

Voruntersuchungen zur Anwendung moderner optischer Meßmethoden
im Hinblick auf das windabhängige Rußverhalten von Kerzenflammen

- Abschlußbericht -

für den Verband Deutscher Kerzenhersteller

im Rahmen der Förderungsmaßnahme des BMFT

"Forschungskooperation zwischen Industrie und Wissenschaft"

(Förderungskennzeichen FIW 0056)

Berichtsumfang: 35 Seiten, 3 Tab., 11 Abb., 40 Lit.

Projektlaufzeit: 15. 4. 1985 bis 14. 4. 1986

Forschungsinstitut: 1. Institut für Technische Chemie der
Universität Stuttgart

Bearbeiter: Dr. Gertrud Hönes

Projektleiter und
Berichterstatter: Prof. Dr. Axel Schönbacher

Veröffentlichung: Stuttgart, Januar 1987

Inhaltsverzeichnis

- 1 Zusammenfassung
- 2 Anlaß und Ziel des Vorhabens
- 3 Bisheriger Kenntnisstand
- 4 Meßverfahren und Ergebnisse
 - 4.1 Untersuchte Kerzenflammen
 - 4.2 Simulierung von Zugluft auf die Kerzenflammen
 - 4.3 Holografische real-time Durchlichtinterferometrie
 - 4.3.1 Optischer Aufbau
 - 4.3.2 Synchronstrukturen und ihre grundlegenden Eigenschaften
 - 4.3.3 Seitenwindeinfluß auf die Synchronstrukturen
 - 4.4 Farb-Thermografie
 - 4.4.1 Meßprinzip
 - 4.4.2 Wärmestrukturen und ihre grundlegenden Eigenschaften
 - 4.4.3 Seitenwindeinfluß auf die Wärmestrukturen
 - 4.5 Digitale Bildauswertung von Fotogrammen
 - 4.5.1 Meßprinzip
 - 4.5.2 Äquidensitenstrukturen und ihre grundlegenden Eigenschaften
 - 4.5.3 Seitenwindeinfluß auf die Äquidensitenstrukturen
 - 4.6 Quantitative Rußbestimmungsmethode
 - 4.6.1 Rußtest-Apparatur
 - 4.6.2 Gemessene Rußmassenströme
 - 4.7 Chromatografisches Verfahren zur Untersuchung der Saugfähigkeit von Dochten
- 5 Schlußfolgerungen und Ausblick auf zukünftige Aktivitäten
- 6 Literaturverzeichnis
- 7 Anhang
 - 7.1 Tabellen
 - 7.2 Abbildungen

1. Zusammenfassung

Auf der Basis einer umfassenden Literaturrecherche wird über den bisherigen Kenntnisstand der Erforschung von Kerzenflammen kurz berichtet.

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß die drei modernen Meßmethoden, nämlich die holografische real-time Durchlichtinterferometrie, die Farb-Thermografie sowie die digitale Bildauswertung von Fotogrammen zu einer aussichtsreichen Erforschung von Kerzenflammen im Hinblick auf deren Rußemission besonders geeignet sind. Ein wichtiges Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen ist die starke Beeinflussung von Seitenwind auf die durch obige Methoden sichtbargemachten Synchron-, Wärme- und Äquidensitenstrukturen der Kerzenflamme. Der Seitenwind führt nämlich gleichzeitig zu verstärkten Rußemissionen.

Zur quantitativen Bestimmung des emittierten Rußmassenstroms von Kerzenflammen wurde eine Rußtest-Apparatur entwickelt, bei der die Rußmassen von einer Glasfritte gesammelt werden, deren Masse gravimetrisch ermittelt wird.

Mit einem chromatografischen Verfahren wurde die Saugfähigkeit verschiedener Baumwolldochte untersucht.

Ein Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Kerzenforschung wird gegeben.

2 Anlaß und Ziel des Vorhabens

Der Verbrauch an Kerzen zum Verbrennen, und nicht wie zunächst nach dem Krieg vorwiegend zur Dekoration, hat sich im letzten Jahrzehnt ganz erheblich gesteigert:

- a) - in häuslichen Innenräumen
 - am gedeckten Tisch zu allen Tageszeiten
 - im Wohnzimmer bei gemütlicher Runde oder während des Fernsehens
 - in Gaststätten
- b) - im sakralen Raum als Opferkerze oder als Opferlicht.

Entsprechend diesem Anwachsen des Verbrauchs weiß man aber zu wenig über die physikalisch-chemischen Vorgänge während des Abbran-

des der Kerzen. Die Unternehmerstruktur der Kerzenhersteller in der Größenordnung von 100-250 Beschäftigten und in der Mehrzahl sogar darunter, ermöglichte bisher keine umfassende Forschung. Die Entwicklungsarbeit in kleinem Umfang beschränkte sich überwiegend auf das Erscheinungsbild des Produktes und die übrigen Kenntnisse, vor allem über das Abbrandverhalten der Kerzen, sind ausschließlich empirisch. Die zeitgemäßen Anforderungen gebieten es dringend, folgendes zu erforschen:

1. Optimales Grundwissen zur Erzielung eines optimalen Verbrennungsvorganges
 - a) für eine Schonung der Innenraumverhältnisse in Wohnungen und Gaststätten
 - b) in sakralen und kulturellen Räumen zur Schonung von Kunstwerken, vor allem Gemälden an den Wänden (Denkmalpflege).
2. Hier besonders die Erforschung der Zusammenhänge zwischen Ablagerung von Staub aus der Luft und Rauchrückständen und ggf. Verbrennungsrückständen aus den Kerzen auf Wänden und Einrichtungen.
3. Bestimmung und Einsatz der richtigen Rohstoffe, auch im Hinblick auf die Ressourcenabhängigkeit, z.B. Erdöl- oder Fettindustrie.
4. Beeinflussung durch Zusatzstoffe, wie Farben, Härtungsmittel, etc.
5. Physikalisch-chemische Vorgänge im Docht als Brennt Träger zur Findung eines optimalen Materials (z.Zt. hauptsächlich aus Baumwolle unterschiedlicher Provenienzen) und die Auswirkungen von zugesetzten Chemikalien für das Abbrandverhalten von Kerzen.

Das Ziel des vorliegenden Vorhabens bestand nicht darin, die oben zusammengestellten Probleme wissenschaftlich zu erforschen - dies bleibt weiteren Aktivitäten vorbehalten - sondern es sollten moderne optische und fotografische Meßmethoden zur Erforschung von Kerzenflammen getestet werden. Bei den modernen Meßmethoden handelt es sich um die holografische real-time Durchlichtinterferometrie, die Farb-Thermografie sowie die digitale Bildauswertung

von Fotogrammen die der Berichterstatter bereits erfolgreich auf Diffusionsflammen flüssiger Kohlenwasserstoffe angewandt hat. Die finanzielle Unterstützung erfolgte von der DFG und der Stiftung Volkswagenwerk. Eine erfolgversprechende Anwendung dieser Methoden auch auf Kerzenflammen ist vor allem deshalb zu erwarten, weil es zwischen den Kerzenflammen und den gewöhnlichen Diffusionsflammen flüssiger Brennstoffe enge Verwandtschaften gibt. Aufgrund dieser Tatsache ist auch zu erwarten, daß viele Phänomene bei gewöhnlichen Diffusionsflammen ebenso bei Kerzenflammen auftreten. Abschließend sei allerdings bemerkt, daß auch die gewöhnlichen Diffusionsflammen im Vergleich zu den Vormischflammen viel weniger gut untersucht und folglich auch weniger gut verstanden werden.

3 Bisheriger Kenntnisstand

Wie ein historischer Überblick (Tab.1) zeigt, spielt bei der Erforschung der Verbrennung und des Feuers gerade die Kerzenflamme eine wichtige Rolle. Vermutlich als erster hat sich F. Bacon bereits um 1600 mit der Struktur von Kerzenflammen wissenschaftlich auseinandergesetzt [1]. Umfangreiche, bis heute aktuell gebliebene Untersuchungen zur Umströmung von Kerzenflammen und ihren Strukturen, zur Bildung von Rußteilchen, Rauch und gasförmigen Verbrennungsprodukten, zur qualitativen Temperatur-Verteilung sowie zum gelben Leuchten von Kerzenflammen, das als kontinuierliche Emission sehr kleiner Rußteilchen erkannt wurde, stammen von M. Faraday [2]. Das Interferenzbild einer Kerzenflamme ist in [3], ein Schlierenbild in [4] zu finden. Die mit Thermoelementen gemessene Temperaturverteilung sowie die unterschiedlichen Zonen innerhalb der Kerzenflamme sind in Abb.1 wiedergegeben [5-7]. Über die quantitative Rußbildung in Kerzenflammen liegen keine speziellen Untersuchungen vor. Allerdings ist zu erwarten, daß sie im Prinzip analog der Rußbildung in Diffusionsflammen flüssiger Brennstoffe verläuft, worüber viele Untersuchungen vorliegen [8-12]. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß die Rußbildung - auch in gewöhnlichen Diffusionsflammen - in Kerzenflammen insbesondere unter Windeinfluß bei weitem nicht vollständig bekannt ist. Weitere Untersuchungen zur Rußbildung sind unerlässlich.

In einer modernen Darstellung der Faraday'schen Arbeiten charakterisiert P. Buck [2] die Kerzen als:

- geniale Erfindung des Menschen
- Beleuchtungsmittel (Kerzenzivilisation im Abendland)
- Modell für Regelkreisvorgänge, die auch beim menschlichen Stoffwechsel - noch komplizierter - ablaufen
- Modell für dynamische Strukturen, welche die Zellatmung oder Fotosynthese ermöglichen.

Zahlreiche Untersuchungen sind über Farbbeeinflussung [13-23] und Parfümierung [13,23] von Kerzenflammen zu finden. Flammenionisierungs-Phänomene werden in Verbindung mit Kerzenflammen diskutiert [24]. Die chemische Zusammensetzung von 3 Zonen in einer Stearin-kerze wird experimentell untersucht [25]. Der Abbrand einer Kerze wird durch sauerstoffhaltige Zusätze (z.B. NaClO_4) verbessert [26]. Über Löschvorgänge von Kerzenflammen wird in [27] berichtet. Neue Methoden der spontanen Verbrennung von Kerzen durch bestimmte Zusätze werden in [28] diskutiert. Die Einflüsse einer Glasfaser-verstärkung in PMMA-Kerzen (Plexiglas) auf die Abbrandgeschwindigkeiten wurden untersucht [29].

Schließlich sei noch auf einige Artikel über Kerzen in Fach- und Handbüchern hingewiesen [30-36].

4 Untersuchungsobjekte, Meßmethoden und Ergebnisse

4.1 Untersuchte Kerzenflammen

Es wurden Kerzenflammen (Dochtflammen) insbesondere der Brennstoffe Paraffin, Stearin und Bienenwachs mit modernen optischen und fotografischen Meßmethoden untersucht. Die festen Brennstoffe und deren Abmessungen sowie ein flüssiger Brennstoff sind in Tab.2 zusammengestellt.

4.2 Simulierung von Zugluft auf die Kerzenflammen

Um den Einfluß von Zugluft auf Kerzenflammen zu untersuchen wurde die in Abb.2 dargestellte Anordnung aufgebaut, die es ermöglicht

die Kerzenflammen mit definiertem Seitenwind anzublasen. Durch ein Anblasrohr gelangt aus einer Druckflasche synthetische Luft mit einem konstant gehaltenen Volumenstrom \dot{V} in die Kerzenflamme. Die Volumenströme wurden so variiert, daß fünf Windgeschwindigkeiten zwischen $u_W=0.3$ und $u_W=0.5$ m/s resultierten. Variiert wurde auch die Anblashöhe durch vertikale Verschiebung des Anblasrohres. Besonders starke Seitenwindempfindlichkeit wurde in den Positionen 1, 2 und 3 des Anblasrohres festgestellt (siehe Abschnitt 4.3).

4.3 Holografische real-time Durchlichtinterferometrie

4.3.1 Optischer Aufbau

Zur trägheitsfreien, berührungslosen und kontinuierlichen Analyse dynamischer Synchronstrukturen, d.h. dynamischer Helligkeitsstrukturen und dynamischer Dichtestrukturen in Kerzenflammen wurde das in Abb.3 schematisch dargestellte Real-time Interferometer eingesetzt. Die Funktion und die Prinzipien des Interferometers sind in [37] ausführlich beschrieben. Das gesamte Flammenfeld der Kerzen wurde, experimentell bedingt, in 80 mm hohen Sektoren zeitlich hintereinander untersucht. Zur Registrierung der Dynamik der Strukturen wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera bei 1000 Bildern/Sekunde eingesetzt.

4.3.2 Synchronstrukturen und ihre grundlegenden Eigenschaften

Es hat sich gezeigt, daß die dynamischen Synchronstrukturen abhängig sind von der Höhe x über dem Brennteller, dem Durchmesser des Brenntellers, der Wachsart und insbesondere von der Zugluft sowie von der Einbrennzeit. Am Beispiel einer Paraffinkerze (Nr.3 in Tab.2) sind die Synchronstrukturen in Abhängigkeit der Höhe x über dem Brennteller in Abb.4 dargestellt. Man erkennt neben der Helligkeitsstruktur der gelbleuchtenden Flamme eine charakteristische thermische Grenzschicht, die bei ungestörter Flamme (ohne Seitenwind) aus nahezu parallelen Interferenzstreifen besteht. Oberhalb der sichtbaren Flamme setzt sich die thermische Grenzschicht fort und geht in die Struktur der thermischen Säule, die aus heißer Luft und heißen Abgasen besteht, über. Die Höhe der thermischen Säule, deren Struktur zunehmend instabil wird, erreicht ein Viel-

faches der sichtbaren Flammenhöhe. Die Anzahl, der gegenseitige Abstand sowie der örtliche Verlauf der dunklen Interferenz-Streifen sind für eine bestimmte Kerzenflamme charakteristisch. So nimmt z.B. der Streifenabstand mit zunehmender Höhe x zu. Dies bedeutet, daß die Dichte- bzw. Temperaturgradienten mit der Höhe x abnehmen. Bei Stearin-Kerzenflammen ist der Streifenabstand – bei gleicher Höhe x – größer als bei Paraffin-Kerzenflammen. Hieraus kann geschlossen werden, daß die Stearinflamme eine etwas geringere Temperatur aufweist als die Paraffinflamme.

4.3.3 Seitenwindeinfluß auf die Synchronstrukturen

Der starke Einfluß von Seitenwind auf Kerzenflammen läßt sich mit der holografischen Synchroninterferometrie detailliert verfolgen. Es ist zweckmäßig die Seitenwindeffekte in Abhängigkeit der 3 Positionen des Anblasrohres (siehe Abb.2) zu diskutieren:

Position 1 (Seitenwind bläst auf die thermische Säule oberhalb der Flamme)

Bläst der Seitenwind über der sichtbaren Flamme, dann bleibt sie davon nahezu unbeeinflußt und neigt, auch bei höheren Windgeschwindigkeiten u_w nicht zur Rußemission. Die Wirkung des Seitenwindes beschränkt sich hier auf ein Zusammendrücken des aufsteigenden Warmluftschlauches, der schließlich zerreißen kann.

Position 2 (Seitenwind bläst auf Flamme)

Bei geringer Windgeschwindigkeit u_w neigen sich Flamme mit thermischer Grenzschicht in Windrichtung zur Seite. Hierbei kommt es weder zu Rußemissionen noch zu Schwingungen. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit werden die Interferenzstreifen auf der Windseite zusammengedrückt und im Windschatten erhöht sich ihr Abstand. Bei noch größerer Windgeschwindigkeit bilden sich zusätzliche Interferenzstreifen im Flammeninnern und es treten starke Deformationen der Interferenzstreifen bis zu deren Ringbildung auf. Es entsteht eine Dynamik von Dichtebällen, die als typische Quellen und/oder Senken vorkommen, wobei die Flamme gleichzeitig Ruß emittiert. Das gesamte Interferenzmuster ist örtlich und zeitlich instabil geworden.

Position 3 (Seitenwind bläst auf Wachskörper)

Bläst der Seitenwind unmittelbar unterhalb des Brenntellers auf den Wachskörper (siehe Abb.2) dann wird die Flamme und ihr Interferenzfeld am stärksten, d.h. am empfindlichsten beeinflusst. Dieser Effekt ist deutlich daran zu erkennen, daß sich bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten Dichteballen in Nähe des Brenntellerrandes ausbilden, die nach oben wandern und zu ausgeprägten Einschnürungen der thermischen Grenzschicht und somit zu Schwingungen führen. Hiermit verbunden ist die Emission von Rußwolken. Die Dichteballen und Einschnürungen der Grenzschicht sind auch in größerem Abstand x vom Brennteller noch gut ausgeprägt und sind in Abb.5 dargestellt.

4.4 Farb-Thermografie

4.4.1 Meßprinzip

Das Meßprinzip der Farb-Thermografie geht aus Abb.6 hervor und ist in [38] detailliert beschrieben. Danach wird die unsichtbare Infrarot-Strahlung z.B. einer Kerzenflamme im Wellenlängenbereich $2\mu\text{m} \leq \lambda \leq 5.6\mu\text{m}$ mit einem speziellen IR-Detektor in elektrische Signale umgewandelt. Die elektrischen Signale werden mit den Mitteln der Fernstechnik in eine sichtbare zunächst schwarz/weiße Helligkeitsverteilung (s/w-Wärmebild) transformiert. Zur detaillierten Analyse dieser Helligkeitsverteilung können bis zu 16 Graustufen jeweils farbig dargestellt werden (Farb-Wärmebild). Die Registrierung der Meßdaten erfolgt analog auf Videoband und/oder digital auf Disketten. Eine digitale Speicherung von Wärmebildern ist mit einer Bildfrequenz von 20 Bildern/Sekunde möglich. Das Thermografiesystem arbeitet im Temperaturbereich zwischen -20°C und 1500°C bei einer maximalen Auflösung von 0.1°C . Zusätzlich können die digitalen Wärmebilder von einem IBM Personal Computer abgerufen und verarbeitet werden.

4.4.2 Wärmestrukturen und ihre grundlegenden Eigenschaften

Die Wärmebilder einer Kerzenflamme geben die Wärmestrukturen in Form einer örtlichen und zeitlichen Temperaturverteilung innerhalb, außerhalb und über der Flamme an. Zu beachten ist aller-

dings, daß die durchsichtigen Kerzenflammen keine schwarzen Strahler sind und somit Emissionskoeffizienten $\epsilon < 1$ besitzen. Dieser Emissionskoeffizient ϵ muß berechnet oder gemessen werden und kann in das Thermografiesystem eingegeben werden, das dann die Temperaturverteilung automatisch korrigiert.

Es hat sich gezeigt, daß auch die Wärmestrukturen von Kerzenflammen abhängig sind von der Höhe x über dem Brennteller, der Dicke der Flamme, der Wachsort und insbesondere von der Zugluft sowie von der Einbrennzeit. Am Beispiel einer Paraffinkerze (Nr.3 in Tab.2) ist die Höhenabhängigkeit der Wärmestrukturen in Abb.7 dargestellt. Es fällt auf (Abb.7), daß die Wärmestrukturen in ihrer Form i.a. der sichtbaren Flammenkontur folgen jedoch noch weit oberhalb der Flammenspitze verlaufen. Auf den Wärmebild-Filmaufnahmen ist von der Dynamik der Wärmestrukturen z.B. das Aufsteigen heißer Flammengase deutlich sichtbar.

Erste quantitative Untersuchungen haben ergeben, daß in einer Kerzenflamme große Temperaturgradienten in radialer Richtung und deutlich kleinere in axialer Richtung vorliegen. Die Ermittlung von Flammentemperaturen ist möglich jedoch etwas aufwendig in der Auswertung, bei der insbesondere die Form der Flamme und ihr Emissionsvermögen zu berücksichtigen ist.

4.4.3 Seitenwindeinfluß auf die Wärmestrukturen

Der Seitenwind - zur Untersuchung seines Einflusses auf die Wärmestrukturen - wurde wie in Abschnitt 4.3.3. beschrieben, experimentell erzeugt. Es hat sich gezeigt, daß die Dynamik der Wärmestrukturen ganz analoge Effekte zeigt, wie die der Synchronstrukturen. Allerdings ist zu beachten, daß die zeitliche Auflösung des Thermografiesystems mit 20 Bildern/Sekunde im Vergleich zur holografischen Interferometrie mit $\geq 1\ 000$ Bildern/Sekunde geringer ist. Dennoch ist gut zu erkennen, daß der Seitenwind die Wärmestrukturen insbesondere in ihrer Form definiert verändert, wodurch schließlich auch Schwingungen, d.h. das Flackern der Kerzenflammen zu beobachten ist. Hinzu kommt, daß auch eine Emission von Rußwolken bei Seitenwindeinfluß auftritt. Ebenso läßt sich eine starke Verkürzung des Warmluftschlauches über den Kerzenflammen beobachten, der bei höheren Windgeschwindigkeiten in einzelne Wärmeballen

zerreißen kann, die nach oben steigen.

4.5 Digitale Bildauswertung von Fotogrammen

4.5.1 Meßprinzip

Zur Sichtbarmachung und Analyse dynamischer Äquidensitenstrukturen (Helligkeitsstrukturen) des mit dem Auge sichtbaren Flammenfeldes einer Kerze wurde die Schwärzungsinformation von Flammenfotogrammen digital ausgewertet (Abb.8). Das von einem Leuchtkasten durchstrahlte Fotogramm z.B. einer Kerzenflammen wird von einer S/W-TV-Kamera abgetastet. Das Videosignal wird in einem A/D Wandler mit 8 bit Auflösung (256 Graustufen) digitalisiert und in einem Bildspeicher mit einer Kapazität von 512 x 512 Bildpunkten abgelegt. Mit Hilfe des Rechners können u.a. Linien konstanter optischer Dichte, d.h. konstanten Grauwerts des Fotogramms in Pseudofarbdarstellung auf dem Monitor wiedergegeben werden. Die von diesen Farblinien gebildeten Strukturen werden als Äquidensitenstrukturen bezeichnet. Weitere experimentelle Details finden sich in [37] und [39].

4.5.2 Äquidensitenstrukturen und ihre grundlegenden Eigenschaften

Die dynamischen Äquidensitenstrukturen geben den zeitlichen und örtlichen Verlauf der Helligkeit (Strahldichte), d.h. der sichtbaren Emission der Kerzenflamme wieder. Die Helligkeit wird zwar hauptsächlich von der Temperaturverteilung bestimmt, hängt aber – nicht ganz einfach – insbesondere von der Flammgeometrie, der Konzentration und Größenverteilung der vorhandenen Rußteilchen und den Gaskonzentrationen an CO_2 und H_2O ab [37,40]. Es hat sich gezeigt, daß die dynamischen Äquidensitenstrukturen ebenfalls charakteristisch abhängig sind von der Höhe x über dem Brennteller, der Dicke der Flamme, der Wachsort, der Einbrennzeit und insbesondere der Zugluft.

Eine quantitative Auswertung der Äquidensitenstrukturen im Zusammenhang mit der Emission von Rußteilchen liegt – aus Zeitgründen – leider bisher nicht vor.

4.5.3 Seitenwindeinfluß auf die Äquidensitenstrukturen

Auch die Äquidensitenstrukturen hängen sehr stark vom Einfluß

seitlicher Luftströmungen ab. Am Beispiel einer Paraffinkerze (Nr.3 in Tab.2) ist der Seitenwindeinfluß auf die Äquidensitenstrukturen dieser Flamme in Abb.9 dargestellt. Man erkennt, daß die Äquidensitenstrukturen unter Windeinfluß rechteckähnliche Streifenmuster ausbilden. Ebenfalls deutlich sichtbar ist das Fehlen der für Kerzenflammen typischen Flammenspitze, wenn Seitenwind bläst.

4.6 Quantitative Rußbestimmungsmethode

4.6.1 Rußtest-Apparatur

Der von einer Kerzenflamme emittierte Rußmassenstrom \dot{m}_R (in mg/h) wurde gravimetrisch mit der in Abb.10 schematisch angegebenen Rußtest-Apparatur bestimmt. Hierbei werden die Rußteilchen auf einer mindestens 40 cm über der Flamme angebrachten Glasfritte von 12 cm Durchmesser abgeschieden. Die Fritte befindet sich in einem Trichter, der mit seinem weiten Ende nach unten aufgehängt und oben mit einer Wasserstrahlpumpe verbunden war, um über der Fritte einen leichten Unterdruck zu erzeugen und so die Rußabscheidung zu erleichtern. Die Fritte weist bei mehrstündiger Lagerung im Exsikator über CaCl_2 eine hinreichende Gewichtskonstanz auf.

4.6.2 Gemessene Rußmassenströme

Mit der in Abschnitt 4.6.1 beschriebenen Apparatur wurden an insgesamt 16 verschiedenen Kerzenflammen (siehe Tab.2) – jeweils ohne Windeinfluß – die emittierten Rußmassenströme \dot{m}_R gemessen. Die jeweils über 6 h gemittelten Massenströme \bar{m}_R sowie die maximalen und minimalen Massenströme $\dot{m}_{R,\max}$ bzw. $\dot{m}_{R,\min}$ sind in Tab.3 zusammengestellt. Die Meßgenauigkeit beträgt $\dot{m}_R > 0.017$ mg/h. Wie aus Tab.3 zu ersehen, liegt der über $n=5$ Messungen gemittelte Rußmassenstrom \dot{m}_R zwischen 0.02 und 0.32 mg/h.

Die Auswertung der gemessenen Rußmassenströme führte zu folgenden 3 Beobachtungen:

1. Paraffinkerzen rußen – grundsätzlich – nicht stärker als Stearinkerzen.

2. Die Rußemission ist zeitabhängig: es treten periodische und völlig unregelmäßige Emissionsschwankungen auf. Es existieren offensichtlich mehrere Brennphasen mit unterschiedlicher Rußemission.
3. Dickere Kerzen neigen mit zunehmender Brenndauer und damit zunehmender Erwärmung des Wachses zu stärkerer Rußemission.

Es wird vermutet, daß für andauernde, starke Rußemissionen folgende Ursachen in Betracht kommen:

1. zu dicker Docht, so daß der Wachsmassenstrom \dot{m}_{Wachs} zu groß wird.
2. Das Wachs enthält Verunreinigungen, z.B. langkettige, ungesättigte oder aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Pigmente und Metallflitter.
3. Senkrecht stehender Docht, der Rußklumpen bildet.
4. Große Sensibilität von Parametern (z. Teil noch unbekannt), die miteinander wechselwirken und zum zeitweiligen Rußen führen.

4.7 Chromatografisches Verfahren zur Untersuchung der Saugfähigkeit von Dochten

Unterschiedlich dicke Rund- und Flachdochte aus Baumwolle wurden mit Hilfe eines einfachen chromatografischen Verfahrens auf ihre Saugfähigkeit untersucht (Abb.11). Hierzu wurden gleichlange Dochtstücke auf einer Glasplatte befestigt und mit ihren unteren Enden senkrecht in eine Farbstofflösung (z.B. Ethanol/Rhodamin B) getaucht. Gemessen wurde die erreichte Höhe der aufsteigenden Farbstofffront bei jeweils konstanter Steigzeit.

Die Auswertung der Versuche führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Die Steighöhen sind unabhängig von Dochtdicke und Flechtart. Sie hängen allerdings vom Farbstoff und Lösungsmittel ab.
2. Der Flüssigkeitstransport erfolgt vorwiegend entlang der Dochoberfläche. Künstlich angebrachte Risse einzelner Fäden vermindern nur minimal die Steighöhe.
3. Auswaschen der Imprägnierung: kein Einfluß auf die Steighöhe.

4. Transportierter Wachsmassenstrom \dot{m}_W :

$\dot{m}_W \sim \text{Dochtumfang} \sim d$ nicht $\dot{m}_W \sim \pi d^2 / 4$ (Dochtquerschnittsfläche).

5 Schlußfolgerungen und Ausblick auf zukünftige Aktivitäten

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen klar, daß moderne berührungsfreie Meßmethoden wie die holografische real-time Durchlichtinterferometrie, die Farb-Thermografie sowie die digitale Bildauswertung von Fotogrammen zur Untersuchung von so schwierigen Meßobjekten wie z.B. Kerzenflammen besonders gut geeignet sind. Speziell mit diesen modernen optischen und fotografischen Meßmethoden, die bisher noch nicht auf Kerzenflammen angewandt wurden, ist es möglich, zusammen mit der entwickelten Rußtest-Apparatur, die Wirkung von Zugluft auf die Rußemission von Kerzenflammen sichtbar zu machen und quantitativ zu erforschen. Ein großer Vorteil dieser Methoden ist weiterhin, daß es sich nicht um kompliziert auszuwertende und zeitaufwendige Punktmessungen handelt, sondern um die Erfassung der Dynamik des gesamten Flammenfeldes mit Umgebung. Schließlich ist hervorzuheben, daß sich diese drei modernen Meßmethoden gegenseitig ergänzen.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens, nämlich die Prüfung der oben diskutierten modernen Meßmethoden auf ihre Anwendbarkeit zur Untersuchung von Kerzenflammen, ist also voll erreicht worden.

Sehr günstig für zukünftige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Kerzenflammen, insbesondere im Hinblick auf mögliche Rußemissionen durch Zugluft, ist die z.Zt. im Aufbau befindliche Erweiterung des holografischen Interferometers auf einen Gesichtsfeld-durchmesser von bisher 8 cm auf 25 cm.

Zu systematischen Untersuchungen der Rußemission von Kerzenflammen sollten folgende Einflüsse beachtet werden:

1. die Auswirkung von Seitenwind unterschiedlicher Stärke und unterschiedlicher Anblashöhe sowie unterschiedlichen Sauerstoffgehalts auf die emittierte Gesamt-Rußmasse. Es wird erwartet, daß die Bedingungen und Ursachen der vermehrten

Rußemission durch Analyse der Synchron-, Wärme- und Äquidensitenstrukturen quantitativ erklärt werden kann.

2. Auswirkung der Wachstyp auf die emittierte Rußmasse. Es wird auch hier von einer Analyse der Synchron-, Wärme- und Äquidensitenstrukturen sowohl der Ort vermehrter Rußemission als auch deren Ursache erwartet.
3. Auswirkung der verfahrenstechnischen Herstellung (z.B. stranggepreßt, pulveragepreßt oder gezogen) des Wachskörpers auf die Rußemission.
4. Auswirkung des Doctes, z.B. Dicke, Krümmung, Material, Stellung und Länge auf die Rußemission.
5. Auswirkung des Wachskörperdurchmessers und der Form des Wachskörpers im Bereich des Brenntellers auf die Rußemission.
6. Auswirkung der Wechselwirkung mehrerer Flammen auf die Rußemission.
7. Auswirkung der Rußteilchen auf die Brillanz ("Schönheit") des Kerzenlichtes. Dieser Effekt erfordert eine Minimalkonzentration an Rußteilchen in der Flamme und sollte quantitativ mit den Äquidensitenstrukturen diskutiert werden.
8. Serienversuche, ausgeführt von einem(r) Chemotechniker(in).

6 Literaturverzeichnis

- |1| F. Bacon, in: W.A. Bone, D.T.A. Townend: Flame and Combustion in Gases, Longmans, Green and Co., Inc., New York (1927), Kapitel 2
- |2| M. Faraday: Naturgeschichte einer Kerze, Verlag B. Franzbecker, Bad Salzdetfurth (1979), 2. Aufl. (1980); mit Einführung von P. Buck
- |3| H.J. Hübner, H. Kläukens: Ann. Phys., Leipzig 39 (1941), 33
- |4| W.G. Parker, H.G. Wolfhard: J. Chem. Soc. (1950), 2038
- |5| A.G. Gaydon, H.G. Wolfhard: Flames, their Structure, Radiation and Temperature, Chapman and Hall, London, (1979), 155
- |6| F.A. Williams: Urban and Wildland Fire Phenomenology, Prog. Energy Comb., Sci. 8 (1982), 317/354
- |7| J. Walker: Scientific American 238 (1978), 154/162
- |8| J.H. Kent, H.Gg. Wagner: Warum rußen Diffusionsflammen?, Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie 38 (1985), 543/549
- |9| J.H. Kent, H.Gg. Wagner: 20. Symp. (Int.) Combust., 1007/1015, The Combustion Institute, Pittsburg (1985)
- |10| H.Gg. Wagner: Soot Formation in Combustion, 17. Symp. (Int.) Combust., 3/19, The Combustion Institute, Pittsburg (1979)
- |11| K.H. Homann: Schadstoffbildung und ihre Vermeidung, Nachr. Chem. Techn. Lab. 31 (1983), 258/262
- |12| K.H. Homann, H.Gg. Wagner: Rußbildung in Flammen, Bild der Wissenschaft 7 (1970), 763/769
- |13| B. Lutze-Birk, J. Dobrowolski, W. Zablotny: Propellants and Explosives 50 (1982), Heft 8
- |14| S. Mamaev: Khim. Zhizn 6 (1978), 75
- |15| D. Zelazko, D. Wolinska-Tomoszewicz, H. Sikorski: Propellants and Explosives 50 (1975), Heft 1
- |16| S. Fujiwara: Propellants and Explosives: 50 (1974), Heft 1
- |17| J. Cangardel: Fats and Waxes 45 (1974), Heft 2

- |18| M. Hatton, H. Watanabe: Petroleum, Petroleum Derivates and Related Products 51 (1972), Heft 12
- |19| A. Wassermann: Petroleum, Petroleum Derivates and Related Products 51 (1971)
- |20| C.A. Carey: Propellants and Explosives 50 (1969)
- |21| E. Gruaz: Fats and Waxes 45 (1968)
- |22| E. Hamsag, X. Hamsag: Fats and Waxes 45 (1966)
- |23| H. Hartmann, S. Liesenberg: Seifen - Öle - Fette - Wachse 98 (1972), Heft 6
- |24| T. Mc Allister: Chem. Aust. 50 (1983), 242/245
- |25| O. Bostrop, C. Rolin, S.M. Jorgensen: Dan. Kemi 63 (1982), 214
- |26| T. Yuki: Fossil Fuels, Derivates and Related Products 51 (1981)
- |27| M. Whittaker: Sch. Sci. Rev. 62 (1980), 177/180
- |28| A.N. Efremov, V.V. Toropov: Khim. Shk (1980), Heft 2
- |29| J.W. Barlow: J. Appl. Polym. Sci. 21 (1977) 21, 301/317
- |30| W. Weidenfeld: Wichtige Kriterien bei der Herstellung von Qualitätskerzen, Verlag für chemische Industrie H. Ziolkowsky KG, Augsburg (1983)
- |31| Fachbuch für den Wachszieher und Wachsbildner, Bayerische Wachszieher-Innung, Augsburg (1982)
- |32| Ullmanns Encyklopädie der Technischen Chemie, Bd. 24, S.35 4. Aufl. (1983), Verlag Chemie, Weinheim
- |33| Ullmanns Encyklopädie der Technischen Chemie, Bd. 9, S.533/537, 3. Aufl. (1957), Urban und Schwarzenberg, München
- |34| Römpps Chemie-Lexikon, Bd. 3, S. 2096, 8. Aufl. (1983), Bd.3, S. 1761, 7. Aufl. (1973) und Bd. II, S.3230/3231, 6. Aufl. (1966), Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart
- |35| Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology, Bd. 4, S. 58/63, 2. Aufl. (1964), John Wiley, New York
- |36| R. Buell: Vom Wachs 1 (1967), 679/784

- [37] A. Schönbacher: Wärme-, Stoff- und Impulstransportvorgänge unter besonderer Berücksichtigung kohärenter Strukturen in Tankflammen organischer Flüssigkeiten, Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 6, Nr. 83 (1981)
- [38] D. Göck: Blockierung der Wärmestrahlung durch Ruß bei großen Diesel-Benzin-Poolflammen, Diplomarbeit, 1. Institut für Technische Chemie, Universität Stuttgart (1985)
- [39] V. Schenk: Experimentelle Untersuchung zur Formierung von Wolken luftfremder Stoffe beim Ausströmen aus Druckbehältern, Dissertation, 1. Institut für Technische Chemie, Universität Stuttgart (1986)
- [40] A. Schönbacher, W. Brötz und A. Kettler: Radiale Verteilung von Emissionskoeffizienten im sichtbaren und infraroten Spektralbereich in n-Hexan- und Methanol-Tankflammen, Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 89 (1985), 484/490

7 Anhang

7.1 Tabellen

Tab.1 Kurzer historischer Abriss der Erforschung des Feuers
im Hinblick auf Kerzenflammen

Tab.2 Brennstoffe Nr. 1 bis 16 der untersuchten Kerzenflammen

Tab.3 Gemessene Rußmassenströme \dot{m}_R , die bei den in Tab.2
aufgeführten Kerzenflammen emittiert werden, wenn
keine Windbeeinflussung vorliegt.

Tabelle 1

ca. 600 000 v. Chr.:	Mensch macht Gebrauch vom Feuer
ca. 30 000 v. Chr. :	Mensch kann Feuer entzünden
ca. 500 v. Chr.:	<u>Heraclit</u> : Feuer ist fundamentale Substanz
ca. 450 v. Chr.:	<u>Empedokles</u> } Feuer ist eines der 4 Elemente
ca. 350 v. Chr.:	<u>Aristoteles</u> }
bis ca. 1350 / 1520 n. Chr. (Renaissance)	
	<u>Alchimisten</u> : Feuer ist göttliche Emanation
ca. 1600	F. Bacon: beobachtet Struktur der Kerzenflamme
ca. 1650 bis 1777	Phlogiston-Theorie: alle brennbaren Stoffe enthalten einen Wärmestoff, der bei Verbrennung entweicht.
1777	Lavoisier: Verbrennung ist Oxidationsvorgang
1785	I. Kant: Dissertation über das Feuer
1860/61	M. Faraday: 6 Vorlesungen über Kerzen
ab 1927	Beginn moderner Verbrennungstheorien
1941	Hübner/Klänkens: Interferometerbild einer Kerzenflamme
1950	Parker/Wolfhard: Schlierenbild einer Kerzenflamme
1953	Gaydon/Wolfhard: Temp.-Feld, Diffusionsflamme
1978	J. Walker: Physik und Chemie unterstreichen den unendlichen Charme einer Kerze
1979/80	M. Faraday: Naturgeschichte einer Kerze, mit einer Einleitung u. Biografie von P. Buck

Tabelle 2

1. Stearin gegossen, ϕ 22 mm, 12 cm lang
2. gezogene Altarkerze, 10 % Bienenwachs, ϕ 80 mm
3. Paraffin pulvergepreßt, ϕ 50 mm
4. Paraffin stranggepreßt, ϕ 50 mm
5. mit gelbem Relief verzierte Kerze, weicher umfallender Docht
6. westdeutsches Paraffin gezogen, ϕ 22 mm, 19 cm lang
7. ostdeutsches Paraffin gezogen, ϕ 22 mm, 19 cm lang
8. chinesisches Paraffin gegossen, ϕ 70 mm, verkehrt herum eingezogener Runddocht
9. Paraffin gezogen, altrosa getaucht (Adventskerze), ϕ 25 mm, 10 cm lang
10. chinesisches Paraffin gegossen, violett durchgefärbt, ϕ 70 mm
11. 10 % Bienenwachs gezogen, getaucht, ϕ 35 mm
12. 100 % Bienenwachs gegossen, Spitzkerze, sehr dünn
13. Paraffin gegossen, Spitzkerze, ϕ 10-23 mm, 25 cm lang
14. Paraffin pulvergepreßt, blau getaucht, ϕ 60 mm
15. Goldhauchkerze, rot getaucht, ϕ 20 mm, 19 cm lang
16. "Kerzolin" (flüssiger Brennstoff in Metallbehälter abgefüllt)

Tabelle 3

Kerzen- Nr.	Anzahl der Messungen	mittl. Ruß- massenstrom \bar{m}_R (mg/h)	$\dot{m}_{R,min}$ (mg/h)	$\dot{m}_{R,max}$ (mg/h)
1	5	0,04	0,03	0,05
2	5	0,16	0,12	0,25
3	5	0,08	0,05	0,10
4	5	0,08	0,03	0,15
5	5	0,11	0,05	0,18
6	5	0,09	0,02	0,13
7	5	0,17	0,12	0,22
8	5	0,32	0,11	0,80
9	5	0,09	0,03	0,18
10	5	0,09	0,03	0,13
11	4	0,12	0,02	0,23
12	1	0,03	----	----
13	5	0,02	0,01	0,05
14	1	1,43	----	----
15	5	0,08	0,07	0,10
16	5	0,04	0,02	0,07

ohne Windeinfluß

7.2 Abbildungen

- Abb.1 a) Temperaturverteilung und unterschiedliche Zonen sowie
b) Verbrennungsvorgänge in einer Kerzenflamme
- Abb.2 Experimentelle Anordnung zur Simulation des Einflusses von
Seitenwind der Geschwindigkeit u_w auf Kerzenflammen; die
besonders signifikanten vertikalen Positionen 1,2 und 3 des
Anblasrohres sind eingezeichnet.
- Abb.3 Holografisches real-time Durchlichtinterferometer zur
simultanen Sichtbarmachung und Analyse von Helligkeits-
strukturen und Dichtestrukturen in Kerzenflammen
- Abb.4 Synchronstrukturen einer pulvergepreßten Paraffinkerzen-
flamme, ϕ 50 mm, in Abhängigkeit der Höhe x über dem Brenn-
teller, ohne Seitenwindeinfluß
a) - $2,3 \text{ cm} \leq x \leq 5,6 \text{ cm}$ und
b) $1,5 \text{ cm} \leq x \leq 9,5 \text{ cm}$
Die Belichtungszeit ist $1/2500 \text{ s}$, die Einbrennzeit 2 Minuten
- Abb.5 Dichtestrukturen einer pulvergepreßten Paraffinkerzenflamme,
 ϕ 50 mm, in Abhängigkeit der Höhe x über dem Brennteller
mit Seitenwindeinfluß (Anblasrohr in Position 3)
a) $0 < x < 8 \text{ cm}$, laminare Vergleichsstruktur ohne Windeinfluß
b) $0 < x < 8 \text{ cm}$, Seitenwind bläst von links nach rechts auf
Wachskörper; es bilden sich Einschnürungen
und Dichteballen, die nach oben wandern;
gleichzeitig emittiert die Flamme Rußwolken
c) $8 < x < 16 \text{ cm}$, Seitenwind wie in (b) auf Wachskörper; deut-
lich sind Dichteballen und verstärkte
Einschnürungen zu beobachten
- Abb.6 Modularer Aufbau des Farbthermografiesystems zur Sichtbar-
machung und Analyse von Wärmestrukturen in Kerzenflammen

Abb.7 Wärmestrukturen einer pulvergepreßten Paraffinkerzenflamme, ϕ 50 mm, in Abhängigkeit der Höhe x über dem Brennteller, ohne Seitenwindeinfluß
die Bildaufnahmefrequenz ist 20 Bilder/Sekunde

Abb.8 Digitales Bildauswertesystem zur Sichtbarmachung und Analyse dynamischer Äquidensitenstrukturen in Kerzenflammen

Abb.9 Dynamische Äquidensitenstrukturen einer pulvergepreßten Paraffinkerzenflamme, ϕ 50 mm
a) ohne Seitenwind
b) mit Seitenwind von rechts nach links
Die Belichtungszeit der zugehörigen Fotogramme beträgt 1/125

Abb.10 Rußtest-Apparatur zur Messung des Rußmassenstroms \dot{m}_R , der von Kerzenflammen emittiert wird; der Ruß sammelt sich auf der Glasfritte, deren Masse nach einer bestimmten Zeit ermittelt wird

Abb.11 Anordnung (schematisch) zur Messung der Saugfähigkeit von Baumwolldochten; gemessen wurde die Steighöhe in Abhängigkeit der Zeit.

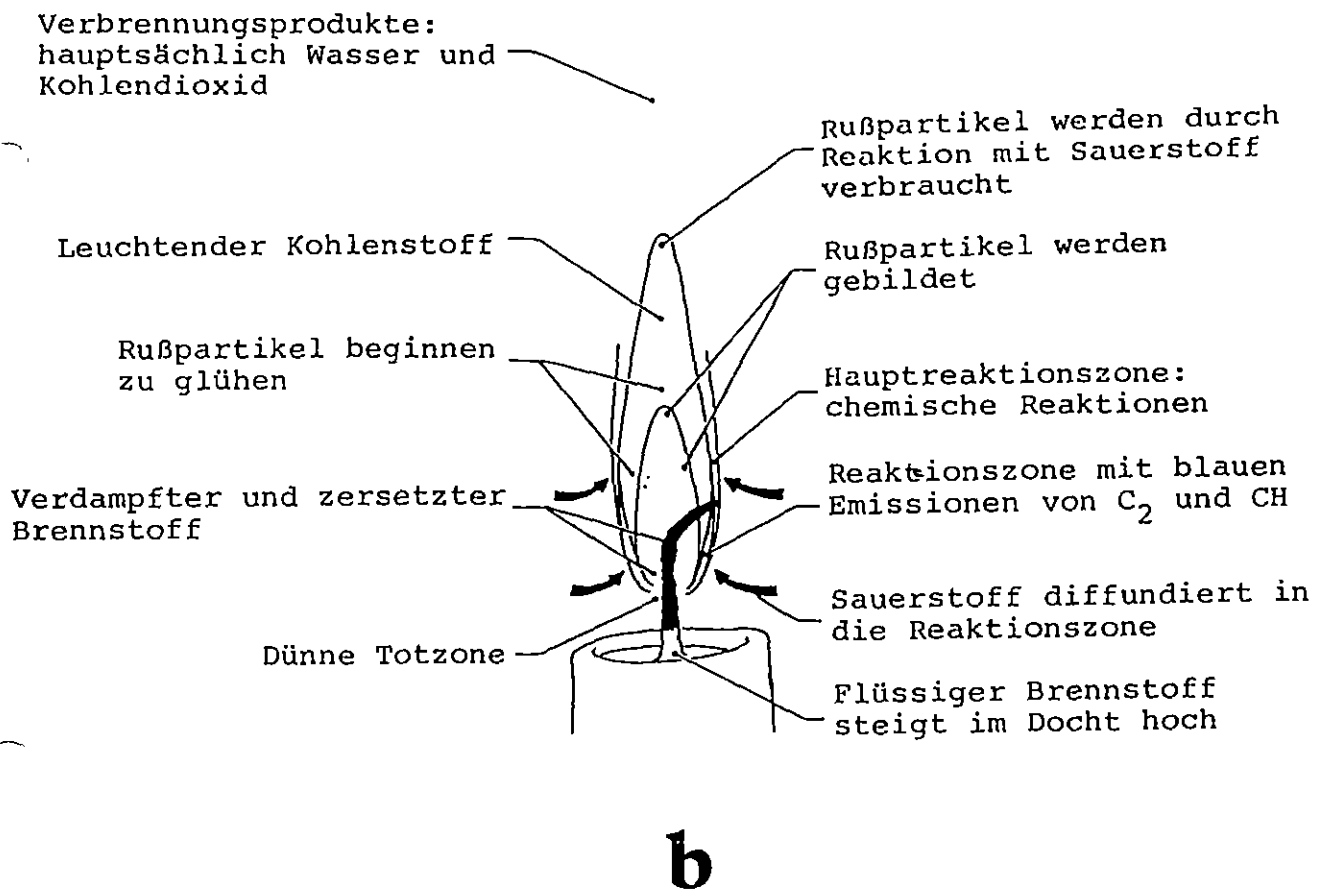


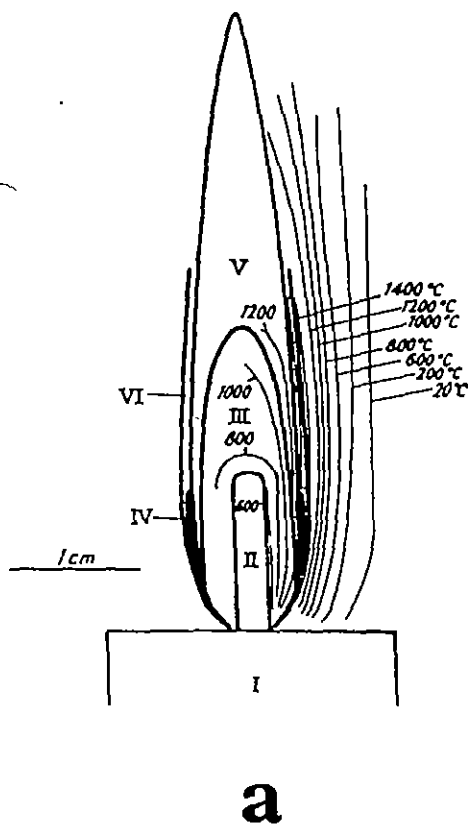
Abb. 1 (b) Verbrennungsvorgänge in der Kerzenflamme

Dunkelzone : 800 bis 1000° C; brennstoffreich, sauerstoffarm; Crackprozesse, Rußbildung und-Wachstum

Blaue Zone : meist außerhalb der Leuchtzone; heißeste Zone durch Reaktion mit Luftsauerstoff; komplexe Reaktionen (noch zu wenig verstanden); blaue Emissionen durch C_2 - und CH- Radikale; teilweise Rußbildung: an Basis wird Luft angesaugt infolge Auftrieb heißer Flammengase (sauerstoffkatalysierte Pyrolyse)

Leuchtzone : Beginnt innerhalb der Hauptreaktionszone und schließt sich an Flammenspitze; gelbe Emission heißer Rußpartikel, die (teilweise) auch verbrennen, Luftzufuhr verstärkt Verbrennung der Rußteilchen

Hauptreaktionszone : sehr heiße Oxidationszone



I: Wachskörper, II: Docht, III: Dunkelzone, IV: blaue C_2 und CH-Zone, V: Leuchtende Zone, VI: Hauptreaktionszone.

Abb. 1 (a) Temperaturverteilung und unterschiedliche Zonen in einer Kerzenflamme

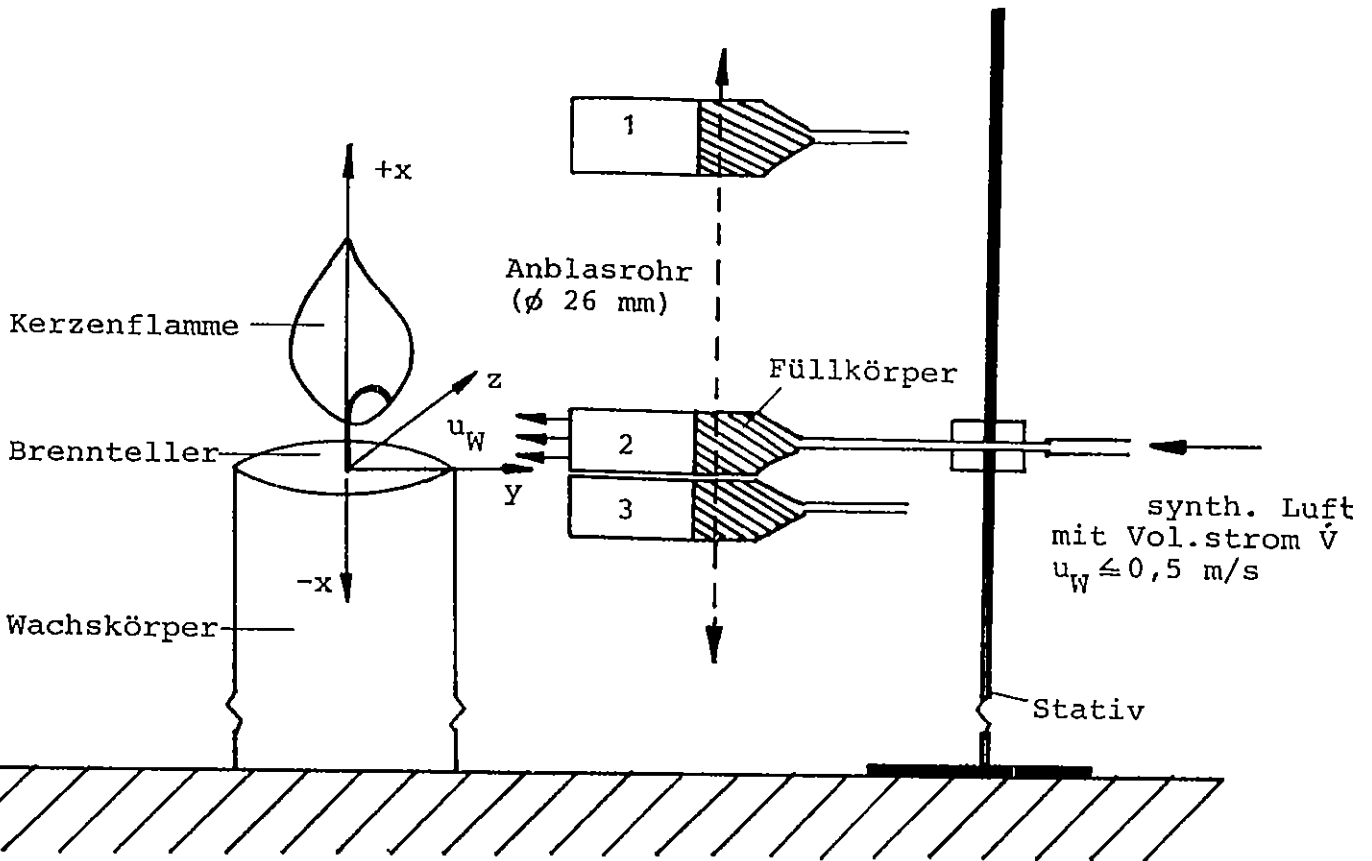


Abb. 2 Experimentelle Anordnung zur Simulation des Einflusses von Seitenwind der Geschwindigkeit u_w auf Kerzenflammen; die besonders signifikanten vertikalen Positionen 1, 2 und 3 des Anblasrohres sind eingezeichnet.

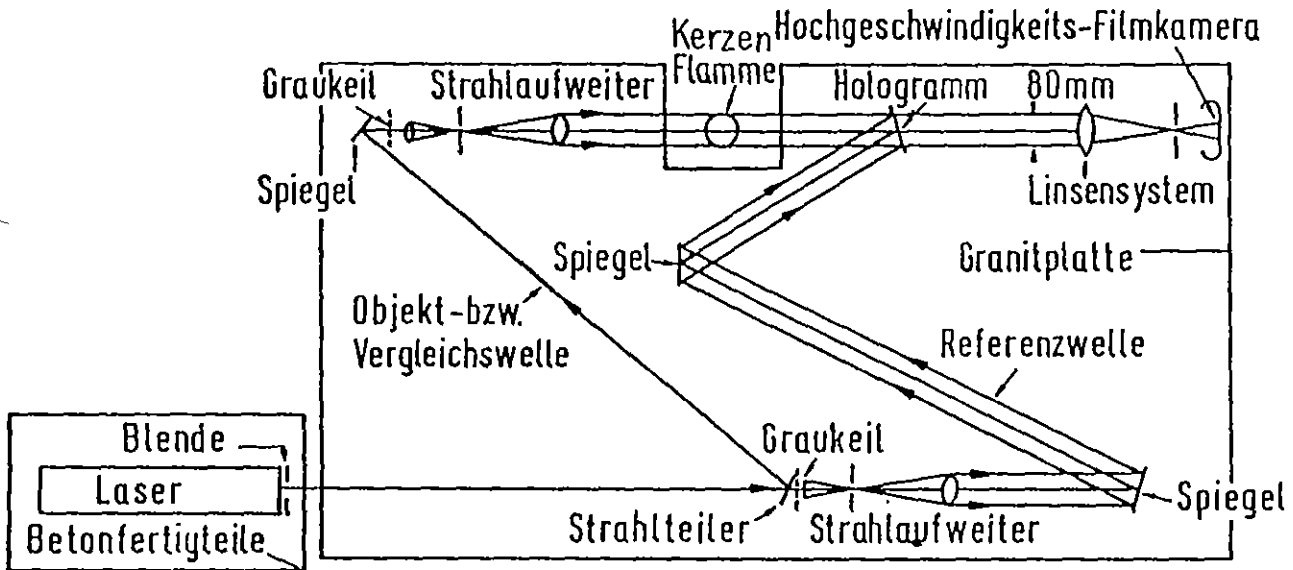
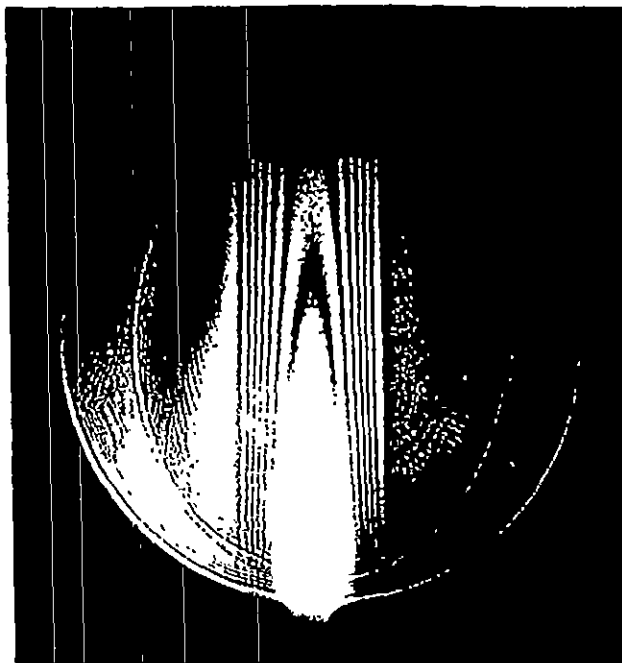
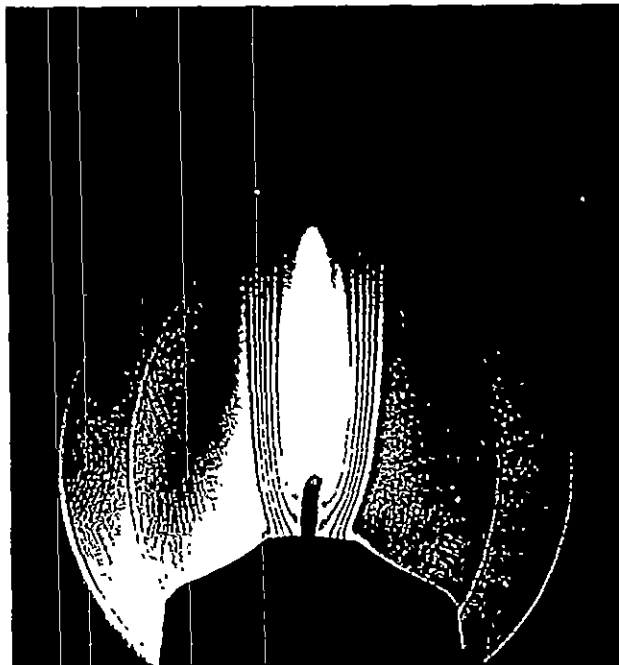


Abb. 3 Holografisches real-time Durchlichtinterferometer zur simultanen Sichtbarmachung und Analyse von Helligkeitsstrukturen und Dichtestrukturen in Kerzenflammen.



b



a

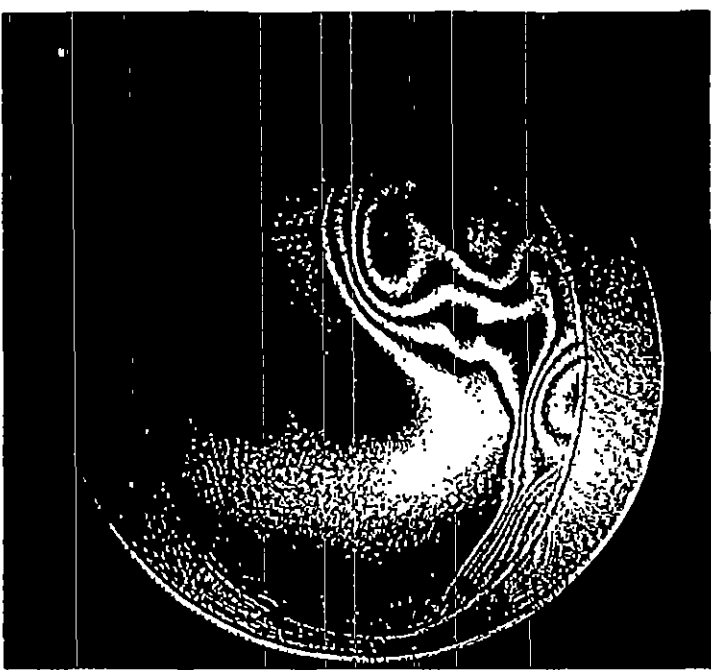
Abb. 4 Synchronstrukturen einer pulvergepreßten Paraffin-
kerzenflamme, \varnothing 50 mm, in Abhängigkeit der Höhe x
über dem Brennteller, ohne Seitenwindeinfluß

a) $-2,3 \text{ cm} \leq x \leq 5,6 \text{ cm}$ und

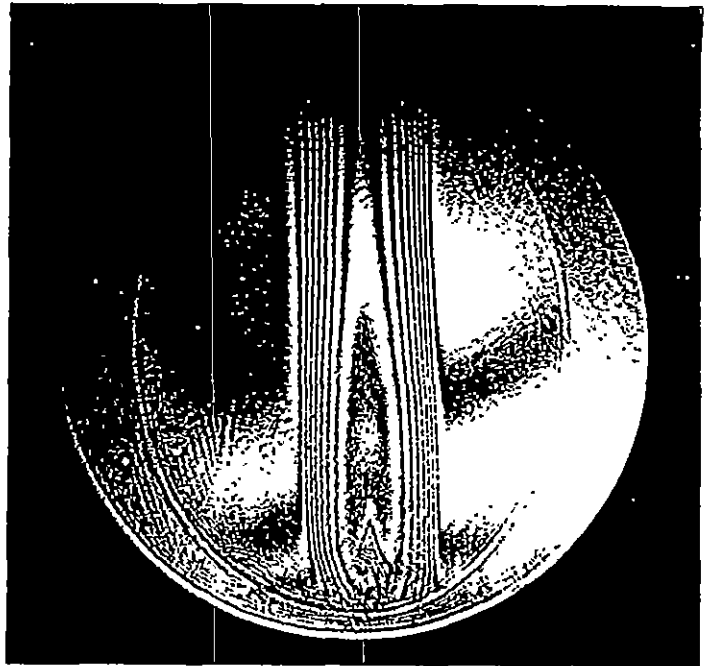
b) $1,5 \text{ cm} \leq x \leq 9,5 \text{ cm}$

Die Belichtungszeit ist $1/2500 \text{ s}$, die Einbrennzeit 2 min.

c



a



b

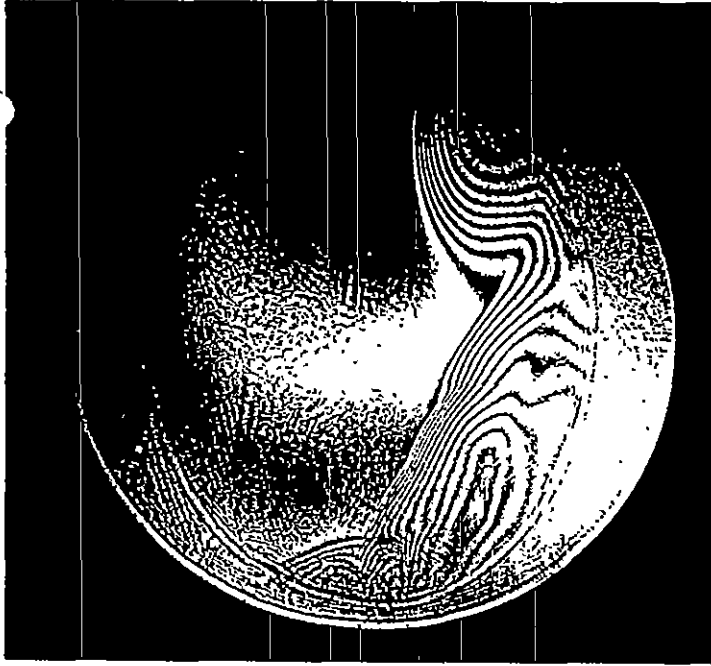


Abb. 5 Dichtestrukturen einer pulvergepreßten Paraffin-
kerzenflamme, \varnothing 50 mm, in Abhängigkeit der Höhe x
über dem Brennteller mit Seitenwindeinfluß
(Anblasrohr in Position 3);

- (a) $0 < x < 8$ cm, laminare Vergleichsstruktur ohne
Windeinfluß
- (b) $0 < x < 8$ cm, Seitenwind bläst von links nach rechts
auf Wachskörper; es bilden sich Einschnürungen
und Dichteballen, die nach oben wandern;
gleichzeitig emittiert die Flamme Rußwolken.
- (c) $8 < x < 16$ cm, Seitenwind wie in b) auf Wachskörper;
deutlich sind Dichteballen und verstärk-
te Einschnürungen zu beobachten.

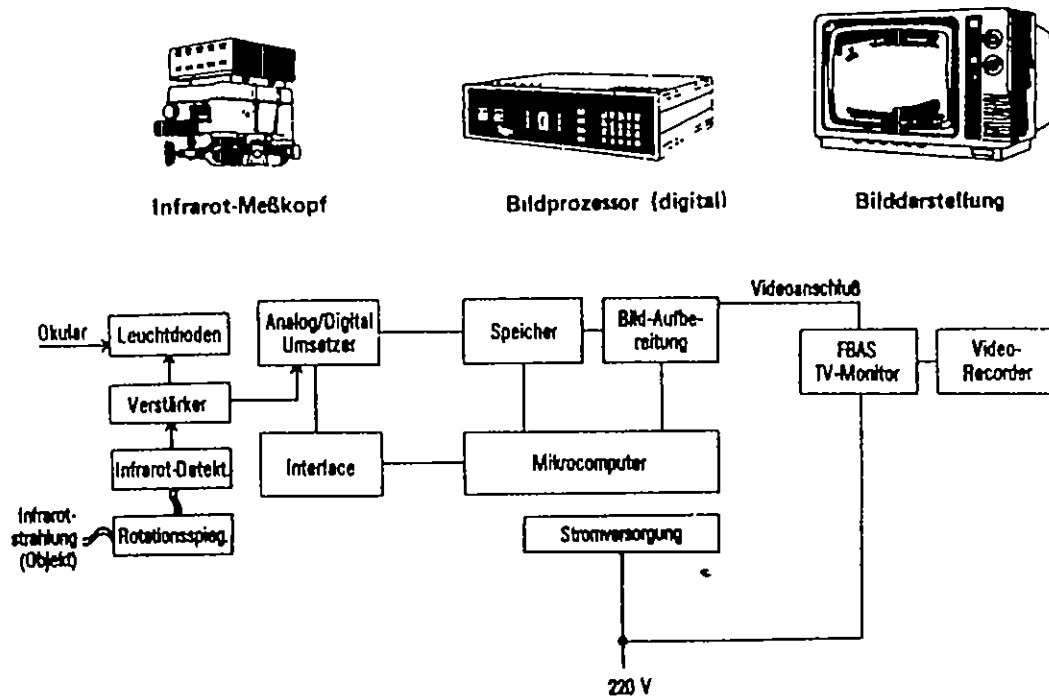


Abb. 6 Modularer Aufbau des Farbthermographiesystems zur Sichtbarmachung und Analyse von Wärmestrukturen in Kerzenflammen

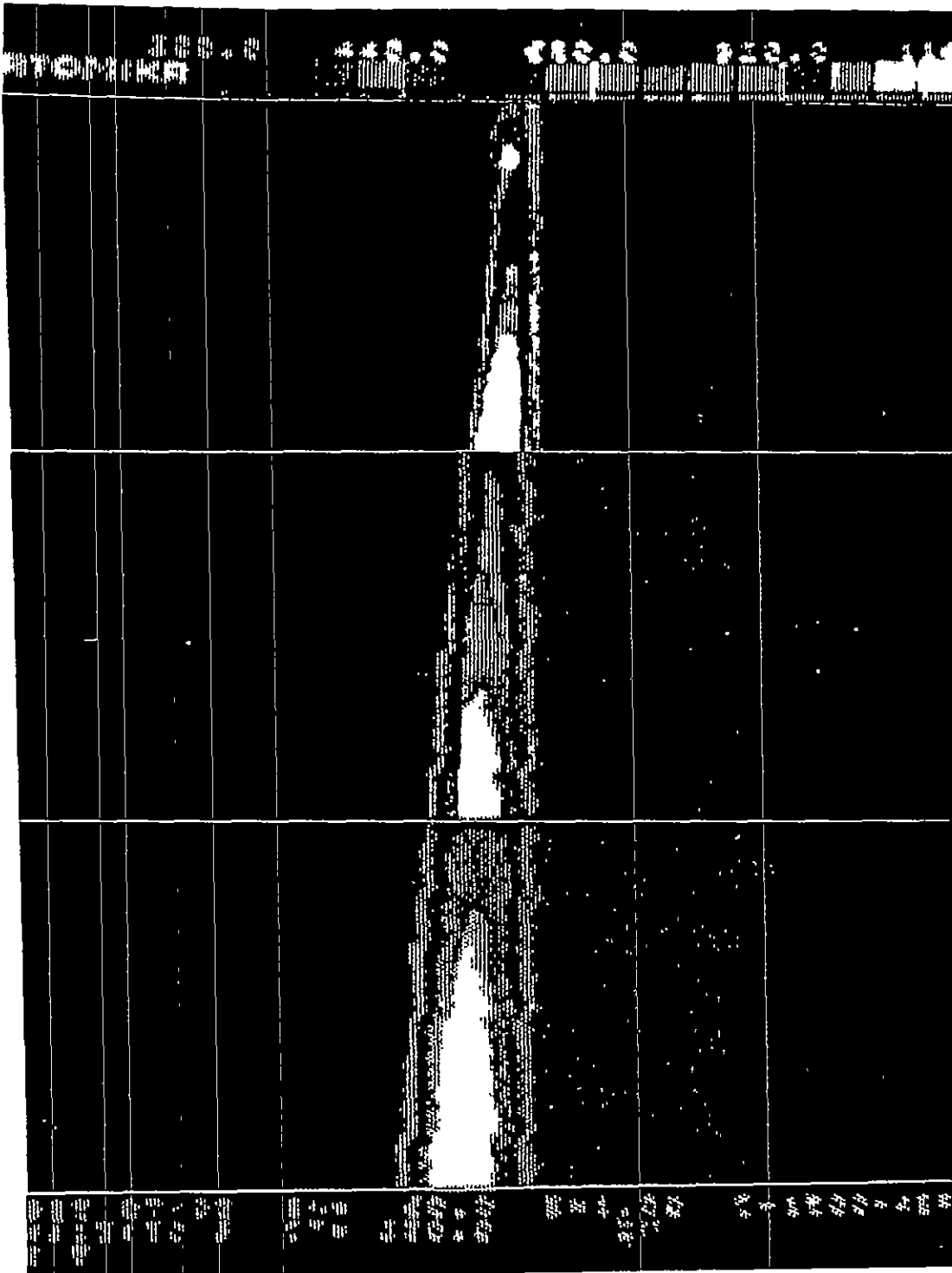


Abb. 7 Wärmestrukturen einer pulvergepreßten Paraffinkerzen-
flamme, \varnothing 50 mm, in Abhängigkeit der Höhe x über dem
Brennteller, ohne Seitenwindeinfluß
Die Bildaufnahmefrequenz ist 20 Bilder/Sekunde

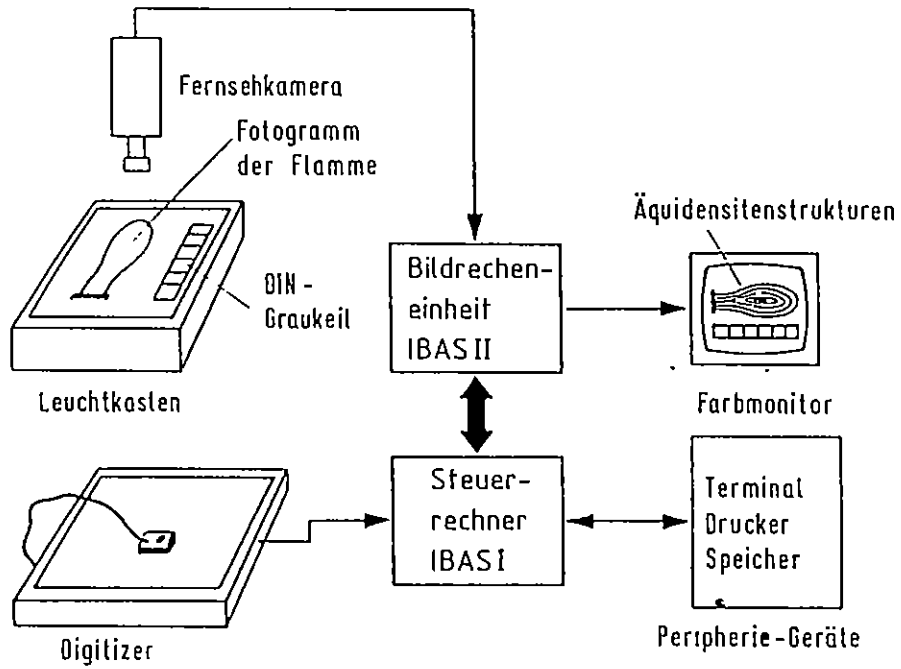


Abb. 8 Digitales Bildauswertesystem zur Sichtbarmachung und Analyse dynamischer Äquidensitenstrukturen in Kerzenflammen.

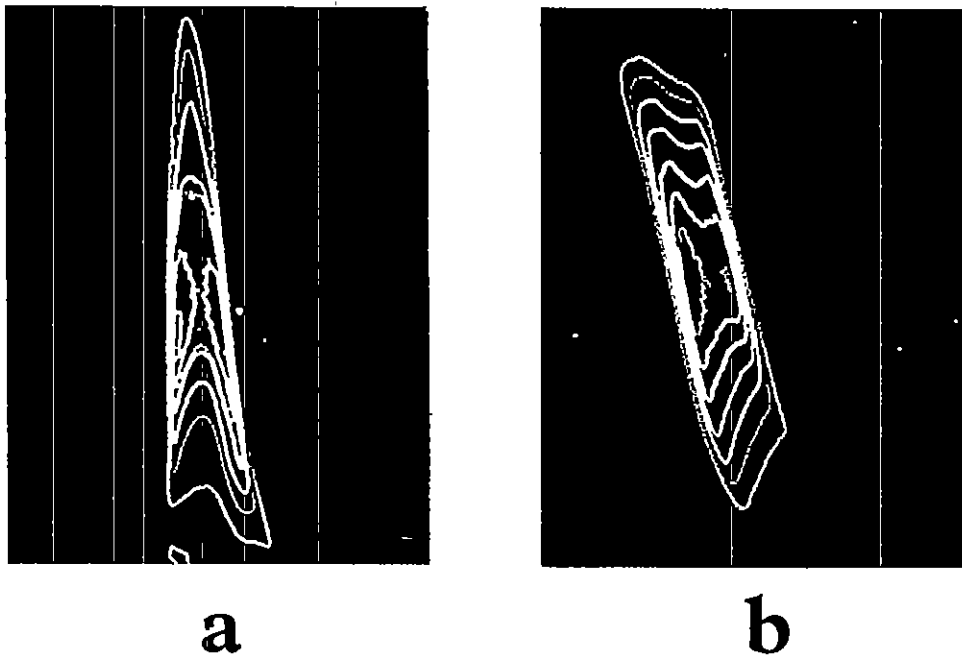


Abb. 9 Dynamische Äquidensitenstrukturen einer pulvergepreßten Paraffinkerzenflamme, \varnothing 50 mm,
a) ohne Seitenwind
b) mit Seitenwind (von rechts nach links);
die Belichtungszeit der zugehörigen Fotogramme beträgt 1/125 s.

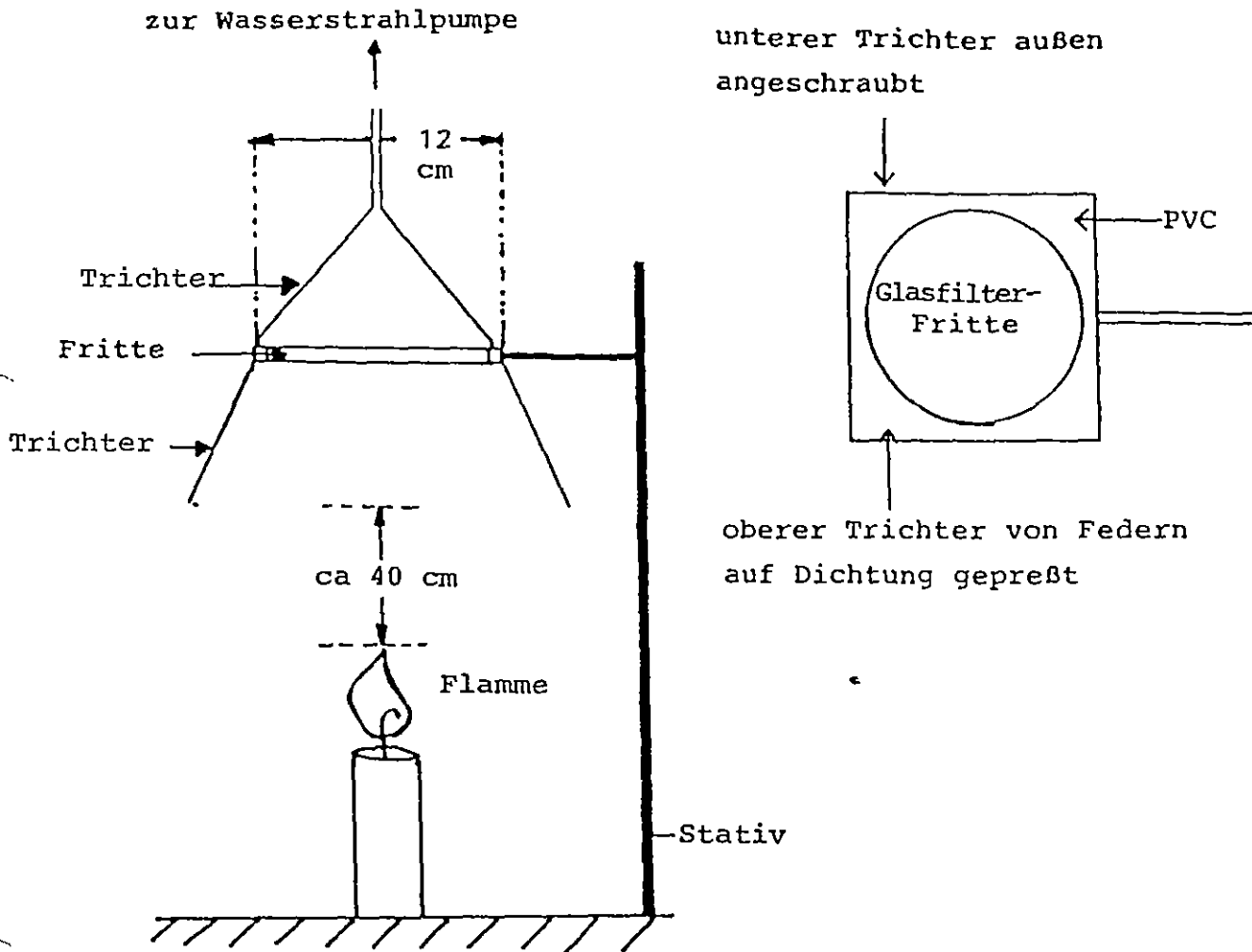


Abb. 10 Rußtest-Apparatur zur Messung des Rußmassenstroms \dot{m}_R , der von Kerzenflammen emittiert wird; der Ruß sammelt sich auf der Glasfritte, deren Masse nach einer bestimmten Zeit ermittelt wird.

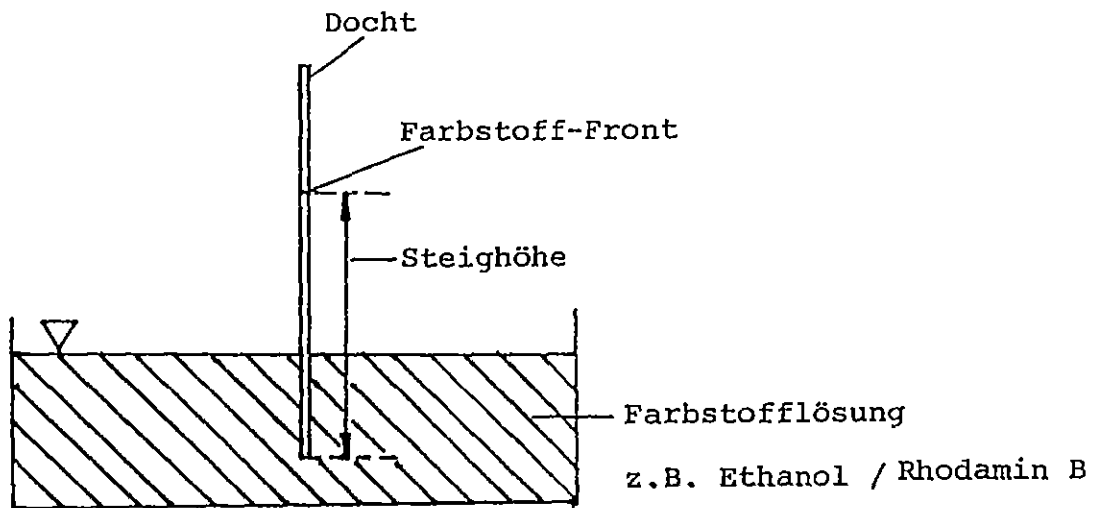


Abb. 11 Anordnung (schematisch) zur Messung der Saugfähigkeit von Baumwolldochten; gemessen wurde die Steighöhe in Abhängigkeit der Zeit.