versuch meist in die Aufgabe eingekleidet, eine mit einer flachen Wasserschicht bedeckte Münze an sich zu nehmen, ohne sich die Finger naß zu machen.

Obwohl dieser Freihandversuch seit langem bekannt ist, vermag er auch heute immer wieder zu begeistern. Dabei spielen der unerwartete Versuchsausgang und die Einfachheit seiner Darstellung eine wesentliche Rolle.

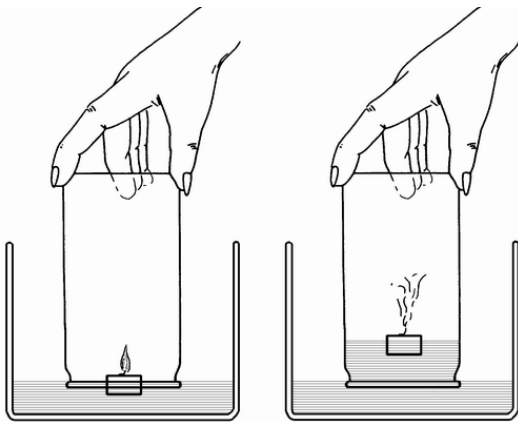


Abb. 1: Beim Überstülpen des Glases muß darauf geachtet werden, daß der innere und äußere Wasserspiegel gleich hoch sind.

Leider sind die Erklärungen, die für das Phänomen des Wasseranstiegs gegeben werden widersprüchlich und uneinheitlich. Am weitesten verbreitet ist eine "chemische" Erklärung, bei der davon ausgegangen wird, daß "die Kerzenflamme ...den Sauerstoff der in der Flasche enthaltenen Luft..." verbraucht. "Durch das Aufzehren des Sauerstoffs erniedrigt sich der Luftdruck in der Flasche, und der (größere) äußere Luftdruck drückt einen Teil des Wassers aus der Untertasse in die Flasche hoch" [1].

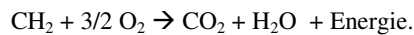
In einer anderen Erklärung wird der Wasseranstieg im Glas als thermischer Effekt dargestellt. Aufgrund der Erwärmung der Luft durch die Kerzenflamme beim langsamen Überstülpen des Glases dehnt sie sich aus und verläßt teilweise das Glas. Nachdem die Flamme erloschen ist, kühlt sich die Luft im Glas wieder ab und ruft einen entsprechenden Unterdruck hervor. Dadurch überwiegt der äußere Luftdruck und drückt soviel Wasser in das Glas, bis schließlich wieder Druckgleichgewicht zwischen innen und außen herrscht. Der Wasseranstieg im Glas, kann als ungefähres Maß für das Volumen der durch die Erwärmung verdrängten Luft angesehen werden. .

## Argumente

Obwohl die "chemische" Erklärung auf den ersten Blick plausibel erscheint, läßt sich nach kurzer Überlegung einwenden, daß durch die Verbrennung im Glas zwar Sauerstoff ( $O_2$ ) verbraucht wird, aber auch gasförmige Verbrennungsprodukte z.B. Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) entstehen. Nur in dem Fall, daß weniger gasförmige Rückstände entstehen als  $O_2$  verschwindet, wäre das obige Argument weiter wenn auch nur eingeschränkt aufrechtzuerhalten. Um diese Frage zu beantworten, muß man sich die chemische Reaktionsformel anschauen.

Kerzen bestehen in der Regel aus Stearin oder Paraffin. Beides sind komplizierte organische Verbindungen. Paraffin ist beispielsweise ein Stoffgemisch aus n Alkanen mit der Summenformel  $C_n H_{2n+2}$  mit n zwischen 22 und 32. Statt mit dem Stoffgemisch

rechnen wir der Einfachheit halber mit der auch für Stearin näherungsweise gültigen Formel  $\text{CH}_2$ . Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet dann:



Da das freiwerdende Wasser zunächst als Gas anfällt, entsteht sogar eine halbe Volumeneinheit mehr an gasförmigen Verbrennungsrückständen. Wie man jedoch am inneren Beschlag des Glases erkennen kann, kondensiert der Wasserdampf bald nach seiner Entstehung wieder aus. Deshalb muß davon ausgegangen werden, daß eine halbe Volumeneinheit mehr an Sauerstoff verbraucht wird als Kohlenstoffdioxid entsteht. Mit anderen Worten: Die chemische Erklärung könnte allenfalls zur Hälfte stimmen.

Um mehr über das "könnte" zu erfahren, reichen qualitative Argumente nicht mehr aus. Wir müssen wenigstens größenordnungsmäßig abschätzen, ob der beobachtete Wasseranstieg auch quantitativ durch die fehlende halbe Volumeneinheit erklärt werden kann oder ob vielmehr das thermische Argument gestützt wird.

## Experimente

Die folgenden Experimente fallen in ihrem Ergebnis so eindeutig aus, daß sie auch ohne größeren Aufwand mit Mitteln der Schulphysik durchgeführt werden können. Bereits ohne eine detaillierte Analyse der Energetik des Verbrennungsvorgangs läßt sich eine Entscheidung zwischen beiden Erklärungsmöglichkeiten herbeiführen.

Da die Luft zu etwa 21% aus Sauerstoff besteht, dürfte aufgrund der obigen Reaktion bei einer 100% Ausnutzung des Sauerstoffs durch die Verbrennung der Wasseranstieg im Glas einen Anteil von 10,5% des Gasvolumens nicht übersteigen.

(Es wurden zylinderförmige Glasgefäße (Bechergläser) benutzt. Bei diesen Gläsern kann von einer Proportionalität zwischen Volumen und Höhe ausgegangen werden, so daß sich die Volumenänderung unmittelbar an der Höhenänderung ablesen läßt. Da man auch bei langsamem Überstülpen des Gefäßes nicht ausschließen kann, daß der Ausdehnungsvorgang der Luft bereits abgeschlossen ist, sollte eine mögliche Absenkung des Wasserniveaus stets durch entsprechendes Anheben des Becherglases ausgeglichen werden (siehe Bild 1)).

Mit einem Glas von 500 ml tritt eine Volumenabnahme von 68 ml auf. Das sind bereits gut 13% des Gesamtvolumens, eine Änderung, die mit der chemischen

Erklärung nicht in Einklang zu bringen ist. Die Entscheidung fällt noch deutlicher aus, wenn man das-

selbe Glas über zwei brennende Kerzen stülpt. Die Volumenabnahme

beträgt dann sogar 142 ml, was einer Änderung von 28% entspricht. Dieser Anstieg ist wesentlich größer als dem gesamten Sauerstoffgehalt im Gefäß entspricht. Damit wird auch das häufig vorgebrachte Argument ausgeräumt, das entstehende

Kohlenstoffdioxidgas werde im Wasser gebunden, ein Argument, das natürlich auch durch Versuche mit Kohlenstoffdioxidgas über Wasser direkt widerlegt werden kann.

## Energetik

Trotz der eindeutigen Aussage des Versuchs bleiben Fragen offen. Beispielsweise legt der Befund, daß mit mehreren brennenden Kerzen offenbar die Sauerstoffausbeute vergrößert werden kann, die Frage nahe, wieviel Sauerstoff bei den Versuchen tatsächlich verbraucht wird.

Da der von der brennenden Kerze pro Zeiteinheit verbrauchte Sauerstoff gemäß obiger Formel in eindeutiger Weise mit dem Verbrauch an Paraffin oder Stearin verknüpft ist, kann der Sauerstoffverbrauch durch den Massenverlust der Kerze bestimmt werden.

Je nach Empfindlichkeit der zur Verfügung stehenden Waage läßt man eine oder mehrere Kerzen mehr oder weniger lange auf der Waage brennen und ermittelt anschließend den Massenverlust pro Zeiteinheit. (Steht nur eine relativ unempfindliche Waage zur Verfügung, so empfiehlt es sich, mehrere gleichartige Kerzen möglichst lange brennen zu lassen und dann das Ergebnis auf eine Kerze umzurechnen). In unseren Versuchen benutzen wir Teelichter, und stellen eine Massenabnahme pro Zeiteinheit von 0,6 mg/s fest. Bei einem Heizwert des Paraffins von ca. 47000 kJ/kg entspricht dem eine Leistung  $P = 28 \text{ J/s} = 28 \text{ W}$ .

Jetzt muß man nur noch die Brenndauer der Kerze unter der Glashaube feststellen, um den Massenverlust in dieser Zeit berechnen zu können. Dabei ist durch eine passende Mittelung die Tatsache zu berücksichtigen, daß die Kerze nicht instantan erlischt, sondern die Flamme allmählich kleiner wird.

Unsere Beobachtungen ergeben, daß eine unter dem Glas erlöschende Kerze innerhalb von 2 bis 4 Sekunden relativ gleichmäßig von normaler Flammengröße auf Null abnimmt. Es liegt dann nahe, eine mittlere Brenndauer (bei normaler Flammengröße) von 1 bis 2 Sekunden zugrunde zu legen. Wir haben festgestellt, daß auch bei längeren Brenndauern von bis zu 60 Sekunden die Kerze bis kurz vor dem Erlöschen die normale Flammengröße aufweist, so daß es ausreicht, von diesem Wert einige

Sekunden abzuziehen.

Der oben genannte Vorversuch zeigt bereits, daß die Sauerstoffausbeute offenbar von der Zahl der brennenden Kerzen, also von der Leistung abhängt. Außerdem liegt die Vermutung nahe, für den Versuchsausgang die Größe der benutzten Glasgefäße zu berücksichtigen. Daher führen wir Versuche mit unterschiedlich großen Glasgefäßen und unterschiedlicher Kerzenzahl durch. Jeder Versuch wird einige Male wiederholt. Die im Anhang angegebenen Werte stellen Mittelwerte dieser Wiederholungen dar.

Die Kerzenpumpe stellt energetisch gesehen eine originelle Vorrichtung zur (einmaligen) Umwandlung von thermischer Energie in potentielle Energie dar. Die Höhendifferenz des inneren und äußeren Wasserspiegels sind ein Maß für die gewonnene potentielle Energie. Beispielsweise steigt in Gefäß 1 das Wasser um  $h = 1,4$  cm entsprechend einer Volumenabnahme der Luft um 13,9 ml. Da der Schwerpunkt des Wassers um  $h/2 = 0,7$  cm gehoben wird, ist dafür eine potentielle Energie von  $E = mgh/2 = 0,97$  mJ nötig. Die Kerze hat während ihrer Brenndauer (von 2 s bei voller Flammengröße) unter der Glashaube im Mittel 56 J an thermischer Energie abgegeben, so daß sich ein Wirkungsgrad von 0,0017 % ergibt. Der geringe Wirkungsgrad darf allerdings angesichts der relativ geringen Temperaturdifferenzen und der Primitivität des Energiewandlers nicht verwundern.

## Auswertung

### Der Sauerstoffverbrauch

Um den Einfluß des Sauerstoffverbrauchs auf die Volumenänderung abschätzen zu können muß man noch wissen, daß mit dem Verbrennen von Paraffin mit  $\mu = 0,6$  mg/s, ein Sauerstoffverbrauch von 1,4 ml/s und eine Kohlenstoffdioxidzunahme von 0,96 ml/s, insgesamt also eine Volumenabnahme von 0,44 ml/s einhergeht (siehe Anhang). Im kleinsten Gefäß (1), mit dem nur ein Teelicht abgedeckt werden kann, messen wir eine Brenndauer von im Mittel 2 Sekunden. Dem entspricht also eine Volumenabnahme von 0,88 ml. Bezogen auf die gesamte Volumenabnahme von 14 ml sind dies nur 6%, was im Rahmen unserer Meßgenauigkeit vernachlässigbar ist. Ändert sich der Einfluß der Volumenabnahme infolge des Sauerstoffverbrauchs bei anderen Gefäßgrößen und bei Benutzung mehrerer Kerzen? Im Gefäß 2 mit einem Volumen von 500 ml erlischt eine Kerze nach 14 s. Das entspricht nach den obigen Überlegungen einer Brenndauer bei normaler Flamme von 12 s. Die Änderung des Volumens durch Sauerstoffverbrauch beträgt demnach 5,3 ml und steht einer Volumenänderung von 68 ml gegen-

über; das sind knapp 8%, also ähnlich wie bei Gefäß 1. Bei den größeren Gefäßen 3 und 4 beträgt, wie man leicht nachrechnet, der Anteil 14% und 12%.

Benutzt man mehrere Kerzen, so ergibt sich folgendes Bild: Bei zwei Kerzen unter Gefäß 2 beträgt die Volumenabnahme aufgrund des Sauerstoffmeherverbrauchs nur noch 1%, bei Gefäß 3 und 4 beträgt sie jeweils 2%. Bei drei Kerzen erhält man für Gefäß 2, 3 und 4 eine Volumenabnahme von 0,3%, 0,2% und 0,7%.

Mit anderen Worten: Die chemische Erklärung, der Sauerstoffverbrauch sei für die Volumenabnahme unter dem Glas verantwortlich, läßt sich um so weniger rechtfertigen, je kleiner das benutzte Gefäß und/oder je größer die Anzahl der brennenden Kerzen, d.h. je größer die Leistung ist.

Bezieht man die Menge des verbrauchten Sauerstoffs auf die Menge des in dem jeweiligen Luftvolumen enthaltenen Sauerstoffs, so zeigen diese Versuche, daß bei den kleineren Gefäßen nur wenige Prozent des Sauerstoffs tatsächlich ausgenutzt werden. In den größeren Gefäßen, in denen die Kerzen lange brennen ist die Sauerstoffausnutzung besser. Hier erhalten wir Werte bis maximal 20% des vorhandenen Sauerstoffs.

Die Ursache für die relativ geringe Ausnutzung des Sauerstoffs liegt zum einen darin, daß die Kerzenflamme bereits erlischt, wenn der Sauerstoffgehalt einen bestimmten Wert unterschreitet. So schlägt beispielsweise der Versuch fehl, eine Kerze in ausgeatmeter Luft eines Menschen brennen zu lassen. Da der Mensch wie andere terrestrische, luftatmende Tiere den Sauerstoffgehalt der Luft nur zu höchstens 20-25 % ausnutzen kann [2], bedeutet dieses, daß der Ausnutzungsgrad des Sauerstoffs durch eine brennende Kerze eher noch niedriger zu veranschlagen ist.

Zum anderen ist eine gute Ausnutzung davon abhängig, daß der Sauerstoff auch in dem Maße an die Kerze herangeführt wird, wie diese ihn benötigt. Die brennende Kerze nutzt dazu die Konvektion aus. Wenn die Konvektion gestört ist, was um so eher der Fall ist, je kleiner, insbesondere je enger der Brennraum ist, kommt es zu einer entsprechend schlechteren Ausnutzung. Daher erklärt sich auch die deutlich bessere Sauerstoffausnutzung in den großen Gefäßen, in denen sich die Konvektion voll ausbilden und auch den Sauerstoff aus den entlegenen Winkeln an die Kerze heranführen kann.

### Ein Freihandversuch

Ein Freihandversuch, der die Bedeutung der Konvektion für das Brennen einer Kerze demonstriert,

besteht darin, daß man die Konvektion durch "Aus-schalten" der die Konvektion "antreibenden" Schwerkraft unterbindet. Dazu fixiert man die Kerze in einem höheren Gefäß, in dem sie ungestört brennen kann. Ein Schüler oder eine Schülerin läßt dieses Gefäß aus möglichst großer Höhe, z.B. von einer Leiter, fallen und von einem anderen Schüler oder einer anderen Schülerin möglichst sanft auf-fangen. Je nach Höhe, aus der man die Kerze fallen läßt, (entsprechend der Zeitdauer, in der die Kerze ohne Konvektion auskommen muß), erlischt sie, oder die Flamme wird zumindest äußerst klein, um sich nach Beendigung des freien Falls wieder zu er-holen.

### Die Gefäßgröße

Die Untersuchung der Kerzenpumpe zeigt darüber hinaus, daß der Effekt des Wasseranstiegs umso größer ist, je schneller der Vorgang der Erwärmung und anschließenden Abkühlung abläuft. Zwar brennen die Kerzen um so länger, je weniger es sind und/oder je größer das benutzte Gefäß ist, aber der Verlängerung der Brenndauer entspricht keine ver-gleichbare Vergrößerung der Luftverdrängung.

Dieser Sachverhalt läßt sich damit erklären, daß bei längerer Zeitdauer die Wechselwirkung der durch die Kerze erwärmten Luft mit der Glaswandung immer stärker ins Gewicht fällt. Es kommt zu einem Temperatenausgleich an der Glaswand, ein Vor-gang, der dem gewünschten Effekt der thermischen Ausdehnung der Luft entgegenwirkt. Wird die Grö-ße der Kerzenflamme bzw. der von der Kerze er-wärmte Raum über der Kerze vergleichbar mit dem Gefäßvolumen, so erlischt die Kerze zwar schneller, kann aber das gesamte Luftvolumen erwärmen, be-vor es zu nennenswerten Energieverlusten kommt.

### Fazit

Das Phänomen des Wasseranstiegs als Folge einer erlöschenden Kerze ist nicht nur überraschend und interessant. Es läßt sich auch leicht unter Benutzung von Alltagsgegenständen von jedem Schüler selbst realisieren.

Darüber hinaus ist es in mehrfacher Weise "lehr-reich". Zum einen stellt es eine äußerst trickreiche Vorrichtung zur Umwandlung von thermischer En-ergie in potentielle Energie dar. Zum anderen kön-nen Schüler und Schülerinnen im Zusammenhang mit den beschriebenen Versuchen erfahren, daß bei gleich plausibel erscheinenden alternativen Erklä-rungen Nachdenken allein nicht notwendig zur ge-wünschten Entscheidung für die eine oder andere Erklärung führen muß. In solchen Fällen müssen Messungen durchgeführt werden, und seien es auch nur wie in unserem Fall eher quantitative Abschät-

zungen.

In den skizzierten Versuchen haben wir uns bewußt auf Probleme beschränkt, die mit Mitteln der Se-kundarstufe I zugänglich sein sollten. Vertiefungen, die sich an der einen oder anderen Stelle geradezu aufdrängen, erfordern in der Regel eine sorgfältige-re, damit aber auch wesentlich aufwendigere Durch-führung der Versuche und darüber hinaus ein ver-tieftes theoretisches Wissen. Beispielsweise spielt die Lage der Kerze innerhalb des Glasgefäßes eine nicht unerhebliche Rolle, weil dadurch die für die Sauerstoffversorgung und Kohlenstoffdioxidensor-gung wichtige Konvektion beeinflusst wird.

### Anhang

In der Sekundarstufe I wird man auf Einzelheiten der stöchiometrischen Betrachtung, insbesondere auf die Zusammenhänge zwischen Stoffmenge und Volumen nicht eingehen können. Man wird den Schülern etwa so wie im Text geschehen das Er-gebnis mitteilen, daß dem Verbrennen von sound-soviel Paraffin soundsoviel Sauerstoffverlust und soundsoviel Kohlenstoffdioxidgewinn entsprechen. Hinter dieser Angabe verbirgt sich im Wesentlichen die folgende Überlegung:

Die chemische Reaktionsgleichung bezieht sich auf Mengeneinheiten, die üblicherweise in Mol gemessen werden. Ein Mol Paraffin (näherungsweise  $\text{CH}_2$ ) reagiert mit  $2/3$  Mol  $\text{O}_2$  und hinterläßt 1 Mol  $\text{H}_2\text{O}$  und 1 Mol  $\text{CO}_2$ . Der Menge 1 Mol  $\text{CH}_2$  ent-spricht  $(12 + 2) \text{ g} = 14 \text{ g}$  an Masse. Mit anderen Worten: Dem Mengenverlust

$$-\mu_{\text{CH}_2}/(14 \text{ g/Mol}) = 0,6 \text{ mg Mol/ } 14000 \text{ mg s} = 0,043 \text{ mMol/s}$$

entspricht wegen  $\mu_{\text{O}_2} = 2/3 \mu_{\text{CH}_2}$  ein Sauerstoff-verbrauch von  $0,064 \text{ mMol/s}$  und eine Kohlen-stoffdioxidzunahme von  $\mu_{\text{CO}_2} = \mu_{\text{CH}_2}$ .

Da 1 Mol einer gasförmigen Substanz (ideales Gas, was hier näherungsweise angenommen werden kann)  $22,4 \text{ l}$  entspricht, nimmt das Sauerstoffgas um  $1,4 \text{ ml/s}$  ab und das Kohlenstoffdioxidgas um  $0,96 \text{ ml/s}$  zu.

Zahlenangaben zu den Messungen			
Gefäßgröße	Kerzen-zahl	Brenn-dauer (s)	Volumenab-nahme (ml)
Gefäß 1 (170 ml)	1	4	13,9
Gefäß 2 (500 ml)	1	14	68
	2	5	142
	3	2	165

Gefäß 3 (920 ml)	1	31	85
	2	9	170
	3	2	240
Gefäß 4(1970 ml)	1	51	170
	2	20	290
	3	9	430

### **Literatur**

[1] K. Goldstein Jackson: Experimente spielend leicht. Freiburg: Herder 1976

[2] K. Urich: Vergleichende Physiologie der Tiere. Berlin etc.: de Gruyter 1977, S. 56.