

Thermo-fluiddynamische Phänomene – Einblicke und Einsichten

F. Mayinger

Technische Universität,
Lehrstuhl für Thermodynamik,
D-80290 München

The enormous advances in electronic data processing today enable the engineer to formulate fluid-dynamic transport processes in a detailed mathematical numerical way, and modern data acquisition systems make it possible to gain detailed insight into the nature of physical phenomena. Modern optical methods are especially well suited for experimental studies because of their inertialess and noninvasive mode of operation. Possible applications of optical methods are briefly described with examples of single- and two-phase fluid dynamics, heat and mass transfer, and also combustion processes. These examples demonstrate the capabilities and the importance of optical methods.

Der gerade in jüngster Zeit enorme Fortschritt moderner Informationstechnik erlaubt heute die numerisch-mathematische Behandlung selbst komplizierter thermo-fluid-dynamischer Vorgänge in Natur und Technik. Was vor wenigen Jahren noch unerschwinglich teuren Großrechnern vorbehalten war, leisten heute preiswerte Arbeitsplatz-Rechner, sogenannte Workstations. Vom rein numerisch-mathematischen Aufwand her, ist es durchaus möglich, auf solchen Workstations die Strömungen beim Ladungswechsel und den Verbrennungsablauf im Zylinder eines Motors oder die Gemischbildung und die Reaktionsvorgänge in der Brennkammer einer wasserstoffbetriebenen Rakete zu berechnen. Der Rechner kann nahezu beliebig viele Differentialgleichungen handhaben und diese schrittweise numerisch integrieren. Er weiß aber nicht, ob diese Gleichungen in ihrem Ansatz richtig sind und das physikalische Geschehen hinreichend gut beschreiben.

Gleichungen zur Berechnung eines thermo-fluiddynamischen System kann man in zwei Kategorien einteilen, nämlich in solche, die sich aus den Erhaltungssätzen ableiten, und in andere, die physikalische Phänomene, z. B. die Turbulenz einer Strömung oder den Phasenwechsel beim Sieden und Kondensieren, beschreiben. Die erstgenannten Gleichungen beruhen auf Axiomen, den Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls. Die letztgenannten aber bedürfen der Phantasie oder besser der Erfahrung desjenigen, der sie für ein Computer-Programm formuliert.

Erfahrung sammeln, heißt Fehler machen, und dies wird für den Ingenieur immer dann teuer und schmerzlich, wenn seine Vorhersage nicht mit dem realen Verhalten der von ihm konstruierten Maschine oder des von ihm ausgelegten Apparates übereinstimmt. Man kann dann blind Erfahrung sammeln, indem man in seinem Rechenprogramm einige mathematische Ansätze solange abändert, bis das richtige Gesamtergebnis erzielt ist. Dabei ist aber keineswegs

sicher, daß die tatsächlich fehlerhaften Gleichungen korrigiert werden, denn es ist durchaus möglich, daß richtig angesetzte Gleichungen manipuliert werden und zwei oder mehrere Fehler sich für den konkreten Anwendungsfall gerade mehr oder weniger zufällig kompensieren.

Solche Korrekturen oder gar die richtige Formulierung mathematischer Ansätze für physikalische Vorgänge wären leichter bei Einblick in das physikalische Detailgeschehen, da so die Möglichkeit der theoretischen Behandlung besser beurteilt werden könnten. Solche Einblicke, im wahren Sinne des Wortes, gewähren optische Meßverfahren, deren Einsatz zur Untersuchung thermo-fluiddynamischer Phänomene in realen technischen Komponenten und Anlagen erst durch die moderne Elektronik wirtschaftlich, teilweise sogar erst möglich wurde [1]. Damit schließt sich der Kreis: Moderne Elektronik benötigt für die theoretische Behandlung fluiddynamischer Phänomene in hohem Maße zusätzliche Einblicke in das reale Geschehen. Sie liefert aber gleichzeitig auch geeignete Meßverfahren – nicht nur optischer, sondern auch kapazitiver, induktiver und auch biotechnischer – für solche Einblicke. Das menschliche Auge ist für den normalen Alltag hervorragend gerüstet und hatte ganz wesentlichen Anteil an der Evolution des Menschen in seiner natürlichen Umwelt. Es versagt aber bei der Beobachtung von Vorgängen in der Technik. Wissenschaft und Technik entwickelten deshalb spezielle, auf den Gesetzen der physikalischen Optik beruhende Methoden, bei denen die Signale aber mit künstlich geschaffenen Geräten und Verfahren registriert und für unser natürliches Wahrnehmungsvermögen aufgearbeitet werden müssen.

Für schnelle Vorgänge ist das menschliche Auge viel zu träge, und wir bedienen uns deshalb zur Beobachtung rasch wechselnder Situationen der Ultrakurzzeit-Fotografie und der Hochgeschwindigkeits-Kinematographie. Damit aufgenommene Szenen können in Ruhe betrachtet bzw. beliebig verlangsamt abgespielt werden. Die Ultrakurzzeit-Fotografie arbeitet heute mit Belichtungszeiten von einigen Nanosekunden, und die Hochgeschwindigkeits-Kinematographie erlaubt mit käuflichen Geräten Aufnahmefrequenzen bis zu 100 000 Bildern/s.

Von den in einem Lichtstrahl enthaltenen drei Informationen, nämlich der Amplitude, der Frequenz und der Phasenlage, registriert und verarbeitet das menschliche Auge nur zwei, die Amplitude in Form der Helligkeit und die Frequenz in Form der Farbe. Die von Gabor [2] bereits 1948 erfundene Holographie gestattet es zusätzlich auch die dritte Information, die Phasenlage des Lichtes, zu registrieren und zu reproduzieren.

Weder das menschliche Auge noch das menschliche Gehirn können Bilder detailgetreu speichern und so unmittelbar Vergleiche anstellen, wie sich eine Situation schrittweise ändert oder welche Detailabweichungen zwei global sehr ähnliche Systeme zeigen. Hätte der Mensch die Fähigkeit zu einer solchen vergleichenden Speicherung und könnte er auch noch die Phasenlage des Lichtes registrieren, so könnte er den Temperaturverlauf in der ihn umgebenden Luft, aber auch in transparenten Flüssigkeiten wie Wasser sehen. Diesen Einblick gewährt die Interferometrie, die heute meist zusammen mit der Holographie angewandt wird [3]. Schließlich ist unser Auge nur für sehr massive Lichtwirkungen gerüstet. Schwache Lichtsignale, die aus bestimmten optischen Streueffekten, z. B. der Rayleigh-Streuung oder der Laser-induzierten Fluoreszenz, herrühren, nimmt es nicht wahr. Diese Lichtstreuungen liegen zudem meist in einem engen Frequenzband, und unser Auge ist für die selektive Erfassung einer einzelnen Lichtwellen-Länge nicht geeignet. Mit diesen Streueffekten lassen sich Verbrennungsvorgänge besonders gut untersuchen, und dafür gibt es elektronische Kameras, sogenannte CCD-Kameras, in Verbindung mit Polychromatoren [4, 5].

Nicht die Arbeitsweise moderner opto-mechanischer und opto-elektronischer Verfahren soll hier behandelt werden, sondern die Einsatzmöglichkeiten und die Aussagekraft dieser Meßverfahren auf die physikalische Interpretation thermo-fluiddynamischer Phänomene anhand einiger Beispiele. Die Methode selbst liefert die Physik, die der Ingenieur intelligent für seine Aufgaben zu nutzen hat.

Transportvorgänge bei der Aerosol-Abscheidung im Venturi-Wäscher

Venturi-Wäscher wurden ursprünglich für die Abscheidung feiner Stäube in der Eisenhütten-Industrie entwickelt. Heute werden sie auch in der Chemie verwendet, und dort gerade in jüngster Zeit als Sicherheitseinrichtung bei der Notentspannung chemischer Apparate zur Rückhaltung toxischer luft- oder gasgetragener feinsten Partikel. Auch bei Notfall-Maßnahmen in Kernkraftwerken zur Eindämmung der Folgen von Kernschmelzunfällen sind sie vorgesehen, wo sie während einer evtl. notwendig werdenden Druckentlastung des Sicherheitsbehälters die radioaktiven Aerosole zurückhalten sollen.

Der Venturi-Wäscher besteht aus zwei gegenläufig konischen Rohrstücken (Fig. 1). Im ersten wird das aerosolbeladene Gas beschleunigt, im zweiten, sich in Strömungsrichtung erweiternden Teil, soll die kinetische

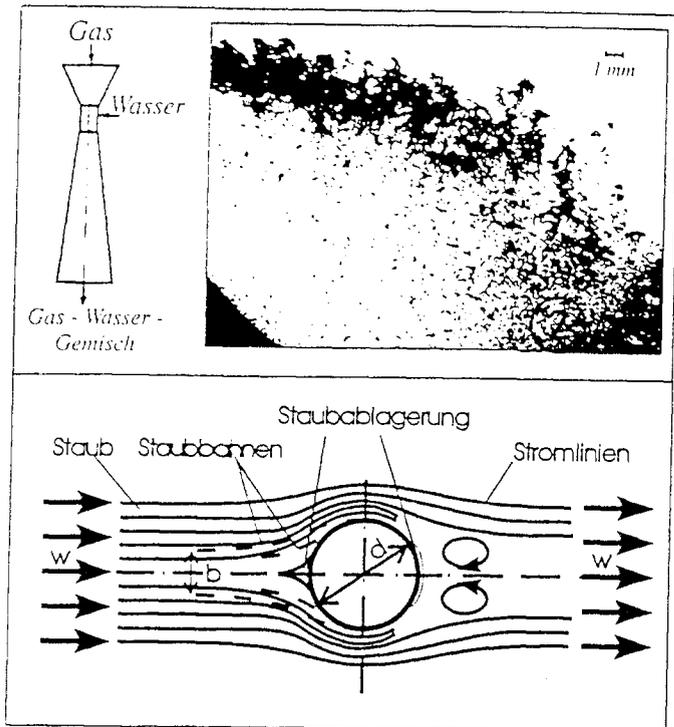


Fig. 1. Arbeitsprinzip des Venturi-Wäschers

Energie des Gases weitgehend wieder in Druckerhöhung umgesetzt werden. Zwischen diesen beiden Rohrstücken befindet sich die eigentliche Waschstrecke, ein im Interesse einer möglichst gleichmäßigen Beladung rechteckiger Kanal, in den von zwei Seiten senkrecht zur Strömungsrichtung des Gases die Waschflüssigkeit zugegeben wird. Diese Waschflüssigkeit wird mit einer Pumpe eingedüst oder von der Gasströmung eingesaugt, die wegen ihrer hohen Geschwindigkeit niedrigen statischen Druck hat. Das letztgenannte Verfahren wird bei sicherheitstechnischen Anwendungen des Venturi-Wäschers bevorzugt, weil die Aerosolabscheidung dann bei der Druckentlastung völlig passiv geschieht und keine Pumpe zur Einspeisung der Waschflüssigkeit benötigt wird.

Theoretische Ansätze in der Literatur gehen davon aus, daß die eingebrachte Waschflüssigkeit durch die hohen Impuls- und Scherkräfte des auf 50 bis 120 m/s beschleunigten Gasstromes in feinste Tropfen zerteilt wird. Beim Umströmen der Tropfen können die Aerosole im Gas der Ablenkung nicht ganz folgen und treffen auf den Tropfen auf, wo sie festgehalten werden. Der sogenannte Einfang-Querschnitt jedes Tropfens (Fig. 1 b) läßt sich bei Kenntnis der Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Gas, der Tropfenabmessung und des Dichteunterschiedes zwischen Aerosol und Gas leicht berechnen. Vergleiche von berechneten und tatsächlich erreichten Abscheidegraden zeigten meist große Unterschiede mit dem für den Ingenieur

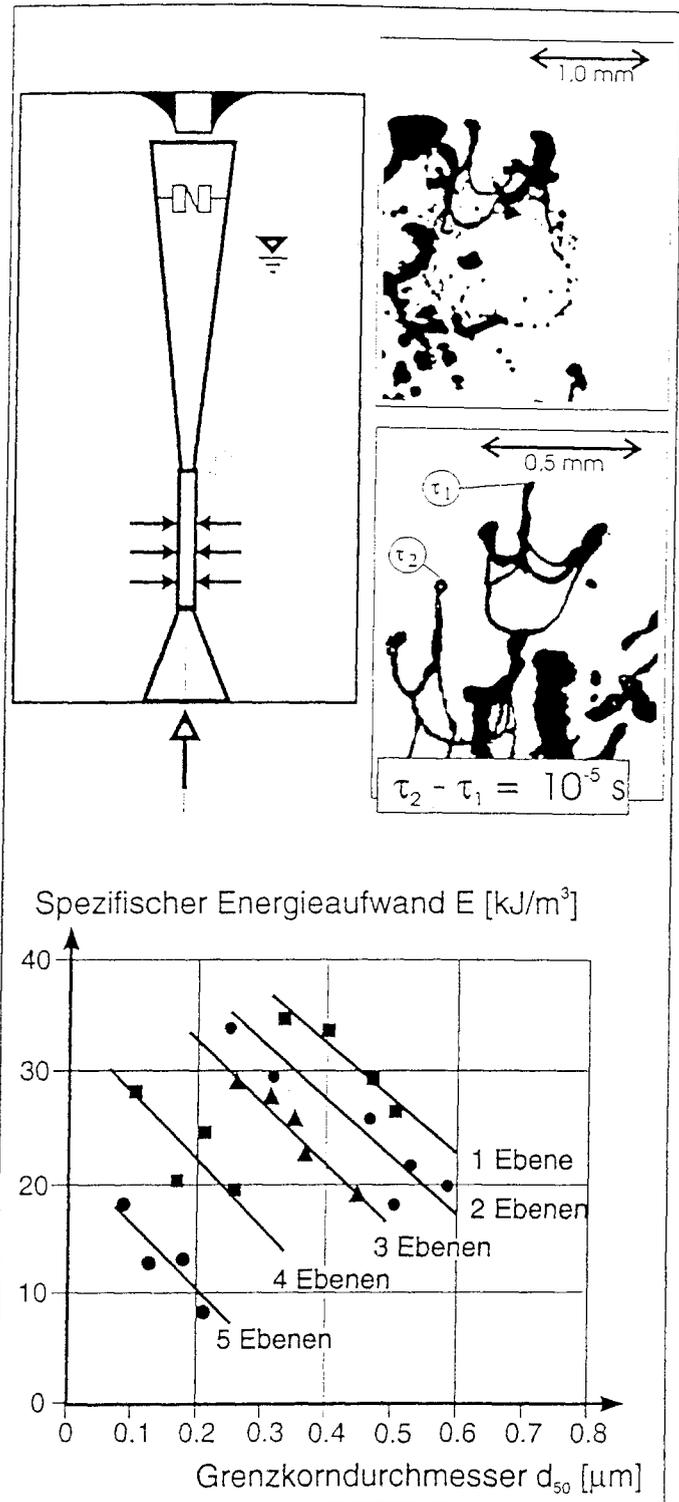


Fig. 2. Aerosolabscheidung in einem Venturi-Wäscher mit Selbstansaugbetrieb

erfreulichen Ergebnis, daß der tatsächliche Abscheidegrad meist höher lag als der vorhergesagte. Damit war aus Sicht der Praxis kein unmittelbarer Zwang gegeben, über den wahren Abscheidemechanismus nachzudenken.

Aufnahmen der dispergierten Flüssigkeit in der Venturi-Kehle mit Ultrakurzzeit-Fotografie (Aufnahmezeiten < 1 ms) brachten ein auf den ersten Blick erstaunliches Ergebnis zutage [6]. Die Flüssigkeit wird von dem hohen Impuls der Gasströmung zunächst nicht in Tropfen, sondern in kleine Lamellen zerteilt, die teilweise Fallschirm-ähnliche Gestalt haben (Fig. 2). Rechts unten in Fig. 2 ist eine Doppelbelichtung desselben Flüssigkeitspartikels wiedergegeben (Zeitdifferenz zwischen den beiden Aufnahmen 10^{-5} s). Man sieht, wie sich der Flüssigkeitsfallschirm durch den Impuls des Gases aufbläht. Rechts oben ist gerade der Augenblick erfaßt, in dem die Flüssigkeitsmembran vom Gasstrom überdehnt ist und in zahlreiche kleine Tropfen zerfällt. Wie man aus den beiden Aufnahmen ebenfalls sieht, hat der Flüssigkeitsfallschirm am offenen Ende einige etwas größere Flüssigkeitsanhäufungen, die sich nach Zerstörung der Flüssigkeitsmembran zu größeren Tropfen umformen. Dadurch beobachtet man weiter stromabwärts im Tropfenspektrum zwei Häufigkeitsmaxima merklich unterschiedlichen Durchmessers.

Die größte Flüssigkeitsfläche für die Aerosolabscheidung besteht während der äußerst kurzen Periode, in der die Impulskraft des Gases wesentlich größer ist als die Oberflächenspannung der Flüssigkeit. Diese Periode dauert weniger als 10^{-3} s, und jedes Flüssigkeitsteilchen legt dabei nur wenige Zentimeter zurück. Dieser Einblick in die Fluidodynamik des Venturi-Wäschers legt es nahe, die nur über eine äußerst geringe Strömungsstrecke verfügbaren großen Phasengrenzflächen dadurch zu vervielfachen, daß die gleiche Menge Waschflüssigkeit nicht in einer Ebene des Venturi-Wäschers, sondern auf 3 bis 5 hintereinander liegende Ebenen zugegeben werden, was bei gleichem Leistungsaufwand und gleichem Waschmittelverbrauch höhere Abscheidegrade bewirkt. Den Erfolg dieser Maßnahme demonstriert das Diagramm in Fig. 2. Es gelingt damit, nicht nur höhere Globalabscheidegrade zu erzielen, sondern auch die Abscheidewirkung zu kleineren Aerosolpartikeln (bis $0,1 \mu\text{m}$) zu verschieben [7, 8].

Holographische Analyse von Einspritzstrahlen und Spraywolken

Bei anderen Strömungsvorgängen reicht die Geschwindigkeit für die Analyse allein nicht aus. Wenn der aus

z. B. der Einspritzdüse eines Dieselmotors kommende Strahl nicht nur global seitlich von außen betrachtet, sondern in verschiedenen, z. B. parallel zur Strahlachse gelegten Schnitten detailliert analysiert werden soll, sind räumlich hoch auflösende Methoden nötig. Eine ist die Holographie. Das Wort Holographie ist griechischen Ursprungs, „holos graphien“ bedeutet „alles aufzeichnen“. Ergänzend zur Fotografie, die Frequenz und Amplitude des Lichtes registriert, wird bei der Holographie zusätzlich noch dessen Phasenlage aufgezeichnet. Diese Aufzeichnungs- und Wiedergabemethode soll hier nur kurz anhand Fig. 3 skizziert werden [9].

Bei der Holographie wird der aufzunehmende Gegenstand mit kohärentem Licht, das in der Regel aus einem Laser stammt, beleuchtet. Das von diesem Gegen-

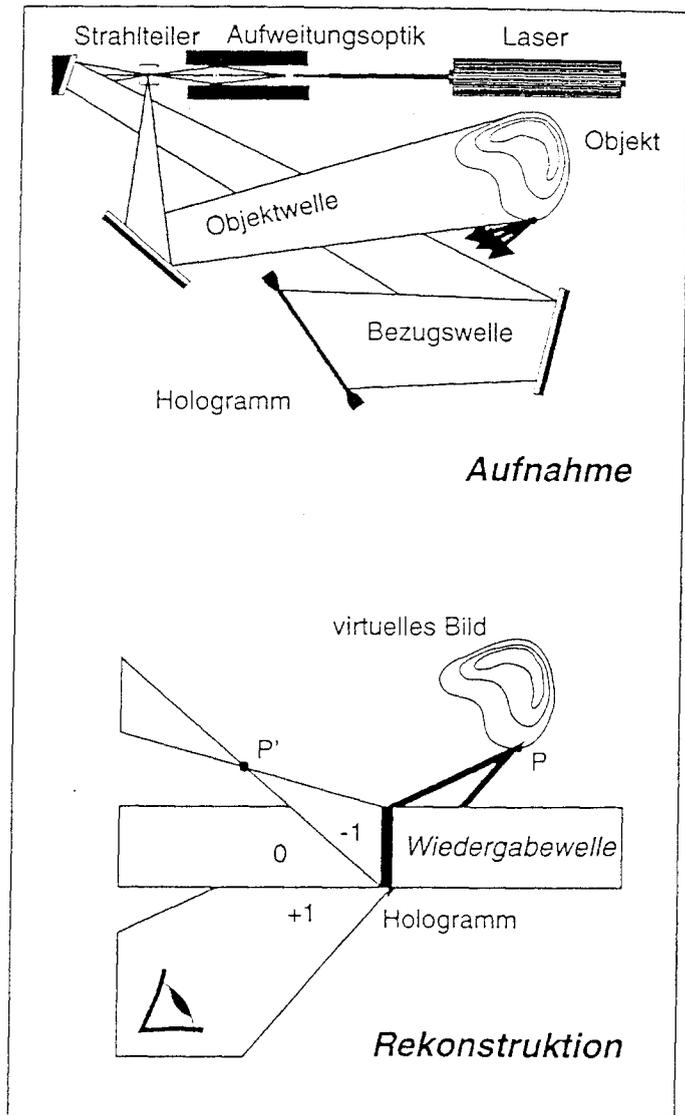


Fig. 3. Prinzip der Holographie

stand reflektierte oder gestreute Licht fällt ohne Zwischenschaltung von Linsen auf eine fotografische Platte. Es hat gewöhnlich eine sehr komplizierte Wellenstruktur, die gemäß dem Huygens'schen Prinzip jedoch als eine Überlagerung von vielen elementaren Kugelwellen betrachtet werden kann. Zur Vereinfachung der Darstellung ist in Fig. 3 nur eine Kugelwelle eingezeichnet. Eine zweite Welle – die Referenzwelle – wird aus dem Laserstrahl ausgeblendet und fällt direkt auf die holographische Platte. Da die beiden Wellen kohärent sind, bilden sie bei ihrer Überlagerung auf der fotografischen Platte ein stabiles Interferenzmuster. Die Phasenlage des Lichtes wird in Form räumlicher Änderungen des Musters gespeichert. Nach der üblichen chemischen Behandlung – Entwickeln und Fixieren – wird die Platte Hologramm genannt. Wird dieses Hologramm mit einem der ursprünglichen Referenzwelle ähnlichen Lichtstrahl beleuchtet, wirkt das mikroskopische Muster wie ein Beugungsgitter mit variabler Beugungskonstante, und hinter der Platte entstehen drei Wellen (Fig. 3 unten). Der ungebeugt die Platte durchtretende Anteil des Lichtes wird Welle 0. Ordnung genannt und ist für unsere Überlegungen uninteressant. Zwei weitere Wellen, jeweils 1. Ordnung, werden für die holographischen Betrachtungen genutzt. Eine bewegt sich entgegengesetzt der Beleuchtungswelle und hat dieselbe Amplitude und dieselbe Phasenverteilung. Sie entwirft ein virtuelles Bild vor der holographischen Platte, gesehen aus der Strahlrichtung der Referenzwelle, das mit bloßem Auge betrachtet werden kann. Die zweite Welle 1. Ordnung hat entgegengesetzte Richtung und entwirft ein reales Bild des aufgenommenen Objektes hinter der holographischen Platte, das mit verschiedenen optischen Methoden, z. B. einem Mikroskop, beobachtet werden kann.

Wird ein Laser mit extrem kurzer Belichtungsdauer verwendet, z. B. ein Rubinlaser mit Belichtungszeiten bis etwa 30 ns oder ein Excimer-Laser mit Belichtungszeiten von 15 bis 20 ns, so lassen sich auch sehr schnell bewegte Objekte ohne Bewegungsunschärfe festhalten. Solche schnell bewegte Objekte sind z. B. die Flüssigkeitsteilchen in einem Einspritzstrahl. Ein Einspritzstrahl hat in der Regel kegelförmige Gestalt, und mit bloßem Auge ist auch bei der Rekonstruktion eines solchen Hologrammes nur seine äußere Form zu erkennen. Für „Einblicke“ nutzt man deshalb eine optoelektronische Auswertemethode des reproduzierten Strahl-Hologramms (Fig. 4) [10, 11]. Eine Videokamera nimmt über ein Teleobjektiv sehr geringer Schärfentiefe das holographisch rekonstruierte Bild des Sprühkegels auf. Die Kamera ist auf einen fein verstellbaren Schlitten montiert und auf eine Schnittebene des Sprühstrahls, z. B. seine Mittelebene, fokussiert. Durch schrittweises Verschieben der Kamera nach vorne und

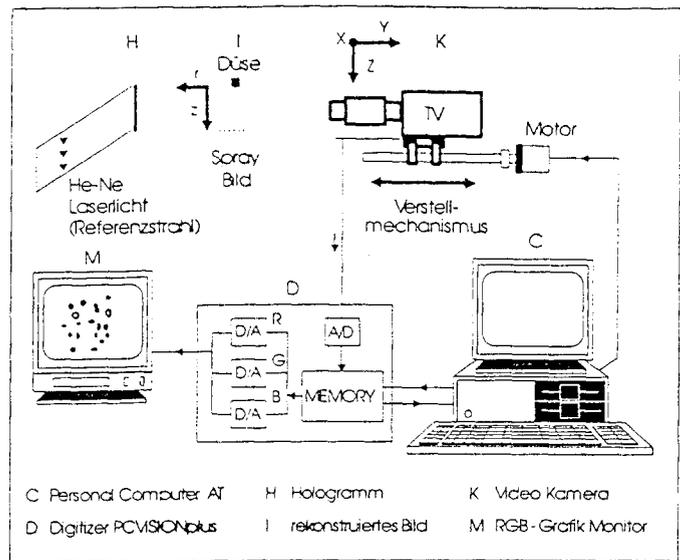


Fig. 4. Digitales Auswertungssystem für Hologramme

hinten kommen andere Schnitte des Sprühstrahls in die Schärfeebene. Das vom Teleobjektiv der Videokamera wiedergegebene Bild wird elektronisch aufgezeichnet und kann über einen üblichen Fernsehmonitor sichtbar gemacht oder einem Rechner zugeführt und in einer komplizierten Prozedur analysiert werden.

Die Ergebnisse der beiden Verfahren sind in Fig. 5 gegenübergestellt. Links sieht man den noch als Flüssigkeitsfilm zusammenhängenden Sprühkegel nahe der Düsenmündung, wie ihn auch unser Auge beobachten würde, wenn es schnell genug wäre, rechts das Ergebnis der Computerauswertung, das einen weniger als 1 mm dicken Schnitt durch diesen Sprühkegel darstellt. Diese Computer-Rekonstruktion vermittelt deutlich die Dicke der Flüssigkeitsschicht und seine besonders innen zu beobachtende Welligkeit. Analysen des Zerfalls dieses kegelförmigen Flüssigkeitsschleiers zu einem Tropfenschwarm zeigen, daß Instabilitäten vom Flüssigkeitsschleier ausgehen, die durch Oberflächenwellen

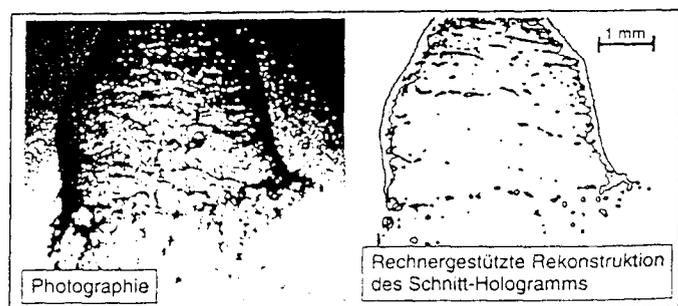


Fig. 5. Struktur eines Einspritzstrahls (Impulsholographie)

bewirkt werden. Mit herkömmlichen Methoden konnten diese Oberflächenwellen aber nur auf der Außenseite beobachtet werden, die eine wesentlich glattere Struktur hat als die innere Oberfläche. Die Beobachtung der Welligkeiten auf der Innenseite, die u. a. auch durch innere Rezirkulationen hervorgerufen oder zumindest verstärkt werden, könnte zu neuen mathematischen Modellen des Zerfallverhaltens des Flüssigkeitsschleiers unmittelbar an der Düsenöffnung führen und damit einen Beitrag zur besseren Steuerung des Tropfenspektrums leisten.

Die im Computer durchgeführten mathematischen Prozeduren seien kurz anhand Fig. 6 angedeutet. Die obere Serie zeigt die Auswertungsschritte nahe der Düsenmündung, die untere die weiter stromabwärts, wenn sich der Tropfenschwarm bereits gebildet hat. Es werden dabei zunächst unerwünschte und mit dem physikalischen Vorgang des Strahlzerfalls nicht zusammenhängende Licht-Streueffekte beseitigt, was man „Noise“ Unterdrückung nennt. Anschließend werden

die verbleibenden Abbildungen der Partikelstrukturen nachgezeichnet. Mit einer äußerst komplizierten Methode werden dann die scharf abgebildeten Teilchen von den unscharfen getrennt, wobei man sich die Grauwertgradienten am Rande der Teilchen zunutze macht. Scharf abgebildete Teilchen haben hohe nicht in der Schärfenebene liegende und damit unscharf abgebildete Teilchen, dagegen flache Grauwertgradienten sind also „verwaschen“. Die unscharf abgebildeten Teilchen werden dann vom Computer einfach gelöscht, und man erhält schließlich die Abbildung einer ganz engen Schärfenebene aus dem Strahl. Man erkennt dann z. B. in Fig. 6 rechts oben, daß die Düse nicht kontinuierlich spritzt, sondern stoßweise, und sich bereits im Schleier eine merklich verdichtete Flüssigkeitswolke bildet, die auch noch stromabwärts im volldispertierten Strahl erhalten bleibt. Ist die Flüssigkeit Brennstoff, der in einer Brennkammer oder im Zylinder eines Dieselmotors oxidiert werden soll, so kann dadurch die Rußbildung im Abgas verstärkt werden.

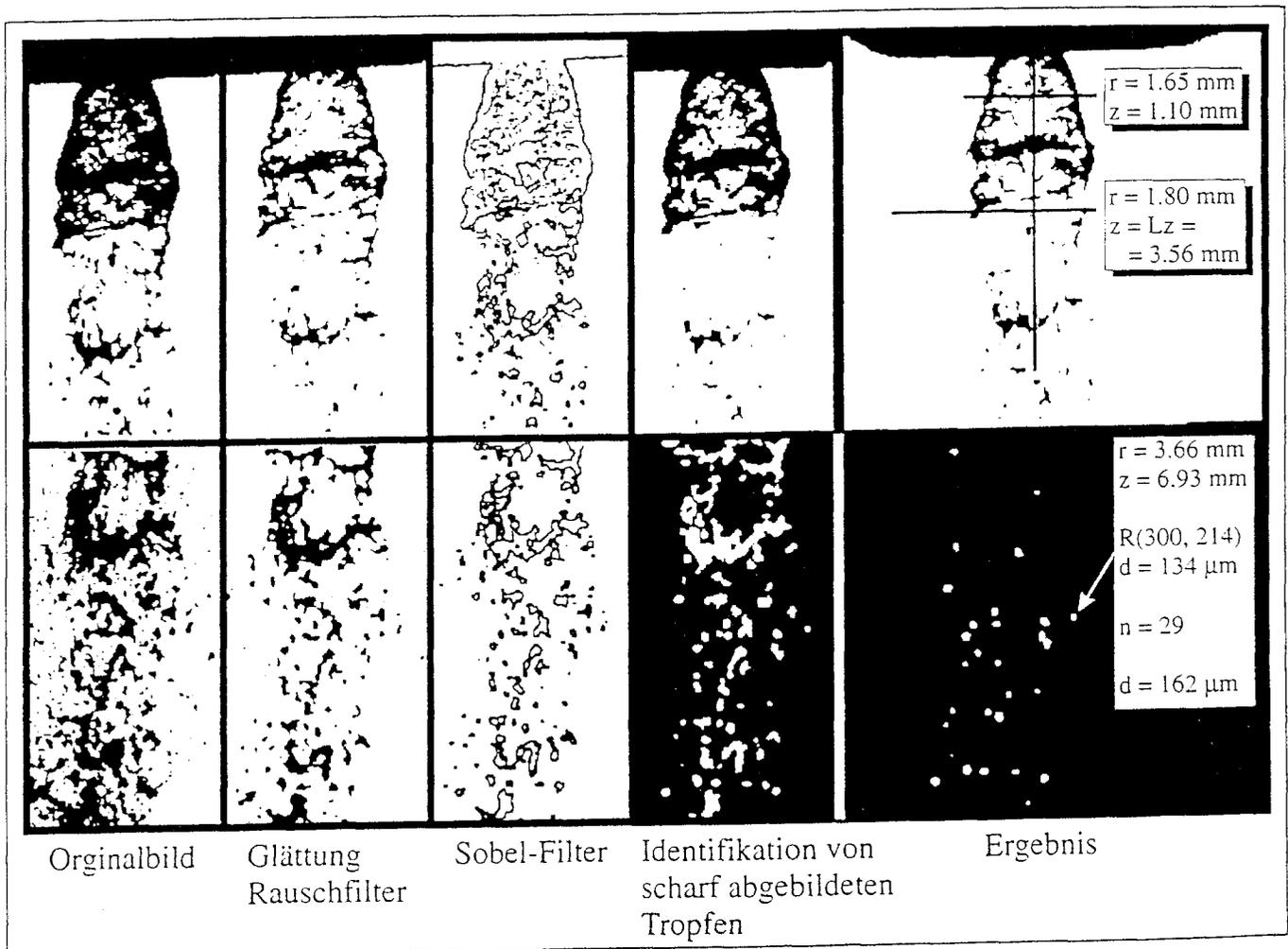


Fig. 6. Computergesteuerte Auswertung eines Einspritzstrahls

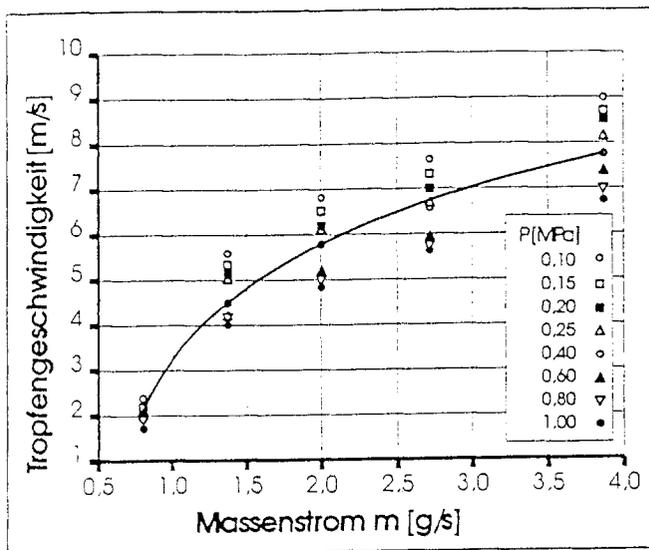


Fig. 7. Tropfengeschwindigkeit in Einspritzstrahlen

Bei zweimaligem Zünden des Lasers in sehr kurzem zeitlichem Abstand – einige Mikrosekunden bis eine Millisekunde – erhält man zwei Abbildungen der Strömungsstruktur des Sprühstrahles auf derselben fotografischen Platte. Die Computerauswertung ermöglicht es dann, aus dem räumlichen Abstand der Abbildungen und aus der zeitlichen Differenz der Belichtung die Geschwindigkeiten der Flüssigkeitspartikel zu ermitteln. Dies geschieht dadurch, daß der Computer jede Partikelabbildung mit allen anderen verbindet und dann aus diesen Verbindungslinien in einer Fourier-Analyse die maximalen Häufigkeiten der Winkel und der Entfernungen bestimmt. Ausgehend von der ersten Abbildung eines Partikels, wird dann der Suchbereich für die zweite zeitversetzte Abbildung des Partikels festgelegt. Wird innerhalb des Suchbereiches eine Partikelabbildung gefunden, läßt sich aus dem Abstand der beiden Abbildungen ein und desselben Partikels dessen Geschwindigkeit berechnen. Das Ergebnis einer solchen vollautomatischen Auswertung zeigt Fig. 7. Die Einsicht, die dort vermittelt wird, ist an sich nicht neu, kann aber als wertvolle quantitative Bestätigung theoretischer Vorhersagen genutzt werden. Wie zu erwarten, steigt die Geschwindigkeit der Tropfen mit zunehmendem Massendurchsatz durch die Düse, was verbunden ist mit höherem Druck vor der Düse. Weiterhin ist die Tropfenbewegung um so schneller, je niedriger der Druck und damit die Dichte der Gasphase ist.

Erfassung thermischer Grenzschichten bei konvektivem Wärmetransport mit Hilfe der holographischen Interferometrie

Die bisherigen Betrachtungen waren auf rein fluiddynamische, isotherme – also nicht thermofluiddynamische – Vorgänge beschränkt. Wird die reine Fluidmechanik von thermodynamischen Prozessen überlagert, wie dies z. B. beim konvektiven Wärmetransport der Fall ist, so reicht das Erfassen der Strömungsstrukturen und des Geschwindigkeitsfelds nicht aus, man benötigt darüber hinaus auch Auskunft über die Temperaturverteilung. Bei jedem Wärmetransport zwischen einem Fluid und einer festen Wand bildet sich in der Nähe der Wand eine sogenannte thermische Grenzschicht aus, eine dünne Zone mit im Gegensatz zur wandfernen Strömung relativ großen Temperaturgradienten. Diese Grenzschicht ist maßgebend für den Wärmetransport, deshalb sollte ihre Natur möglichst genau bekannt sein.

Für Einblicke in die Natur dieser Grenzschicht muß man die Unterschiede des thermodynamischen Zustands im Fluid sichtbar machen, z. B. mit holographischer Interferometrie [3, 9]. Man bedient sich dabei zunächst der Aufzeichnungsmöglichkeiten der Holographie, nämlich unterschiedliche Lichtwellensysteme zu unterschiedlichen Zeiten zu speichern und nach Entwicklung der Fotoplatte gleichzeitig wieder freizusetzen. Wenn sich beide Wellen nur geringfügig voneinander unterscheiden, treten sie miteinander in Interferenz. Dies ist die Grundlage der holographischen Interferometrie.

Bei der holographischen Interferometrie wird der Raum, in dem der zu untersuchende Wärmetransport-Prozess später ablaufen soll, von parallelem Laserlicht durchstrahlt, das dann auf eine fotografische Platte trifft (Fig. 8). Gleichzeitig wird diese Platte auch vom Referenzstrahl belichtet. Man erhält so zunächst ein Hologramm – ähnlich wie vorher beschrieben – des Untersuchungsraumes, in dem alle thermo- und fluiddynamischen Zustände für die Untersuchung vorhanden sind, nur der eigentlich interessierende Vorgang, nämlich der Wärmetransport, noch nicht. Man entwickelt und fixiert dann die Platte und bringt sie auf eine halbe Wellenlänge – also 0,3 bis 0,4 μm – genau mit Hilfe optischer Methoden und Justierung mittels Piezo-Quarz wieder an die alte Stelle zurück. Jetzt erst wird der Wärmetransport-Prozess im Versuchsraum zugeschaltet und der Versuchsraum wieder von Laserlicht – der sogenannten Objektwelle – durchstrahlt. Gleichzeitig setzt eine Wiedergabewelle, die exakt an die Stelle der vorhergehenden Referenzwelle tritt, den ursprünglichen Vorgang aus der Hologrammplatte frei. Hinter der Hologrammplatte interferieren damit

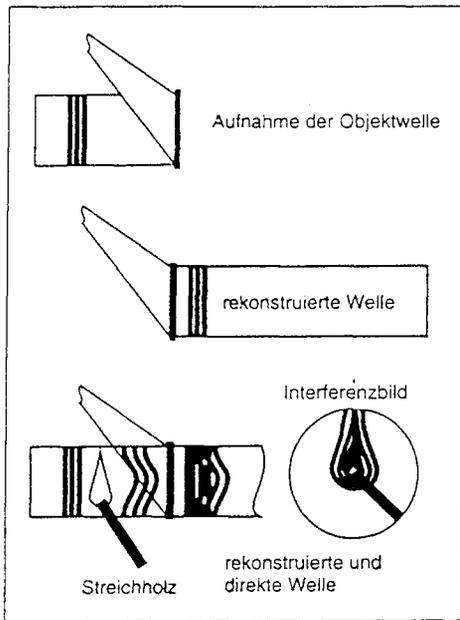


Fig. 8. Prinzip der holographischen Interferometrie (Echtzeitverfahren)

zwei Bilder des Systems, nämlich das ohne und das mit Wärmetransport. Das Ergebnis sind, wie in Fig. 8 für das Temperaturfeld einer Streichholzflamme gezeigt, helle und dunkle Streifen, die mit Hilfe einfacher optischer Gesetze als Linien konstanter Dichte identifiziert werden können. Die Dichte eines Fluids ist eine Funktion der Temperatur, des Druckes und bei Mehrstoffsystemen auch der Konzentration. Handelt es sich um reinen Stoff und hat das Versuchsfeld weitgehend konstanten Druck, so sind diese Dichtelinien gleichbedeutend mit Linien konstanter Temperatur, wobei die Temperaturdifferenz zwischen jedem Linienpaar exakt gleich ist.

Dichtgepackte Interferenzlinien, also in diesem Fall konstanter Temperatur, zeigen eine Grenzschicht mit großem Temperaturgradienten an. Da der Wärmefluß in der Grenzschicht in erster Näherung proportional dem Temperaturgradienten sowie einer Stoffkonstanten, der sog. Wärmeleitfähigkeit, gesetzt werden kann, sind solche dichtgepackten Isothermen auch Zonen hohen Wärmetransportes, den man, bezogen auf die Einheit der Temperaturdifferenz – 1 K – und der Fläche, als Wärmeübergangskoeffizient oder in dimensionsloser Form als Nusselt-Zahl Nu darstellt.

Figur 9 zeigt die Grenzschicht in einem von drei Rohren gebildeten Zwischenraum, in dem die Strömung gerade von laminar in turbulent umschlägt. Man sieht, daß die Grenzschicht sehr von der Lage der äußeren Rohroberfläche innerhalb dieses Zwischenraumes abhängt. In den engen Spalten zwischen den Rohren ist die Grenzschicht dicker und der Temperaturgradient

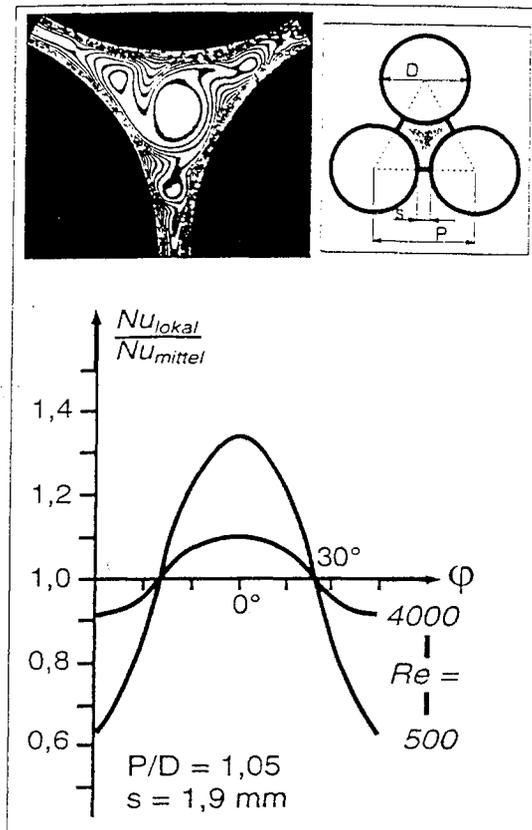


Fig. 9. Grenzschicht und Wärmeübertragung an längsangeströmten Rohren im Bündel

kleiner als zum offenen Dreiecksraum hin. Die Oberfläche der Grenzschicht ist auf der von der Rohrwand abgewandten Seite auch keineswegs glatt, sondern weist erhebliche Welligkeiten auf, die zeitlich und örtlich wandern, obwohl die Rohre exakt längs angeströmt wurden. Dementsprechend ist auch der örtliche Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten oder, dimensionslos dargestellt, der Nusselt-Zahl und den Rohrumfang unterschiedlich. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit und damit steigender Reynolds-Zahl glätten sich diese Unterschiede.

Figur 9 hat uns zwar Einblicke, aber keine neuen Einsichten vermittelt, da das beobachtete Strömungs- und Wärmetransportgeschehen aufgrund theoretischer Analysen so zu erwarten war. Wesentlich interessanter ist dagegen ein Wärmetransport-Prozess, der sich bisher einer zuverlässigen, theoretischen Beschreibung wegen seiner hohen Komplexität entzieht. Es ist der Wärmetransport beim Blasensieden, der insbesondere dann noch viele Rätsel aufgibt, wenn der von der wärmeabgebenden Wand weiter entfernte Kernbereich der Strömung noch nicht Sättigungstemperatur erreicht hat, in der Grenzschicht nahe der wärmeabgebenden Wand aber bereits Blasen entstehen können, die nach

sehr kurzer Zeit wieder kondensieren. Einen solchen Prozeß, erfaßt mit der holographischen Interferometrie, zeigt Fig. 10. Man erkennt anhand der Interferenzlinien die sehr ungleichmäßige Grenzschicht. Die Bildung und Kondensation von zwei Dampfblasen ist in einer Sequenz von acht Bildern erfaßt, die einen Zeitraum von 4,7 ms überdecken. In einer Zone kleiner Temperaturgradienten – weite Abstände zwischen den Interferenzlinien – hat sich eine größere Dampfblase gebildet, nahezu gleichzeitig beginnt eine zweite, kleinere Dampfblase in eine Zone wesentlich höherer Temperaturgradienten hineinzuwachsen. Die erste Dampfblase wächst rund 1,6 ms lang, löst sich nach etwa 1,9 ms von der Heizfläche ab und kondensiert beim Eindringen in die unterkühlte Kernströmung. Ihre Lebensdauer beträgt fast 5 ms. Der zweiten Blase ist wegen ihres ungünstigeren Geburtsortes eine wesentlich kürzere Lebensdauer beschieden. Sie hat bereits nach 0,6 ms ihre maximale Größe erreicht, löst sich ab, durchdringt das sehr starke Temperaturgefälle, beginnt rasch zu kondensieren, und nach 1,9 ms findet man

nur noch einen kleinen Dampfrest in der kalten Zone der Flüssigkeit.

Was können wir aus diesen Beobachtungen lernen? Wegen der großen Inhomogenitäten in der Grenzschicht ist das Blasensieden erheblichen stochastischen Einflüssen unterworfen. Die Phänomene des Wärmeübergangs beim Sieden an Heizflächen können deshalb nicht in den auf Betrachtungen der reinen Schubspannungsübertragung und des Impulsaustausches beruhenden Turbulenzmodellen beschrieben werden. Aus theoretischer wie praktischer Sicht ist es nach wie vor zweckmäßiger, einfache empirische Ansätze heranzuziehen. Sie beschreiben zwar, wie die Turbulenzmodelle, das eigentliche Geschehen nur mangelhaft, benötigen aber, im Gegensatz zu den letzteren, verschwindend kleine Rechenzeiten.

Mit der holographischen Interferometrie, verbunden mit der Hochgeschwindigkeits-Kinematographie, lassen sich die thermofluidodynamischen Phänomene beim Phasenwechsel noch wesentlich detaillierter erfassen, als am vorhergehenden Beispiel erläutert wurde [13, 14]. Betrachtet sei der scheinbar einfache Vorgang der Kondensation einer Dampfblase, die sich an einer mit Satttdampf beschickten Düsenmündung in Flüssigkeit derselben Substanz, jedoch mit einer Temperatur erheblich unterhalb der Sättigungstemperatur des Dampfes, bildet. Optische Einzelbeobachtungen solcher Blasen lassen bereits deutlich erkennen, ob die Kondensation durch den Wärmetransport an der Phasengrenze bestimmt wird oder ob dieser z. B. wegen großer Temperaturdifferenz zwischen dem Dampf in der Blase und der umgebenden Flüssigkeit so gut wird, daß Trägheitseffekte das Kondensationsgeschehen hemmen und damit auch steuern. Figur 11 a zeigt einen Kondensationsvorgang an der Phasengrenze einer Blase, der allein durch den Wärmetransport bestimmt wird, während in Fig. 11 b rein mechanische Trägheit – die nachstürzende Flüssigkeitsmenge kann den durch die Kondensation frei werdenden Raum nicht

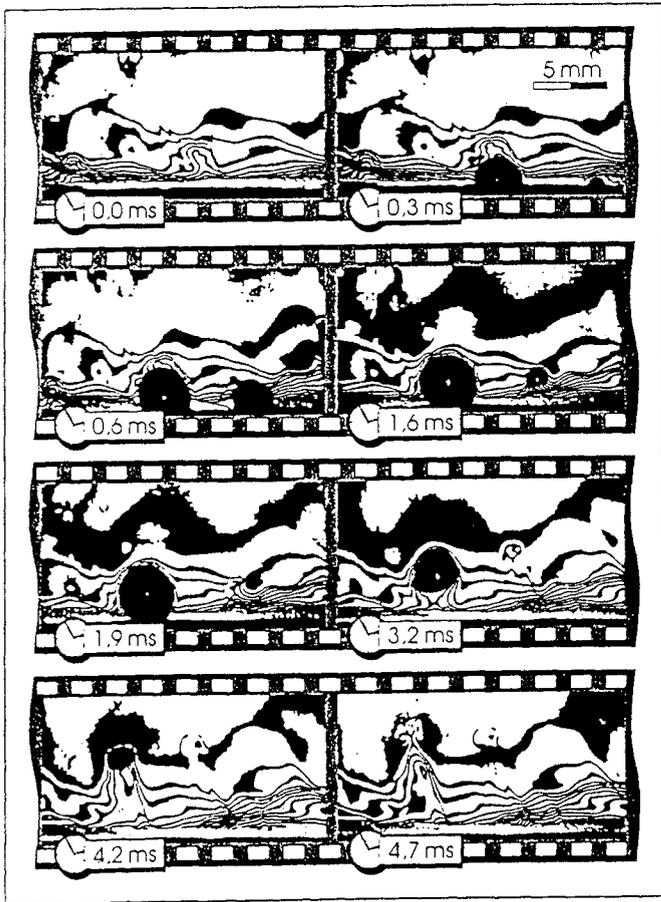


Fig. 10. Entstehung von Blasen in der überhitzten Grenzschicht an Heizflächen und ihre Kondensation beim Eindringen in kältere Zonen (Hochgeschwindigkeitsaufnahmen)

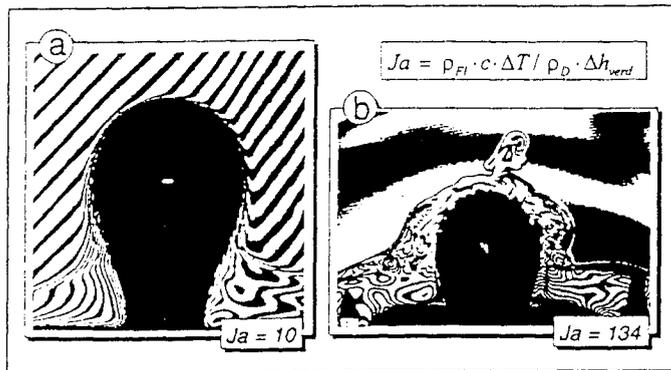


Fig. 11. Wärmetransport-(a) und trägheitsgesteuerte (b) Kondensation einer Blase in kalter Flüssigkeit

schnell genug einnehmen – die Geschwindigkeit der Kondensation bestimmt. Bereits eine rein qualitative Betrachtung zeigt, daß die Oberfläche der Blase in Fig. 11 a glatt ist, die Oberflächenspannung also die Blasenform bestimmt, während in Fig. 11 b örtlich unterschiedliche Impulskräfte eine zerklüftete Phasengrenze verursachen.

Das Temperaturfeld wurde wieder mit der holographischen Interferometrie sichtbar gemacht, in Fig. 11 a jedoch mit einer abgewandelten, der sog. Finite-Fringe-Methode. Dabei werden mittels eines optischen Tricks im Versuchsfeld parallele Streifen beliebig einstellbarer Richtung vorgegeben, die dann durch Temperaturgradienten, wie sie z. B. in der Grenzschicht nahe der Phasengrenze vorliegen, abgelenkt werden. Die Größe der Ablenkung ist ein Maß für die Steilheit des Temperaturgefälles. Mit dieser Methode lassen sich auch sehr dünne Temperaturgrenzschichten quantitativ vermessen.

In Fig. 11 sind unten Zahlenwerte – 10 und 134 – angegeben, die einer Kenngröße, der sog. Jakob-Zahl (Ja) entsprechen. Diese Jakob-Zahl ist das Verhältnis der in der Flüssigkeit bis zur Erwärmung auf Sättigungstemperatur speicherbaren Wärme und der latenten Wärme, die der Dampf bei der Kondensation abgibt. Beides ist bezogen auf die Volumeneinheit.

Streulichtmethoden zur Flammenuntersuchung

Wie erwähnt, lassen sich Interferogramme immer dann eindeutig auswerten, wenn die Dichteänderung durch nur eine thermodynamische Zustandsgröße, z. B. die Temperatur, verursacht wird. In Mehrstoffsystemen, z. B. zu Untersuchungen thermischer Stofftrennung oder chemischer Reaktionen, verursachen Temperatur und Gemischkonzentration die Dichteänderungen. Bei der Interferometrie müßte man dann mit mehreren Lasern unterschiedlicher Wellenlänge, also mit verschiedenen Farben, arbeiten, weil die Lichtbrechung eine Funktion der Wellenlänge ist. Solche Mehr-Wellenlängen-Verfahren sind aber äußerst schwierig zu handhaben und von sehr beschränkter Genauigkeit.

Man wendet deshalb in Mehrstoff-Systemen zur Bestimmung der Konzentration der Einzelkomponenten die Lichtstreuung an, bei der die Wellenlänge des gestreuten Lichtes typisch für das Molekül ist, an dem es gestreut wird. Das Prinzip einiger Streulicht-Methoden zeigt Fig. 12. Hier sollen nur die Rayleigh-Streuung und die Laser-induzierte Fluoreszenz behandelt werden. Beide Methoden beruhen darauf, daß das zu

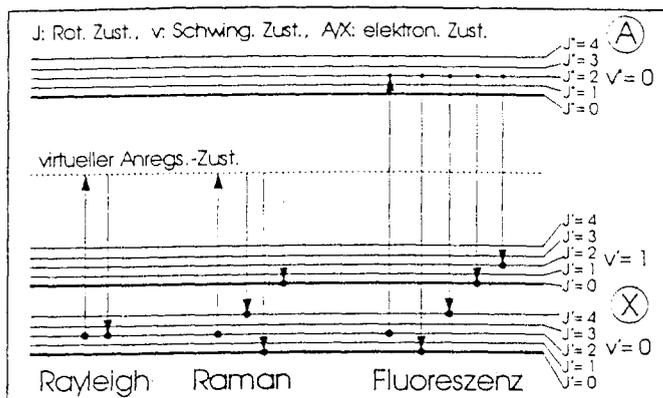


Fig. 12. Licht-Streuprozesse

identifizierende Molekül kurzzeitig ein Photon aufnimmt und dann wieder emittiert. Bei der Laser-induzierten Fluoreszenz (Fig. 12) wird ein Molekül durch die Aufnahme eines Photons des einstrahlenden monochromatischen Lichtes kurzzeitig aus dem Grundzustand „X“, dessen Energie sich aus rotatorischen (v') und oszillatorischen (J') Anteilen zusammensetzt, in einen angeregten Zustand „A“ gehoben und fällt nach Abgabe eines Photons der gleichen Wellenlänge wieder in den alten Energiezustand zurück. Die abgegebenen Photone können als Streulichtstrahlung gemessen werden. Ihre Zahl, und damit die Intensität des Streulichts, ist proportional der Zahl der kurzzeitig angeregten Moleküle.

Die Streulicht-Intensität kann man mit einer elektronischen Kamera in Form von Grauwerten registrieren, denen ein nachgeschalteter Computer beliebige Farben, sog. Falsch- oder Pseudofarben, zuordnet. Jede Farbe kennzeichnet somit einen ganz bestimmten Konzentrationswert des untersuchten Moleküls im durchstrahlten Feld. In den folgenden Beispielen werden nicht die Pseudofarben, sondern nur die Grauwerte wiedergegeben. Durch geeignete Wahl der Wellenlänge des Lichtes kann man die interessierende Molekülart, z. B. das OH-Radikal, in einer Flamme gezielt anregen. Für das OH-Radikal verwendet man dazu monochromatisches Licht aus einem Excimer-Laser mit 308 nm Wellenlänge, also im ultravioletten Bereich.

Die Rayleigh-Streuung funktioniert ähnlich, nur wird hier der energetische Zustand des anzuregenden Moleküls weniger hoch, nämlich nur bis zu einem virtuellen Energieniveau, angehoben. Die Streustrahlung hat ebenfalls die Wellenlänge des anregenden Lichtes. Das aufgenommene und das emittierte Photon lassen sich dadurch unterscheiden, daß man das anregende monochromatische Licht in einem ganz schmalen Lichtband – einem sog. light-sheet – in das zu untersuchende Fluid einstrahlt und senkrecht zur Strahlungs-

richtung dieses light-sheets die emittierten Photonen, also die Streustrahlung, mißt. Dazu wird ein Laserstrahl durch Zylinder-Linsen zu einem wenige 10tel mm dicken Lichtband aufgeweitet, das den Versuchsraum durchdringt. Senkrecht dazu erfaßt eine elektronische Kamera nur Licht einer ganz bestimmten Wellenlänge, nämlich der des Streulichtes aus dem Untersuchungsraum (Fig. 13).

Die Methoden der Lichtstreuung – selbstverständlich nicht nur die laser-induzierte Fluoreszenz und die Ray-light-Streuung, sondern auch die in der Technik häufig verwendete Raman-Streuung – lassen sich besonders vorteilhaft auf die Analyse von Verbrennungsvorgängen [15] in stationären Brennkammern, aber auch in Zylindern von Kolbenmotoren anwenden. Hier sollen einige Einblicke in den Reaktionsablauf von Wasserstoffbrennern vermittelt werden. Wasserstoff wird heute als künftiger Brennstoff nicht nur für Kolbenmotoren, sondern auch für Triebwerke in der Luft- und Raumfahrt gesehen. Jeder Verbrennungsvorgang unterliegt reaktionskinetischen – also rein chemischen – und fluiddynamischen Einflüssen, wobei letztere den Wärme- und Stofftransport bestimmen. Da bei der Wasserstoffreaktion die Reaktionskinetik äußerst schnell ist, kann man an Wasserstoff-Flammen die fluiddynamischen Einflüsse auf die Förderung des Verbrennungsablaufes, also die Erhöhung der Flammengeschwindigkeit, sehr gut untersuchen. Zwei Beispiele sollen Einblicke in die Flammenstruktur vermitteln. Die Brennzone breitet sich durch Wärme- und Stofftransport in das noch unverbrannte Gemisch aus. Bei technischen Brennern wird das Brennstoff/Luft-Gemisch in Form einer Strömung in die Brennkammer eingebracht, und die Flammenfront bewegt sich gegen diese Strömung. Sind Strömungsgeschwindigkeit und

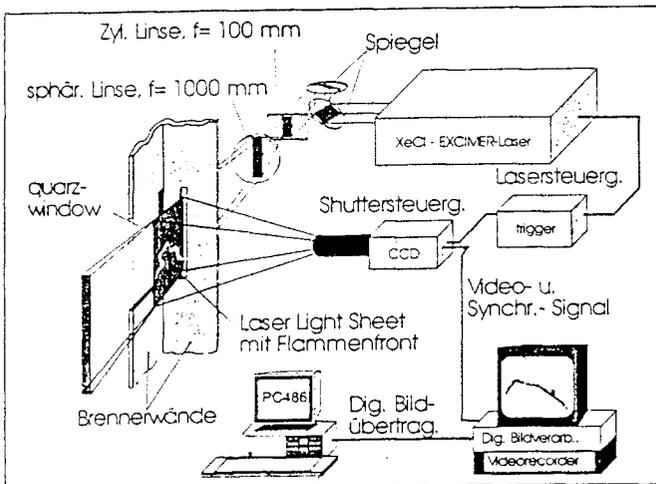


Fig. 13. Versuchsanordnung für Experimente zur Flammenstruktur mittels Laser-induzierter Fluoreszenz (LIF)

Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit gleich, stellt sich dies für einen außenstehenden Beobachter als ortsfeste Flamme dar, z. B. wie beim Bunsenbrenner. Man spricht auch von einer stabilisierten Flamme. Ist die Strömungsgeschwindigkeit größer als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Brennzone, wird die Flamme weggetragen und kann erlöschen, z. B. wie beim Kerzenauspusten. Schließlich kann noch die Oxidation an der Oberfläche eines festen Körpers erfolgen, z. B. einem glühenden Holzsplit, das natürlich von der Strömung nicht weggetragen wird. Hier läßt sich durch erhöhte Sauerstoff- bzw. Luftzufuhr – „Blasen“ – die Oxidationsrate verbessern.

Flammen sind wesentlich unruhiger, als es nach der Beobachtung mit bloßem Auge den Anschein hat. Dies gilt auch für stationäre Brennkammern. Beobachten wir mit der Laser-induzierten Fluoreszenz eine Wasserstoff-Flamme in einer einfachen Brennkammer (Fig. 14) [16], zunächst ohne Zuhilfenahme der Ultrakurzzeit-Aufnahmetechnik, so sehen wir eine unseren herkömmlichen Vorstellungen entsprechende „Flamme“. Die oberste Fluoreszenz-Aufnahme in Fig. 14 zeigt die über eine kurze Zeit gemittelte Verteilung des OH-Radikals in der vom Lichtband des Lasers durchstrahlten Ebene. Da das OH-Radikal das am stärksten

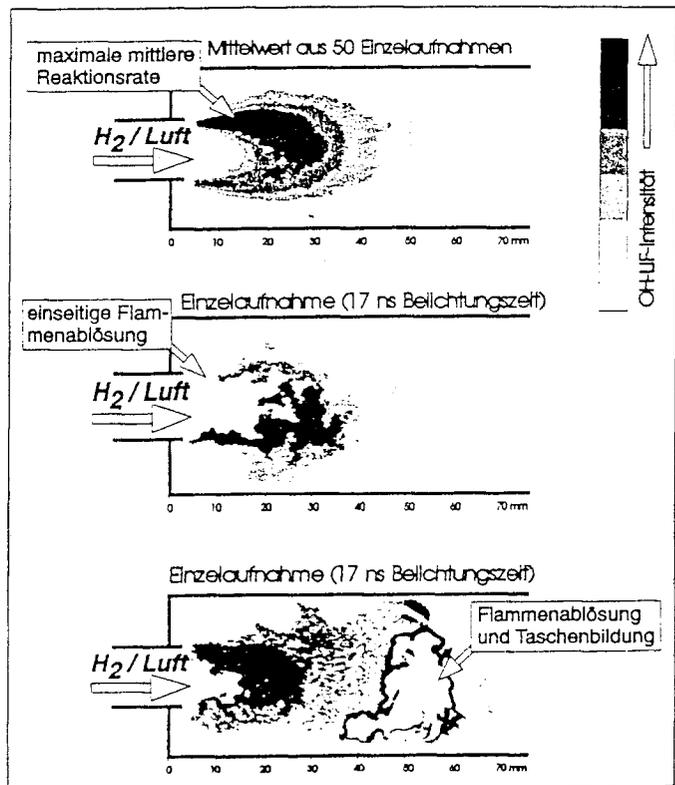


Fig. 14. Struktur vorgemischter Wasserstoff-Flammen in einer Brennkammer

MA

aktive Produkt bei der Reaktionskinetik der Wasserstoff-Verbrennung ist, vermittelt die Farbabstufung die örtliche Reaktionsstärke. Man erkennt die Zone höchster Reaktionsrate – schwarze und dunkelgraue Bereiche – nur wenig stromabwärts und zufällig etwas oberhalb der Einblasstelle.

Das scheinbar ruhige Flammenbild verändert sich stark, wenn die Aufnahmezeit auf sehr kurze Perioden – z. B. 17 ns – reduziert wird. Zwei Momentaufnahmen dieses Flammenzustandes zeigt Fig. 14 unten. In der oberen dieser beiden Aufnahmen löst sich die Flamme für einen Augenblick von der Einblaseöffnung des Brenners ab, trotz Vorhandenseins eines gut brennbaren Gemisches aus Wasserstoff und Luft erfolgt also momentan dort keine Reaktion.

Solche reaktionsfreien Zonen können, wie aus der untersten Aufnahme in Fig. 14 ersichtlich, innerhalb der Wasserstoff-Flamme über einen langen Strömungsweg erhalten bleiben. In dem hochreaktiven Wasserstoff/Luft-Gemisch werden diese kurzzeitig vorhandenen unverbrannten „Taschen“ schließlich auch reagieren, und aus der Verbrennungszone fließt ein voll durchreagiertes Gemisch aus Wasserdampf, Stickstoff und einem Rest an Sauerstoff ab. Anders sind die Folgen, wenn man als Brennstoff nicht Wasserstoff, sondern einen Kohlenwasserstoff, womöglich noch mit hohem Kohlenstoffanteil, verwendet. Hier sind diese Taschen Quellen von Rußbildung, der dann im Abgas zur Umweltbelastung wird.

Wir haben aus Fig. 14 zwar einen Einblick in die Flammenstruktur gewonnen und damit die Tatsache realisiert, daß bei nicht ganz optimaler Verbrennung Zonen unverbrannten oder schlecht verbrannten Gemisches existieren. Zur Einsicht, wie es physikalisch zu diesen Zonen kommt, reichen die in Fig. 14 vermittelten Beobachtungen nicht aus. Wir müssen hierzu die Flammenstruktur noch feiner auflösen und uns um die Turbulenz in der Flamme und in ihrer Umgebung kümmern, z. B. indem wir ein homogenes Gemisch aus Wasserstoff und Luft durch einen rechteckigen Kanal strömen lassen, dessen Querschnitt an einer Stelle durch ein seitlich eingebrachtes dünnes Blech verengt ist (Fig. 15). Zündet man die Flamme nun an der Einströmstelle und ist die Flammengeschwindigkeit größer als die Strömungsgeschwindigkeit, so läuft die Flamme durch den Kanal, holt also sozusagen das vor ihr strömende Gemisch ein. Das in den Kanal eingeschobene Blech verursacht als Strömungshindernis Turbulenz, deren Einfluß auf die Flamme sich untersuchen läßt, wenn man die Flamme in dem Augenblick erfaßt, in dem sie das Hindernis umbrennt.

Beobachtet man die Flammenstruktur in diesem Augenblick bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Gasströmung, aber sonst gleichen thermo-fluiddynamischen Gegebenheiten, so stellt man eine deutliche

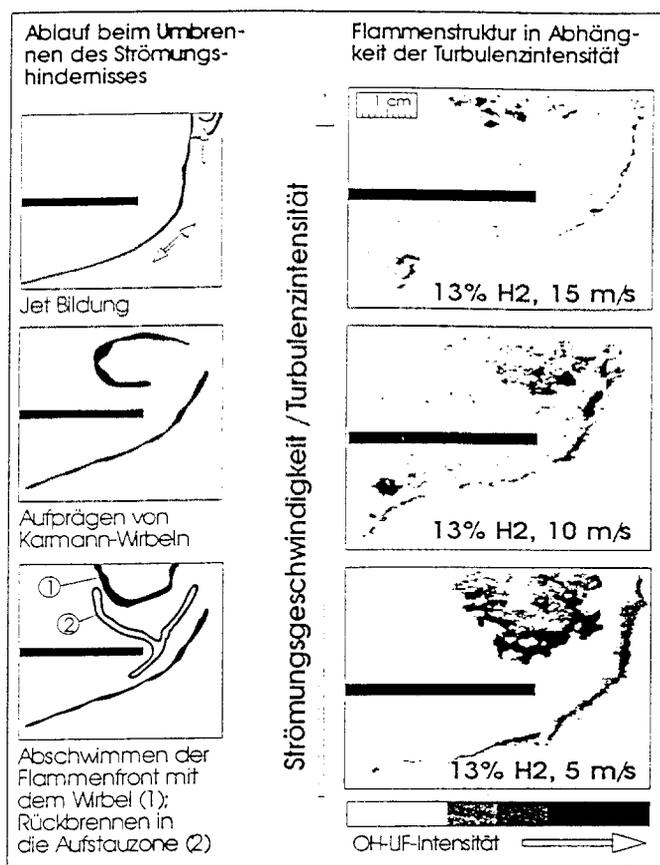


Fig. 15. Ausbreitung von H₂-Luft-Flammen über ein Strömungshindernis

Verengung der Flammenzone mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit fest (Fig. 15). Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ist die Flammenfront vor dem Hindernis und seitlich davon noch relativ breit, und das OH-Radikal ist kontinuierlich – wenn auch mit Konzentrationsschwankungen – über die Flammenfront verteilt. Bei erhöhter Strömungsgeschwindigkeit beobachtet man Lücken in der Flammenfront und damit auch Zonen, in denen kein OH mehr vorhanden ist. Erhöhte Strömungsgeschwindigkeit bedeutet zunehmende Turbulenz, und damit ist durch diese optischen Aufnahmen deutlich gemacht, daß starke Turbulenz Löscheffekte für die Flamme mit sich bringt. Dabei muß man sich verdeutlichen, daß eine Strömungsgeschwindigkeit von 15 m/s einem Sturmwind von 54 km/h entspricht.

Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten müssen also mathematische Ansätze, die die Flammengeschwindigkeit beschreiben, nicht nur Terme für die turbulente Flammenbeschleunigung, sondern auch für Löscheffekte durch eben diese Turbulenz enthalten. Unsere Untersuchungen ergaben, daß für diese Löscheffekte auch Stoffeigenschaften des Gasgemisches, wie Diffu-

sionskoeffizient und Temperatur-Leitfähigkeits-Koeffizient, eine wichtige Rolle spielen, die man dimensionslos z. B. in Form der Lewis-Zahl ausdrücken kann [17].

Schlußbetrachtung

Wie einleitend erwähnt, enthalten Rechenprogramme zur Vorhersage fluiddynamischer Phänomene und Zustände zwei Gruppen von Gleichungen, nämlich solche, die aus den Axiomen der Erhaltungssätze abgeleitet sind, und andere, die Austauschprozesse z. B. durch Turbulenz oder beim Phasenwechsel beschreiben. Die letztgenannten beruhen auf experimentellen Beobachtungen, in manchen großen kommerziellen Rechenprogrammen aber auch auf der mehr oder weniger realitätsnahen Phantasie des Programmierers, wobei verschiedentlich mathematische Formulierungen – „physikalische Modelle“ genannt – weitgehend unbeschoren von einem Programm in das andere übernommen werden. Dies erinnert mich etwas an die Deutschstunden meiner Schulzeit. Dort habe ich zuerst Nacherzählungen geübt, bevor ich zu Bildbeschreibungen bei meinen schulischen Aufsätzen übergehen durfte. Vielfach beobachtete ich bei der Analyse auch großer international verwendeter Rechenprogramme durchaus noch Nacherzählungscharakter in der Behandlung fluiddynamischer Vorgänge, nämlich in dem Sinne, daß irgend jemand einmal ein physikalisch-mathematisches Modell aufgestellt hat, das dann ungeprüft, ob weniger oder mehr richtig, übernommen und „nacherzählt“ wird, wobei dann Variationen entstehen, die nicht immer besser sein müssen als die ursprüngliche Fassung.

Informationen, die wir mit modernen optischen Methoden erarbeiten können, geben uns heute die Möglichkeit der „Bildbeschreibung“ bei der mathematischen Formulierung fluiddynamischer Phänomene.

Wir kommen dabei der physikalischen Realität wesentlich näher und können erwarten, daß Auslegungsrechnungen für technische Maschinen, Apparate und Anlagen zuverlässiger werden. Dies gilt ganz besonders für die Vorhersage sog. transienter Zustände, wie sie z. B. bei Stör- und Unfällen auftreten bzw. zu erwarten sind.

Ein weiterer zukünftiger Schritt müßte dann die „freie Aufsatzgestaltung“ sein, die es ermöglicht, auch komplizierte fluiddynamische Vorgänge nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ genau und zuverlässig zu beschreiben.

1. Mayinger, F.: Optical Measurements – Application and Potential. Berlin: Springer 1994
2. Gabor, D.: *Nature* 161, 777 (1948); *Proc. Roy. Soc. A* 197 454 (1949); *Proc. Phys. Soc. B* 64, 449 (1951)
3. Mayinger, F., in: *Optische Meßverfahren in der Wärme- und Stoffübertragung*. U. Grigull, H. (Hrsg.). Berlin: Springer 1991
4. Andresen, P., Meijer, G., Schlüter, H., Voges, H., Koch, A., Hentschel, W., Oppermann, W., Rothe, E.: *Appl. Opt.* 29, 2392 (1990)
5. Andresen, P., Bath, A., Gröger, W., Lülff, H. W., Meijer, G., ter Meulen, J. J.: *ibid.* 27, 365 (1988)
6. Neumann, M.: Dissertation Univ. Hannover 1978
7. Tigges, K. D., Mayinger, F.: *Chem. Eng. Progr.* 18, 171 (1984)
8. Lehner, M., Glückert, U., Mayinger, F.: *Chem.-Ing.-Tech.* 65, 1355 (1993)
9. Mayinger, F., Panknin, W.: *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conference, Tokyo 1994, Vol VI, 28*
10. Chávez, A., Mayinger, F.: *Conf. on Heat Transfer*, p. 187 (1990)
11. Chávez, A., Mayinger, F.: *Int. J. Heat Mass Transf.* 35, 691 (1992)
12. Panknin, W.: Dissertation Univ. Hannover 1977
13. Nordman, D., Mayinger, F.: *Temperatur, Druck und Wärmetransport in der Umgebung kondensierender Blasen*. VDI-Forschungsheft 605 (1981)
14. Chen, Y. M., Nordmann, D., Mayinger, F., in: *Heat Transfer at the Phase-Interface Phenomena in Multiphase Flow*, p. 433 (G. F. Hewitt et al., eds.). New York: Hemisphere 1991
15. Andresen, P., Rothe, E., Schlüter, Wolff, D., Voges, H., Koch, A., Hentschel, W., Oppermann, W.: *Appl. Opt.* 31, 7684 (1992)
16. Ardey, N., Beauvais, R., Mayinger, F., Strube, G.: *Flame Propagation Around a Single Obstacle of Instationary H₂-Air Flames*. Final Report, BMFT 1500824, GRS 1994
17. Beauvais, R.: Dissertation TU München 1994