

**Kann man mit einem Teelicht
eine Kanne Kaffee kochen?**

(v. A. Reichert)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1. Einleitung.....	3
2. Vorstellen des Problems.....	4
3. Lösung des Problems.....	5
3.1 Bestimmung des Energieinhaltes eines Teelichtes	5
3.2 Energieverluste	7
3.3 Erweiterung der Überlegungen	10
4. Übungsaufgabe.....	13
5. Literatur.....	14

1. Einleitung

Die TIMSS-Studie über das Leistungsvermögen deutscher Schüler im internationalen Vergleich hat an den Tag gebracht, dass unsere Schüler zwar über ein solides Fachwissen verfügen, jedoch hinter den Schülern anderer Länder, vor allem dem Nachwuchs aus Japan, hinterherhinken, wenn sie dieses Wissen dazu einsetzen sollen, Probleme zu lösen. Daraus kann man nur den Schluss ziehen, dass es endlich an der Zeit ist, mit den Schülern Problemlösungsstrategien einzuüben. Eine zusätzliche Motivation erzielt man als Lehrer dann, wenn die Problemstellungen auch noch aus der Alltagserfahrung der Schüler stammen. Die in diesem Skript aufgeworfene Fragestellung erfüllt diese Bedingungen in geradezu idealer Weise. Außerdem lassen sich mit ihr zusätzlich noch eine ganze Reihe interessanter Aspekte zum Thema Energie erarbeiten, einem physikalischen Begriff, der zur Zeit in aller Munde ist.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau für das Korrekturlesen.

Stolberg, im August 2002

2. Vorstellen des Problems

Als Einstieg erzähle ich den Schülern eine kleine wahre Begebenheit. Vor einigen Jahren tobte an einem kalten Winterabend ein heftiger Schneesturm, der die Elektrizitätsversorgung meiner Heimatstadt völlig lahm legte. Es dauerte Stunden, bis der Strom wieder zur Verfügung stand. Zwischendurch wurde es ziemlich kalt im Haus. Schließlich benötigt die Heizung auch Strom. Irgendwann nach zwei bis drei Stunden hatten meine Frau und ich den Wunsch, etwas Warmes zu uns zu nehmen. Aber weder der Herd noch die Kaffeemaschine funktionierten. Da meinte ich, wir könnten es ja mal mit Teelichtern versuchen. Meine Frau hielt das für ziemlich absurd.

Auch die Schüler quittieren den Vorschlag meist mit einem verständnislosen Kopfschütteln und dem Kommentar: Das funktioniert niemals. Als Gründe für ihr Nein führen sie meist an:

- Es dauert viel zu lange.
- Die Energieverluste sind zu hoch.
- Das Teelicht liefert viel zu wenig Energie.

Bei einer kleinen Umfrage unter Bekannten stimmte die Mehrzahl der Gefragten spontan den Schülern zu. Nur einige Physikkollegen wollten sich nicht ganz festlegen. In der Tat ist die Antwort vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet nicht ganz so einfach, wie es auf den ersten Blick scheint. Dabei kommt der dritten Begründung sicherlich eine besondere Bedeutung zu. Liefert das Teelicht nämlich beim Verbrennen grundsätzlich nicht genügend Energie, so sind die beiden anderen Gründe jedenfalls belanglos. Daher muss der erste Schritt zur Lösung des Problems darin bestehen, den Energieinhalt eines Teelichtes zu bestimmen. Kennen die Schüler das Gesetz

$$W = c \cdot m \cdot \Delta T,$$

so können sie den Aufbau und den Ablauf des benötigten Versuches selbst planen.

3. Lösung des Problems

3.1 Bestimmung des Energieinhaltes eines Teelichtes

Versuch:

Geräte:

- 1 Becherglas 250 ml
- 1 Thermometer, wenn möglich mit Genauigkeit 0,1 °C
- 1 Stativ
- 1 Doppelmuffe
- 1 Klemme
- 1 elektronische Waage, Genauigkeit 0,01 g
- 1 Teelicht
- 1 Messzylinder 100 ml
- 1 Feuerzeug
- 1 Stoppuhr

Aufbau:

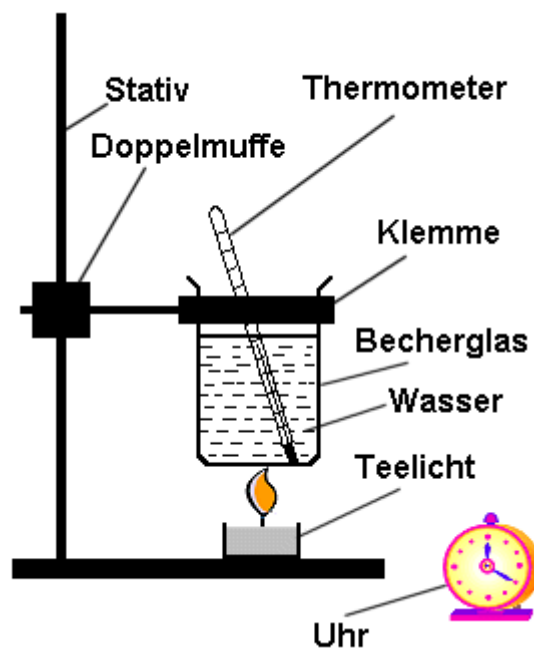


Abb. 1: Versuchsaufbau

Durchführung:

Man befestigt das Becherglas am Stativ und füllt es anschließend mit Hilfe des Messzylinders mit $V = 200$ ml Wasser. Dann wiegt man das Teelicht, zündet es an und erwärmt damit 5 min lang das Wasser. Dabei sollte die Spitze der Flamme den Boden des Glases gerade berühren. Eventuell muss man dazu das Becherglas ein wenig höher oder tiefer hängen. Danach wiegt man das Teelicht erneut. Außerdem misst man die Temperatur des Wassers vor und nach dem Erwärmen. Während des Erwärmens sollte man es mehrere Male etwa mit dem Thermometer umrühren. Um die gesamte vom Teelicht abgegebene Energie ermitteln zu können, benötigt

man außerdem noch die Gesamtmasse des Kerzenwachses in einem Teelicht. Dazu nimmt man ein neues Teelicht aus der Metallhülle, entfernt den Docht und wiegt es.

Ergebnisse:

$m(\text{Teelicht vorher}) = 14,92 \text{ g}$
 $m(\text{Teelicht nachher}) = 14,77 \text{ g}$
 $m(\text{Kerzenwachs im Mittel}) = 14,5 \text{ g}$
 $T(\text{Wasser vorher}) = 20,3 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T(\text{Wasser nachher}) = 25,2 \text{ }^\circ\text{C}$

Auswertung:

$\Delta m(\text{Teelicht}) = 0,15 \text{ g}$
 $\Delta T(\text{Wasser}) = 4,9 \text{ }^\circ\text{C}$

Daraus folgt für die von 0,15 g Kerzenwachs abgegebene Energie:

$$W = m \cdot c \cdot \Delta T = 200 \text{ g} \cdot 4,18 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 4,9^\circ\text{C} = 4096 \text{ J.}$$

Mit Hilfe eines einfachen Dreisatzes erhält man damit für die insgesamt zur Verfügung stehende Energie eines Teelichtes:

$$W(\text{Teelicht}) = 14,5 \text{ g} \cdot 4096 \text{ J}/0,15 \text{ g} = 395,9 \text{ kJ}$$

Als nächstes gilt es zu klären, wie viel Wasser man mit dieser Energie zum Kochen bringen könnte. Dabei nehmen wir an, das Wasser habe zu Beginn eine Temperatur von $T_1 = 20,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (s.o). Seine Endtemperatur beträgt $T_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Daraus folgt:

$$m(\text{Wasser}) = 395900 \text{ J}/(4,18 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 80^\circ\text{C}) = 1188 \text{ g.}$$

Die Energie, die ein Teelicht liefert, reicht immerhin aus, um ca. $V = 1,2 \text{ l}$ Wasser von $20,3 \text{ }^\circ\text{C}$ zum Kochen zu bringen. Das entspricht etwa 6 - 7 Tassen Kaffee. Also müssen wir auch die anderen Punkte genauer unter die Lupe nehmen.

Doch zuvor noch ein paar Anmerkungen zu obigem Experiment.

- Der Versuchsaufbau und die Durchführung sind so einfach, dass man das Experiment problemlos als Schülerversuch durchführen kann.
- Die Erwärmungszeit sollte möglichst kurz gewählt werden, um die Energieverluste an die Umgebung so gering wie möglich zu halten.
- Man kann bei der Auswertung natürlich auch die Energie berücksichtigen, die das Becherglas aufnimmt. Dazu muss man nur zusätzlich das leere Becherglas wiegen. Allerdings erwärmt sich wegen der kurzen Zeit das Glas nicht gleichmäßig, da Glas die Wärme schlecht leitet. Daher erzielt man nur scheinbar eine größere Genauigkeit, wenn man annimmt, dass die Temperatur des Glases genauso stark steigt wie

die des Wassers. Und die genaue mittlere Temperaturerhöhung des Glases lässt sich nur schwer ermitteln.

- Statt das Teelicht zu wiegen, könnte man im Prinzip die vom Teelicht abgegebene Energie auch dadurch ermitteln, dass man seine Brenndauer heranzieht. Auf manchen Packungen wird sie mit ca. $t = 4,5$ h angegeben. Die vom Teelicht in $t = 5$ min abgegebene Energie lässt sich mit dieser Angabe in einem Dreisatz auf das gesamte Teelicht hochrechnen. Man erhält dann

$$W = 4,5 \cdot 60 \text{ min} \cdot 4096 \text{ J} / 5 \text{ min} = 221,2 \text{ kJ},$$

also erheblich weniger. Das Teelicht brennt offensichtlich nicht während der gesamten Zeit mit gleichbleibender Flamme. Das zeigt sich auch daran, dass man je nach Teelicht manchmal bereits nach $t = 3$ min eine Erwärmung um $\Delta T = 5$ °C erhält bei gleicher verbrauchter Menge an Kerzenwachs. Andererseits würde man für die Brenndauer aufgrund obiger Messergebnisse finden:

$$t = 14,5 \text{ g} \cdot 5 \text{ min} / 0,15 \text{ g} = 8,06 \text{ h}.$$

Der Weg, den Energieinhalt des Teelichtes über die Masse zu ermitteln, ist also wesentlich zuverlässiger und genauer.

3.2 Energieverluste

Kommen wir nun auf die beiden anderen eingangs aufgeführten Begründungen der Schüler zurück. Die Zeitfrage ist durch den Versuch bereits geklärt. Um die Kanne Wasser zum Kochen zu bringen, muss das ganze Teelicht verbrannt werden. Das dauert im Schnitt mehr als $t = 4,5$ h. Man müsste also in der Tat sehr lange auf den Kaffee warten.

Die Frage nach den Energieverlusten ließe sich auf dreierlei Art klären:

- Man führt den Versuch mit einem Stövchen und einer Kaffeekanne, in die man $V = 1,19$ l Wasser füllt, tatsächlich durch. Da die Versuchsdauer über 4 Stunden beträgt, scheidet der Versuch für die Schule aus. Man könnte die Schüler das Experiment allenfalls als Hausexperiment durchführen lassen.
- Man stellt ein kleines Gedankenexperiment an. Angenommen, das Wasser kocht. Ist die Kanne nicht isoliert, so hat es sich nach $t = 4,5$ h bereits auf Zimmertemperatur abgekühlt. Folglich wird beim Erwärmen mit dem Teelicht das Wasser irgendwann eine Temperatur erreichen, bei der es seine Energie genauso schnell an die Umgebung verliert, wie es sie vom Teelicht erhält.
- Man führt den Versuch mit einem Teelicht möglichst großer Flamme mit möglichst wenig Wasser durch.

Daraus ergibt sich folgender Schülerversuch:

Versuch:

Geräte:

s.S.5

Aufbau:

s.S.5

Durchführung:

Man füllt $V = 100$ ml Wasser ins Becherglas, erwärmt das Wasser mit einem Teelicht, rührt ab und zu mit dem Thermometer um und liest alle 5 Minuten die Temperatur des Wassers ab. Man fasst die Werte in einer Tabelle zusammen und erstellt anschließend mit Excel ein Messdiagramm.

Ergebnis:

Man erhält die folgende Tabelle und das entsprechende Excel-Diagramm. Beide bestätigen in glänzender Weise die Überlegungen des Gedankenexperimentes.

t[min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40
T[°C]	19,0	39,0	54,9	64,7	70,4	73,7	75,0	75,5	75,0

Tabelle 1: Messwerte

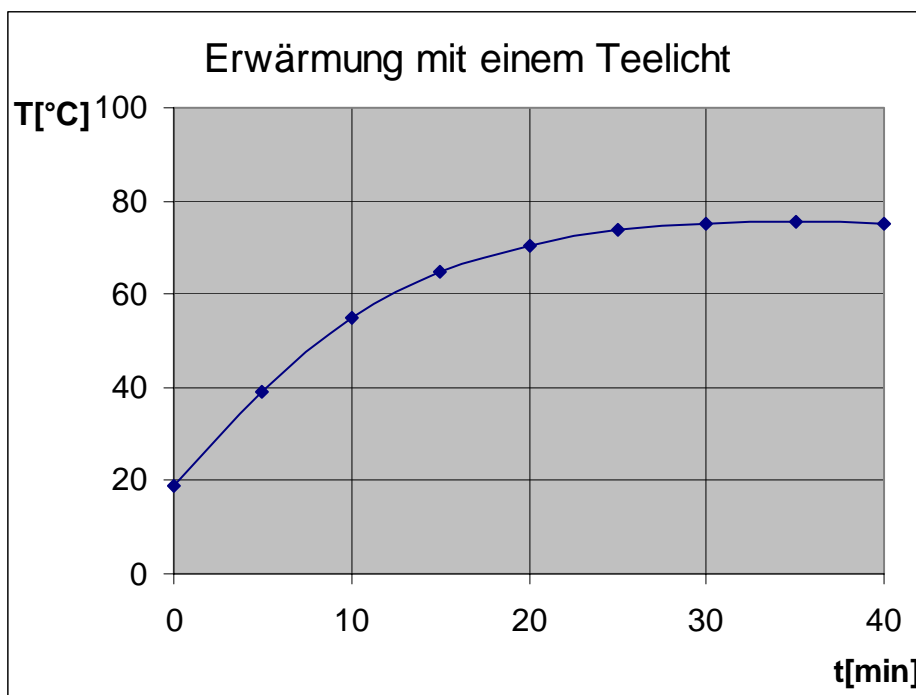


Abb.1: Ergebniskurve des Versuches

Anmerkung:

In Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der Größe der Flamme des Teelichtes erreicht man eine Endtemperatur, die zwischen 55°C und 75°C liegt. Um weitere Aussagen über den Einfluss der Energieverluste zu erhalten, bieten sich die folgenden Abwandlungen des Versuches an.

Versuchsvarianten:**Geräte:**

s.S.5
1 enghalsiger Erlenmeyerkolben
1 Uhrglas

Aufbau:

s.S.5

Durchführung:

- Man erwärmt $V = 100$ ml Wasser mit zwei oder vier Teelichtern gleichzeitig, rührt dabei ab und zu mit dem Thermometer um und liest alle 5 Minuten die Temperatur ab.
- Man erwärmt $V = 100$ ml Wasser mit zwei Teelichtern in einem enghalsigen Erlenmeyerkolben statt in einem Becherglas und deckt den Kolben zusätzlich mit einem Uhrglas ab.

Ergebnisse:

- Mit zwei Teelichtern erreicht man nach 20 Minuten eine Endtemperatur von $T_1 = 82$ °C, mit vier Teelichtern nach 15 Minuten eine Endtemperatur von $T_2 = 96$ °C. In beiden Fällen kocht das Wasser nicht.
- Beim Versuch mit dem enghalsigen Erlenmeyerkolben und den zwei Teelichtern beginnt das Wasser nach ca. 25 Minuten zu Köcheln bei einer Temperatur von $T_3 = 99$ °C.

Folgerungen:

Die Wärmeverluste sind ab einer gewissen Temperatur offenbar recht groß und zwar vor allem dadurch, dass Wasser verdunstet und einen nicht geringen Teil der zugeführten Energie nach außen abführt. Man sollte also Wasser stets bei geschlossenem Deckel kochen, um die Wärmeverluste möglichst gering zu halten. Eine Schülerin kommentierte das Ergebnis mit den Worten: „Ich koche ja auch keine Spaghetti bei geöffnetem Deckel.“

Also lautet die vorläufige abschließende Antwort auf unsere Frage:

Die Energie eines Teelichtes reicht grundsätzlich aus, um eine Kanne Kaffee zu kochen. Allerdings müsste man das Kaffeewasser in einem isolierten und geschlossenen Gefäß erwärmen. Mit einer normalen Kaffeekanne gelingt es nicht, da ab einer bestimmten Temperatur die Energieverluste an die Umgebung zu groß werden. Teelichter sind also zum Warmhalten des Kaffees geeignet, nicht jedoch zum Kaffeekochen.

3.3 Erweiterung der Überlegungen

Aufbauend auf diesem Ergebnis lassen sich weitere interessante Aspekte diskutieren.

- Warum erreicht man mit zwei oder mehr Teelichtern eine höhere Endtemperatur beim obigen Versuch?
- Was macht eine Kaffeemaschine anders als ein Teelicht?
- Warum sind kleine Gasbrenner, etwa Campingkocher, besser geeignet als ein Teelicht?

Die Antworten auf die erste, zweite und zum Teil auch auf die dritte Frage münden im Begriff der Leistung. Dazu stellen wir eine kleine Rechnung an. Mit der im Versuch ermittelten Energie errechnet sich die Leistung eines Teelichtes zu

$$P(\text{Teelicht}) = 4096\text{J}/300\text{s} = 13,7 \text{ W}.$$

Die Leistungen der Teelichter unterliegen allerdings erheblichen Schwankungen. So errechnet sich mit den Messwerten aus Tabelle 1 eine Leistung

$$P(\text{Teelicht}) = 4,18\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 100\text{g} \cdot 20^\circ\text{C}/300\text{s} = 28 \text{ W}.$$

Werte zwischen ca. 10 W und 30 W sind je nach Güte des Doctes durchaus möglich, wie die Ergebnisse zahlreicher Schülerversuche zeigen.

Eine Kaffeemaschine trägt die Aufschrift $P = 900 \text{ W}$. Sie ist also in der Lage, die benötigte Energie in viel kürzerer Zeit zur Verfügung zu stellen. Deshalb kann der Kaffee sich nicht mehr so schnell abkühlen wie er erwärmt wird. Die Maschine braucht für $V = 1,19 \text{ l}$ Wasser nur

$$t = 395900\text{J}/900\text{W} = 439,9 \text{ s} = 7,33 \text{ min}.$$

Das entspricht durchaus in etwa der Realität. Nachmessen mit einer Kaffeemaschine ergab eine Zeit von ca. 8 min, wobei man beachten muss, dass auch bei der Kaffeemaschine unvermeidliche Wärmeverluste auftreten. Außerdem entspricht die auf der Maschine angegebene Leistung der aufgenommenen elektrischen Leistung und nicht der abgegebenen thermischen Leistung. Rein phy-

sikalisch lässt sich also die Ausgangsfrage ganz einfach beantworten.

Die Energie des Teelichtes reicht aus, um eine Kanne Kaffee zu kochen, nicht aber seine Leistung.

Um mit Teelichtern die gleiche Leistung zu erzielen wie mit einer Kaffeemaschine, müsste man nämlich

$$z = 900 \text{ W} / 13,7 \text{ W} = 66$$

Teelichter gleichzeitig unter die Kanne stellen. Das dürfte aber aus Platzgründen ziemlich schwierig werden.

Bei der Antwort auf die dritte Frage kommt noch ein weiterer Gesichtspunkt mit ins Spiel. In Campingkochern dient Propangas als Energielieferant. Propan aber hat einen höheren Heizwert als Kerzenwachs. Der Heizwert gibt bekanntlich an, wie viel Energie frei wird, wenn man 1 kg des betreffenden Stoffes vollständig verbrennt. Dazu ist es eigentlich erforderlich, den Stoff im reinen Sauerstoffstrom in einem Kalorimeter zu verbrennen. Da in unserem Versuch die Energieverluste dadurch gering gehalten wurden, dass sich die Temperatur nur geringfügig erhöhte, kann man aus dem Versuchsergebnis den Heizwert von Kerzenwachs zumindest näherungsweise errechnen, auch wenn der Wachs wahrscheinlich nicht vollständig verbrannt ist, wie Rußspuren am Glas zeigen. Man findet:

$$\text{Heizwert(Wachs)} = 395,9 \text{ kJ} / 0,0145 \text{ kg} = 27303 \text{ kJ/kg.}$$

Einen Literaturwert konnte ich nicht finden. Im Vergleich zu anderen Werten¹⁾ erscheint er jedoch durchaus realistisch. Er liegt jedenfalls wesentlich niedriger als der von Propan mit 50000 kJ/kg.

Zum Abschluss der kleinen Unterrichtsreihe kann man die Schüler noch die Tabellen über die Heizwerte und die Brennwerte für Nahrungsmittel im Mittelstufenphysikbuch Dorn-Bader¹⁾ auswerten lassen. Daraus ergeben sich eine Reihe weiterer interessanter Aspekte, die man durch ein paar Anmerkungen zum Umweltschutz und zur Energieversorgung etwa wie folgt ergänzen kann.

- Manche Physiker und Politiker sehen im Wasserstoff den Energieträger der Zukunft. Zum einen entsteht bei seiner Verbrennung nur Wasser. Ferner besitzt er, wie man der Tabelle entnehmen kann, einen sehr großen Heizwert. Das würde die benötigte Lagerkapazität im flüssigen Zustand erheblich verringern, wenn auch die Lagerung sich insgesamt erheblich schwieriger gestaltet als bei Benzin oder Heizöl, da Wasserstoff unter normalen Bedingungen gasförmig ist und nur mit erheblichem Aufwand verflüssigt werden kann. Zur Zeit forscht man jedoch intensiv an sogenannten Festkörperspeichern für Wasserstoff.
- Aus der Tabelle der Heizwerte geht außerdem hervor, dass Holz ein sehr schlechter Energieträger ist. Aber vor allem in der dritten Welt wird es noch häufig zum Heizen und Ko-

chen benutzt. Hier wäre es sinnvoll, verstärkt auf die Solarenergie umzusteigen, zumal in vielen Entwicklungsländern die Sonneneinstrahlung erheblich größer ist als bei uns. Außerdem müsste dann nicht soviel Wald abgeholzt werden. Der Kohlendioxidgehalt der Luft würde gleich in doppelter Hinsicht gesenkt.

- Nicht zuletzt kann man den Einsatz von Teelichtern zum Warmhalten von Kaffee oder Tee auch als einen, wenn auch sehr bescheidenen Beitrag ansehen, nachwachsende Rohstoffe als Energieträger zu nutzen. Schließlich verbraucht man dann keinen Strom, um eine elektrische Warmhalteplatte zu betreiben. Vom energetischen Standpunkt aus betrachtet wäre es allerdings noch günstiger, eine isolierte Warmhaltekanne zu benutzen, damit die einmal zugeführte Wärme nicht so schnell an die Umgebung verloren geht.
- Der Heizwert, oder wie man bei Nahrungsmitteln sagt, Brennwert ist aber auch bei der Ernährung von größter Bedeutung. Viele Leute in den Industrieländern leiden unter Übergewicht, da sie zu viele energiereiche Lebensmittel zu sich nehmen, vor allem Fette und Kohlenhydrate. Energieärmere Kost wie Obst und Gemüse wären der Gesundheit wesentlich förderlicher. Ihr (die Schüler) solltet also rechtzeitig auf eine ausgewogene Ernährung achten.

4. Übungsaufgabe

- a) Führen Sie die Versuche im Skript mit verschiedenen Tee-lichtern durch. Vergleichen Sie die Ergebnisse miteinander. Was folgern Sie aus den Ergebnissen?
- b) Bestimmen Sie auf ähnliche Art und Weise den Heizwert von Brennsspiritus. Benutzen Sie dazu einen kleinen Brenner, wie er für Fondues benutzt wird.
- c) Ermitteln Sie die Leistung eines solchen Brennspiritusbrenners und vergleichen Sie sie mit der Leistung eines Tee-lichtes. Könnte man mit einem solchen Brenner eine Kanne Kaffee kochen? Begründen Sie ausführlich.

5. Literatur

1) Dorn-Bader, Physik Sekundarstufe I, Schroedel-Verlag Hannover, S. 250