

## Ein vereinfachtes Modell für das Abbrennen einer Kerze

### 1. Einleitung

Kerzen haben auch in unserer heutigen, digitalisierten Welt nichts von Ihrer Faszination verloren. Davon zeugt auch die Tatsache, dass allein in Europa jährlich über 600 000 Tonnen Kerzen produziert und konsumiert werden. Die Anforderungen an die Qualität und insbesondere an den Kerzenabbrand sind in den Bestimmungen der Europäischen Gütegemeinschaft Kerzen E.V. /1/ und EN-Normen für Kerzen /2/ benannt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- leuchtende, ruhige Flamme
- optimale Dochtkrümmung
- rußarmes Brennen
- kein Tropfen
- Einhalten der Brenndauer
- minimaler Wachsrückstand

So sehr uns der Abbrand einer Kerze in seiner scheinbaren Einfachheit begeistert, verbirgt sich dahinter ein äußerst komplexer Vorgang. Bereits der englische Naturforscher Michael Faraday führte dazu in seinen Vorlesungen zur Naturgeschichte einer Kerze aus: „ Alle im Weltall wirkenden Gesetze treten darin zu Tage oder kommen wenigstens dabei in Betracht und schwerlich möchte sich ein bequemerer Tor zum Eingang in das Studium der Natur finden lassen.“ /3/

Kerzen werden heute hauptsächlich aus Paraffin, Stearin sowie pflanzlichen Fetten hergestellt. Dazu kommen Farbstoffe, Lacke und in zunehmenden Maße auch Duftstoffe. Die hier betrachteten Untersuchungen wurden an einer Paraffinkerze durchgeführt.

Der Abbrand einer Kerze hängt neben der Zusammensetzung der Brennmasse, dem eingesetzten Docht und dem Durchmesser der Kerze von vielen weiteren Faktoren ab. Dazu zählen auch Umgebungseinflüsse wie Temperatur und Luftbewegung. Trotz der zunehmenden Verfügbarkeit computergestützter numerischer Verfahren ist es sehr aufwändig eine Kerzenflamme numerisch zu modellieren. Einerseits ist die Verbrennungskinetik der Flamme mit den einzelnen Elementarreaktionen nur teilweise bekannt, zum anderen müssen die instationären Strömungs- und Diffusionsvorgänge, mit denen z.B. der Luftsauerstoff zur Flamme gelangt, berechnet werden.

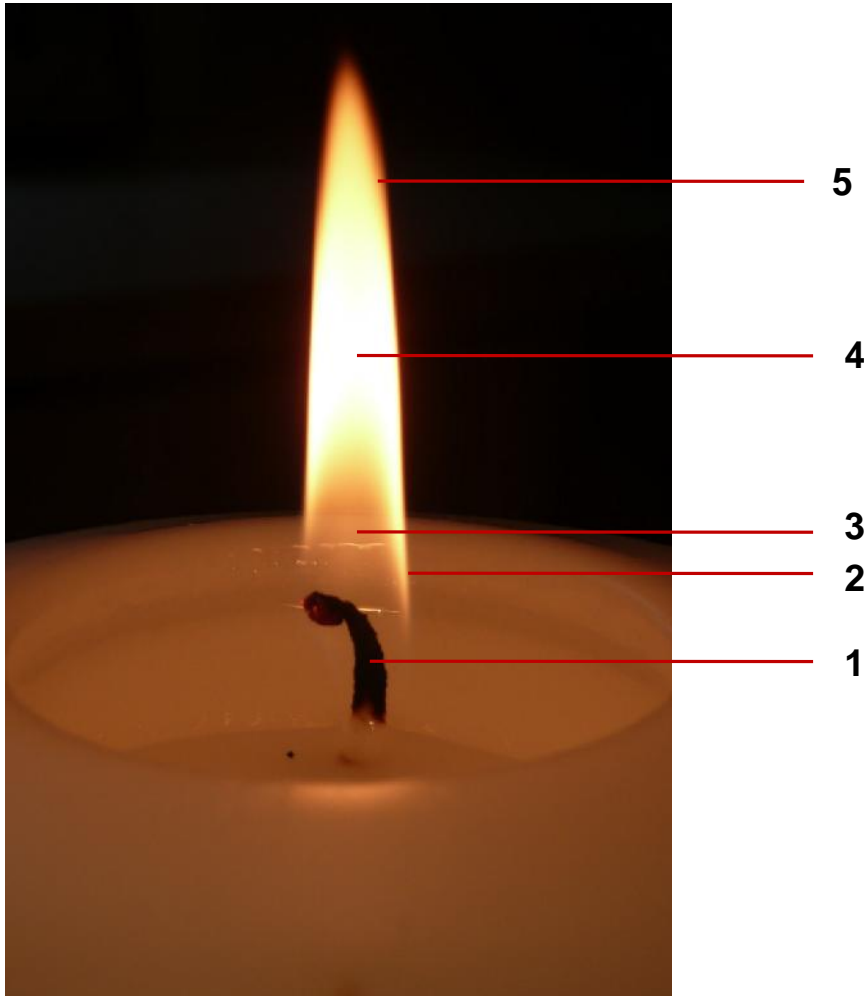
Auch wenn die Vorgänge sehr komplex sind bringen uns simple Regeln unter Umständen weiter. Für die nachfolgenden Betrachtungen zum Abbrennen von Kerzen soll die Flamme deshalb nur thermodynamisch, d. h. über ihre Verbrennungswärme und ihre Strahlungsleistung, mit einfachen stationären Modellen beschrieben werden. Das Aufschmelzen des Paraffins und Wärmeableitung im Kerzenkörper werden ebenfalls stark vereinfacht betrachtet. Trotzdem kann gezeigt werden, dass es mit diesen starken Vereinfachungen möglich ist, das Abbrandverhalten zu beschreiben.

### 2. Abbrand einer Kerze

Für die Modellierung des Abbrennens von Kerzen ist es sinnvoll, zwischen der Kerzenflamme und den wärmephysikalischen Vorgängen im Kerzenkörper zu unterscheiden.

Nach dem Anzünden einer Kerze schmilzt das Paraffin und wird durch die Kapillarwirkung des Dochtes in die Flamme transportiert. Dort verdampft es und kann in Gegenwart von Luftsauerstoff verbrennen. Die freiwerdende Verbrennungswärme verursacht Konvektion.

Die Verbrennungsgase steigen aufgrund der geringeren Dichte gegenüber der kalten Umgebungsluft nach oben. Die nachströmende Luft führt der Flamme neuen Sauerstoff für die Verbrennung am Docht zu. Ist ein Docht zu lang oder zu dick, wird mehr Paraffin verdampft als Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung zur Verfügung steht. Es werden Kohlenstoffpartikel gebildet und die Kerzenflamme beginnt zu rußen. Um die Dochtlänge in der Flamme zu begrenzen, enthalten Kerzen meist asymmetrisch geflochtene Döchte mit Spannfäden. Diese Döchte biegen sich bei Wärmeeinwirkung in der Flamme. Ab einer bestimmten Krümmung kommen die Döchte dann am Rand der Flamme mit Luft in Berührung und verglühen (siehe Abb. 1). Dadurch wird ein automatisches Kürzen des Döchtes bewirkt.



Legende:

1. Geflochtener Docht, gebogen mit glühender Dochtspitze
2. Blaue Zone im unteren Bereich der Flamme, meist schwach leuchtend, Temperaturanstieg durch Oxidation
3. Dunkelzone, Verdampfung des Paraffins, Crackprozesse und erste Teiloxidationen, Temperatur ca. 800 bis 1000 °C
4. Leuchtende Zone mit Verbrennungsprozess des Paraffins zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Nicht oxidierte Rußteilchen werden bis 1200 °C erhitzt und leuchten.
5. Flammenoberfläche. Die brennbaren Gase werden durch den Sauerstoffüberschuss komplett oxidiert und bis zu 1400 °C erhitzt.

**Abb. 1:** Flamme einer Paraffinkerze

Die Kerzenflamme kann man in mehrere Verbrennungszonen /4/ unterteilen. In der Dunkelzone (siehe Abb. 1, (3)) wird Paraffindampf erwärmt und dabei einem Crackprozess unterzogen, bei dem kurzkettige Kohlenwasserstoffe entstehen. Erste Partialoxidationen finden statt. Sauerstoff ist hier die Mangelkomponente. Die Temperaturen sind relativ niedrig, Rußpartikel bilden sich. Darüber beginnt die leuchtende Zone (4). Hier ist die Hauptreaktionszone mit entsprechend hohen Temperaturen von bis zu 1200 °C. Die im Verbrennungsprozess bei Sauerstoffmangel entstandenen Kohlenstoffpartikel leuchten und werden durch zusätzlichen Sauerstoff weiter zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Am unteren Flammenrand, in der blauen Zone (2), herrscht durch starke Konvektion mit Luftzufuhr ein Sauerstoffüberschuss. Bei hohen Temperaturen kommt es zu Radikalbildung und schwach blauer Lichtemission. An der Spitze der Flamme (5) werden schließlich die Rußpartikel aus der leuchtenden Zone durch weiteren Sauerstoffzutritt vollständig verbrannt. Hier können nach SCHÖNBUCHER /4/ Temperaturen bis max. 1400 °C entstehen.

Betrachtet man den Kerzenkörper, so wird durch die Wärme der Kerzenflamme das Paraffin in der Nähe des Doctes aufgeschmolzen und es bildet sich eine sogenannte Brennschüssel. Bei Kerzen mit größeren Durchmessern bleibt außen an der Brennschüssel ein Rand stehen, der unterschiedliche Dicken haben kann (siehe Abb. 2). Kerzen mit geringeren Durchmessern brennen dagegen ohne Rand ab. Die Ursachen der Randbildung und damit des Abbrenn- und Tropfverhaltens liegen im Wechselspiel von Wärmezufuhr durch die Flamme und Wärmeabfuhr durch den Kerzenkörper begründet. Um diese Vorgänge zu verstehen, sind mit Thermoelementen die Temperaturen der Kerzenflamme und an bestimmten Punkten in der Brennschüssel und im Kerzenkörper gemessen worden. Mit Hilfe dieser Messungen soll nachfolgend die Wärmebilanz im Kerzenkörper betrachtet werden.



**Abb. 2:** Paraffinkerze mit einem Durchmesser von 100 mm nach einer Brennzeit von 20 Stunden

### 3. Wärmebilanz der brennenden Kerze

Die wärmephysikalischen Vorgänge im Kerzenkörper werden heute in der Regel mit sogenannten Finiten Elemente Methoden (FEM), z. B. mit der Software COMSOL Multiphysics® /5/, berechnet. Diese Programme gestatten eine Kopplung der Simulationen von verschiedenen physikalischen Vorgängen in kleinen Raumeinheiten.

Ziel dieser Arbeit waren jedoch keine aufwändigen numerischen Berechnungen, sondern es sollte mit einem einfachen wärmephysikalischen Ansatz das Abbrandverhalten von Kerzen erklärt werden. Dafür sind z.T. stark vereinfachte Modelle der Wärmequelle und Wärmesenke angewendet worden, die jedoch trotzdem den Kerzenabbrand in guter Näherung abbilden können.

Die Wärmequelle ist die Verbrennungsreaktion von Paraffin zu Kohlendioxid und Wasser in der Kerzenflamme. Bei einer nicht rußenden Kerze und einer vollständigen Verbrennung, erhält man beispielhaft für ein gesättigtes Paraffin mit einer mittleren Zahl von 25 C-Atomen die folgende Oxidationsgleichung.



Die Standardverbrennungsenthalpie (Verbrennungswärme) kann mit etwa -43,4 kJ/g berechnet werden /6/. Bei einem Brennstoffverbrauch von 8,3 g/h (siehe experimenteller Teil) lag die Gesamtleistung der untersuchten Kerzenflamme bei etwa 100 W.

Der Wärmeverluste (Wärmesenken) der Kerzenflamme sind unterschiedlicher Natur. So wird ein kleiner Teil der Verbrennungswärme, etwa 0,3 kJ/g /7/, für das Aufheizen und Verdampfen des Paraffins im Docht verbraucht. Weitere Wärme benötigt man, um die Verbrennungsgase und die umgebende Luft aufzuheizen und damit die Konvektion zu erzeugen. Letztlich geht ein Teil der Wärme als Wärmestrahlung in die Umgebung. Der Anteil der Wärmeleitung (Konduktion) kann in der Bilanz der Flamme vernachlässigt werden, da Wärmeleitfähigkeit der Luft vergleichsweise gering ist. Die Wärmeströme sind in Gleichung (2) zusammengefasst worden.

$$-\dot{m}\Delta h_c = \dot{m} (\Delta h_v + c_p \int_{T_m}^{T_b} dT) + \dot{q}_r + \dot{q}_c \quad (2)$$

$\dot{m}$  – Massestrom des verbrannten Paraffins

$\Delta h_v$  – spez. Verdampfungsenthalpie

$\Delta h_c$  – spez. Verbrennungsenthalpie

$\dot{q}_r$  – Wärmestrom durch Strahlung

$\dot{q}_c$  – Wärmestrom durch Konvektion

$T_m$  – Schmelztemperatur

$T_b$  – Siedetemperatur

Betrachtet man nun den Paraffinkörper der Kerze, so trägt die Konvektion an der Flamme im Normalfall nur wenig zur Erwärmung in der Brennschüssel bei, da die heißen Gase nach oben strömen. Nur die Wärmestrahlung ( $\dot{q}_r$ ) erreicht die Oberfläche des Kerzenkörpers und bewirkt hier das Aufschmelzen des Paraffins.

Die Strahlungsemission der Flamme kann mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben werden.

$$\dot{q}_r = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (3)$$

$\varepsilon$  – Emissionskoeffizient

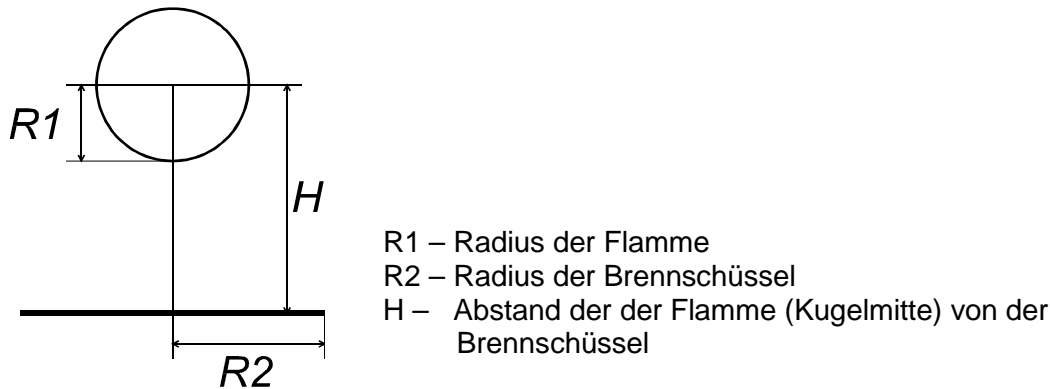
$\sigma$  – Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

A – Fläche des Strahlers

T – Kelvintemperatur

Den maßgeblichen Einfluss auf die Strahlungsleistung haben die Oberfläche der Flamme und die Flammentemperatur in der 4. Potenz.

Von der Wärmestrahlung wird nur ein Teil in der Oberfläche der Kerze absorbiert. Dieser Anteil kann unter Berücksichtigung eines geometrischen Faktors, des sogenannten „View-Faktors“ (Blickwinkel), berechnet werden. Dabei kann ein vereinfachtes Modell nach Abb.3 verwendet werden.



**Abb. 3:** Geometrisches Modell zur Berechnung des View-Faktors /8/

Betrachtet man den oberen Querschnitt der Kerze als eine Scheibe mit dem Radius R2 und nimmt die Flamme vereinfacht eine kugelförmige Strahlungsquelle mit dem Radius R1 an, so kann nach /8/ der folgende Zusammenhang für den View-Faktor ( $F$ ) abgeleitet werden:

$$F_{1,2} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{h^2}}} \right) \quad (4)$$

mit  $h = H/R2$

Der in die Brennschüssel fließende Wärmestrom beträgt somit

$$\dot{q}_{r,B} = F_{1,2} \dot{q}_r \quad (5)$$

Entscheidend für das Brennverhalten der Kerze ist neben dem Wärmestrom, der durch die Flamme in die Brennschüssel gestrahlt wird, der Wärmestrom, der durch den Kerzenkörper wieder abgeführt werden kann. Diese Wärmesenke ist dafür entscheidend, ob eine Kerze komplett abbrennt oder aber ein Rand um die Brennschüssel stehen bleibt. In unserem Beispiel blieb bei einem Durchmesser der Kerze von 100 mm (siehe Abb. 2) ein Rand von etwa 10 mm stehen. Für das thermische Gleichgewicht in der Brennschüssel sind der absorbierte Teil der Strahlungswärme der Kerzenflamme, die Aufheiz- und Schmelzenthalpie des Paraffins, die Wärmeleitung durch den Kerzenkörper sowie die Abkühlung an der Oberfläche zu berücksichtigen.

Die zum Aufheizen und Schmelzen des Paraffins in der Brennschüssel bei Raumtemperatur benötigte Energie lässt sich wie folgt darstellen:

$$\Delta h_S = c_p \int_{293}^{T_m} dT + \Delta h_p + \Delta h_m \quad (6)$$

Dabei können in erster Näherung eine mittlere spezifische Wärme ( $c_p$ ) im Temperaturbereich als konstant betrachtet und die erste Phasenumwandlungsenthalpie ( $\Delta h_p$ ) sowie die Schmelzenthalpie ( $\Delta h_m$ ) addiert werden. Man erhält mit den Angaben für Pentacosan bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C nach /7/ eine Enthalpiedifferenz von etwa 0,31 kJ/g.

Durch Wärmeleitung fließt Wärmeenergie von der bestrahlten Oberfläche  $A$  (oberer Querschnitt der Kerze mit Brennschüssel) in den Kerzenkörper. Im stationären Zustand, d.h. nach einer längeren Brennzeit, stellt sich eine konstante Temperaturverteilung im Kerzenkörper ein. Die durch Wärmestrahlung zugeführte Wärmeleistung und die durch Wärmeleitung in den Kerzenkörper abgeführte Leistung sind gleich. In diesem Zustand lassen sich mit Temperaturmessungen die Wärmeströme nach Gleichung (7) bestimmen.

$$\dot{q}_L = A \lambda \Delta T / d \quad (7)$$

$\dot{q}_L$  - Wärmestrom (Leistung) durch Wärmeleitung im Kerzenkörper

$d$  - Dicke der Paraffinschicht zwischen den Temperaturmessstellen

$\lambda$  - Wärmeleitfähigkeitskoeffizient ( $0,22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) /9/

$A$  – Fläche der Kerze, die durch die Flamme bestrahlt wird

$\Delta T$  - Temperaturdifferenz zwischen den Messstellen

An der Oberfläche des Kerzenkörpers wird die Wärme letztlich durch Konvektion und Wärmeleitung an die umgebende Luft abgegeben. Der Wärmestrom ist hier abhängig vom Wärmeübergangskoeffizient und der Temperaturdifferenz an der Oberfläche.

$$\dot{q}_{\bar{u}} = \alpha A_O \Delta T \quad (8)$$

$\dot{q}_{\bar{u}}$  - Wärmestrom

$A_O$  – Oberfläche des Kerzenkörpers

$\Delta T$  - Temperaturdifferenz zwischen den Medien Paraffin und Luft

$\alpha$  - Wärmeübergangskoeffizient

#### 4. Experimentelle Ermittlung des Wärmestroms durch die Kerze

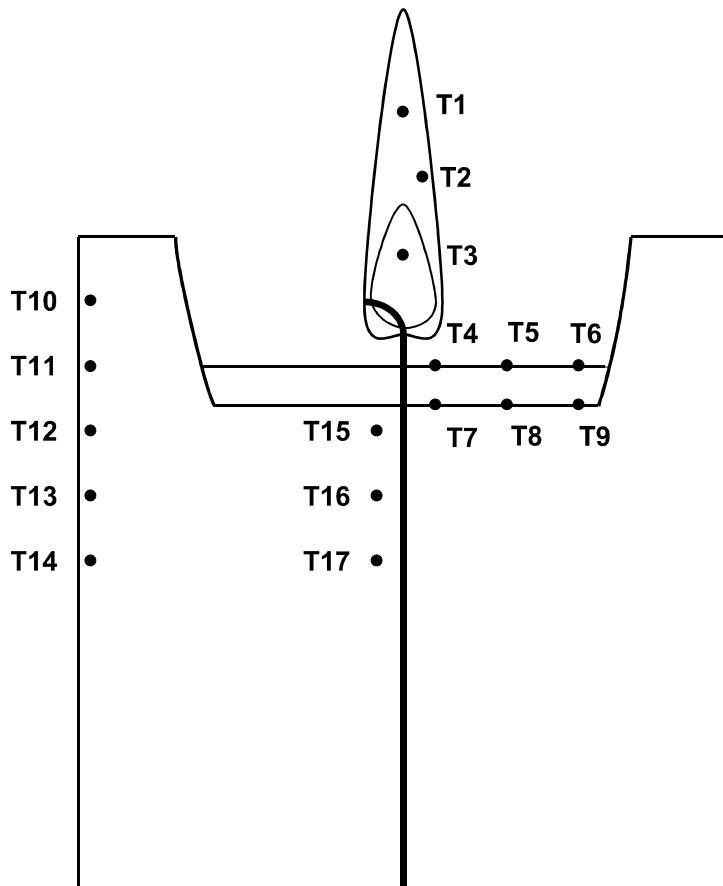
Der Wärmestrom durch den Kerzenkörper kann im stationären Zustand nach Gleichung (7) mit Hilfe von Temperaturmessungen bei Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Paraffins bestimmt werden.

Dazu ist ein Versuchsaufbau nach Abb. 4 verwendet worden. Für die Versuche stand eine Kerze mit einer Länge von 110 mm und einem Durchmesser von 100 mm zur Verfügung. Die Kerze bestand aus Paraffin des Typs SW 5603 (Schmelzbereich  $56/58 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und einem geflochtenen Docht des Typs HZL 41C der Westdeutschen Dochtfabrik. Der Docht hatte einen rechteckigen Querschnitt mit den Abmaßen  $2,7 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$ .

Die Temperaturen wurden mit  $0,5 \text{ mm}$  starken Mantelthermoelementen des Typs K, angeschlossen an ein Digitalthermometer des Typs Ahlborn Therm 2280-3, gemessen. Die Temperaturmessstellen T1 bis T3 waren in der brennenden Flamme, die einen Durchmesser von etwa  $8 \text{ mm}$  und eine Höhe von etwa  $50 \text{ mm}$  hatte. T1 war am oberen Ende in der leuchtenden Zone, T2 am Außenrand der leuchtenden Zone und T3 in der Dunkelzone angeordnet. Die Temperaturmessstellen T4 bis T6 befanden sich im oberen Bereich des flüssigen Paraffins der Brennschüssel, T7 bis T9 jeweils im unteren Bereich kurz vor der Phasengrenze zum festen Paraffin. Der Abstand von T4 und T7 betrug  $5 \text{ mm}$  vom Docht. Die weiteren Thermoelemente in der Brennschüssel waren jeweils  $10 \text{ mm}$  zur vorherigen Temperaturmessstelle angeordnet (siehe Abb. 4).

T10 bis T14 waren im Abstand von jeweils  $10 \text{ mm}$  etwa  $3 \text{ mm}$  tief am Außenrand der Kerze angebracht. T10 befand sich in einer Höhe von  $10 \text{ mm}$  oberhalb des Flüssigkeitsspiegels in der Brennschüssel.

T15 bis T17 waren etwa  $45 \text{ mm}$  tief im Zentrum der Kerze angeordnet. Um die genaue Führung im Paraffin zu gewährleisten, sind diese Thermoelemente durch  $1/8''$ -Edelstahlrohre geführt worden. Die Messspitze der Thermoelemente ragte  $5 \text{ mm}$  über die Rohrenden hinaus.



**Abb. 4:** Längsschnitt durch die Kerze mit Markierung der Temperaturmessstellen

Alle Messungen sind bei einer Raumtemperatur von  $(22 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$  ohne Luftströmung durchgeführt worden. Zu Beginn der Messungen wurde der Paraffinverbrauch der Kerze mittels einer Laborwaage des Typs Sartorius LA 6200S, bestimmt. Dazu wurde die Kerze 1 h eingebraunt und gewogen. Nach weiteren 3 Stunden wurde erneut gewogen und ein durchschnittlicher Paraffinverbrauch von  $8,3 \text{ g/h}$  gemessen.

Die Temperaturmessungen sind nach einer weiteren Brennzeit der Kerze von 5 h (insgesamt nach 9 h) vorgenommen worden, um stationäre Verhältnisse zu gewährleisten. In der Brennschüssel hatte sich eine Flüssigkeitsschicht von etwa 8 mm gebildet. Die Brennschüssel hatte einen Durchmesser von etwa 80 mm. Die Ränder der Brennschüssel waren im Durchschnitt 10 mm dick und etwa 15 mm hoch. Der untere Rand der Kerzenflamme befand sich etwa 3 mm über der Oberfläche des geschmolzenen Paraffins in der Brennschüssel. Die gemessenen Temperaturen können der Tabelle 1 entnommen werden.

Aus den Temperaturen T15, T16 und T17 kann mit einer mittleren Temperaturdifferenz von  $T = 7,5 \text{ K}$  bei einer Schichtdicke  $d = 10 \text{ mm}$  und eine Fläche der Brennschüssel von  $A = 50,2 \text{ cm}^2$  nach Gleichung (7) ein Wärmestrom von  $\dot{q}_L = 0,83 \text{ W}$  in vertikaler Richtung berechnet werden. Die Wärmeleitung horizontal von der Brennschüssel zur Außenwand durch den Rand der Brennschüssel lässt sich in erster Näherung aus der Fläche des Zylindermantels berechnen. Mit  $A = 20 \text{ cm}^2$  bei einer Höhe der Flüssigkeitsschicht von 8 mm und einer Temperaturdifferenz zwischen T11 und dem Mittelwert aus T6 und T9 von  $8,5 \text{ K}$  bei einer Wanddicke von etwa 10 mm mit  $\dot{q}_L = 0,38 \text{ W}$  abschätzen. Die Summe der experimentell ermittelten Wärmeströme im Kerzenkörper beträgt  $1,21 \text{ W}$ . Dazu kommt die für das Aufheizen und Schmelzen des vom Docht angesaugten Paraffins benötigte Wärmeleistung. Sie beträgt bei einem Verbrauch von  $8,3 \text{ g/h}$  und einer Enthalpie von  $h_s = 0,31 \text{ kJ/g}$  etwa  $0,71 \text{ W}$ . Insgesamt wird also eine Wärmeleistung von etwa  $2 \text{ W}$  im Kerzenkörper abgeführt. Ein weiterer Anteil ist die direkte Wärmeabgabe des flüssigen

Paraffins der Brennschüssel an die umgebende Luft. Dieser Anteil wurde bei den Abschätzungen vernachlässigt.

Tabelle 1: Temperaturen, gemessen mit 0,5mm-Mantelthermoelmenten an einer brennenden Paraffinkerze

Messstelle	Temperatur in °C	Bemerkung
T1	960	Die Flammentemperaturen werden durch die Wärmeableitung der Thermoelemente etwas zu niedrig gefunden.
T2	1020	
T3	870	
T4	75	Etwa 1 mm unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche in der Brennschüssel gemessen.
T5	66	
T6	60	
T7	58	Etwa 1 mm oberhalb der Oberfläche des festen Paraffins gemessen
T8	55	
T9	55	
T10	49	Etwa 3 mm tief unter der Kerzenoberfläche gemessen.
T11	49	
T12	39	
T13	33	
T14	30	
T15	52	45 mm tief in der Nähe der Kerzenmitte gemessen.
T16	45	
T17	37	

## 5. Anwendung des vereinfachten Modells zum Kerzenabbrand

Die im Kerzenkörper abgeführte Leistung muss im stationären Zustand durch die Strahlung der Kerzenflamme zugeführt werden. Die Größenordnung des Strahlungsanteils an der Gesamtleistung einer Kerzenflamme wurde nach /10/ mit 17% gemessen. Bei einer Leistung von 100 W sind das 17 Watt. Allerdings bezieht sich diese Strahlungsleistung auf eine zylinderförmige Flamme, die ihre Strahlung vor allem seitlich emittiert. Für das kugelförmige Modell (unterer Bereich der Flamme über der Brennschüssel) ist der Anteil deutlich geringer zu erwarten. Man kann die absorbierte Strahlungsleistung mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz nach Gleichung (3) und den geometrischen Verhältnissen an der Kerze nach Gleichung (4) abschätzen. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass der im Vergleich zur Brennschüssel weiter entfernte feste Rand nicht mehr wesentlich zur Strahlungsabsorption beiträgt. Nach Gleichung (3) erhält man mit einem Flammendurchmesser (Kugeldurchmesser) von 8 mm, einem angenommenen Emissionskoeffizienten von 0,3 und einer Flammentemperatur von etwa 900 °C im unteren Bereich /4/ eine Strahlungsleistung von 6,5 W. Berücksichtigt man den View-Faktor nach Gleichung (4) so erhält man mit  $R_1 = 4$  mm,  $R_2 = 40$  mm und  $H = 7$  mm einen View-Faktor  $F_{1,2} = 0,41$ . Die in der Brennschüssel absorbierte Strahlungsleistung beträgt danach etwa 2,6 W. Das ist durchaus plausibel und liegt in der Größenordnung des mit Hilfe der Temperaturmessungen im Kerzenkörper ermittelten Wertes.

Mit den Modellberechnungen nach Tabelle 2 werden die Zusammenhänge deutlich.

Bis zu einer Leistungsdichte von etwa 50 mW/cm<sup>2</sup> (Grenzdurchmesser der Brennschüssel = 8 cm) brennen Paraffinkerzen bei 20 °C mit einer Dochtleistung von 8,3 g/h ohne Rand ab. Bei geringeren Leistungsdichten bleiben Ränder stehen. Befindet sich eine Kerze in kälterer Umgebung, so erhöht sich mit  $T = (55 \text{ °C} - T_u)$  der durch Wärmeleitung abgeführte Wärmestrom. Der Grenzwert der Leistungsdichte steigt entsprechend Gleichung (7) proportional an. Bei einer Umgebungstemperatur von -15 °C verdoppelt sich der Grenzwert gegenüber +20 °C. Der für diese Temperatur berechnete Durchmesser für ein Abbrennen ohne Rand beträgt 5,5 cm.



Tabelle 2: Abhängigkeit der Leistungsdichte vom Durchmesser der Kerze

Strahlungsanteil des unteren Teils der Flamme ( $\dot{q}_r$ )  $\approx$  6,5 W

Durchmesser der Kerze in cm	Fläche (A) in cm <sup>2</sup>	View-Faktor (F <sub>1,2</sub> )	Absorbierte Strahlungsleistung in W	Leistungs-dichte ((F <sub>1,2</sub> · $\dot{q}_r$ )/A) in mW/cm <sup>2</sup>
12	113,0	0,44	2,86	25,3
8	50,2	0,41	2,67	53,3
4	12,6	0,33	2,15	172,6
2	3,1	0,21	1,37	439,8
1	0,8	0,09	0,59	768,2

Betrachtet man kleinere Flammen, z.B. mit dem halben Durchmesser (4 mm), würde sich bei etwa gleicher Flammentemperatur die Strahlungsleistung auf 25% verringern ( $\dot{q}_r = 1,6$  W). Bei einem Grenzwert der Leistungsdichte von 50 mW/cm<sup>2</sup> und dem entsprechend geänderten View-Faktor ergibt sich ein Kerzendurchmesser von 3,5 cm. Das bedeutet, mit einer solchen kleinen Flamme können nur Kerzen bis zu diesem Durchmesser ohne Randbildung abbrennen.

Diese sehr vereinfachte Betrachtungsweise berücksichtigt natürlich nicht sich zeitlich ändernde, instationären Vorgänge. Hier kann es z.B. zu sich verändernden geometrischen Verhältnisse kommen, wenn sehr hohen Ränder stehen bleiben. In der Regel erweichen dann die Ränder und verformen sich dabei. Auch sich ändernde Strömungsverhältnisse beeinflussen das Wärmegleichgewicht.

## 6. Zusammenfassung

Mit Hilfe dieses einfachen Modells lassen sich bereits einige wichtige Aussagen treffen und das Verhalten von Kerzen mit unterschiedlichen Durchmessern beim Abbrennen besser verstehen.

- Entscheidend für ein Abbrennen der Kerzen ohne verbleibenden Rand sind die Strahlungsleistung der Flamme und die obere Querschnittsfläche der Kerze, durch die die Wärme abgeführt wird. Das Verhältnis der beiden Größen (Strahlungsleistung pro Fläche) wird auch als Leistungsdichte bezeichnet.
- Die Experimente zeigten, dass bei Verwendung von Paraffin als Kerzenmaterial und einer Dochtleistung von etwa 8,3 g/h Kerzen bis zu einem Durchmesser von 80 mm noch ohne Randbildung abbrennen. Voraussetzung ist dabei eine Mindestbrenndauer zum Einstellen eines stationären Zustandes.
- Bei größeren Durchmessern bleiben Ränder stehen. Dieses Verhalten kann man aus dem Modell verstehen. Die durch Wärmeleitung im Kerzenkörper abgeführte Wärme (Wärmesenke) ist nach Gleichung (7) proportional zur oberen Querschnittsfläche der Kerze. Die absorbierte Strahlungsleistung steigt jedoch bei größeren Oberflächen nicht so stark (siehe Tabelle 2). Die Leistungsdichte sinkt. Das Paraffin kann nicht mehr vollständig aufschmelzen.
- Bei tieferen Außentemperaturen oder Verwendung von Material mit höherem Schmelzpunkt erhöht sich  $T$  in Gleichung (7) und (8) und damit die durch den Kerzenkörper abgeführte Wärmeleistung. Dadurch kann sich dann bereits bei Durchmessern < 80 mm ein Rand bilden.
- Durch größere Kerzenflammen und damit durch eine höhere Strahlungsleistung können Kerzen mit größeren Durchmessern ohne Randbildung abbrennen. Der Durchmesser der Kerzenflamme hängt wiederum vom verwendeten Docht ab. Begrenzend ist hier die eintretende Rußbildung bei zu dicken Dochten.

- Auch zur Verbesserung des Aufschmelzens der Wachsoberfläche generell ( z.B. in Gläserkerzen ) muss der Flammendurchmesser vergrößert und der Abstand der Flamme zur Wachsoberfläche verringert werden. Um dies insbesondere beim Einsatz von Fetten ohne Rußbildung zu erreichen sind neue Dochtkonstruktionen erforderlich. Hier liegt eine zukünftige Herausforderung innovativer Dochtentwicklung. Das beschriebene vereinfachte Modell leistet dazu einen wesentlichen theoretischen Beitrag.

#### Literatur:

- /1/ DIN EN 15426 "Kerzen — Spezifikation für das Rußverhalten“ 2008  
DIN EN 15493 "Kerzen — Spezifikation für die Feuersicherheit“ 2008  
DIN EN 15494 "Kerzen — Produktsicherheitskennzeichnung 2008
- /2/ Güte- und Prüfbestimmungen RAL-GZ 41 September 2014
- /3/ Faraday, M., Naturgeschichte einer Kerze, Verlag ,Franzbecker-Didaktischer Dienst, Bad Salzdetfurth, 2. Edition 1980
- /4/ Schönbacher, A. und Hönes, G., Abschlussbericht zur Anwendung moderner optischer Messmethoden im Hinblick auf das windabhängige Rußverhalten von Kerzenflammen, Stuttgart, Jan. 1987
- /5/ COMSOL Multiphysics®, Software, , [www.comsol.com](http://www.comsol.com)
- /6/ Poling, B. E., Prausnitz, J. M., O’Connell, J. P.: The Properties of Gases and Liquids, McGRAW-HILL, New York, 2001
- /7/ NIST Webbook, <http://webbook.nist.gov>, National Institute of Standards and Technology, Boulder US (2012)
- /8/ Martinez, I., Radiative View Factors, [webserver.dmt.upm.es](http://webserver.dmt.upm.es)
- /9/ Schröder, V., Opitz, D. , Wärmephysikalische Untersuchungen an Spezialparaffinen für den Einsatz in Latentwärmespeichern, Bericht im Auftrag der Sasol AG, Berlin, Juni 1992
- /10/ Hamins, A. and Bundy, M., Characterization of Candle Flames, Journal of FIRE PROTECTION ENGINEERING, Vol. 15, November 2005

Autoren: Dr. Michael Matthäi  
Westdeutsche Dochtfabrik GmbH & Co KG  
41334 Nettetal  
Ravensstraße 46

Dr. Volkmar Schröder  
Bundesanstalt für Materialforschung und  
-prüfung ( BAM)  
12205 Berlin  
Unter den Eichen 87