

# Die Chemie der Weihnachtskerze

Carolin Meißner, WS 09/10

## Gliederung

1	Die Kerzen-Roh-Produktion.....	1
2	Die brennende Kerze.....	2
2.1	Der Wärme-Fluss der brennenden Kerze .....	2
2.2	Die 4 Zonen der Flamme .....	3
2.3	Das Schicksal eines Wachs-Moleküls .....	4
2.3.1	Thermische Spaltung der Wachs-Moleküle: .....	5
2.3.2	Exotherme Oxidations-Reaktionen .....	6
2.3.3	Flamme im schwerelosen Raum:.....	6
2.4	Schadstoff-Ausstoß einer Kerze .....	6

**Einstieg:** Weihnachten – überall duftet es nach Lebkuchen und heißem Glühwein und täglich werden wir verzaubert von der Magie der Kerzen. Dabei sind Material und Vorgang „trivial“.



Abb. 1: brennende Kerze [4]

## 1 Die Kerzen-Roh-Produktion

Die „Seele der Kerze“ ist der **Docht**. Dieser muss dafür sorgen, dass sich ein Gleichgewicht zwischen der geschmolzenen und verbrannten Wachs-Menge einstellt. Denn ist zu viel geschmolzenes Wachs vorhanden, so erlischt die Flamme, bei zu wenig geschmolzener Wachs-Menge fängt die Kerze an zu rußen. An Fürsten-Höfen mussten die Dochte regelmäßig vom „Wachsschneutzer“ gekürzt werden, dass sie nicht zu rußen begannen. 1828 erfand Jules de Cambacérès den geflochtenen Baumwoll-Docht. Hier kann die Anzahl der Baumwoll-Fäden dem Kerzen-Durchmesser angepasst werden, um eine optimale Verbrennung zu erreichen. Außerdem kommt es hier zu einer automatischen Docht-Stützung. Der Baumwoll-Faden krümmt sich ab einer gewissen Länge, tritt dadurch in die heißeste Flammen-Zone ein und verglüht dort.



Abb. 2: automatische Docht-Stützung bei Baumwoll-Fäden [5]

Außerdem wird der Docht heutzutage imprägniert

- Ammoniumsalze verhindern ein zu schnelles Abbrennen
- Borsäure und Phosphate bilden eine Schmelz-Perle, welche das Abfallen von Asche-Teilen ins flüssige Wachs und das Nachglühen der Docht-Spitze nach dem Ausblasen verhindert

Der Kerzen-Körper besteht aus **Wachs**. Dieses wird nicht chemisch definiert, sondern nach seinen physikalischen Eigenschaften:

- durchscheinend bis opak
- bei 20°C knetbar
- > 40°C schmelzend
- wenig viskos
- unter leichtem Druck polierbar

Es gibt drei Kerzenwachse:

- Bienen-Wachs= gesättigte, langkettige Ester + freie Säuren + Kohlenwasserstoffe
- Stearin= gesättigte, langkettige Carbonsäuren
- Paraffin= gesättigte, langkettige Kohlenwasserstoffe

## 2 Die brennende Kerze

### 2.1 Der Wärme-Fluss der brennenden Kerze

Die Kapillar-Kräfte saugen geschmolzenes Wachs in den Docht. An der Docht-Oberfläche verdampft dieses und treibt nach oben, was eine Konvektions-Strömung erzeugt. Diese kühlt zum einen die Oberfläche des Kerzen-Körpers und sorgt so dafür, dass der obere Kerzen-Rand nicht weg schmilzt, zum anderen ist sie für die längliche Flammen-Form verantwortlich.

Brennt eine Kerze im schwerelosen Raum, gibt es zwar ebenfalls Kapillar-Kräfte die das Wachs nach oben saugen, aber es gibt keinen Auftrieb der heißen Flammen-Gase und somit keine Konvektions-Strömung.



Abb. 3: Flamme auf der Erde (mit Konvektionsströmung) [7]

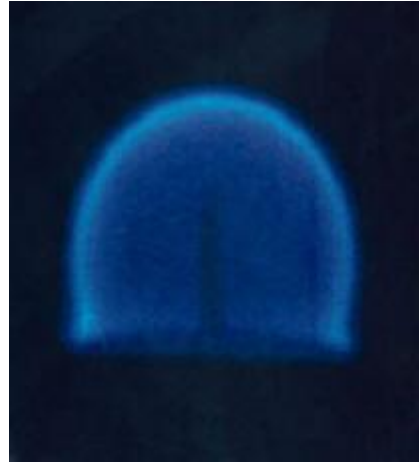


Abb. 4: Flamme im schwerelosen Raum (ohne Konvektionsströmung) [8]

## 2.2 Die 4 Zonen der Flamme

Eine Flamme hat 4 Reaktions-Zonen

- die dunkle Zone 1
- die blau-grün leuchtende Reaktionszone 2
- die wenig leuchtende Reaktionszone 3 (Flammenoberfläche)
- die hell leuchtenden Zone 4

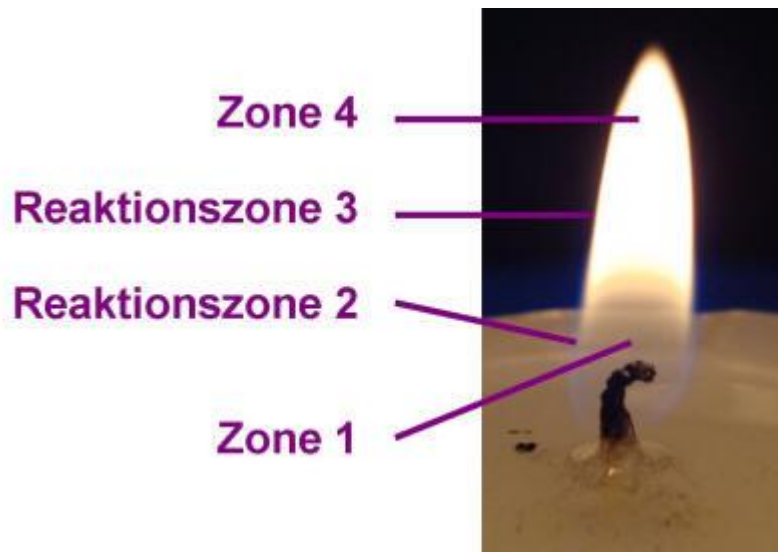
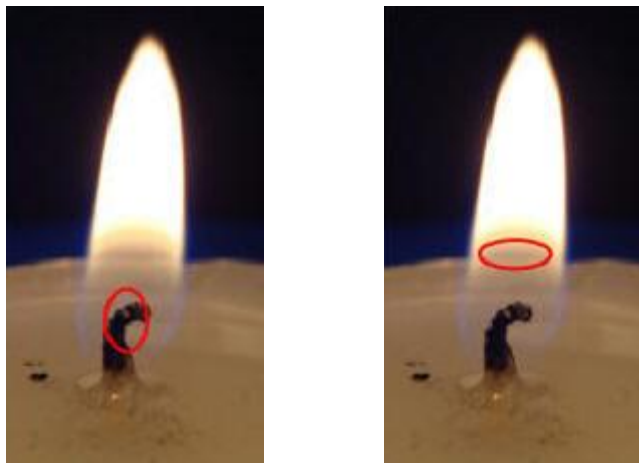


Abb. 5: Die vier Zonen einer Flamme

## 2.3 Das Schicksal eines Wachs-Moleküls

### Zone 1:



**Reaktion:** Direkt oberhalb des Doctes verdampft das Wachs bei ca. 600°C (siehe Versuch).

Etwas weiter oben kommt es zur thermischen Spaltung der Wachsmoleküle (siehe unten).

### Zone 2 und 3:



**Reaktion:** In den Reaktions-Zonen kommt es zu exothermen Oxidations-Reaktionen (siehe unten). (Das blaue Licht der Reaktions-Zonen wird in Zone 3 von der Zone 4 überstrahlt.)

### Zone 4:



**Reaktion:** Glühen der großen Ruß-Teilchen, welche aus bis zu einer Millionen aneinander gelagerter Kohlenwasserstoff-Atome bestehen können, bei  $T = 1.400^{\circ}\text{C}$ .

**Reaktionszone 3 – oben:**



**Reaktion:** Oxidation der Ruß-Partikel zu Kohlenstoffdioxid.

**Versuch.** Ableiten des Wachs-Dampfes

**Zeitbedarf:** 5 Minuten

**Ziel:** Ableiten des Wachs-Dampfes aus der Flammen-Zone 1

**Materialien:**

- Kerze
- S-förmiges Glas-Rohr
- Zündhölzer

**Durchführung 1:** Ein Ende des Glas-Rohres wird unmittelbar oberhalb des Doctes gehalten.

**Beobachtung 1:** Nach kurzer Zeit ist weißer Rauch am Ende des Ableitungs-Rohres zu sehen und an den kälteren Teilen des Glas-Rohres bildet sich ein weißer Niederschlag.

**Deutung 1:** Der weiße Rauch enthält Wachs-Moleküle, welche an den kälteren Teilen des Glas-Rohres kondensieren.

**Durchführung 2:** Nach einiger Zeit wird der weiße Rauch angezündet.

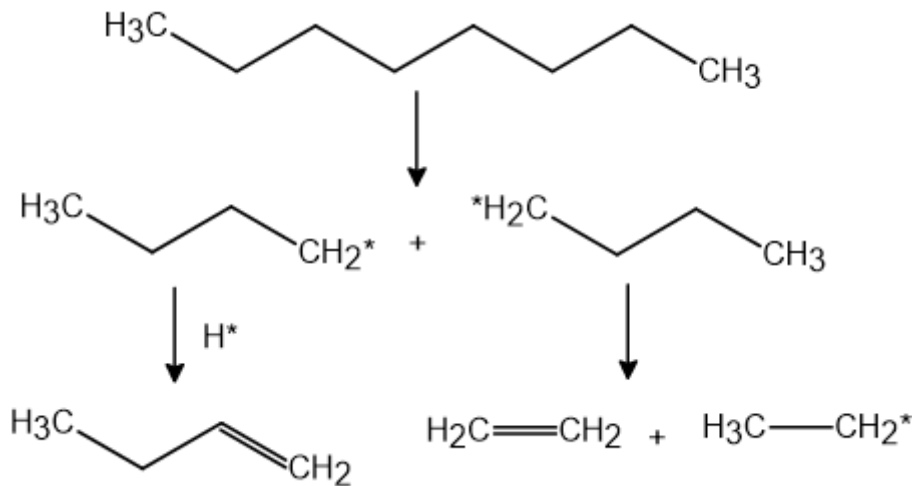
**Beobachtung 2:** Der weiße Rauch brennt.

**Deutung 2:** Bei einer Kerzen-Flamme brennt nicht der Docht, sondern der Wachs-Dampf.

**Quelle:** [1]

### 2.3.1 Thermische Spaltung der Wachs-Moleküle:

Im ersten Schritt wird die C-C-Bindung unter Bildung von zwei Radikalen gespalten. Diese Kohlenwasserstoff-Radikale sind hochreaktiv. Kommt es nun zu einer Abspaltung von Wasserstoff-Atomen führt dies zu Olefinen. Eine Abspaltung von zum Beispiel Ethen führt zu kürzeren Radikalen. Insgesamt läuft ein Wirrwarr an Reaktionen ab, dass zu einem Gemisch kleinerer, ungesättigter Kohlenwasserstoffe führt.



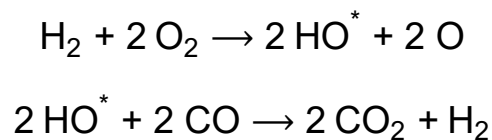
### 2.3.2 Exotherme Oxidations-Reaktionen

Die von innen kommenden pyrolytischen Abbau-Produkte der Wachs-Moleküle treffen auf den von außen heran diffundierenden Sauerstoff und es kommt zu stark exothermen Oxidations-Reaktionen. Die dabei entstehenden Moleküle verraten ihre Existenz durch das blau-grüne Licht.

- Violette Strahlung bei 432 nm wird von elektronisch angeregten CH\*-Molekülen abgestrahlt
- Blau-grünes Licht im Bereich von 400 nm – 500 nm von elektronisch angeregten C2\*-Molekülen
- Weitere Lichtemission bei 315 nm von elektronisch angeregten OH\*-Radikalen

Alle angeregten Moleküle geben ihre überschüssige Energie spontan als Licht ab. Dies wird als Chemo-Lumineszenz bezeichnet.

Innerhalb der Reaktionszonen 2 und 3 ist nicht Sauerstoff das Haupt-Oxidationsmittel, sondern OH-Radikale:



Man spricht von einer Reaktions-Kette, die der eigentliche Motor einer Kohlenwasserstoff-Flamme ist. Da die Konzentration an HO-Radikalen am äußeren Rand der Reaktions-Zone am größten ist, herrscht dort die höchste Temperatur von 1.400°C.

### 2.3.3 Flamme im schwerelosen Raum:

Wie in Abb. 4 zu erkennen ist, ist die Flamme im schwerelosen Raum nicht gelb. Dies liegt daran, dass durch die fehlende Konvektions-Strömung die Temperatur der Flamme geringer ist und somit keine HO-Radikale und dadurch auch keine Ruß-Partikel gebildet werden. Es sind nur die Licht-Emissionen der angeregten C2\*- und CH\*-Moleküle vorhanden.

## 2.4 Schadstoff-Ausstoß einer Kerze

Die Haupt-Produkte beim Abbrennen von Kerzen sind CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O, aber es entstehen auch andere Verbindungen. Aus diesem Grund hat der TÜV Rheinland die Luft-Konzentration (ng/m<sup>3</sup>) nach Abbrand von 600 g Kerzen-Masse bzw. einer Zigarette auf Methanal, Acrylaldehyd und Benzo[a]pyren untersucht.

Substanz	Bienenwachs-Kerze	Paraffin-Kerze	Stearin-Kerze	Zigarette
Methanal (CH <sub>2</sub> O)	56	170	44	600 000
Acrylaldehyd (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O)	1,2	1,2	64	25 000
Benz[a]pyren (C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> )	0,24	0,12	0,12	3 500

Die Untersuchung zeigt, dass „...von sachgerecht abbrennenden Kerzen [...] keine gesundheitliche Schädigung ausgeht.“ (TÜV Rheinland).

### Zusammenfassung:

- Kerzenroh-Produkte: Baumwolle + Wachs (Bienenwachs, Stearin, Paraffin)
- Wärmefluss durch Kapillarkräfte und Konvektionsströmung (verantwortlich für längliche Flammenform)
- 4 Zonen in der Flamme:  
dunkle Zone 1: Wachs verdampft  
Reaktionszonen 2 und 3: exotherme Oxidations-Reaktion  
helle Zone 4: Glühen der Ruß-Partikel
- Kerzen-Gase sind nicht gesundheitsschädlich (laut TÜV)

**Abschluss:** fehlt.

### Quellen:

1. Roth, K.; Alle Jahre wieder: die Chemie der Weihnachtskerze, Chem. Unserer Zeit, 2003, 37, 424-429
2. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kerze>, (23.10.2009)
3. <http://www.eika.de>, (23.10.2009)
4. Brennende Kerze: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22Candle%22.JPG?u-selang=de>; Urheber: Arivumathi; Lizenz: „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 nicht portiert“; 23.12.2020
5. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Candle\\_wick\\_and\\_flame\\_closeup.jpg?u-selang=de](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Candle_wick_and_flame_closeup.jpg?u-selang=de); Urheber: Kreuzschnabel/Wikimedia Commons, Lizenz: Cc-by-sa-3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>) 23.12.2020
6. <http://www.bienenzuchtverein-bechen.de/Kurse/WachsUndWaben/wachsendwaben.html>, (23.07.2010)
7. [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kerze\\_zonen.png&filetimestamp=20050602222251](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kerze_zonen.png&filetimestamp=20050602222251), (21.07.2010, Lizenz: GNU Free Documentation License, Autor: Anton)
8. <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Candlespace.jpg&filetimestamp=20060501042830>, (21.07.2010, Lizenz: Public Domain, Urheber: NASA Marshall Space Flight Center (NASA-MSFC))