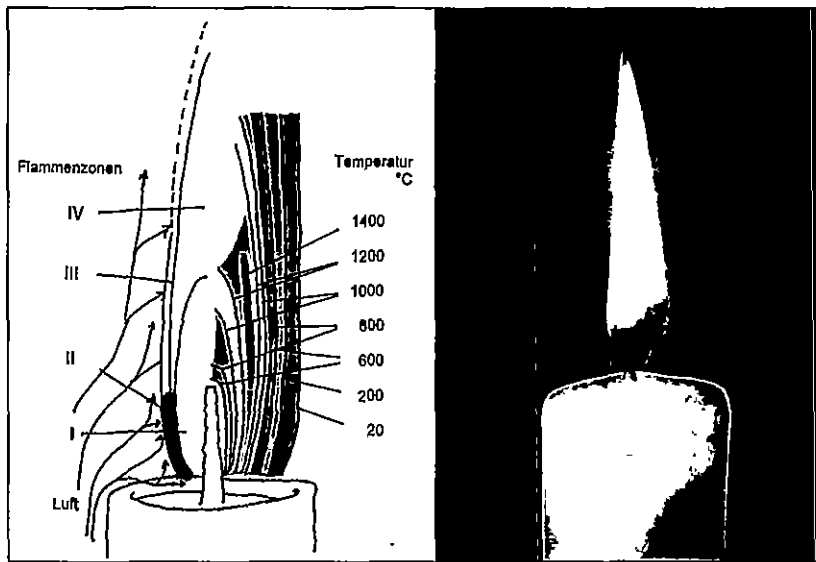


Abb. 1 Die Kerzenflamme.

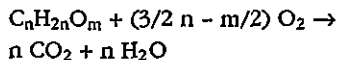
Links: Idealisiert. Die Flammenform wird durch Konvektionsströmungen bestimmt, da die aufsteigenden, heißen Verbrennungsgase kalte Frischluft von der Seite und von unten anziehen und dadurch die Flamme vertikal in die Länge strecken. Vom unteren Teil der Reaktionszone (Zone II) wird blaugrünes, vom zentralen und oberen Teil (Zone IV) gelbes Licht abgestrahlt. Die höchsten Temperaturen werden in den Flammenbereichen beobachtet, in denen die stark exothermen Oxidationsreaktionen ablaufen (Reaktionszone II und III). rechts: real. Nach längerer Brennzeit erreicht der Docht seine maximale Länge. Durch die erwünschte Docht-
klüftung verbrennt die Dochtspitze im heißesten Flammenteil, die Dochtlänge bleibt unverändert und die Kerze brennt rußfrei ab.



KURIOS, SPANNEND, ALLTÄGLICH...

Alle Jahre wieder: die Chemie der Weihnachtskerze

Warmer Kerzenschein verleiht unseren Wohnstuben den festlichen Glanz, ohne den die Adventszeit viel von ihrem Zauber verlieren würde. Das Beobachten der Kerzenflamme, das Kokeln mit Tannenzweigen, das vorsichtige Pusten in die Flamme und Abfließenlassen von flüssigem Wachs faszinieren wohl jeden. Bei einer brennenden Kerze scheint spannende Chemie weit entfernt zu sein, handelt es sich doch um die simple Verbrennung einer organischen Verbindung:



Die Reaktionsgleichung beschreibt schnörkellos den Ausgangs- und den Endzustand einer Verbrennung, aber bei einer Kerze ist der Weg das Ziel. Wie entsteht der Kerzenschein? Warum sind verschiedene Bereiche der Flamme unterschiedlich farbig? Wann und warum rußt eine Kerze?

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen alle Naturwissenschaften herangezogen werden. „Alle im Weltall wirkende Gesetze treten darin zu Tage oder kommen dabei wenigstens in Betracht, und schwerlich möchte sich ein bequemeres Tor zum Eingang in das Studium der Natur finden lassen“ erklärte Michael Faraday in seiner berühmten Weihnachtsvorlesung „The Chemical

History of a Candle“ [1], die er 1860 und 1861 vor jungem Publikum an der Royal Institution in London gehalten hat. Begeben wir uns auf Faradays Spuren und verfolgen das chemische Schicksal einer Kerze, von den Rohprodukten bis zum festlichen Abbrennen [2].

Der Kerzenkörper

Bis ins 18. Jahrhundert wurde für hochwertige Kerzen ausschließlich Bienenwachs verwendet. Diese Kerzen zeigen einen edlen Brand, ein schönes Aussehen und verbreiten einen angenehmen Duft, waren aber als Luxusgüter den Kirchen, Klöstern und Adelshäusern vorbehalten. Die einfachen Leute waren auf minderwertige, fettig-schmierige Kerzen aus Rindernierenfett und Hammeltalg angewiesen, die beim Abbrennen stark

qualmten, rußten und fürchterlich gestunken haben müssen.

Liebig untersuchte als erster die chemische Struktur von Bienenwachs und bezeichnete Wachs danach allgemein als Gemische von Estern langkettiger Carbonsäuren mit langkettigen Alkoholen. Die chemische Zusammensetzung von Bienenwachs zeigt, dass diese Definition nicht korrekt ist, denn auch freie langkettige Carbonsäuren und langkettige Kohlenwasserstoffe sind darin enthalten (Tabelle 1).

Heute definiert man in der industriellen Praxis Wachs nicht auf der Basis ihrer chemischen, sondern der physikalischen Eigenschaften: durchscheinend bis opak, bei 20 °C knetbar, oberhalb von 40 °C zu einer niedrigviskosen Flüssigkeit schmelzend und unter leichtem Druck polierbar. Eine ganze Anzahl von natürlichen und synthetischen Produkten haben wachsartige Eigenschaften und eignen sich zur Kerzenherstellung.

Das erste halbsynthetische Wachs wurde von M.E. Chevreul Anfang des 19. Jahrhunderts hergestellt [3]. Er erhielt bei der alkalischen Verseifung von Schweinefett nach anschließendem Ansäuern eine feste Substanz, die er als Stearin bezeichnete. Stearin ist bei Zimmertemperatur hart und zeigt die vom Verbraucher geschätzte Weißstrubung. Der Schmelzpunkt von 52–60 °C ist fast identisch mit dem Erweichungspunkt, so dass eine Stearinkerze auch bei erhöhten Zimmertemperaturen formstabil bleibt. Aus heutiger Sicht ist Stearin ein Gemisch aus Palmitin- und Stearinsäure [4].

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wird Paraffin zur Kerzenherstellung verwendet. Dieses Gemisch gesättigter Kohlenwasserstoffe wird heute fast ausschließlich aus Erdöl gewonnen. Der Schmelzpunkt der Paraffine variiert mit der Kettenlänge. Reine Paraffine sind farblos und durchscheinend und zeigen einen breiteren Erweichungsbereich. Paraffinkerzen haben heute einen Marktanteil von über 95 %, der Rest entfällt auf Kerzen aus Stearin (3 %) und Bienenwachs (2 %).

Der Kerzendocht

Der Docht ist die Seele der Kerze. Er muss eine ausreichende Menge an geschmolzenem Wachs ansaugen, damit sich ein Gleichgewicht zwischen der geschmolzenen und verbrannten Wachsmenge einstellt. Saugt der Docht zu wenig, sammelt sich zuviel flüssiges Wachs und die Kerze erlischt; saugt der Docht zuviel, kann das Wachs nicht mehr vollständig verbrennen, und die Kerze beginnt zu rußen. Unsere Vorfahren hatten mit schlechten Dochten ihre liebe Not. An Fürstenhöfen kurzte ein „Wachschneutzer“ die Kerzendochte, bevor sie zu rußen begannen. Im privaten Haushalt musste man das selbst machen. Goethe stöhnte: „*Wusste nicht, was sie besseres erfinden könnten, als dass die Lichter ohne Putzen brennten*“.

Die Erfindung des heute noch üblichen geflochtenen Baumwolldochts 1828 durch Jules de Cambacères ist ein großer Schritt in der Kerzengeschichte. Die Saugkraft der Dochte kann über die Anzahl der Einzelfäden dem Kerzendurchmesser und dem verwendeten Wachs angepasst werden. So benötigen 10 mm-Kerzen

DIE KERZEN – EIN SCHWIERIGES STUDIENOBJEKT

Eine Kerzenflamme experimentell erschöpfend zu studieren ist eigentlich unmöglich. Die Gründe liegen auf der Hand: einmal sind Kerzenflammen selbst in geschlossenen Apparaturen nicht stabil und zum anderen kann man beim Abbrennen nichts verändern. Wachszusammensetzung, Kerzendimension und das Material und die Geometrie des Dochts können zwar variiert werden, aber natürlich nicht während eines Brennvorgangs. In die Flamme eingebrachte Messsonden verändern die Flammenform und Temperaturverteilung, verfälschen daher die Messung selbst. Mit heute verfügbaren berührungslosen laser-technischen Verfahren ließen sich zwar momentane Temperaturen und die Konzentrationen einiger weniger Komponenten (z.B. N_2 , O_2 , CO , H_2O) selbst bei instabilen Flam-

men messen. Dies wäre allerdings nur mit erheblichem apparativem Aufwand möglich. Wegen dieser experimentellen Schwierigkeiten wissen wir über die genauen Vorgänge innerhalb einer Kerzenflamme nur recht wenig. Allerdings liegen viele Studien anderer, technisch wichtiger Flammentypen vor; z.B. solche, die zur Wärme- oder Rußerzeugung dienen oder die bei Verbrennungsvorgängen in verschiedenen Motortypen, in Düsentriebwerken und Raketen auftreten.

Die dort gewonnenen Erkenntnisse lassen sich bis zu einem gewissen Grad auf die Kerzenflamme übertragen, so dass wir uns zumindest indirekt ein Bild über die Chemie im Innern einer Kerzenflamme machen können.

(90 % Paraffin, 10 % Stearin) einen Docht aus 24, bei einem Durchmesser von 15 mm 33 Baumwollfäden. Das Abbrennverhalten der Kerze verbessert sich auch dadurch, dass sich der schraubenförmig geflochtene Docht in der Kerzenflamme bei einer gewissen Länge zur Seite krümmt und die Dochtspitze in den heißesten Flammenteil ragt und dort verbrennt, eine Art „automatische Dochtschutzung“. Eine weitere Verbes-

serung wird durch die Imprägnierung des Dochts mit einer wässrigen Lösung von Ammoniumsalzen, Borsäure und Phosphaten erreicht. Die Ammoniumsalze verhindern ein zu schnelles Abbrennen des Dochts in der Flamme. Die Borsäure und Phosphate bilden am Dochtende eine Schmelzperle, die ein Abfallen von Ascheteilen in das flüssige Wachs und das Nachglühen der Dochtspitze nach dem Ausblasen verhindern.

TAB. 1 | DIE CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG VON BIENENWACHS

| Trivialname [19] | Rationeller Name | Formel | Gehalt |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|---------|
| Ester von Wachssäuren | | | 70–72 % |
| Palmitinsäuremyricylester | Palmitinsäuretriacontylester | $CH_3[CH_2]_{14}COO[CH_2]_{29}CH_3$ | 23 % |
| Palmitinsäure-laccerylester | Palmitinsäuredotriacontylester | $CH_3[CH_2]_{14}COO[CH_2]_{31}CH_3$ | 2 % |
| Cerotinsäuremyricylester | Hexacosansäuretriacontylester | $CH_3[CH_2]_{24}COO[CH_2]_{29}CH_3$ | 12 % |
| Hypogäasäure-myricylester | Hexadec-2-ensäuretriacontylester | $CH_3[CH_2]_{12}CH=CHCOO[CH_2]_{29}CH_3$ | 12 % |
| 2-Hydroxypalmitinsäure-cerylester | 2-Hydroxypalmitinsäurehexacosylester | $CH_3[CH_2]_{13}CH(OH)COO[CH_2]_{25}CH_3$ | 8–9 % |
| weitere langkettige Ester | | | 13–15 % |
| freie Wachssäuren | | | 9–11 % |
| Laccersäure | Dotriacontansäure | $CH_3[CH_2]_{30}COOH$ | |
| Cerotinsäure | Hexacosansäure | $CH_3[CH_2]_{24}COOH$ | |
| Lignocerinsäure | Tetracosansäure | $CH_3[CH_2]_{22}COOH$ | |
| Mellssinsäure | Triacosansäure | $CH_3[CH_2]_{28}COOH$ | |
| Hypogäasäure | Hexadec-2-ensäure | $CH_3[CH_2]_{12}CH=CHCOOH$ | |
| Kohlenwasserstoffe | | | 12–15 % |
| | Pentacosan | $CH_3[CH_2]_{23}CH_3$ | |
| | Heptacosan | $CH_3[CH_2]_{25}CH_3$ | |
| | Nonacosan | $CH_3[CH_2]_{27}CH_3$ | |
| | hentriacontan | $CH_3[CH_2]_{29}CH_3$ | |
| Melen | Triacont-1-en | $CH_3[CH_2]_{27}CH=CH_2$ | |
| weitere Bestandteile | | | 4–5 % |

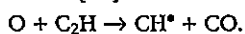
Bienenwachs ist der Prototyp aller Kerzenwachs und besteht aus gesättigten, langkettigen Estern, freien Säuren und Kohlenwasserstoffen. Neben Bienenwachs und Stearin (gesättigte, langkettige Carbonsäuren) werden heute vor allem Paraffine (gesättigte, langkettige Kohlenwasserstoffe) als Kerzenwachs eingesetzt.

Wachsmolekül kommt in einer Kerzenflamme mit Sauerstoff in Berührung!

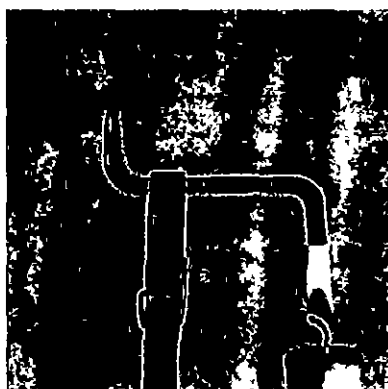
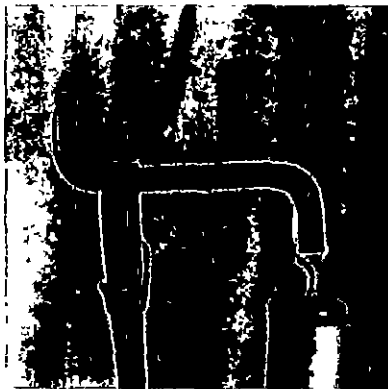
Wir kommen nun zum chemischen Herz einer Kerzenflamme: die Reaktionszone. Hier treffen die pyrolytischen Abbauprodukte der Wachsmoleküle von innen kommend auf den von außen herandiffundierenden Sauerstoff. Die hier ablaufenden stark exothermen Oxidationsreaktionen werden allein durch das Herandiffundieren der Reaktionspartner begrenzt. Eine Kerzenflamme ist eine typische Diffusionsflamme.

Eine nicht-rußende Kerzenflamme wird vollständig von der Reaktionszone umschlossen. Warum leuchtet nun der untere Teil der Reaktionszone, Zone II, blaugrün und die Zone III überhaupt nicht, obwohl in der gesamten Reaktionszone die gleichen chemischen Reaktionen ablaufen? Die Antwort überrascht: es ist eine optische Täuschung. Das starke gelbe Leuchten der Zone IV überstrahlt das schwache, bläuliche Licht in der benachbarten Reaktionszone. Nur in der von der gelben Leuchtzone weiter entfernten Zone II können wir daher das bläuliche Licht wahrnehmen.

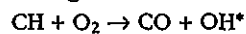
Zwei ungewöhnliche Moleküle verraten ihre Existenz durch das bläuliche Licht, das uns von den Erdgas-Flammen im Gasherd oder Bunsenbrenner [8] vertraut ist. Das charakteristische Bandenspektrum [9] hat zwei molekulare Quellen. Die violette Strahlung bei 432 nm wird von elektronisch angeregten CH^* -Molekülen abgestrahlt, die in der Reaktionszone durch folgende Reaktion entstehen [10]:



Das blau-grüne Licht stammt von ebenfalls elektronisch angeregten C_2^* -Molekülen, die im sichtbaren Bereich die Swan-Banden bei 436, 475 und 520 nm abstrahlen. Angeregte C_2^* -Moleküle entstehen vor allem durch die Reaktion von höheren wasserstoffarmen Kohlenwasserstoffradikalen mit Sauerstoffatomen. Eine weitere Lichtemission tritt bei 315 nm im nahen UV-Bereich auf. Sie stammt

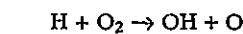


von OH^* -Radikalen auf der sauerstoffreichen Seite der Reaktionszone, die durch folgende Reaktion entstehen

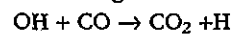


Alle angeregten Moleküle geben ihre überschüssige Energie spontan als Licht ab (Chemilumineszenz).

Auch die Oxidationsreaktionen innerhalb der Reaktionszonen II und III nehmen einen überraschenden Verlauf. Nicht Sauerstoff selbst, sondern das Hydroxylradikal OH ist das Hauptoxidationsmittel in der Reaktionszone [11]. Wie in der Knallgas-Reaktion entstehen OH -Radikale nach der Reaktionsgleichung



über H -Atome, die unter anderem durch die Folgereaktion



zurückgebildet werden. Man spricht von einer Reaktionskette, die durch die im ersten Schritt entstehenden O -Atome noch wirkungsvoller wird. Diese Kette ist der eigentliche Motor einer Kohlenwasserstoff-Flamme. Die Konzentration der OH -Radikale ist am äußeren Rand der Reaktionszone am größten und dementsprechend herrschen dort die höchsten Temperaturen von 1400 °C.

Wir nähern uns nun dem schönsten Teil der Kerzenflamme: der Zone IV, die unsere Stuben in das warme gelbe Licht taucht. Woher kommt das Licht? Auch hier hat Faraday ein einfaches Experiment ersonnen. Wir beleuchten die Kerze mit einer starken Lampe und betrachten deren Schattenbild (Abbildung 3, Mitte). Deutlich ist nur Schatten von Zone IV zu erkennen. „Es ist merkwürdig, dass wir den Teil der Flamme im Schatten als den dunkelsten sehen, der in Wirklichkeit der hellste ist“ bemerkte Faraday bei seinem Experiment. Ein schwarzer Schatten kann nur entstehen, wenn größere Teilchen Licht mit allen sichtbaren Wellenlängen absorbieren. Auch die chemische Natur dieser Partikel in Flammenzone IV konnte Faraday aufklären, in dem er mit einem Ableitungsrohr die Partikel direkt aus diesem Flammenbereich ableitete (Abbildung 3, unten): Es ist Ruß.

Wie kommt es zum Rußleuchten in Zone IV? In den heißeren Bereichen der sauerstofffreien Zone I bilden sich bei höheren Temperaturen kohlenstoffreiche Moleküle, die sich nicht mit einfachen Strukturformeln beschreiben lassen. Zunächst bilden sich primäre Rußteilchen mit einer Zusammensetzung von etwa $(\text{C}_3\text{H})_n$ mit einigen tausend Kohlenstoffatomen. Die Bruttoformel deutet auf ringförmige, stark ungesättigte, polycyclische aromatische Strukturelemente hin. Die primären Rußteilchen wachsen durch Anlagerung, Dehydrierung sowie Koagulation bis auf

Abb. 3 Drei Experimente von Michael Faraday (1861).

Oben: Nach Ableiten der Gase aus der dunklen Zone unmittelbar oberhalb des Dochts kondensiert Wachs in kälteren Teilen des Ableitungsrohres. Der weiße Rauch am Ende des Ableitungsrohres kann nach einiger Zeit entzündet werden.

Mitte: Nur der gelb leuchtende Teil der Kerzenflamme wirft im hellen Schein einer Lichtquelle einen Schatten und verrät die Anwesenheit fester, lichtabsorbierender Partikel.

Unten: Die Natur der festen Partikel lässt sich durch Ableiten der Gase aus der gelben, leuchtenden Zone leicht nachweisen: es sind Rußpartikel.

TAB. 2 | SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN IN DER UMGEBUNGSLUFT NACH KERZENABBRAND

| Substanz | Paraffinkerze | Bienenwachskerze | Stearinkerze | Zigarette |
|------------------------------------|---------------|------------------|--------------|-----------|
| Formaldehyd | 170 | 56 | 44 | 600 000 |
| Acrylaldehyd (früher: Acrolein) | 1,2 | 1,2 | 64 | 25 000 |
| Benzo[a]pyren | 0,12 | 0,24 | 0,12 | 3 500 |

Beobachtete Luftkonzentrationen (in ng/m³) einiger Verbindungen nach dem Abbrand von 600 g Kerzenbrennmasse bzw. einer Zigarette in einem Wohnraum (50 m³) ohne Luftaustausch [20]. Diese Menge entspricht dem vierstündigen Abbrennen von 30 Kerzen.



Abb. 4 Eine brennende Kerze unter Einfluss der irdischen Schwerkraft und im schwerelosen Raum. Oben: Im Schwerfeld der Erde brennende Kerze (Durchmesser 5 mm). unten: Die gleiche Kerze im schwerelosen Raum. Dieses Foto wurde mit sehr langer Belichtungszeit aufgenommen, da das blaue Kerzenlicht sehr schwach und von den Astronauten mit bloßem Auge kaum erkennbar ist.

einige Millionen Kohlenstoffatome an [12]. Diese großen Rußteilchen fangen in Zone IV oberhalb von 1200 °C an zu glühen. Das gelbe Kerzenlicht beruht also nicht direkt auf einer chemischen Reaktion, sondern die festen Rußpartikel wandeln thermische Energie in Licht um, in dem die gelben und roten Spektralanteile intensiver sind als die blauen. Die Kerzenflamme erscheint unserem Auge gelb.

Die in der sauerstoffarmen Zone IV thermisch gebildeten Rußpartikel werden in der darüber liegenden Reaktionszone zu CO oder CO₂ oxidiert. Die Verbrennung der Rußteilchen ist aber nur dann vollständig, wenn die Temperatur mindestens 1000 °C beträgt. Kühlt man den oberen Flammenteil z.B. durch Hineinblasen von Luft oder Zugluft, dann kann Ruß nicht vollständig abreagieren: die Kerze beginnt zu rußen oder „blaken“.

Die Hauptprodukte beim Abbrennen von Kerzen sind zwar Kohlenstoffdioxid und Wasser, allerdings entstehen in extrem geringen Mengen weitere Verbindungen. Die chemische Struktur und die gebildeten Mengen dieser Nebenprodukte sind von großer Bedeutung. Schließlich muss sichergestellt sein, dass Menschen in kerzenerleuchteten Räumen keinen gesundheitlichen Risiken ausgesetzt sind. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die entstehenden Produkte.

Eine Studie des TÜV Rheinlands [13] untersuchte die Bildung von Schmutzpartikeln in der Luft der St.-Bonifatius-Kirche in Wiesbaden

außerhalb und während der Gottesdienste mit und ohne den Abbrand von 50 - 115 Opferlichtern aus Paraffin. Dabei sollte der Einfluss von Kerzenabbrand auf die oberflächliche Verschmutzung von Kunstwerken (Glasfenster, Plastiken, Altargemälde), aber auch auf eine mögliche gesundheitliche Gefährdung untersucht werden. Die Ergebnisse sind eindeutig: Die in Filtern gesammelten Staubpartikel rühren fast ausschließlich von der Heizung und von den Kirchenbesuchern her, der Einfluss der Kerzen kann vernachlässigt werden.

Auch bei durchgefärbten und in Farben getauchten Kerzen konnten keine gesundheitlichen Gefährdungen nachgewiesen werden [14]. Lediglich beim vierstündigen Abbrennen von 30 Duftkerzen mit besonders hohem Duftgehalt von 8 % in einem luftdichten Raum können polychlorierte Dioxine und Furane in der Größenordnung der maximalen Arbeitsplatzkonzentration entstehen [15]. Bei Kerzen sollte man jedoch immer auf russfreies Abbrennen achten, denn freiwerdende Rußteilchen wirken verschmutzend und enthalten geringe Mengen von unerwünschten Substanzen, von denen die polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe am kritischsten beurteilt werden müssen. Insgesamt muss festgestellt werden, dass von sachgerecht abbrennenden Kerzen weder in Kirchenräumen noch im privaten Bereich eine gesundheitliche Schädigung ausgeht [16].

Die brennende Kerze im schwerelosen Raum

Die nach oben abziehenden, heißen Verbrennungsgase und die von unten und seitlich angesaugte Frischluft verleihen der Flamme ihre typische langgestreckte Gestalt. Im schwerelo-

sen Raum gibt es keinen Auftrieb und keine Konvektionsströmungen. Wie sieht die Flamme einer brennenden Kerze in der Schwerelosigkeit aus? Die NASA hat ein umfangreiches Forschungsprogramm des Kerzenabbrandes unternommen. Dabei ging es natürlich nicht um stimmungsvolle Weihnachtsfeiern bei Raumflügen, sondern um das allgemeine Abbrennverhalten von Materialien, die mögliche Rußbildung und die daraus resultierenden Loschstrategien. 1992 zündeten die Astronauten zehn Kerzen während der Space-Shuttle-Mission (STS-50, USML-1) in einem geschlossenen Polycarbonat-Behälter an. Weitere Experimente wurden 1996 an Bord der russischen Raumstation MIR durchgeführt. Einige Sekunden nach dem Anzünden bildete sich eine stabile Flamme, die tatsächlich ganz anders aussah als auf der Erde (Abbildung 4).

Die auffälligsten Unterschiede zwischen den Kerzenflammen innerhalb und außerhalb der Schwerkraft der Erde sind die Flammenfarbe und -form. Im schwerelosen Raum brennen Kerzen mit einer halbkugelförmigen bläulichen Flamme mit so geringer Lichtintensität, dass die Astronauten nur mit Schwierigkeiten erkennen konnten, ob die Kerzen überhaupt brannten [17].

Worin liegen die Unterschiede beim Abbrennen einer Kerze mit oder ohne Schwerfeld? Die Versorgung der Flamme mit Brennstoff beruht auf der Kapillarwirkung durch den Docht. Auf die Kapillarkraft hat Schwerkraft aber keinen Einfluss. Im Gegensatz zur Sauerstoffversorgung: im Schwerfeld wird der Sauerstoff zur Reaktionszone durch Diffusion und Konvektion transportiert. Über beide Transportmechanismen verlassen die Verbrennungsgase die Reaktionszone.

Auf die Diffusion hat die Schwerkraft keinen Einfluss, aber Konvektionströmungen fallen im schwerelosen Raum völlig weg, da die heißen Flammengase nicht nach oben aufsteigen (Wo sollte auch oben sein?) [18].

Die Flamme ist nahezu halbkugelförmig. Im Schwerfeld entsteht die längliche Flammenform einer Kerze durch die aufsteigenden Flammengase und das Ansaugen von Frischluft von unten. Dies fällt im schwerelosen Raum weg, so dass Sauerstoff allein durch Diffusion in die Reaktionszone eintreten kann. Insgesamt wird dadurch die Sauerstoffzufuhr gedrosselt, so dass die exothermen Oxidationsreaktionen langsamer ablaufen und die Flammentemperatur wesentlich geringer ist als im Schwerfeld. Dies hat wiederum Einfluss auf fast alle physikalisch-chemischen Vorgänge in der Flamme, z.B. brennt die Kerze insgesamt wesentlich langsamer ab.

Die Flamme leuchtet nicht gelb. Leuchtende, größere Rußpartikel können sich also nicht gebildet haben. Ruß lässt sich auch nicht an den Wänden der Kerzenbox nachweisen. Offensichtlich reicht die niedrigere Flammentemperatur nicht für die Bildung der primären Rußteilchen aus. Die Flamme ist blau, d.h. das emittierte sichtbare Licht stammt ausschließlich von angeregten C_2^* und CH^* -Molekülen aus der Reaktionszone.

Zusammenfassung

Wenn wir am Heiligen Abend die Kerzen entzünden, treiben wir ein Stück besonders schöner, aber auch besonders komplexer Chemie. Von der im Inneren der strahlenden Kerzenflamme ablaufenden Chemie haben wir nur ungefähre Vorstellungen, viele Details sind uns noch verborgen. Klar ist jedoch, dass letztlich glühende Rußpartikel unseren Wohnstuben den festlichen Glanz verleihen. Im Weltraum sahe es ganz anders aus: die molekularen Exoten C_2^* und CH^* würden mit ihrem kaum sichtbaren, blassblauen Licht unsere Augen wohl kaum zum Leuchten bringen. Ist es nicht wunderbar, dass die Chemie der Kerze für unsere irdischen Wohnzimmer optimiert ist? In diesem Sinne: Fröhliche Weihnachten!

Dank

Für die tatkräftige Hilfe bei der Einarbeitung in dieses schwierige Teilgebiet der Chemie möchte ich mich bei den folgenden Kollegen herzlich

bedanken: Dr. Daniel L. Dietrich (NASA John H. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio), Dr. K.-H. Hellwich (Bellstein GmbH, Frankfurt), Dr. M. Matthäi (Sasol Wax, Hamburg) und ganz besonders Prof. K.-H. Homann (TU Darmstadt). Weiterhin bedanke ich mich beim Verband Deutscher Kerzenhersteller e.V., Frankfurt, für das umfangreiche Untersuchungsmaterial zum Abbrennverhalten von Kerzen. Für die Verwendung der im schwerelosen Raum aufgenommenen Fotos danke ich dem John H. Glenn Research Center der NASA.

Literatur

- [1] M. Faraday, *The Chemical History of a Candle*, Dover, Mineola, N.Y., 2002; M. Faraday, *Naturgeschichte einer Kerze*, Verlag Franzbecker, Hildesheim 1980.
- [2] M. Matthäi, N. Peterelt, *Seifen, Öle, Fette, Wachse*, 2001 (3), 3. siehe: <http://www.kerzenlicht.de/Kerzen/sevice/kerze.html>; <http://www.kopfball-online.de/wissen/wiss020414.html>; <http://www.quarks.de/feuer/02.htm>
- [3] C. Gottmann, *Chem. unserer Zeit*, 1979, 13, 176; J. Walker, *Sci. Amer.* 1978, 238, 154.
- [4] Chevreul nannte eine aus Schmelnefett isolierte Fettsäure zunächst *acide margarique*, dann *acide stéarique*. Diese Fettsäure erwies sich später als ein Gemisch aus Hexa- und Octadecansäure. Die Octadecansäure $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ wird heute als Stearinsäure, die Hexadecansäure $CH_3(CH_2)_{14}COOH$ als Palmitinsäure. Als Margarinsäure wird die selten vorkommende Heptadecansäure $CH_3(CH_2)_{15}COOH$ bezeichnet.
- [5] Dieser Auftrieb der heißen Verbrennungsgase treibt erzgebirgische Weihnachtspyramiden an.
- [6] Vereinfachend nehmen wir an, dass der Kerzenbrennstoff ein Paraffin der Summenformel C_nH_{2n+2} ist.
- [7] In Wirklichkeit ist alles noch komplizierter: viele der entstehenden Moleküle liegen in der Flamme auch in ionisierter Form vor. Dies lässt sich leicht durch Anlegen von starken elektrischen Feldern nachweisen. siehe <http://www.americantantigravity.com/ffametest.html>
- [8] In diesen Brennern wird Erdgas mit Luft vorgemischt und diese Gas Mischung verbrannt. Man spricht dann von Vormischflammen, während eine Kerzenflamme eine reine Diffusionsflamme ist, in die der Luftsauerstoff von außen hindiffundieren muss.
- [9] R. Mavrodineanu, H. Boiteux, *Flame Spectroscopy*, 1965, Wiley, Chichester.
- [10] A.G. Gaydon, H.G. Wolfhard, *Flames, their structure, radiation and temperature*, 3rd edition 1970, Chapman & Hall Ltd., London.
- [11] K.-H. Homann, *Angew. Chem.* 1998, 110, 2572.
- [12] K.-H. Homann, H.G. Wagner, *Bild der Wissenschaften* 1970, 7, 762.
- [13] Bericht der Messstelle für Luftreinhaltung des TÜV Rheinland Nr. 539 / 777091 (April 1999).
- [14] Ergebnisbericht der Ökometric GmbH und des Bayreuther Instituts für Umweltforschung, Oktober 1994.
- [15] Ergebnisbericht der Ökometric GmbH und des Bayreuther Instituts für Umweltforschung, Oktober 1997.
- [16] Natürlich können nicht alle hergestellten Kerzen sorgfältig untersucht werden. Die Gütegemeinschaft Kerzen e.V. verleiht deswegen ein RAL-Gütesiegel, das dem Verbraucher garantiert, dass die entsprechende Kerze die Standards bezüglich der Zusammensetzung, der verwendeten Farben und des Abbrennverhaltens erfüllt.
- [17] Bringt man eine brennende Kerze in einen großen Exsikkator und vermindert den Druck, so beobachtet man eine Flammenform und -farbe ähnlich denen im schwerelosen Raum. Die Ursachen für die Veränderung sind aber unterschiedlich: abnehmender Luftdruck erhöht die Diffusionsgeschwindigkeit, verringert aber die Konvektionsströmungen und vor allem den Sauerstoffpartialdruck. Dadurch laufen die Oxidationsreaktionen langsamer ab, die Flamme wird kälter und dadurch treten keine Rußbildung und -leuchten ein.
- [18] Weitere Informationen über Kerzenversuche im schwerelosen Raum findet man bei http://microgravity.grc.nasa.gov/com-bustion/cfm/cfm_intro.htm; http://microgravity.grc.nasa.gov/com-bustion/cfm/mlr_intro.htm
- [19] Die Trivialnamen der langkettigen Säuren und Alkohole sind verwirrend. Triacansäure $C_{23}H_{46}COOH$ wird als Mellissäure, der entsprechende Alkohol $C_{30}H_{61}OH$ sowohl als Melissylalkohol oder Myricylalkohol bezeichnet. Bis vor noch nicht allzu langer Zeit wurden diese Trivialnamen auch für die entsprechenden C_{31} -Verbindungen benutzt. Der Trivialname Hypogaasäure wurde ursprünglich im Bellstein-Handbuch für Hexadecansäure, seit der Beschreibung verschiedener Doppelbindungsisomere in den Ergänzungswerken aber überhaupt nicht mehr verwendet. Meilen wird im Bellstein als $C_{30}H_{60}$ oder $C_{30}H_{62}$ angegeben. Die IUPAC machte diesem Wirrwarr ein Ende und lässt heute nur noch Palmitin- und Stearinsäure als Trivialnamen zu, alle anderen langkettigen Säuren und Alkohole sollen also rational benannt werden.
- [20] Ergebnisbericht der Ökometric GmbH und dem Bayreuther Institut für Umweltforschung, 1994.

Autor dieser Rubrik ist Prof. Klaus Roth von der Freien Universität Berlin.
E-Mail: klaroth@chemie.fu-berlin.de