



# Temperatur

## Ein heißes Thema



Präsentation  
AECM 2004  
Salzburg, Österreich



Meine sehr verehrten Damen und Herren,  
es ist für mich eine große Ehre, heute anlässlich des Jahrestreffens der europäischen Kerzenhersteller hier in Salzburg zu Ihnen zu sprechen. Mein Vortrag zum Einfluss der Temperatur auf Herstellung, Qualität und Anwendung von Kerzen habe ich anlässlich des ersten Welt-Kerzen-Kongresses in Orlando im April vor Kerzenherstellern aus der ganzen Welt gehalten. Aus meiner Sicht war dieser Kongress ein großer Erfolg für alle Teilnehmer. Im Mittelpunkt stand der Erfahrungsaustausch zwischen den einzelnen Kerzenherstellern, den nationalen und internationalen Organisationen und technischen Komitees, aber auch die Gespräche und Diskussionen mit Zulieferern und Prüflaboratorien sowie allen anderen, mit der Kerzenindustrie verbundenen Personen und Unternehmen.

In den vergangenen Jahren haben wir zahlreiche interessante Vorträge zu den unterschiedlichen Aspekten der

Kerzenproduktion gehört, die sich zumeist mit den eingesetzten Materialien, den Herstellungsprozessen, dem wissenschaftlichen Hintergrund und natürlich auch dem fertigen Produkt, der Kerze, beschäftigen [1, 2]

Ich möchte Ihre Aufmerksamkeit heute auf einen Parameter der Kerzenherstellung lenken, dessen Bedeutung oft unterschätzt wird und der deshalb nicht die benötigte Aufmerksamkeit bekommt, die er verdient – die Temperatur.

Wir wissen, dass die Kerze aus einem Kerzenkörper und einem Docht besteht. Der Docht wird oft auch als die Seele der Kerze bezeichnet. Aber wissen Sie auch, dass die Kerze neben Körper und Seele auch einen Geist besitzt. Dieser Geist, der die Kerze von der Herstellung bis zum Abbrand begleitet, heißt Temperatur.

Dieser Geist ist:

- nicht zu sehen und doch immer anwesend
- verantwortlich für die Beeinflussung aller Pro-

zesse (ob wir es wollen oder nicht).

Darüber hinaus

- wird erwartet, dass er all' unsere Wünsche erfüllt, aber unerklärlicherweise tut er das nicht immer
- kann er ignoriert werden, aber dann auf eigene Gefahr (wie einfach Ihre Arbeit ist, hängt davon ab, wie Sie ihn beachten und sich seinen Forderungen beugen)
- kann er unberechenbar sein (insbesondere, wenn er in die falsche Richtung gedrängt wird)

Ich möchte deshalb in meinem heutigen Vortrag besonders darauf eingehen, was wir tun müssen, um den Geist der Kerze für uns zu nutzen und versuchen, Ihnen ein wenig von dessen Magie zu vermitteln.

# Temperatur - ein heißes Thema

## 1 Einleitung

Ein Blick auf die Klimakarte zeigt, dass die Kerzenherstellung in Nord- und Südamerika, Europa, Afrika und Asien in völlig unterschiedlichen Klimazonen stattfindet.

Die angewandten Herstellungsmethoden reichen dabei von der Handarbeit über mechanisierte Prozesse bis zur vollautomatisierten Fertigung. Obwohl wir uns mit den unterschiedlichen Temperaturverhältnisse in dem jeweiligen Land auseinandersetzen müssen, können Sie sicher sein, dass unser Geist, die Temperatur, seinen Einfluss in jedem dieser Gebiete besitzt und damit weltweit beachtet werden muss.

In den nachfolgenden Beispielen möchte ich auf den Einfluss der Temperatur sowohl auf die eingesetzten Rohstoffe als auch auf den angewandten Herstellungsprozess und damit letztlich auf die Qualität der hergestellten Kerze eingehen. Kosten und Sicherheitsaspekte stehen ebenfalls in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Temperatur.

Die häufigste Ursache von Störungen im Produktionsprozess besteht darin, dass der Veränderung und der Kontrolle der thermischen Prozesse nicht genügend Aufmerksamkeit geschenkt wird. Nach meinen Erfahrungen trifft das für über 80% aller Störungen zu.

Die thermischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien sind darüber hinaus entscheidend für eine optimale Prozessführung und eine hohe Produktqualität.

Ich bin mir bewusst, dass ich im Rahmen eines Vortrages zu dieser Thematik keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann, aber ich möchte versuchen, mit Beispielen den Einfluss der Temperatur deutlich zu machen. Insbe-

sondere möchte ich die Konsequenzen thermischer Eigenschaften auf Prozesse, Oberflächenqualitäten und das Abbrandverhalten von Kerzen darstellen.

## 2 Temperaturabhängige Parameter

Was verstehen wir eigentlich unter Temperatur?

Die Temperatur ist eine Zustandsgröße, die den Wärmezustand eines Körpers charakterisiert oder einfach ausgedrückt, die Temperatur sagt uns, wie heiß oder kalt etwas ist. Wenn wir uns von sehr hohen zu sehr tiefen Temperaturen bewegen, dann än-

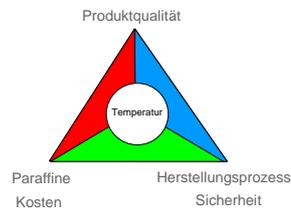


Bild 1: Einfluss der Temperatur

dern sich wichtige Kenngrößen. Eigenschaften sind abhängig von der Temperatur, in der sich der Körper befindet. Lassen Sie mich an dieser Stelle eine Kernaussage meiner Präsentation treffen:

*„In Abhängigkeit von der Temperatur ändern sich die Eigenschaften der Materialien bzw. der daraus hergestellten Produkte. Bei Vergleichen muss daher immer die jeweilige*

*Temperatur beachtet werden, um falsche Aussagen zu vermeiden.“*

Lassen Sie mich zunächst über die wichtigsten, temperaturabhängigen Größen sprechen und diese etwas näher betrachten.

### 2.1 Viskosität

Beginnen wir mit der Viskosität oder einfacher gesagt, der Zähigkeit eines Produktes. Sie ist ein entscheidender Parameter der Kerzenherstellung.

Die graphische Darstellung zeigt uns die Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Paraffin, Mikrowachs und Tauchwachs [3]. Die richtige Einstellung der Temperatur ist entscheidend für die Dicke der aufgetragenen Schichten, sei es im Prozess des Ziehens oder beim Übertauchen der Kerzen und beeinflusst damit unmittelbar die Kosten des Prozesses.

Neben den Auswirkungen auf die Kosten des Herstellungsprozesses ist die richtige Temperatur einer Tauchmasse eine der wichtigsten Voraussetzungen zur Erzielung der gewünschten Oberflächenqualität, einschließlich des gewünschten Farbtones. Aber auch für das Abbrandverhalten, insbesondere für die Dochtauswahl, ist es ent-

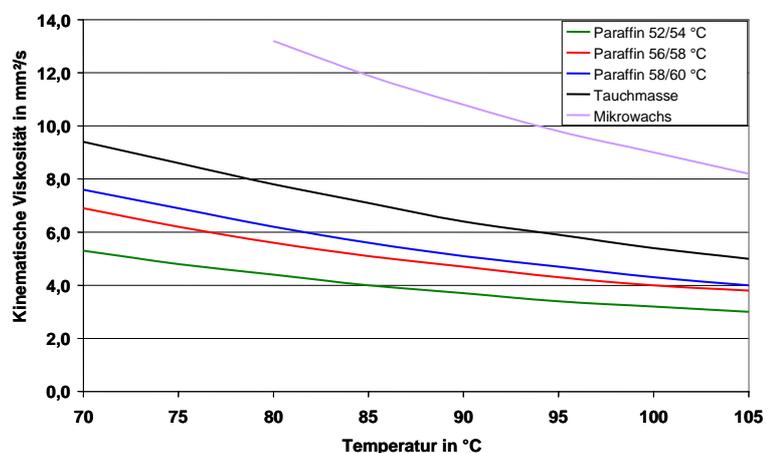


Bild 2: Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur

# Temperatur - ein heißes Thema

scheidend, welche Viskosität diese Masse letztlich in der Brennschüssel besitzt.

Wie wir alle wissen, erfüllt uns ein Geist immer nur eine begrenzte Anzahl von Wünschen. Der Geist der Kerze – die Temperatur – macht dabei keinen Unterschied. Wir sollten deshalb immer wissen, was und warum wir etwas erreichen möchten.

## 2.2. Löslichkeit

Eine weitere wichtige temperaturabhängige Größe ist die Löslichkeit verschiedener Stoffe in dem Hauptrohstoff Paraffin.

- Ablösung der Tauchmasse
- Blasenbildung an Kerzen
- Lufteinschlüsse in Gläserkerzen

Wir sollten im Herstellungsprozess deshalb darauf achten, nicht zusätzliche Luft durch die Verarbeitungstechnologie hineinzubringen bzw. frisch hergestelltem Blend die Zeit geben, zu entgasen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Beeinflussung der Kristallisation durch gezielte Compoundierung der eingesetzten Paraffine.

Der Idealfall wäre das Arbei-

einfrieren lassen.

## 2.3 Dichte/Kontraktion

Wir sehen im Bild 4, dass die Dichte von Paraffin mit zunehmender Temperatur kleiner wird. Das bedeutet, dass bei Gültigkeit der Gleichung

$$\text{Volumen} = \text{Masse}/\text{Dichte}$$

das Volumen von Paraffin beim Erwärmen größer und beim Erstarren kleiner wird. Wir alle kennen die daraus resultierenden Erscheinungen, wie z. B. die Kontraktion beim Kerzengießen oder, wie mache schmerzliche Erfahrung zeigt, das Überlaufen von Tanks beim Erwärmen, wenn man diese vorher zu voll gefüllt hatte. Schockartige und ungleichmäßige Kühlung kann zu Spannungen in der Kerze führen, die diese später krumm werden lassen. Einmal mehr zeigt die Temperatur (unser Geist) ihren Einfluss.

## 2.4 Wärmeleitfähigkeit

Betrachten wir die Wärmeleitfähigkeit, so sehen wir, dass sich die Wärmeleitfähigkeit von Paraffin in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung im Vergleich mit uns bekannten Dingen wie Wasser oder Stahl wie ein Isolationsmaterial verhält.

Sie alle kennen die unterschiedlichen Schmelzprozesse für Pastillen, Pulver oder

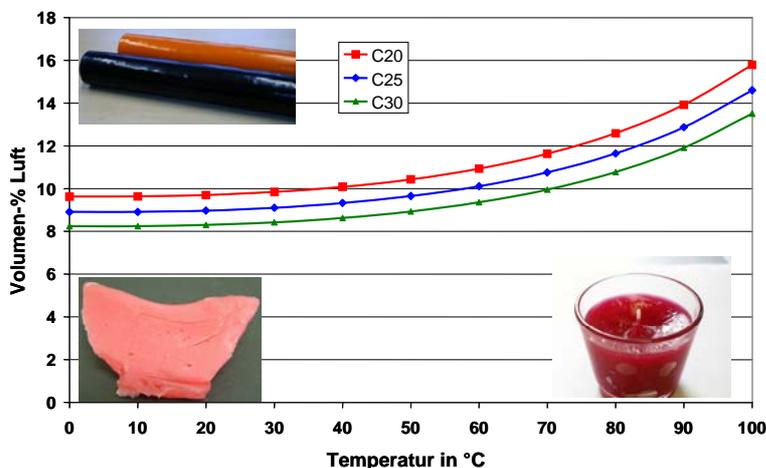


Bild 3: Luftlöslichkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Lassen Sie uns die Löslichkeit eines Stoffes in Paraffin betrachten, den wir alle dringend benötigen, um zu existieren, aber den wir eigentlich in unserer Kerze nicht benötigen. Ich spreche von der Luft.

Wir haben extra eine spezielle Methode entwickelt, um die Luftlöslichkeit in Wachs zu bestimmen [4]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Luftlöslichkeit in Abhängigkeit von der Kettenlänge des eingesetzten Paraffins bei etwa 10 Vol.% liegt. Während des Kristallisationsprozesses wird diese Luft in der Kerze zusammengedrückt und wandert durch die Einwirkung von Wärme nach außen. Das Ergebnis sind dann Beispiele wie:

ten unter Vakuumbedingungen, aber die daraus resultierenden finanziellen Konsequenzen würden ohne Zweifel das Lächeln auf den Lippen unseres Hauptbuchhalters

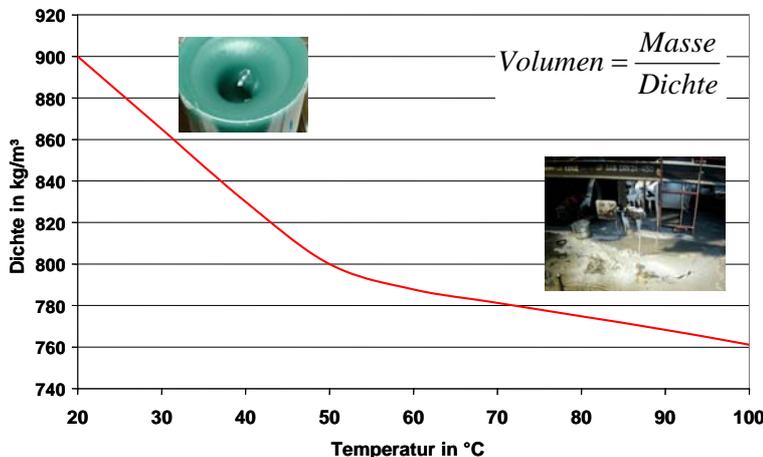


Bild 4: Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur

# Temperatur - ein heißes Thema

Paraffinplatten. Wir versuchen oft, den Prozess zu beschleunigen, indem wir in kurzer Zeit möglichst viel Wärme zuführen. Dieses kann zu einer örtlich begrenzten Überhitzung des Paraffins führen. Es beginnt zu oxidieren, wird gelblich und entwickelt einen charakteristischen Geruch (den wir oftmals alle aus unseren Produktionsstätten kennen). Auch der Abkühlungsprozess von gegossenen Kerzen ist in manchen Fällen frustrierend langsam, wie diese Infrarotaufnahme in Bild 6 einer Kerze mit einem Durchmesser von 70 mm deutlich macht. Der Wärmequerschnitt einer solchen Kerze zeigt uns, dass, obwohl die äußere Schicht mit fast 29 °C schon auf Raumtemperatur abgekühlt ist, der Kern im Inneren mit 57,2 °C noch flüssig ist. Wir alle wissen, dass Zeit Geld bedeutet, und gerade die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst entscheidend die Kosten des Herstellungsprozesses, entscheidet sie doch darüber, wie viel Guss man an einem Tag pro Form durchführen kann.

Die gezielte Beeinflussung von Kühl- und Aufschmelzprozessen bedarf deshalb der genauen Kenntnis dieses Kennwertes [5]. Die Wärmeleitfähigkeit von Paraffin kann durch gezielte Compoundie-

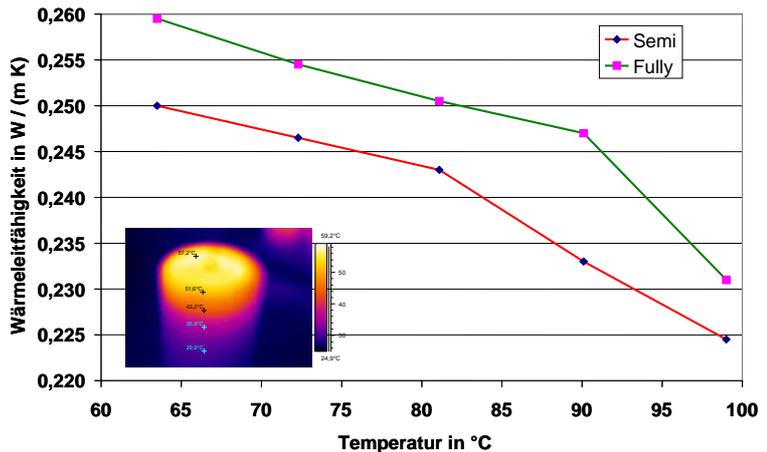


Bild 6: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

rung verändert werden. Lassen Sie mich das an einem speziellen Beispiel erklären: Sie sehen in Bild 7, dass geringe Mengen von Polymer im Paraffin die Wärmeleitfähigkeit stark beeinflussen. Obwohl diese geringe Zugabe keine Veränderungen bei Erstarrungspunkt, Viskosität, Penetration oder anderen physikalischen Parametern bewirkt, tritt eine deutliche Verbesserung im Zugverhalten ein. Die Ursache dafür ist die veränderte Wärmeleitfähigkeit derartiger Produkte.

## 2.5 Härte

Die Penetrationszahl oder Härte ist ein sehr wichtiger Parameter für die Auswahl der einzusetzenden Paraffine. Gerade die Härte unterliegt jedoch einer sehr großen Temperaturabhängigkeit. Pa-

raffine, die eine relativ ähnliche Härte bei 25 oder 30 °C besitzen, unterscheiden sich bezüglich der Härte bei 40 °C sehr deutlich, wie man an diesen Penetrations-Temperaturkurven erkennt.

Wir haben am Anfang des Vortrages über unterschiedliche Klimazonen gesprochen, in denen die weltweite Kerzenproduktion stattfindet. Aber auch in Europa arbeiten wir unter stark unterschiedlichen Temperaturverhältnissen. Wenn eine hochwertige Kerze in die falschen klimatischen Bedingungen gerät, dann beugt sie sich im wahrsten Sinne des Wortes dem Einfluss der Temperatur in diesem Gebiet. Wie wir in Bild 8 sehen, hat unser Geist – die Temperatur – dieser Kerze nicht wirklich geholfen, standhaft zu bleiben.

Aber auch beim Abbrand zeigt sich der Einfluss der Härte des Paraffins. Dicht aneinander stehende Kerzen können durch ihre Wärmestrahlung Paraffin erwärmen und so zu einem Verbiegen der nebenstehenden Kerze führen. Während es beim Turm von Pisa bewundert wird, ist dies für eine Kerze normalerweise nicht wünschenswert. Betrachten wir diese zwei Kerzen in Bild 8 mit den Augen der Infrarotkamera, so sehen wir, dass die Temperatur an der Stelle, an der sich die eine

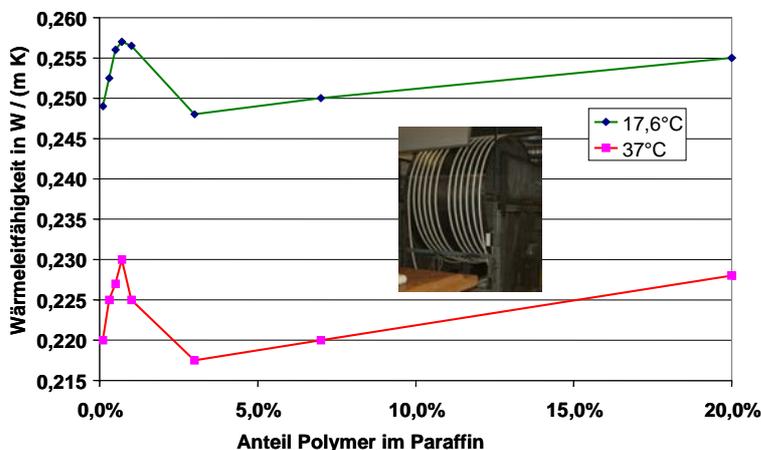
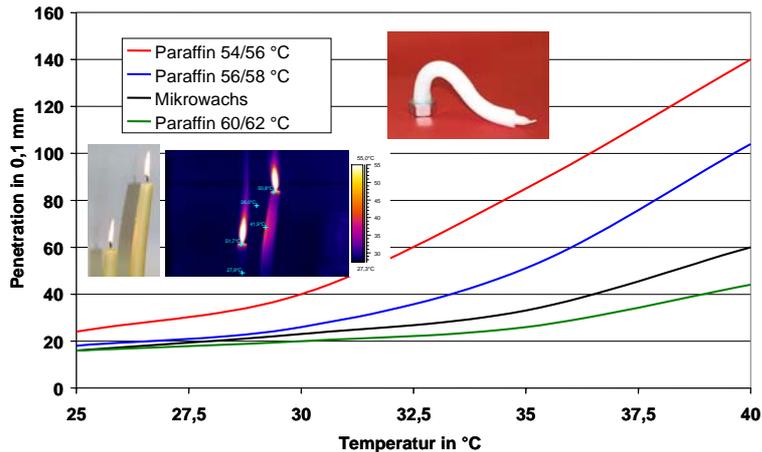


Bild 7: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Polymeranteil und der Temperatur

# Temperatur - ein heißes Thema



**Bild 8: Penetration in Abhängigkeit von der Temperatur**

Kerze verbiegt, rund 42 °C beträgt und damit ein Erweichen in Abhängigkeit von der Härte des eingesetzten Paraffins bei dieser Temperatur beginnt.

Natürlich lässt sich speziell über die Härte noch eine ganze Menge mehr sagen, gerade auch im Hinblick auf mögliche Beeinflussung durch Compoundierung. So besteht z. B. ein unmittelbarer Zusammenhang zum Kristallisationsprozess, auf den ich später noch ausführlich zu sprechen komme.

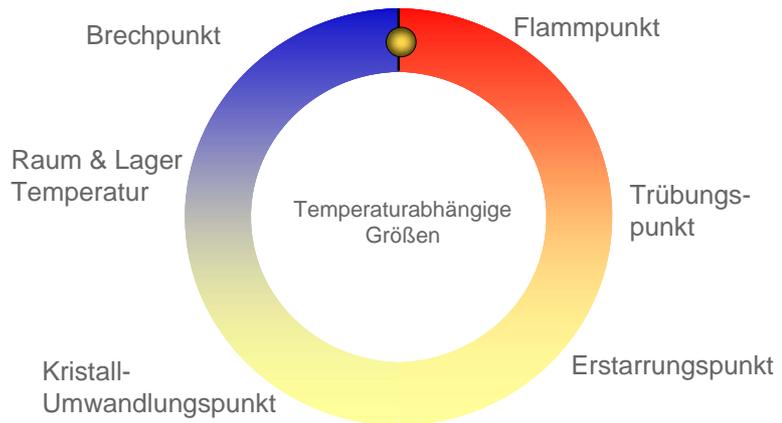
Unterschiedliches Verhalten von Paraffinen im Produktionsprozess ist oftmals nicht auf veränderte Paraffinqualitäten, sondern auf unterschiedliche Temperaturverhältnisse zurückzuführen.

All' die Beispiele, über die ich gesprochen habe, haben gezeigt, dass sich die Eigenschaften der eingesetzten Rohstoffe und der daraus hergestellten Kerzen mit der Temperatur ändern. Das Wissen um diese Änderungen ist eine Voraussetzung für eine gezielte Arbeit mit diesen Produkten.

## 3 Wichtige Temperaturbereiche

Aufgrund der fortgeschrittenen Zeit möchte ich nun den Bereich der temperaturabhän-

gigen Größen verlassen und mich wichtigen Punkten auf der Temperaturskala zuwenden (Bild 9). Lassen wir unsere Roulettekugel von heiß nach kalt rollen. Nichts geht mehr, meine Damen und Herren. Der erste Halt für die Kugel ist der Flammpunkt.



**Bild 9: Wichtige Temperaturbereiche bei Paraffin**

### 3.1 Flammpunkt

In Bild 10 sehen wir die Apparatur zur Bestimmung des Flammpunktes [6]. Der Flammpunkt ist erreicht, wenn sich die entstehenden Dämpfe bei Zuführung einer Flamme entzünden. Der Flammpunkt von Benzin, wie wir es in unseren Autos verwenden, liegt bei etwa -20 °C, während der Flammpunkt für Paraffin in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung zumeist oberhalb von 200 °C liegt. Das erscheint zunächst sehr hoch, doch müssen wir davon aus-

gehen, dass durch Zusatzstoffe – und hier seien speziell die Duftstoffe genannt – dieser



**Bild 10: Flammpunktmessgerät**

Flammpunkt wesentlich erniedrigt werden kann. Der Flammpunkt von Duftstoffen liegt in der Regel zwischen 50 und 100 °C. Da wir beim Kerzenabbrand Flam-

mentemperaturen von mehr als 1000 °C erreichen, ist die entsprechende Zündquelle immer vorhanden. Wenn die Masse dann aufgrund ihrer



**Bild 11: Großflächiges Brennen**

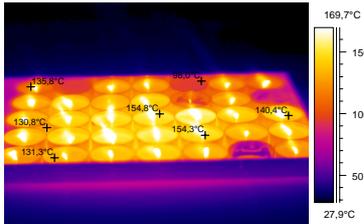
Zusammensetzung den Flammpunkt erreicht, dann kann es, wie in Bild 11 dargestellt, zum vollständigen Bren-

# Temperatur - ein heißes Thema

nen der Oberfläche führen. In beiden Fällen war die Ursache die Einarbeitung von Stoffen ins Paraffin, die den Flammpunkt deutlich herabsetzten.

Solche gravierenden Fehler können bei einer ausreichenden Testung während der Produktentwicklung vermieden werden.

Bei der Rezepturentwicklung



**Bild 12: Eng zusammenstehende Teelichte**

sollte deshalb auch der Flammpunkt aller eingesetzten Materialien Beachtung finden.

Der Flammpunkt steht somit im unmittelbaren Zusammenhang mit der Sicherheit beim Abbrand von Kerzen. Die untere Aufnahme in Bild 12 zeigt sehr eng zusammenstehende Teelichte, die sich während ihres Abbrandes in einer Weise aufheizen, dass die entstehenden Dämpfe sich entzünden. Das führt letztlich dazu, dass alle Teelichte sich auf der Oberfläche entzünden und das gesamte Kerzenensemble zu brennen beginnt.

Die Oberfläche beginnt aber nicht schlagartig zu brennen, so dass die Beachtung des alten Grundsatzes, Kerzen niemals unbeaufsichtigt brennen zu lassen, auch hier Schlimmeres verhindern kann. Die Aufnahme der Infrarotkamera in Bild 12 zeigt, dass die Temperatur nach Anzünden aller Kerzen an speziellen Stellen bereits 155 °C und mehr erreicht hat. Ein

solch dichtes Zusammenstellen von Kerzen ist sehr dekorativ und wird sehr oft z. B. bei Geburtstagsfeiern angewandt. Ein ausreichender Abstand zwischen den brennenden Kerzen ist hier unbedingt erforderlich und dem Verbraucher, der dieses „Abbrandverhalten“ nicht erwartet, muss dieses natürlich mitgeteilt werden. Ansonsten kann es zu unliebsamen Geburtstagsüberraschungen kommen.

## 3.2 Trübungspunkt

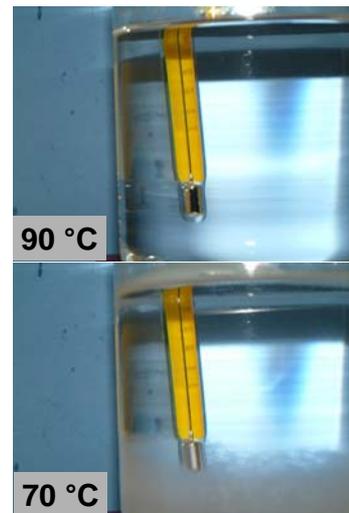
Wenn sich unsere Kugel weiter in Richtung abnehmende Temperatur bewegt, so erreichen wir den Klar- bzw. Trübungspunkt.

Sowohl reine Paraffine als auch Paraffinblends bestehen aus Komponenten mit unterschiedlichen Schmelz- und Erstarrungspunkten. Wenn hochschmelzende Bestandteile fest werden, führt das zu einer Trübung der vorher klaren Schmelze. Am Trübungspunkt liegt deshalb keine homogene Flüssigkeit mehr vor, sondern die Schmelze besteht aus einer flüssigen und einer festen Phase.

Paraffin mit einer Temperatur von 90 °C ist völlig klar und transparent (Bild 13 oben). Während des Abkühlprozesses wird die klare Flüssigkeit trübe, und es ist kaum noch möglich, die Temperatur am sich in der Flüssigkeit befindlichen Thermometer abzulesen. Bei 70 °C (Bild 13 unten) ist die Trübung bereits so weit fortgeschritten, dass wir nicht mehr vollständig erkennen, was sich im Inneren des Glases befindet. Die ausfallenden, festen Bestandteile können zu Verstopfungen an Düsen oder in Leitungen oder Pumpen führen. Bei einem langsamen Abkühlprozess, z. B. beim Gießen, können sich solche Bestandteile am Fuß oder am Kopf der Kerze anreichern und letztlich zu einem

völlig ungleichmäßigen Aufbau des Kerzenkörpers führen. Das zeigt sich bei durchgefärbten Kerzen in z. B. unterschiedlichen Schattierungen auf der Kerze und kann auch das Abbrandverhalten negativ beeinflussen.

Beim Abbrand einer Kerze bildet sich, durch die Wärmestrahlung der Flamme bedingt, eine flüssige Brennschüssel aus. Das kann zu



**Bild 13: Unterschreiten des Trübungspunktes**

einem Ausfall der in der Brennmasse enthaltenen Additive führen, die sich in der Brennschüssel anreichern. Deshalb ist das Wissen um die Temperatur der flüssigen Wachses in der Brennschüssel unbedingt erforderlich. Wir haben verschiedene Kerzen hergestellt, deren Brennmasse aus Paraffinen unterschiedlicher Schmelzpunkte, Stearinsäure, Gelwachs oder Bienenwachs bestand. Mit der Infrarotkamera können wir die Temperatur in jeder Brennschüssel bestimmen (Bild 14). Betrachten wir diese Temperaturen, so erkennen wir, dass die Temperatur in der Brennschüssel im Durchschnitt ungefähr 10 °C oberhalb der Schmelztemperatur der eingesetzten Brennmasse liegt.

Das Abbrandverhalten einer

# Temperatur - ein heißes Thema

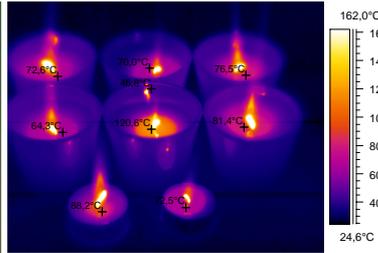


Bild 14: Brenntellertemperaturen unterschiedlicher Kerzenrohstoffe

Kerze begrenzt somit den Einsatz von Zusatzstoffen, da diese in den Docht eindringen und im Ergebnis zu Ablagerung, Butzenbildung oder, im ungünstigsten Fall, zum selbständigen Verlöschen der Kerze führen können.

So gern wir durch Zusatzstoffe dekorative Effekte erzielen wollen, die „Dochtbrennbarkeit“ dieser Stoffe besitzt oberste Priorität.

### 3.3 Erstarrungspunkt

Wenn wir uns weiter in Richtung tiefere Temperaturen bewegen, kommen wir zu einer Temperatur, an der das flüssige Produkt zu erstarren

Grablichtparaffin	35 – 45 °C
Gläserparaffin	40 – 55 °C
Teelichtparaffin	50 – 55 °C
Stumpenparaffin	55 – 65 °C
Gießparaffin/Zugparaffin	
Tauchmassen	
Mikrowachse	65 – 80 °C

Tabelle 1: Erstarrungsbereiche von Kerzenwachs

beginnt, dem Erstarrungspunkt.

Der Anteil der Feststoffe ist nun so groß, dass ein nach außen fester Körper vorliegt, in dem jedoch noch sehr viele flüssige Anteile eingeschlossen sind. Wenn der Anteil der flüssigen Phase überwiegt, sprechen wir von einem Sol, überwiegt der Anteil der festen Phase, sprechen wir von einem Gel. Der Erstarrungspunkt ist somit der Übergang vom Sol- in den Gel-Zustand unserer Brennmasse.

Wir wissen, dass der Erstarrungspunkt ein wichtiger Parameter zur Klassifizierung der Paraffine ist. Der Erstarrungspunkt bildet gemeinsam mit der Viskosität, der Härte und der C-Kettenverteilung wichtige Entscheidungskriterien zum Einsatzgebiet der jeweiligen Paraffine und damit zur Beantwortung der Frage: „Welches Paraffin ist für welchen Einsatzzweck geeignet?“

Und damit, meine Damen und Herren, komme ich zu einer weiteren Grundaussage dieser Präsentation. Ich bedaure, es sagen zu müssen, *aber es gibt kein Universalparaffin, das für alle Anwendungsfälle geeignet ist!*

Gerade im Zusammenhang mit der Temperatur möchte ich Ihre Aufmerksamkeit auf einen wichtigen energetischen Effekt beim Schmelzen bzw. Erstarren des Paraffins lenken. Die spezifische Wärmekapazität von Paraffin liegt bei

2,3 kJ/kg und die Schmelzenthalpie bei 180 kJ/kg [8]. Daraus lässt sich errechnen, welche Wärmemenge ich benötige, um Paraffin zu erwärmen bzw. zu schmelzen. Die gesamte Energiemenge, die ich dafür brauche, liegt bei 306 kJ/kg. Von dieser Energie benötige ich 41% zum Erwärmen und 59% zum Schmelzen (Bild 15). Damit wird der Phasenübergang fest/flüssig aus energetischer Sicht zu einem der wichtigsten Punkte und stellt auch einen wichtigen Kostenfaktor bei der Kerzenherstellung dar.

Schmelz- und Erstarrungspunkt spielen auch beim Abbrandverhalten der Kerze eine wichtige Rolle. Niedrigschmelzende Paraffine neigen zum Tropfen und Ablaufen bzw. führen zu einer sehr vollen Brennschüssel.

Die Kerzen, die Sie in Bild 16 sehen, sind aus Paraffinen mit unterschiedlichen Schmelzpunkten hergestellt.

Links sehen Sie eine nicht tropfende Kerze. Der Schmelzpunkt des eingesetzten Paraffins liegt bei 58 °C.

Für die rechte Kerze wurde ein Paraffin mit einem Schmelzpunkt von 52 °C eingesetzt. Das Ergebnis ist eine stark tropfende und ablaufende Kerze.

In beiden Fällen wurde der gleiche Docht verwendet.

### Paraffin:

Spezifische Wärmekapazität  $c_p = 2.3 \text{ kJ/(kg K)}$   
Schmelzenthalpie  $\Delta H = 180 \text{ kJ/kg}$

Energiebedarf beim Erwärmen von 20 °C (Raumtemperatur) auf 75 °C

Wasser = 230.3 kJ/kg  
Paraffin = 306.5 kJ/kg

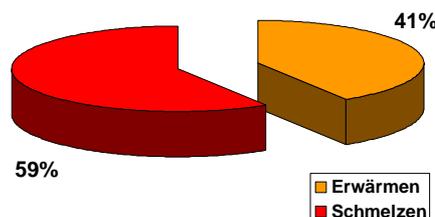


Bild 15: Fühlbare und latente Wärme von Paraffin

# Temperatur - ein heißes Thema

Natürlich können wir unser Wissen über das Schmelzen oder Erstarren von Paraffinen auch für die Erzielung dekorativer Oberflächeneffekte verwenden.



**Bild 16: Schmelzpunkt und Brennverhalten von Kerzen**

Wir sehen in Bild 17 links eine Kerze, die nach dem Tauchen schockartig abgekühlt wurde, und es entstehen diese feinen Risse in der Kristallstruktur, die dieser Kerze ein dekoratives Aussehen verleihen.

Im umgekehrten Fall, bei sehr langsamer Abkühlung, entstehen Kristalle, die den auf dem rechten Bild sichtbaren schönen Oberflächeneffekt hervorrufen. Wenn wir uns dies aus der Nähe ansehen, dann erkennen wir deutlich die strukturierte Oberfläche, entstanden durch langsam gewachsene Kristalle während des Abkühlvorganges.



**Bild 17: Struktureffekte mit Paraffin**

Wenn wir in das Innere der Kerze hineinschauen, dann sehen wir die entstandene Kristallstruktur und sind damit dem niemals schlafenden Geist der Kerze schon sehr nahe. Dieses Bild führt uns auch unmittelbar zum nächsten Punkt auf unserer Temperaturskala.

## 3.4 Kristallumwandlungspunkt

Der nächste Temperaturpunkt, den wir bei unserem Roulettspiel erreichen, ist der Kristallumwandlungspunkt, einer der interessantesten und wichtigsten Punkte.

- Prozessführung und Produktqualität
- Migrationseigenschaften
- Oberflächenqualität und Blasenbildung
- und Stabilität während der Lagerung

stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit diesem Kristallumwandlungspunkt.

Die Kurven in Bild 18 zeigen uns den Schmelzprozess verschiedener Paraffine. Im Bereich zwischen 30 und 35 °C kommt es zu einem energetischen Effekt, der seine Ursache in einer Kristallumwandlung im festen Zustand besitzt. Das führt dazu, dass im Abkühlungsprozess zusätzliche Wärmemengen frei werden und es zu einer nochmaligen Kontraktion kommt. Die Kristallform wechselt dabei von der hexagonalen zur orthorhombischen Struktur. Das ist typisch für unseren Geist, die Temperatur. Er spielt seine Rolle im Hintergrund, und wir sehen die Auswirkungen. In Bild 19 ist die Apparatur, mit deren Hilfe wir den Schmelz- oder Erstarrungsvorgang messtechnisch erfassen können, dargestellt.



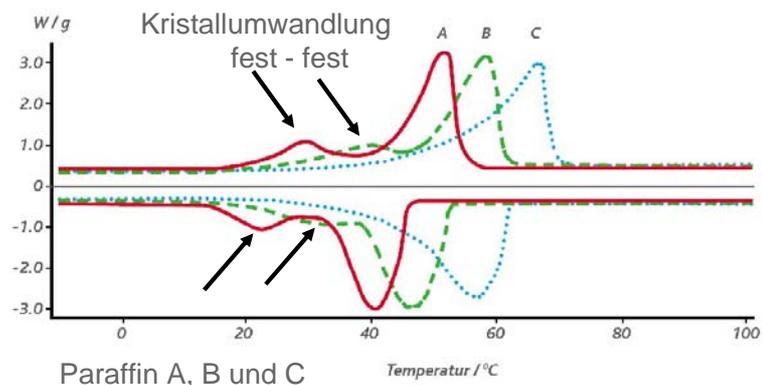
**Bild 19: Gerät für Schmelz- und Erstarrungsuntersuchung (DSC)**

Lassen Sie uns nun ins Innere einer Kerze schauen und versuchen, dem Geist der Kerze und seiner Magie näher zu kommen.

Neue elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen, was sich im Inneren der Kerze während des Abkühlprozesses abspielt [9].

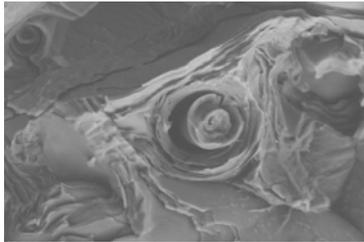
Im Bild 20 sehen wir die Kristalle bei ca. 45 °C. Diese Kristalle rollen sich, wobei deutlich erkennbar zwischen den einzelnen Schichten noch jede Menge Platz vorhanden ist. Die entstehenden Gebilde werden oft als Nadelkristalle bezeichnet [10].

In Verbindung mit einer weiteren Abkühlung sehen wir im Bild 21, dass der Raum zwischen den einzelnen Schichten deutlich abnimmt; die Nadeln rollen sich immer fester



**Bild 18: DSC-Diagramm verschiedener Paraffine**

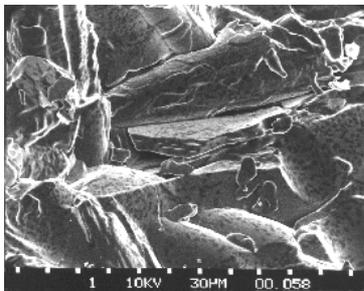
# Temperatur - ein heißes Thema



**Bild 20: Hexagonale Kristallstruktur von Paraffin**

zusammen. Am hexagonal-orthorhombischen Umwandlungspunkt beginnen die „Nadeln“, sich abzurollen und formen die so genannten Plattenkristalle.

Die Kristalle haben nun eine feste Position und, wie man im Bild 21 erkennen kann, befinden sich zwischen ihnen Öltropfen.



**Bild 21: Orthorhombische Kristallstruktur von Paraffin**

Diese Bilder zeigen die neuesten Ergebnisse der Untersuchungen auf diesem Gebiet und wurden in dieser Form erstmals öffentlich präsentiert. In der Literatur zur Kristallisation von Paraffinen wird sehr oft im Zusammenhang mit dem Umwandlungspunkt über Nadel- und Plattenkristalle berichtet [11, 12]. Diese Bilder beweisen, dass die Nadeln in Wirklichkeit aufgerollte Plattenkristalle sind.

Sie werden sich vielleicht spätestens jetzt fragen: „Was haben diese hochtheoretischen Betrachtungen zum Kristallumwandlungspunkt denn nun mit meinen Kerzen zu tun?“ Die Kenntnis über den Verlauf des Kristallisationsprozesses ist sehr wichtig, da gerade an diesem Umwandlungspunkt sich unsere Kerzen in einer

extrem instabilen Lage befinden.

Sie alle kennen die daraus resultierenden sichtbaren Konsequenzen, wie z. B. Kristallisationsflecken, sehr gut. Das Ausschwitzen von Duft-



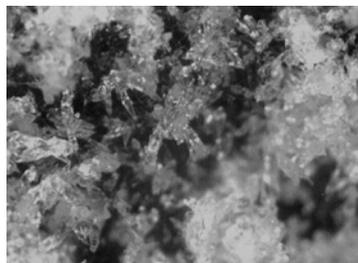
**Bild 22: Öltropfen auf einer Kerzenoberfläche**

stoffen, die Migration von Farbstoffpigmenten oder anderen Produkten zur Kerzenoberfläche oder in das Verpackungsmaterial finden genau an diesem Punkt statt (Bild 22). Die Verfärbung von Kerzen während der Lagerung



**Bild 23: Luftblasen in Paraffinprobe**

bzw. die Beschädigung des Verpackungsmaterials sind oftmals das sichtbare Ergebnis.



**Bild 24: Kristalle in einer Luftblase**

Wenn wir uns die „Flecken“ im Bild 24 etwas genauer ansehen, so erkennen wir, dass diese durch nach außen drin-

gende Luft gebildet werden und, wenn wir durch das Mikroskop schauen, so sehen wir, dass in diese „Luftlöcher“ Kristalle gewachsen sind.

## 3.5 Raum- und Lagertemperatur

Die Frage der optimalen Lagertemperatur für Kerzen ist nicht einfach zu beantworten. Wir produzieren in unterschiedlichen klimatischen Zonen und setzen dafür unterschiedliche Produkte ein, so dass die Anforderungen sehr stark schwankend sind. Allgemein kann man jedoch sagen, dass die richtige Lagertemperatur in jedem Fall niedriger als der Fest-Fest-Umwandlungspunkt und höher als der Brechpunkt liegen sollte.

Eine in diesem Zusammenhang oft gestellte Frage ist die Frage einer optimalen Transporttemperatur für hergestellte Kerzen. Messungen in Containern unter hohen Wärmeeinwirkungen beim Transport zeigen, dass im Inneren hohe Temperaturen erreicht werden, die nahe am oder oberhalb des Kristallumwandlungspunktes liegen können; dies führt oft zum Verblocken der Ware.

Leider kennen wir das in Bild 25 dargestellte Ergebnis aus der Praxis nur all zu gut. Extrem hohe Temperaturen können zu einer Verformung des gesamten Kerzenkörpers führen. Solche hohen Temperaturen entstehen auch im Inneren einer Verpackung, wenn die Kerzen zu warm eingepackt werden. Wird dann, bedingt durch die Kristallumwandlungstemperatur weitere Wärme freigegeben, so



**Bild 25: Temperaturverformte Kerzen**

# Temperatur - ein heißes Thema

kommt es oftmals zum Zusammenkleben der Kerzen in einer Packung. Dem kann man natürlich durch eine ganze Reihe von Maßnahmen entgegenwirken. Dabei ist eines jedoch wichtig – den genauen Umwandlungspunkt zu kennen.

Auch bei der Verarbeitung können bei zu hohen Raumtemperaturen Probleme auftreten, die ich hier kurz erläutern möchte.

Speziell bei der Herstellung pulvergepresster oder extrudierter Kerzen kommt es auf eine gute Fließfähigkeit des Pulvers an. Zu hohe Raumtemperaturen oder eine nicht ausreichende Kühlleistung der Trommel führen zu einer erhöhten Temperatur des hergestellten Pulvers. Das Ergebnis ist eine Verklumpung des Pulvers (Bild 26), die zu Störungen im Produktionsprozess führt und damit auch direkt die Kosten des Prozes-



**Bild 26: Verblocktes Paraffinpulver**

ses beeinflusst. Denn wir alle wissen: Zeit ist Geld!

Die Auswahl geeigneter Paraffine sowie die Möglichkeit gezielter Compoundierung sind auch hier Maßnahmen, diesen Erscheinungen entgegenzuwirken.

Werden Rohlinge vor der Weiterverarbeitung zu kalt gelagert, so kann es beim späteren Übertauchen zu Ablösungen der Tauchmasse kommen, wie Sie in Bild 27 sehen können. Aufgrund der bereits genannten schlechten Wärmeleitfähigkeit der Paraffine

bedarf es deshalb einer ausreichend langen vorherigen Temperierung solcher Kerzen. Temperaturmessungen haben gezeigt, dass dafür mehrere Stunden, in extremen Fällen sogar mehrere Tage, erforderlich sind.

Vergessen Sie auch bei diesen Fällen deshalb niemals den Geist der Kerze – die Temperatur.



**Bild 27: Luft unter dem Tauchmassenmantel**

Auch beim Abbrandverhalten von Kerzen spielt die Umgebungstemperatur eine wichtige Rolle. Obwohl der Kerzenhersteller darauf keinen unmittelbaren Einfluss hat, muss er Dochtabstimmung und Ausprägung der Kerzen unter definierten Bedingungen durchführen und so sicherstellen, dass unter den zu erwartenden Abbrandbedingungen ein ordnungsgemäßer Abbrand der Kerze erfolgt.

## 3.6 Brechpunkt

Der nächste Punkt auf unserer Skala ist der Brechpunkt.



**Bild 28: Hohlgebrannte Kerze**

terverarbeitung, z. B. beim Abfräsen, zu Ausplatzungen, wie Bild 29 deutlich zeigt.

Extrem kaltes Pulver lässt sich nur äußerst schwierig verpressen und führt bei der Wei-

Auch hier gilt, dass aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit sehr kalt gelagertes Pulver einer sehr langen Lagerung bei Raumtemperatur bedarf, um sich zu erwärmen. Messungen haben gezeigt, dass bei Big-Bags dies bis zu mehreren Tagen dauern kann.

Beim Transport von Kerzen bei tiefen Temperaturen (< -20 °C) kann es bei Belastungen und Erschütterungen im Extremfall zum Zerbrecen der Kerzen kommen.

Damit haben wir unsere Reise durch die verschiedenen Punkte auf der Temperaturskala beendet, und ich bin mir bewusst, dass meine Beispiele die gesamte Vielfalt der Thematik nur sehr unvollständig wiedergegeben haben.



**Bild 29: Spröbruch durch Fräsen bei zu niedriger Temperatur**

Sie sind sicherlich mit mir einer Meinung, dass die Temperatur eine im wahrsten Sinne des Wortes „heiße Sache“ für die Kerzenherstellung ist.

Wir haben inzwischen so viele schlechte Beispiele von Kerzen gesehen, dass ich Ihnen an dieser Stelle wieder Mut

m a c h e n möchte und uns alle daran erinnere, dass wir schon in der Lage sind, nahezu perfekte Kerzen herzustellen.



**Bild 30: Qualitätskerze**

# Temperatur - ein heißes Thema

## 4 Temperatur in der Kerzenflamme

Lassen Sie mich die verbleibende Zeit nutzen, um vom niedrigsten Temperaturpunkt in den höchsten Temperaturbereich im Zusammenhang mit einer Kerze zu gelangen – in die Temperaturen der Kerzenflamme.



Bild 31: Michael Faraday

Nicht erst seit Michael Faraday haben die komplexen Vorgänge in der Flamme die Wissenschaftler begeistert. Viele von ihnen spürten das „brennende Verlangen“, den Geist der Flamme zu erforschen und die Vorgänge zu analysieren. Wie Sie wissen, zählen wir Chemiker nicht gerade zu den größten Romantikern dieser Welt, dennoch hat gerade die Flamme und die von ihr ausgehende Faszination viele Wissenschaftler begeistert. Ob aus chemischer, physikalischer, thermodynamischer oder strömungstechnischer Sicht, die Kerzenflamme bietet viele interessante Fragestellungen für die Wissenschaft.



Bild 32: Kerzenflamme mit und ohne Gravitationseinfluss

Beispiele aus jüngster Vergangenheit sind die Untersuchung der Flamme unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit (Bild 32) oder die Anwendung der Farbthermogra-

Temperaturen – in der Flamme / °C			
Flammenteil	Stearin	Paraffin	Bienenwachs
dunkel	900	940	920
leuchtend	1050	1120	1090

Tabelle 2: Flammentemperatur unterschiedlicher Kerzenrohstoffe

phie zum strömungstechnischen Verhalten der Kerzen [13, 14].



Bild 33: Versuchsaufbau Temperaturmessung

Im Zusammenhang mit der Ermittlung zum Temperaturprofil von Kerzen hat unser Team Messungen der Temperaturen in und außerhalb der Flamme an Paraffin-, Stearin- und Bienenwachskerzen durchgeführt [15]. Den Versuchsaufbau sehen Sie im Bild 33. Aber das ist ein Thema für einen gesonderten Vortrag!

Die erste Tabelle zeigt uns die Temperaturen in der Flamme. Ohne auf Einzelheiten eingehen zu wollen, haben wir in jedem Fall deutlich tiefere Temperaturen gemessen, als sie bisher in der Literatur genannt wurden. Der Ursache versuchen wir zurzeit auf die Spur zu kommen.

Messungen im Umfeld der Flamme haben ergeben, dass aufgrund des Nachströmens kühler Luft im seitlichen Abstand bereits ab 1 cm Entfernung Raumtemperaturen gemessen werden. Oberhalb der Flamme sieht das natürlich ganz anders aus, und wir sehen in dieser Tabelle, welche Temperaturen in Abhängigkeit im Abstand zur Flammenspitze gemessen wurden.

Diese Werte zeigen deutlich, wie wichtig ein Mindestabstand zu brennbaren Gegenständen ist.

Wir alle wissen, dass das Entstehen möglicher Schadstoffe letztlich von den Temperaturen in der Flamme abhängig ist. In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, dass im Rahmen der europäischen Qualitätsdiskussion an renommierten Umweltinstituten Untersuchungen zu den entstehenden Schadstoffen in Abhängigkeit von den eingesetzten Kerzenmaterialien durchgeführt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass bei ordnungsgemäßem Abbrand derartige Stoffe in einem so geringen Umfang entstehen, dass keinerlei Gefährdung für Mensch und Umwelt auftritt [16].

Temperaturen – oberhalb der Flamme / °C			
Abstand	Stearin	Paraffin	Bienenwachs
1 cm	400 - 600	300 - 500	400 - 550
5 cm	250 - 400	100 - 200	250 - 350
10 cm	100 - 200	50 - 100	150 - 200
20 cm	50 - 70	40 - 50	50 - 100

Tabelle 3: Temperaturen oberhalb der Flamme bei unterschiedlichen Kerzenrohstoffen

# Temperatur - ein heißes Thema

## 5 Zusammenfassung

Meine Damen und Herren, lassen Sie mich zusammenfassen:

Die Temperatur spielt eine entscheidende Rolle in allen im Zusammenhang mit der Kerzenherstellung und Kerzenqualität auftretenden Fragestellungen. Je intensiver wir uns mit der Temperatur beschäftigen, um so mehr sehen wir, welche Konsequenzen und Effekte die Temperatur auf Kerzenherstellung und Kerzenqualität besitzt und wir beginnen, ihr Wirken als „Geist der Kerze“ zu verstehen. Je mehr wir darüber wissen und je mehr wir darüber lernen, um so besser werden wir diesen Geist, den wir riechen, auch beherrschen.

Das Wissen über die temperaturabhängigen Parameter und die Beachtung der technischen Zusammenhänge sind die Voraussetzungen für all die hier aufgeführten Punkte. Meine Damen und Herren, ich möchte damit meinen Vortrag beenden und glaube, dass speziell die Thematik der Temperatur noch genügend Stoff für weitere detaillierte Diskussionen bieten wird.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Mitgliedern unseres Kerzenteams recht herzlich für die Unterstützung in der Vorbereitung dieser Präsentation bedanken.

Vielen Dank für Ihre Zeit und Ihre Aufmerksamkeit.

## 6 Literaturnachweis

[1] M. Matthäi, N. Petereit, „Qualität und Zukunft der Kerze – ein brennendes Thema“, SÖFW-Journal, Sonderdruck aus 3-2001

[2] M. Matthäi, „Composition and Properties of Paraffin Waxes and their Application in the Candle Industry“, Vortrag National Candle Association's Fall Meeting, San Diego (USA), 4. Oktober 2000.

[3] K. Roth, „Die Chemie der Weihnachtskerze“, Chem. Unserer Zeit, 2003, 37, 424-429

[4] S. v. Delden, „Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Bestimmung der Luftlöslichkeit in handelsüblichen Paraffinwachsen“, Institut für Erdöl- und Erdgasforschung, Dipl.-Arbeit, Dezember 1966

[5] M. Matthäi, V. Schröder, „Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von Paraffinen und Paraffinblends“, SÖFW 3/92, S. 190-198

[6] DIN EN ISO 2592, Bestimmung des Flammpunktes

[7] M. Matthäi, H. Laux, G. Hildebrand, „An Investigation of the Dependence of Penetration on the Temperature and Composition of Paraffin Waxes“, Eur. J. Lipid Sci. Technol. 103 (2001), S. 292-298

[8] D. Opitz, V. Schröder, „Wärmephysikalische Untersuchungen an Spezialparaffinen für den Einsatz in Latentwärmespeichern“, FE-Bericht Sasol Wax, 6/1992

[9] M. Matthäi, „Beitrag zur Modellierung von Struktureigenschaften-Beziehungen in Paraffinen“, Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2000

[10] N. P. Bogdanov, A. N. Pereverzev, „Entparaffinierung von Erdölprodukten“, Moskau, Gostoptechisdat, 1961

[11] J. Teubel, W. Schneider, R. Schmiedel, „Erdölparaffine“, Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1965

[12] W. Schneider, A. Heymer, „Über die Kristallisation von festen Paraffinen aus Lösemitteln“, Chem. Technik, 15 (1963), 3, S. 150-156

[13] Bildquelle NASA

[14] G. Hönes, Voruntersuchung zur Anwendung moderner optischer Messmethoden im Hinblick auf das windabhängige Rußverhalten von Kerzenflammen, Institut der Techn. Chemie der Universität Stuttgart, Abschlussbericht für den Verband Deutscher Kerzenhersteller, 1986

[15] V. Schröder, „Bericht über Temperaturmessungen an Kerzenflammen“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachgruppe II.1, Berlin, Oktober 2003

[16] K. H. Schwind, J. Hosseinpour, H. Fiedler, C. Lau, O. Hutzinger, „Bestimmung und Bewertung der Emissionen von PCDD/PCDF, PAK und kurzkettigen Aldehyden in den Brandgasen von Kerzen“, Z. Umweltchem. Ökotox 6 (5) 243-246 (1994)