

Autoren: M. Matthäi*, H. Gutberlet*, K.-H. Feller**; M. Schimmelpfennig**, M. Stübiger**
Titel: Messungen der Lichtstärke von Kerzen unterschiedlicher Zusammensetzung
Keywords: Kerze, Abbrand, Lichtstärke, Helligkeit

Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchungen bestand in der Ermittlung der Lichtstärke von Kerzen, hergestellt aus Paraffin, Bienenwachs, Fett und Stearin.

Um eine Aussage über die Effektivität der Verbrennung dieser verschiedenen Kerzenrohstoffe zu erhalten, wurde ein Messaufbau entwickelt, der es ermöglicht den Wachsverbrauch und die Lichtstärke gleichzeitig zu bestimmen. Aus dem Verhältnis (Lichtstärke/Wachsverbrauch) der beiden Größen ergibt sich ein Maß für die Effektivität der Umsetzung von chemischer Energie in Licht.

Ein Vergleich der mittleren, pro Gramm Brennmasse erzielten (spezifischen) Lichtstärke der Kerzenflamme zeigt, dass Bienenwachs und Paraffin deutlich höhere Werte aufweisen, als Fett und Stearin.

Es wird ein Messaufbau zur Bestimmung des kritischen Brennstoffstroms (Stundenverbrauch) vorgestellt.

1. Die Rolle der Kerze in der Geschichte der Lichtmessung

Wie schon aus der Einheit der Lichtstärke zu entnehmen, spielte die Kerze eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Fotometrie. Zum Beispiel diente in der Astronomie die Leuchtkraft einer Kerze als Referenz, um die Helligkeit von Himmelskörpern auszudrücken.

Ein grundlegendes Problem stellte die Festlegung eines allgemein gültigen Standards für die Lichtstärke dar. Es sollte sich um eine Lichtquelle handeln, die ein möglichst weißes, konstantes Licht ausstrahlt und zudem reproduzierbare Werte aufweist. So gab es viele verschiedene Einheiten, welche meist auf den damals gebräuchlichen Lichtquellen, den Kerzen, basierten.

Zu den ersten Versuchen, eine Einheitengrundlage festzulegen, gehört die „alte Lichteinheit“. Diese basierte auf dem Licht der 42 mm hohen Flamme einer Wachskerze, von der 6 Stück ein Pfund (500g) wogen.

Der Verein deutscher Gas- und Wasserfachmänner legte 1868¹, die als „Deutsche Vereinskерze“ bezeichnete Einheit, eine Paraffinkerze von 20 mm Durchmesser mit einer Flammenhöhe von 50 mm, als Referenz zu Grunde. Ähnlich wie bei der „alten Lichteinheit“ wurde das Gewicht von 6 Kerzen auf ein Pfund festgelegt.

Eine andere auf einer einfachen Kerze basierende Einheit ist die „Berliner Kerze“. Diese Einheit wurde als Walrat- oder Spermaceti-Kerze festgelegt, welche bei einem Verbrauch von 7,77 g pro Stunde mit einer 44,5 mm Flammenhöhe brannte. Aufgrund der guten

Brenneigenschaften dieses aus Pottwalen gewonnenen Kerzenrohstoffes, fand ein ähnlicher Standard ab 1860² auch in England und den USA Verwendung.

All diese Einheiten hatten den Nachteil, dass die Lichtemission der flackernden Kerzen nicht konstant war und zudem von Größen wie zum Beispiel Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Dochtzustand abhing. Zudem konnte die vorgeschriebene Flammenhöhe nur bedingt durch das Kürzen des Dochtes eingestellt werden. Dabei wuchsen die Ansprüche an das Lichtstärkenormal stetig. Wurden Mitte des 19. Jahrhunderts die verschiedenen Kerzenarten als Lichtstärkereferenz verwendet, entwickelten sich im Zuge von immer präziseren Messeinrichtungen und mit der Weiterentwicklung der Lichtquellentechnik, genauere und besser reproduzierbare Referenzen.

Die erste reproduzierbare Grundlage für die Lichtstärke wurde 1884 durch Friedrich-Alternak Hefner³ konstruiert und basierte auf der Lichtstärke einer mit Isoamylacetat gespeisten Flamme einer Petroleumlampe. Der Dochtdurchmesser betrug dabei 8 mm und die Flammenhöhe 40 mm. Diese Konstruktion hatte den Vorteil, dass die Flammengröße einfach reguliert werden konnte und der Wachsverbrauch durch den definierten Aufbau vorgegeben war. Außerdem gab es Formeln, mit welchen die Messergebnisse an Luftdruck und Luftfeuchtigkeitsänderungen angepasst werden konnten. Die so genannte Hefnerkerze (1 HK = 0,903 cd)⁴ wurde seit 1896⁵ in Deutschland und später auch in den skandinavischen Ländern und Österreich als gesetzlicher Maßstab verwendet und dient auch heute noch als nostalgische Einheit für Gas- und Petroleumlampen.

Parallel dazu wurde in England, Frankreich und den USA die internationale Kerze als Standard verwendet. Diese bezieht sich auf einen Satz von sorgfältig ausgewählten Kohlefaser-Glühlampen. Aufgrund der schlecht reproduzierbaren Lampeneigenschaften, sowie der Alterserscheinungen stellte diese Einheitengrundlage jedoch kein wahres Urnormal dar.

Erst in den vierziger Jahren begann man mit der Entwicklung eines Normals, welches das Licht einer Flamme als Lichtstärkenormal ablösen sollte. Die so genannte „neue Kerze“ wurde 1948 eingeführt und basierte auf der ausgestrahlten Lichtstärke eines schwarzen Strahlers. Heute ist die Einheit Candela durch eine monochromatische Lichtquelle von 555 nm Wellenlänge und einer Strahlleistung von 1/683 Watt pro Steradian festgelegt.

2. Kerzenabbrand und Lichterzeugung

Trotz der Möglichkeiten der modernen Lichtquellen haben Kerzen immer noch eine große Bedeutung in unserer Gesellschaft. Ob das romantische Candle-Light-Dinner, die gemütliche Tee- oder Kaffeestunde, der festlich gedeckte Geburtstagstisch oder die stimmungsvolle Atmosphäre eines Sommerabends, überall spielen Kerzen eine wichtige Rolle. Dabei wird eine leuchtende, ohne sichtbare Rußabgabe brennende Flamme erwartet.

Bei der Beleuchtung spielt die Lichtstärke einer Lichtquelle naturgemäß eine große Rolle. Überraschenderweise wird die Lichtstärke von Kerzen im Normalfall kaum beachtet, obwohl dies ein wichtiges Produktcharakteristikum wäre.

Wovon ist die Lichtstärke einer Kerze abhängig? Welche Bedeutung haben die Art der Brennmasse und der Wachsverbrauch pro Stunde für die Helligkeit der Kerzenflamme?

Bei der Entwicklung neuer Kerzen wird der zu verwendende Docht optimal an die Brennmasse und den Kerzendurchmesser angepasst. Döchte sind so geflochten, dass sie beim Abbrand eine natürliche Biegung aufweisen. Dadurch befindet sich die Döchtspitze im heißen Randbereich der Kerzenflamme, wo sie verglühen kann. Auf diese Weise reguliert sich die Länge des Döchtes von selbst und es kann von einem gleichmäßigen Abbrennverhalten ausgegangen werden. Des Weiteren wird durch die selbsttätige Döchtverkürzung eine Butzenbildung vermieden. In Abbildung 1 sind die verschiedenen Flammenzonen einer Kerze dargestellt.

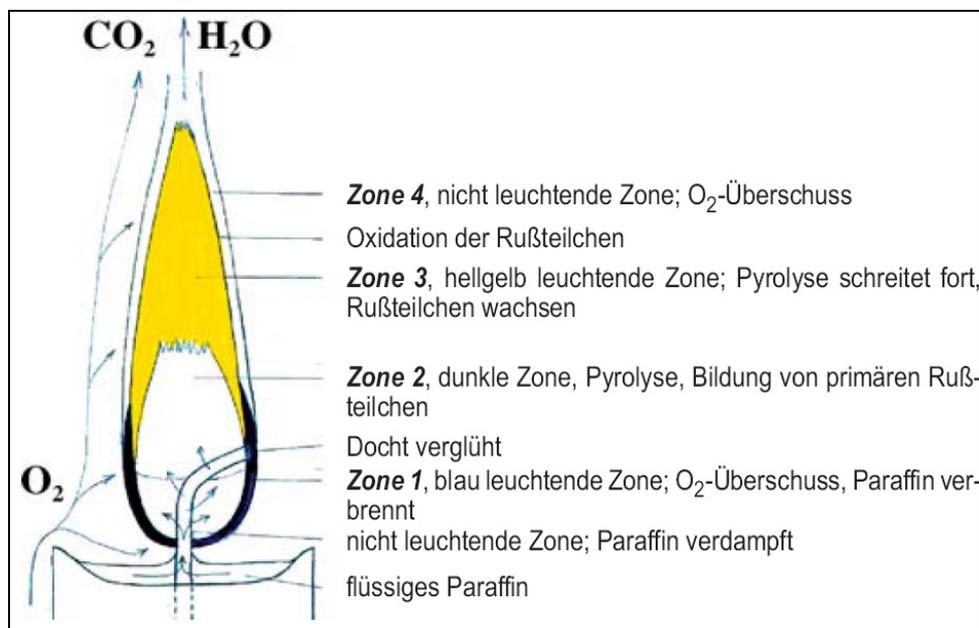


Abbildung 1: Flammenzonen einer Kerze⁶

Pflanzliches oder tierisches Fett, Stearine, Bienenwachs und Paraffine bilden heute die Haupteinsatzprodukte der Kerzenindustrie. Entscheidende Kriterien für deren Einsatz sind die Verfügbarkeit, der Preis sowie die Einsetzbarkeit auf den bestehenden Anlagen. Aufgrund seiner hohen Verfügbarkeit und universellen Anwendbarkeit wird Paraffin in 78 % aller Kerzen eingesetzt. Gehärtete pflanzliche oder tierische Fette liegen bei 12 %, Stearine ca. 8 % und Bienenwachs bei 2 % (siehe Abbildung 2).

Das Bienenwachs wird in Plättchenform von den Bienen ausgeschieden und bekommt seine gelbliche Farbe durch den Farbstoff Carotin, welcher in den Pollen zu finden ist. Als letztes alternatives Kerzenmaterial ist Fett zu nennen. Dieses besteht aus gehärtetem Palmöl und wird aufgrund des guten Duftstoffbindeverhaltens in der Duftkerzenherstellung verwendet.

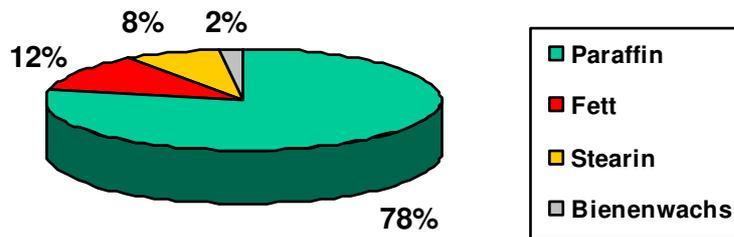


Abbildung 2: Anteil der verschiedenen Wachsorten an der Kerzenproduktion⁷

Untersucht wurden Kerzen aus Paraffin, Stearin, Bienenwachs und Fett mit einem Durchmesser von 70 mm. Diese Kerzen haben beim Abbrand den Vorteil, dass der Schmelzkegel innerhalb des Kerzendurchmessers liegt und so Tropfen und Ablaufen von Brennmasse keinen Einfluss auf die Flammengröße nehmen kann. Es ist leicht nachvollziehbar, dass die Lichtstärke einer Kerze stark von der Flammengröße abhängig ist. Die Flammengröße wird hauptsächlich über die Wachsmenge bestimmt, die pro Stunde verbrannt wird. Dieser „Stundenverbrauch“ wird im Wesentlichen durch die Stärke bzw. den Durchmesser des Doctes festgelegt. Die Kerzen wurden je Brennmassenart mit drei verschiedenen Dochtstärken gefertigt, um unterschiedliche Stundenverbräuche bzw. Flammengrößen untersuchen zu können.

Um diese Einflussparameter bei der Lichterzeugung von Kerzen besser zu verstehen, wurde ein Versuchsaufbau zur Lichtstärkenmessung entwickelt, der die Besonderheiten beim Kerzenabbrand berücksichtigt.

3. Grundlagen der Lichtmessung

Die Lichtstärke ist eine fotometrische Eigenschaft einer Lichtquelle und gibt die abgestrahlte Strahlleistung pro Raumwinkel an. Fotometrische Größen basieren auf dem Helligkeitseindruck einer Strahlungsquelle auf das menschliche Auge, welches elektromagnetische Strahlung (Licht) im Wellenlängenbereich von ca. 400 nm bis ca. 700 nm wahrnehmen⁸ kann. Dabei hängt das Helligkeitsempfinden nicht nur von der Intensität der Quelle, sondern auch von der spektralen Zusammensetzung ab. Beispielsweise werden blaue oder rote Lichtanteile weniger intensiv wahrgenommen als grüne. Um den Eindruck einer Lichtquelle auf das menschliche Auge quantitativ erfassen und vergleichen zu können, werden radiometrische Größen (Strahlstärke) mit der Empfindlichkeitskurve des Auges für Tagsehen (V-Lambda-Kurve) gewichtet. In Abbildung 3 sind die Empfindlichkeitskurven des menschlichen Auges für Tag- und Nachtsehen dargestellt. Durch geeignete Filter werden fotometrische Messgeräte an die Wellenlängenempfindlichkeit des Menschen angepasst.

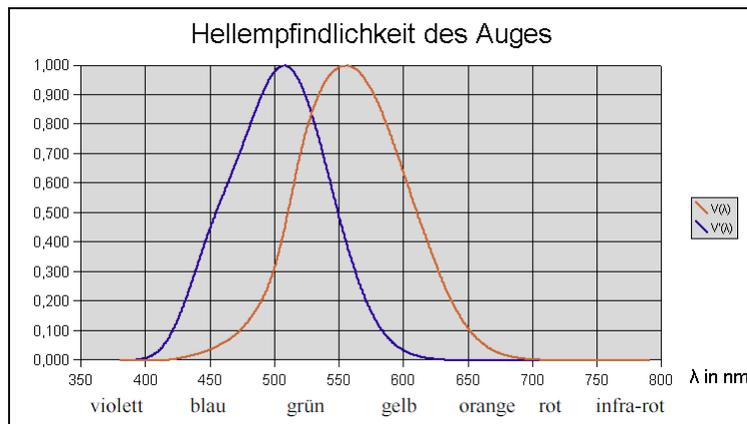


Abbildung 3: Empfindlichkeitskurve eines Normalbeobachters bei Tag- (orange) und Nachtsehen (blau)⁹

Die Lichtstärke kann nicht direkt gemessen werden. In der Regel wird sie über die Beleuchtungsstärke mit Hilfe des fotometrischen Entfernungsgesetzes bestimmt, welches mit folgender Formel ausgedrückt wird:

$$I = E \cdot r^2 \cdot \cos \beta$$

Die Lichtstärke (I) ist somit abhängig von der Beleuchtungsstärke (E) des zum messenden Lichtes, dem Abstand (r) des Sensors von der Quelle und dem Einfallswinkel (β). Die Beleuchtungsstärke kann mittels Luxmeter direkt ermittelt werden. Dabei wird von einer punktförmigen homogen in alle Raumrichtung strahlenden Lichtquelle ausgegangen. Bei realen Lichtquellen mit einer räumlichen Ausdehnung ergibt sich somit ein zu beachtender Fehler. Durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Lichtquelle und Sensor kann die reale Lichtquelle der idealen Quelle angenähert werden. Die Entfernung, bei welcher der so eingegangene Fehler im zulässigen Fehlerrahmen bleibt, wird fotometrische Grenzentfernung genannt. Diese ist lichtquellenspezifisch und wird meist empirisch ermittelt. In der Praxis sollte der Abstand mindestens das 10fache der größten Lichtquellenausdehnung betragen.

4. Aufgabenstellung

4.1 Versuchsaufbau und Experimentablauf

Um eine Aussage über die Effektivität der Verbrennung verschiedener Wachssorten zu erhalten, wurde ein Messaufbau entwickelt, der es ermöglicht den Wachsverbrauch und die Lichtstärke gleichzeitig zu bestimmen. Aus dem Verhältnis (Lichtstärke/Wachsverbrauch) der beiden Größen ergibt sich ein Maß für die Effektivität der Umsetzung von chemischer Energie in Licht.

Bei der Auswahl eines Messsystems sind die besonderen Eigenschaften der Lichtquelle Kerze zu beachten. Neben der Wärme- und Rußentwicklung sind vor allem das, im Vergleich zu einer elektrischen Lichtquelle, unruhige Leuchtverhalten und die Notwendigkeit eines

ausreichenden und Zugluft freien Luftaustausches. Auf den letzten Punkt ist ein besonderes Augenmerk zu legen. Zum einen kann eine Sauerstoffunterversorgung der Flamme zur unvollständigen Verbrennung und somit zum Rußen führen, zum anderen können konvektionsbedingte Luftströmungen ein unruhiges Brennverhalten der Flamme hervorrufen. Zugluft und starke Luftströmungen können zudem die Flamme so weit abkühlen, dass der komplizierte Verbrennungsprozess gestört wird und Kohlenstoffpartikel (Ruß) unverbrannt aus der Flamme austreten.

Um die Ansprüche an die Messung des Abbrandverhaltens einer Kerze weitestgehend zu erfüllen, wurde sich daher für die Bestimmung der Beleuchtungsstärke mit Hilfe eines Luxmeters entschieden. Diese dient zur Berechnung der Lichtstärke auf Grundlage des fotometrischen Entfernungsgesetzes. Der Abstand des Sensors zur Kerzenflamme wurde im Bereich von 55 cm bis 65 cm so gewählt, dass die Grenzentfernung für alle auftretenden Flammengrößen eingehalten wird. Außerdem ist der Sensor des Messgerätes durch eine Blende vom Umgebungslicht abgeschirmt. Dadurch wird der Öffnungswinkel auf 14 Grad beschränkt. Um das Messfeld des Sensors exakt auszurichten, wurde die Messanordnung mit einem Ziellaser ausgestattet. Zur Kompensation der natürlichen Schwankungen der Flamme wurden softwareseitig Filter- und Mittelungsverfahren eingesetzt. Die Installation eines zweiten Luxmeters ermöglicht es Umgebungslichtschwankungen aufzunehmen und aus dem Messsignal herauszurechnen. Dazu wurde der Sensor eines zweiten Messgerätes so ausgerichtet, dass nur Umgebungslicht und kein von der Kerze abgestrahltes Licht aufgenommen wird.

Andere Geräte zur Bestimmung der Lichtstärke wie die Ulbricht-Kugel oder das Goniofotometer sind aufgrund ihres Aufbaus für die Vermessung von Kerzen nur bedingt geeignet. Die Messung mit der Ulbricht-Kugel hat zwar den Vorteil, dass dem inhomogenen Charakter des Kerzenlichts Rechnung getragen wird, jedoch bringt der geschlossene Aufbau Probleme mit der Luftversorgung mit sich. Außerdem könnten Rußablagerung die reflektierenden Eigenschaften der Ulbricht-Kugel verschlechtern und so einen starken Messfehler verursachen. Einen offeneren Aufbau ermöglicht das Goniofotometer. Um eine Messung mit diesem Gerät durchzuführen ist es jedoch zwingend notwendig das Leuchtmittel fest im Mittelpunkt der Messeinrichtung zu fixieren. Die Flamme einer Kerze stellt jedoch eine „lebendige“ Lichtquelle dar, die sich durch kleine Verwirbelungen und Luftströmungen in ständiger Bewegung befindet. Durch die Bewegung ergibt sich somit eine fehlerhafte Lichtverteilungskurve, aus welcher kein aussagekräftiges Ergebnis für die mittlere Lichtstärke abgeleitet werden kann. Abgesehen davon ermöglicht das Goniometer keine kontinuierliche Messwertaufnahme. Zudem ist die Messung mit diesem Gerät für diesen Einsatzzweck zu aufwändig.

Zur Ermittlung des Wachsverbrauches dient eine Analysewaage ($d = 10 \text{ mg}$). Aus den stetig fallenden Gewichtswerten wird durch Differentiation (Anstieg) der Wachsverbrauch ermittelt.

Die Weiterverarbeitung der aufgenommenen Werte erfolgt mit einem auf diese Anwendung zugeschnittenen (LabView) Programm, welches auf einem PC ausgeführt wird. Es dient der Messwertaufnahme, Weiterverarbeitung und Protokollierung.

Das für diesen Versuch verwendete Gesamtsystem ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

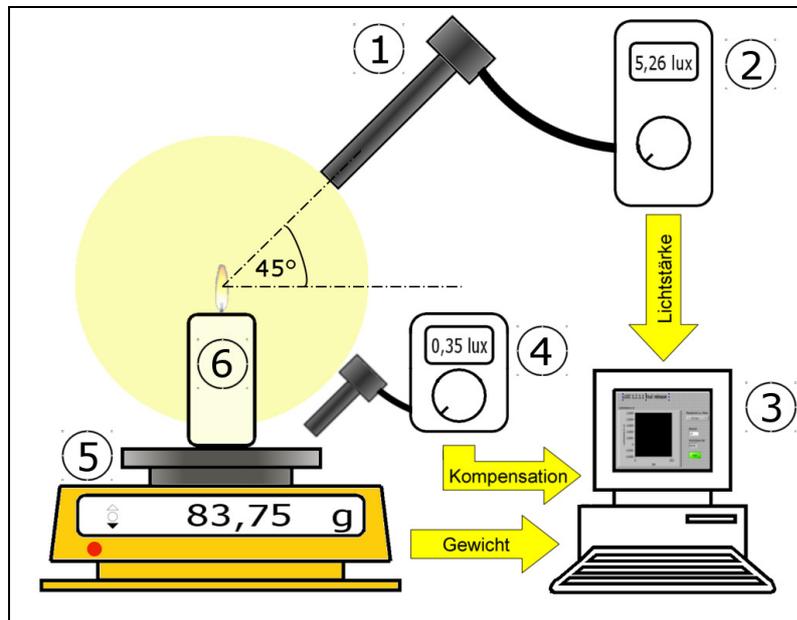


Abbildung 4: Prinzipbild des Versuchsaufbaus bestehend aus Lichtsensor mit Blende (1), Luxmeter (2), PC mit Auswertesoftware (3), Luxmeter zur Umgebungslichtkompensation (4), Analysewaage (5) und Kerze (6)

Der Docht spielt bei der Umsetzung der chemischen Energie in Lichtenergie eine zentrale Rolle, deshalb wurde der Zustand des Dochtes vor jeder Messung auf Beschädigungen und Verunreinigung wie zum Beispiel Butzen geprüft. Anschließend wurde die Kerze angezündet und nach einer Einbrennphase von 15 Minuten im Messaufbau positioniert. Um eine Abschirmung des Flammenlichtes und Verschlechterungen der Luftzirkulation durch den langsam entstehenden Wachsrand zu vermeiden, wurde dieser vor Messbeginn entfernt. Im Rahmen der Messserie wurde für jede Kombination aus Wachsorte und Dochtart mindestens 5 Messreihen aufgenommen. Aus diesen wurden die Mittelwerte gebildet. Die Messdauer betrug nach der Einbrennphase ca. 10 bis 20 Minuten.

4.2 Auswertung

Um die Beziehung zwischen ausgesandter Lichtstärke und Wachsverbrauch aufzuzeigen, wurde der Quotient aus beiden Größen in Abbildung 5 über die Zeit aufgetragen. Es lässt sich erkennen, dass dieser zeitlich um einen konstanten Wert schwankt und somit ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Wachsverbrauch und der ausgestrahlten Lichtstärke besteht.

Dieser Quotient kann als Effektivität der Umwandlung des Brennstoffes in sichtbares Licht interpretiert werden und ist im eingebrennten Zustand sowohl von der gewählten Wachsorte als auch vom Dochtdurchmesser und somit vom Wachsverbrauch abhängig. Die relativ konstanten Werte zeigen, dass die oft als lebendig beschriebene Kerze im Mittel doch stabile Werte liefert. Die Messwerte weisen eine Standardabweichung von ca. 5% auf.

Die grafische Darstellung der Lichtstärke über der Zeit zeigt, ob die Einbrennphase vollständig abgeschlossen ist und ein quasi-stationärer Zustand erreicht wurde, bei dem eine fehlerfreie Messwertaufnahme gewährleistet ist. Aus den Messdaten, der so geprüften Messreihen, wurden die Mittelwerte für die Lichtstärke, den Wachsverbrauch und die Effektivität ermittelt. Die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen sind nach Brennstoffsorte und Dochtgröße in Tabelle 1 zusammengefasst. Jeder eingetragene Wert ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel von mindestens fünf Einzelmessungen.

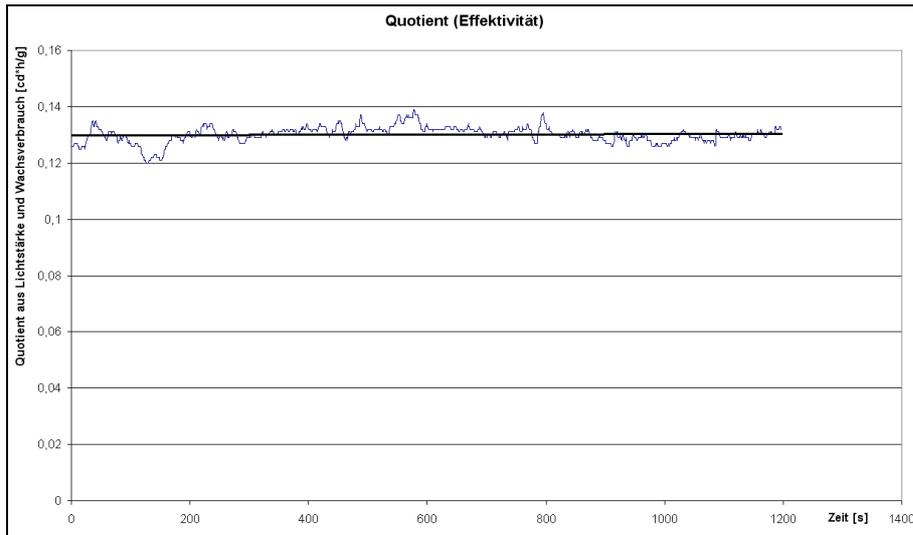


Abbildung 5: Verlauf des Quotienten von Lichtstärke zu Wachsverbrauch – Stearin, Docht groß

Tabelle 1: Übersicht der ermittelten Kerzenparameter

	Bienenwachs		
	Klein	Mittel	Groß
Wachsverbrauch [g/h]	4,740	6,630	7,890
Lichtstärke [cd]	0,72	1,253	1,299
Lichtstärke / Wachsverbrauch [cd*h/g]	0,152	0,189	0,165
	Fett		
	Klein	Mittel	Groß
Wachsverbrauch [g/h]	3,780	5,610	6,960
Lichtstärke [cd]	0,562	0,939	1,061
Lichtstärke / Wachsverbrauch [cd*h/g]	0,149	0,167	0,152
	Paraffin		
	Klein	Mittel	Groß
Wachsverbrauch [g/h]	2,590	4,380	6,184
Lichtstärke [cd]	0,429	0,817	1,096
Lichtstärke / Wachsverbrauch [cd*h/g]	0,189	0,187	0,177
	Stearin		
	Klein	Mittel	Groß
Wachsverbrauch [g/h]	5,370	8,030	11,250
Lichtstärke [cd]	0,661	1,191	1,416
Lichtstärke / Wachsverbrauch [cd*h/g]	0,123	0,148	0,126

Wie zu erwarten steigt der Wachsverbrauch und damit die ausgesandte Lichtstärke mit zunehmendem Dochtdurchmesser. Betrachtet man den Quotienten aus Lichtstärke und Wachsverbrauch kann kein direkter Zusammenhang mit der Dochtgröße abgelesen werden. Um diesen Zusammenhang ermitteln zu können, wurden die Tabellenwerte durch Zwischenwerte ergänzt, die durch Variation der Dochtlänge ermittelt wurden.

In Abbildung 6 sind die so gewonnenen Werte für die Quotienten in Abhängigkeit vom Wachsverbrauch dargestellt.

Ein Vergleich der mittleren, pro Gramm Brennmasse erzielten (spezifischen) Lichtstärke der Kerzenflamme zeigt, dass Bienenwachs und Paraffin zwischen 8% und 39% höhere Werte aufweisen, als Fett und Stearin.

Für jede Wachsort ergibt sich eine spezifische, parabelförmige Kurve, welche die Effektivitätsabhängigkeit der Verbrennung vom Wachsverbrauch darstellt. Die abgebildeten Verläufe wurden durch eine quadratische Regression an die Werteschar angenähert. Die auftretenden Standardabweichungen der Messwerte von der Regressionsfunktion sind in Tabelle 2 zusammengefasst und schwankten je nach Wachsort zwischen 2,8% und 5,4%.

Diese Abweichungen können vor allem auf Umgebungseinflüsse sowie auf unterschiedliche Dochtzustände zurückgeführt werden.

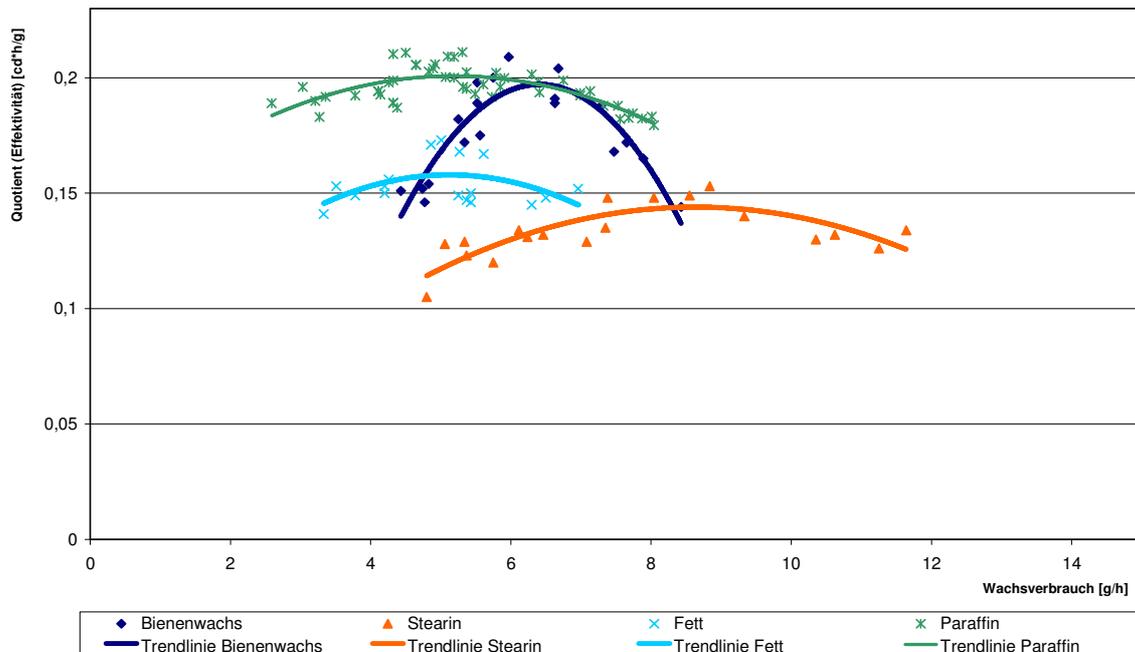


Abbildung 6: Effektivität der Verbrennung in Abhängigkeit zum Wachsverbrauch

Tabelle 2:

Wachsart	Standardabweichung
Bienenwachs	4,9%
Stearin	5,1%
Fett	5,4%
Paraffin	2,8%

Bei niedrigen Verbräuchen, ist aus dem Diagramm ein geringer Quotient abzulesen. Das bedeutet, dass bei kleinen Flammen weniger der im Brennstoff gespeicherten Energie in sichtbares Licht umgewandelt wird. Dies lässt sich damit begründen, dass bei steigendem Wachsverbrauch der leuchtende Teil der Flamme nicht im gleichen Maße zunimmt wie die Flammengröße. Betrachtet man den Querschnitt einer Kerzenflamme wird das emittierte Licht im inneren Teil der Flamme erzeugt. Dieser Bereich ist von der nur schwach leuchtenden Verbrennungszone umgeben, in dem Rußteilchen und Kohlenwasserstoffe durch Sauerstoff oxidiert und in Wärme umgewandelt werden. Die Dicke dieses Bereiches ist annähernd unabhängig von der Flammengröße und wird hauptsächlich von der Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffes bestimmt. Demzufolge nimmt dieser Bereich bei kleinen Flammen einen größeren Anteil am gesamten Flammenvolumen ein als bei großen Flammen. Mit zunehmender Flammengröße steigt also der Anteil des Flammenvolumens, welcher sichtbares Licht emittiert, an.

Bei weiter steigenden Wachsverbräuchen und somit größer werdenden Flammen, sinkt das Oberflächen/Volumenverhältnis der Flamme. Die Zufuhr des über die Flammenoberfläche diffundierenden Sauerstoffes und somit die durch die Verbrennung umgesetzte Energie nimmt demzufolge nicht im selben Maße wie das Flammenvolumen zu. Folglich sinkt die Flammentemperatur.

Das ausgestrahlte Licht einer Flamme wird durch das Glühen heißer Rußpartikel im Flammenkern hervorgerufen, deshalb sinkt mit fallender Temperatur auch die Energie der einzelnen Teilchen. Diese verhalten sich wie „Schwarze Strahler“ und emittieren ein von der Temperatur abhängiges Lichtspektrum. Die Lage des Emissionsmaximums ist, wie in Formel 1 zu erkennen, von der Temperatur abhängig und wird durch das „Wiensche Verschiebungsgesetz“ beschrieben.

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8}{T} \text{ } [\mu\text{mK}]$$

λ_{\max} = Wellenlänge des Emissionsmaximums

Formel 1: Wiensches Verschiebungsgesetz

Durch das Sinken der Flammentemperatur verschiebt sich das Emissionsspektrum dieser Teilchen aus den sichtbaren hin zum nicht wahrnehmbaren infraroten Lichtspektrum. Demzufolge wird ein geringerer Anteil der umgesetzten Energie in sichtbares Licht umgewandelt und der Quotient sinkt.

Darüber hinaus bewirkt eine niedrigere Flammentemperatur, dass Teile der Rußpartikel nicht mehr vollständig verbrannt werden und somit Brennstoff in Form von Ruß verloren geht.

Das jeweilige Maximum der Kurven stellt den optimalen Arbeitspunkt der Verbrennung dar, in dem keiner der zuvor beschriebenen gegenläufigen Prozesse überwiegt. An diesem Punkt wird der Brennstoff am effizientesten in sichtbares Licht umgewandelt.

Aus den Kurvenverläufen können noch weitere Erkenntnisse abgeleitet werden. Flache Verläufe stehen für eine nur geringe Rußneigung. Damit ergibt sich für den Kerzenhersteller die Möglichkeit den Stundenverbrauch in einem großen Bereich einzustellen, ohne dass sichtbares Rußen auftritt. Bei stark gekrümmtem Kurvenverlauf ist dieser Bereich wesentlich kleiner.

5. Ausblick

Wie aus der Auswertung ersichtlich, lassen sich mit diesem einfachen und zweckmäßigen Aufbau viele wichtige Parameter des Kerzenabbrandes bestimmen. Diese können zur Verbesserung der Brenneigenschaften genutzt werden. Um die Genauigkeit und die Aussagekraft der Messungen zu verbessern, ist ein optimierter Messplatz, wie er in Abbildung 7 dargestellt ist, in Planung. Anders als beim vorherigen Aufbau wird nun das gesamte Wachs während der Messung flüssig gehalten und der Baumwolldocht durch einen Glasfaserdocht ersetzt. Dieser ist in der Höhe veränderbar und ermöglicht so ein variables Einstellen des Wachsverbrauches. Der verbesserte Aufbau gewährleistet somit einen effektiveren Messablauf, da der Verbrauch unabhängig vom Dochtdurchmesser verändert

werden kann. Damit entfällt das zeitaufwendige Einstellen von Zwischenverbräuchen durch Kürzen des Doctes und das bisher notwendige Einbrennen der Kerzen. Ein weiterer Vorteil wäre der definierte Aufbau des Brennersystems, der zu vergleichbareren Versuchsbedingungen führt. Durch die konstanten Dochtparameter wird eine geringere Streuung der Messwerte erwartet. Zudem können auf diese Weise verschiedene Wachsarten unter gleichen Brennbedingungen getestet und miteinander verglichen werden.

Neben der Verbesserung der Messbedingungen ermöglicht der Aufbau einen weiteren wichtigen Parameter einer Kerze zu bestimmen. Es handelt sich um den „kritischen Brennstoffstrom“, der angibt ab welchen Wachsverbrauch die Flamme zu Rußen beginnt. Insbesondere bei der Herstellung von emissionsarmen Qualitätskerzen ist dieser Wert von großer Bedeutung.

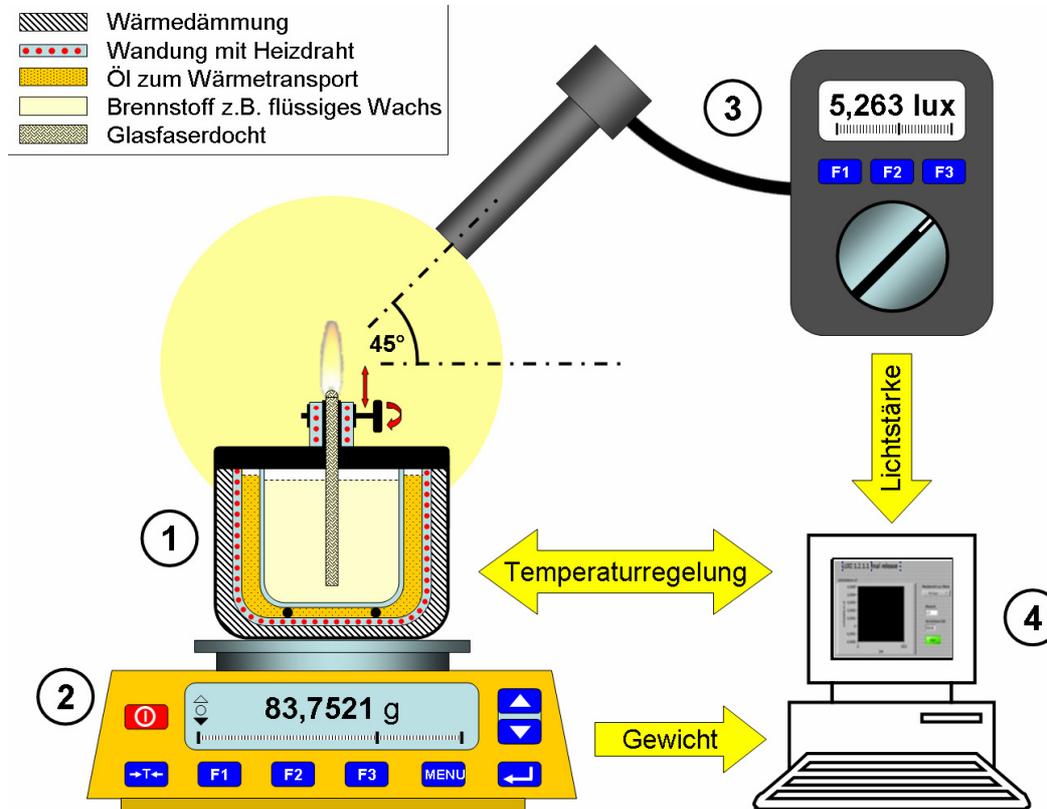


Abbildung 7: Prinzipbild des verbesserten Messaufbaus bestehend aus beheiztem Brennersystem (1), Analysewaage (2), Luxmeter mit Sensor (3), PC mit Auswert- und Steuersoftware (4)

Quellenverzeichnis

- ¹ Sackowski, Alfred: Physikalische Größen und Einheiten, Stuttgart: DEVA Fachverlag, 1960, S. 117
- ² Sackowski, Alfred: Physikalische Größen und Einheiten, Stuttgart: DEVA Fachverlag, 1960, S. 117
- ³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Hefnerkerze> (Stand vom 15. Dezember 2007)
- ⁴ Brockhaus Enzyklopädie 2006 Band 12 S.185
- ⁵ Brockhaus Enzyklopädie 2006 Band 12 S.185
- ⁶ Dr. Michael Matthäi, Dr. Norbert Petereit, Die Qualitätskerze, Jahrbuch für den Praktiker 2004
- ⁷ Dr. Michael Matthäi, Dr. Norbert Petereit, Die Qualitätskerze, Jahrbuch für den Praktiker 2004
- ⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Farbwahrnehmung> (Stand vom 12. Mai 2008)
- ⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Hellempfindlichkeitskurve> (Stand vom 24. April 2008)

Anschrift der Verfasser:

* Dr. Michael Matthäi

Westdeutsche Dochtfabrik GmbH & Co. KG, Ravensstraße 46

D-41334 Nettetal

Tel.: 49 2157 120619

Fax: 49 2157 120629

michael.matthaei@wedowickde

* Dipl.-Ing. Helmut Gutberlet

Sasol Wax GmbH

Worthdamm 13-27

20457 Hamburg

helmut.gutberlet@de.sasol.com

** Prof. Dr. Karl-Heinz Feller , ** Dipl.-Ing. Michael Schimmelpfennig, ** M. Stübiger

Fachhochschule Jena, Fachbereich Medizintechnik und Biotechnologie

Arbeitsgruppe Instrumentelle Analytik

Carl-Zeiss-Promenade 2

D-07745 Jena

feller@fh-jena.de

michael.schimmelpfennig@fh-jena.de