

# Strömung und Wärmetransport in Natur und Technik, sichtbar gemacht

F. Mayinger\*

Institut für Verfahrenstechnik der Universität, D-3000 Hannover

High-speed cinematography and optical interferometry make it possible to visualize the physical occurrences with fluid flow and heat transfer which are not accessible to the naked eye due to its incapacity to follow fast movements and to comprehend phase shifts of a light wave due to temperature changes in a transparent fluid. Examples of velocity- and temperature fields with free and forced convection in single and two-phase flow are presented and physically analyzed.

## Der Wärmetransportprozess

Das Wort „warm“ wird in der Umgangssprache als subjektive und relative Temperaturangabe verwendet. Das daraus abgeleitete Substantiv, die Wärme, stellt jedoch eine Energieform dar. Wärmetransport bedeutet dementsprechend die Übertragung dieser Energieform von einem System auf ein anderes, wobei zwischen beiden ein Temperaturgefälle herrschen muß. Dieser Vorgang ist uns aus der täglichen Erfahrung bekannt, so melden z.B. Sensoren in der menschlichen Haut Temperaturveränderungen, die durch Wärmetransport hervorgerufen sind.

Wärme kann transportiert werden durch Strahlung, Leitung, Konvektion.

Der globale Wärmetransport zwischen Erde und Weltall findet durch Strahlung statt. Innerhalb der Erdatmosphäre und vor allem auch in technischen Apparaten und Maschinen spielt der Wärmetransport mit Hilfe eines strömenden Fluids – einer Flüssigkeit, eines Gases oder auch eines mehrphasigen Gemisches – die wesentliche Rolle, und man spricht dann von konvektivem Wärmetransport. Wärmeleitung ist im

wesentlichen auf feste Körper beschränkt, da bei fluiden Systemen schon geringe Temperaturunterschiede Konvektionsbewegungen, d.h. Strömung hervorrufen.

Damit sind für viele technische Anwendungen und auch häufig in der Natur Strömung und Wärmetransport eng verbunden und beeinflussen sich gegenseitig. Die Gesetze, nach denen Strömungen und Wärmetransport erfolgen, lassen sich zwar global, scheinbar einfach, aufbauend auf den Erhaltungssätzen für Masse, Energie und Impuls, formulieren – man kommt dann z.B. zu der bekannten Navier-Stokes-Gleichung –; für konkrete quantitative Aussagen müssen jedoch das Strömungs- und das Temperaturfeld in unmittelbarer Nähe des Körpers, von oder zu dem Wärmetransport erfolgt, im Detail bekannt sein. Für diese Information sind wir auch heute noch auf Experimente angewiesen, deren Ergebnisse nicht selten dann in empirischen Ansätzen münden.

Eines der einfachsten Experimente zum Wärmetransport, das man anstellen kann, ist sicher die Beobachtung der thermohydraulischen Vorgänge und der Temperaturverhältnisse beim Eintauchen eines Fingers in kaltes Wasser. Wir nehmen dabei an, daß es uns gelungen ist, das Temperaturfeld um diesen Finger mit einer optischen Methode sichtbar zu machen. In Fig. 1, die einen Finger als Schattenriß zeigt, sind die weißen und schwarzen Linien um diesen Finger in erster Näherung jeweils Linien konstanter Temperatur, sog. Isothermen. Zwischen zwei schwarzen Linien herrscht für diesen konkreten Fall im Wasser ein Temperaturunterschied von 0,1 K. In Flüssigkeitsbereichen, in denen keine Linien zu sehen sind, ist die Temperatur des Wassers konstant. Je enger also die Linien zusammengedrängt sind, um so ein größeres Temperaturgefälle herrscht dann im Wasser.

Das Temperaturgefälle ist auf ein enges Gebiet – Grenzschicht genannt – begrenzt, dessen Isothermen sich lamellen- oder schichtenförmig um den Finger lagern. Geht man von der Fingerunterseite nach oben,

\* Vortrag anlässlich der 110. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, Innsbruck, 17. 21. September 1978

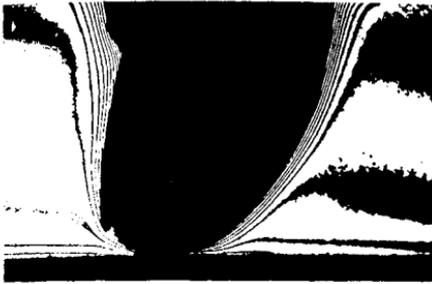


Fig. 1. Temperaturfeld um einen in Wasser getauchten Finger

so ist zu beobachten, daß die Grenzschichtdicke und damit auch die hautnahe Flüssigkeitstemperatur zunimmt, was dadurch zu erklären ist, daß längs des Fingers erwärmte Flüssigkeit nach oben strömt, wobei sie in der Temperatur von unten nach oben zunimmt. Diese Konvektion wird durch Auftriebseffekte der leichteren, wärmeren Flüssigkeitsteile hervorgerufen.

Auf der Nagelseite des Fingers zeigen sich Unstetigkeitsstellen im Verlauf der Isothermen. An der Nagelspitze sind die an der Fingerkuppe bereits gebildeten Isothermen teilweise unterbrochen, was darauf zurückzuführen ist, daß das hornartige Material des Nagels aus dem Fingerinneren wesentlich weniger Wärme nach außen leitet und damit an das Wasser abgibt als durchblutete Hautpartien. Demgegenüber zeigt die starke Zunahme der Linien am Nagelbett einen besseren Wärmetransport, da hier im Verhältnis zu den übrigen Hautpartien eine stärkere Durchblutung herrscht. Dieses einfache Experiment hat bereits wichtige, in Naturwissenschaft und Technik selbstverständlich lange bekannte Gesetzmäßigkeiten des konvektiven Wärmetransports vermittelt, nämlich:

- an der wärmeabgebenden oder aufnehmenden Wand ist im wärmetransportierenden Fluid eine Grenzschicht vorhanden,
  - ihre Dicke hängt von den Strömungsbedingungen ab,
  - das Temperaturgefälle in ihr ist eine Funktion des Wärmefflusses und der Strömungsbedingungen.
- In der Technik wird die letztgenannte Aussage meist im umgekehrten Sinne verwendet, nämlich:
- die pro Fläche übertragene Wärmemenge ist proportional dem Temperaturgefälle in unmittelbarer Wandnähe.

### Optische Methoden zur Erfassung des Temperaturfeldes

Wie man weiß, ist das menschliche Auge nicht in der Lage, das in Fig. 1 gezeigte Temperaturfeld um

einen Körper ohne technische Hilfsmittel zu erkennen. Dies liegt daran, daß es nur einen Teil des Informationsgehaltes einer Lichtwelle auswertet, nämlich deren Frequenz in Form der Farbe und deren Amplitude als Helligkeit. Für die dritte Information, nämlich die Phasenlage der Lichtwelle, bedarf es spezieller optischer Einrichtungen, sogenannter Interferometer, die durch Vergleich und Überlagerung von Lichtwellen aus einem dabei entstandenen Streifenmuster – den sogenannten Interferenzstreifen – Auskunft über die Phasenlage bzw. deren Änderung geben. Für die Untersuchung von Wärmeübergangsprozessen werden deshalb seit langem Interferenzverfahren, z.B. in der Methode nach Mach-Zehnder, verwendet.

Seit einigen Jahren wird diese klassische optische Methode durch eine neue Interferenztechnik ergänzt, ja teilweise ersetzt, die sich aus der Holographie [1, 2] entwickelt hat. Im Unterschied zum Mach-Zehnder-Interferometer, welches das Licht in zwei Wege aufspaltet, von denen der eine durch das Testobjekt und der andere durch ein Vergleichsobjekt führt, bis beide Teilstrahlen schließlich wieder zusammentreffen und dabei zur Interferenz kommen, teilt die Holographie den Meßvorgang in zwei Zeitschritte auf, wobei jedes Mal ein und dasselbe Testobjekt durchstrahlt wird [3, 4].

Ein erstes Hologramm entsteht auf der lichtempfindlichen Platte, wenn sich, wie in Fig. 2 gezeigt, die Referenzwelle und die durch den Versuchsraum gehende Objektwelle überlagern. Hierbei ist der zu untersuchende wärmeübertragende Vorgang im Versuchsraum noch nicht in Gang gesetzt. Es liegen jedoch alle anderen thermodynamischen und fluidodynamischen Zustände wie Druck, Mengenstrom und Fluidtemperatur, bei denen die Untersuchungen ablaufen sollen, bereits vor. Der durch den Versuchsraum tretende Lichtstrahl ist also bereits durch optische Unzulänglichkeiten der Autoklavenfenster durch Strömungsturbulenz oder durch versuchsbedingte Temperaturfelder beeinflusst.

Die fotografische Platte wird nach dieser Belichtung

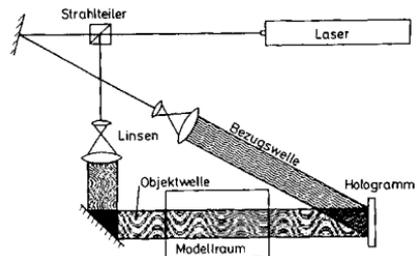


Fig. 2. Optischer Aufbau für die holographische Interferometrie

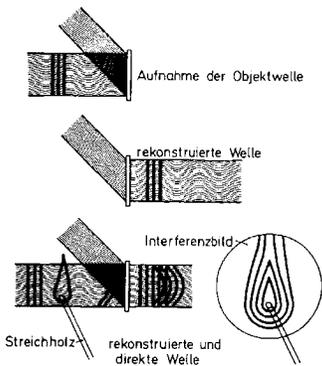


Fig. 3. Schema des „real-time“-Verfahrens für die holographische Interferometrie

entwickelt und fixiert, was z.B. an Ort und Stelle in einer einfachen überstülpbaren Küvette erfolgen kann. Entfernt man die Platte zu dieser Prozedur, so muß sie nachher wieder auf eine halbe Wellenlänge genau an die alte Stelle zurückpositioniert werden, was bei genügend fein justierbarem Plattenhalter, z.B. durch Piezoquarzverstellung, durchaus möglich ist.

Die entwickelte fotografische Platte enthält nun die Information von zwei verschiedenen Wellenfronten, nämlich von der durch das Versuchsobjekt gehenden Welle – Objektwelle genannt – und von der Bezugswelle, die über Spiegel unmittelbar auf die Platte traf. Beleuchtet man nun die fotografische Platte mit der Bezugswelle allein, die jetzt die Funktion einer Wiedergabewelle übernimmt, so wirkt die Fotoplatte ähnlich wie ein Beugungsgitter mit örtlich variabler Gitterkonstante und erzeugt u.a. auch eine Reproduktion der gespeicherten Objektwelle.

In einem weiteren Schritt setzt man den Wärmetransportprozeß im Versuchsraum in Gang – in Fig. 3 durch das Steichholz angedeutet – und beleuchtet die Hologrammplatte nun auch mit der den Versuchsraum durchdringenden Objektwelle. Hinter der Hologrammplatte interferieren dann beide Wellen – die neue Objektwelle und die ursprünglich in der Hologrammplatte gespeicherte Objektwelle, jetzt Vergleichswelle genannt – miteinander und geben das im Versuchsraum herrschende Temperaturfeld wieder. Voraussetzung hierfür ist, daß Bezugswelle und Wiedergabewelle exakt gleiche Phasenlage haben, was nur durch Verwendung einer kohärenten Lichtquelle – meist eines Gas-Lasers – erreichbar ist.

Mit dieser Aufnahmemethode – dem sogenannten Echtzeit- oder real-time-Verfahren – ist es möglich, das Temperaturfeld kontinuierlich z.B. mit Hilfe einer

Filmkamera zu registrieren. Die Auswertung [5] der Interferenzlinien ist nach den Gesetzen der Optik einfach, wenn sie eindeutig der Änderung einer Zustandsgröße, z.B. der Temperatur, wie es bei der Wärmeübertragung in der Regel der Fall ist, zugeschrieben werden können und das Zustandsfeld über den Strahlweg weitgehend homogen ist.

### Wärmeübertragungsprozesse bei natürlicher und bei erzwungener Konvektion

Wie einleitend erwähnt, erfolgt bei konvektiver Wärmeübertragung der Wärmetransport durch ein strömendes Fluid – Gas oder Flüssigkeit –, das entweder durch Auftriebskräfte oder durch Druckgefälle in Bewegung gesetzt wird. In technischen Anlagen wird das Druckgefälle durch Gebläse oder Pumpen aufgebracht, man spricht dann von Zwangskonvektion. Auftriebsbedingte Strömung wird als Natur- oder freie Konvektion bezeichnet. Beide Konvektionsformen unterscheiden sich in ihrem Wärmetransportverhalten dadurch wesentlich, daß bei der Naturkonvektion die übertragene Wärme auch den Antrieb für die Bewegung des Fluids liefert, während die Zwangskonvektion, angetrieben von der Pumpe oder dem Gebläse, weitgehend unabhängig von der übertragenen Wärmemenge ist.

Ein einfaches Beispiel für Naturkonvektion ist die wärmeabgebende oder -aufnehmende senkrechte Wand – sei es eines Zimmers, eines Wasserbehälters oder auch einer Felsformation. Hierbei hat man große Flächen mit langen Strömungswegen, und es erhebt sich die Frage, ob die laminare wandnahe Grenzschicht beliebig dick werden kann.

Figur 4 zeigt das Temperaturfeld an einer senkrechten wärmeaufnehmenden Wand [6]. Man sieht, daß aus dem Interferenzbild zuverlässige Schlüsse auf die Grenzschichtverhältnisse, z.B. Grenzschichtablösung, Grenzschichtinstabilitäten und auch Umschlag von laminar in turbulent, gezogen werden können. Es sind drei Abschnitte aus verschiedenen Höhen der Wand herausgegriffen. Im obersten Bereich, in dem die Strömung anläuft, ist die wandnahe Schicht laminar und glatt. Nach genügend großer Anlauflänge zeigt die laminare Schicht wellige Störungen und instabiles Verhalten. Diese Wellen verstärken sich auf dem weiteren Weg der Strömung nach unten, bis die wandnahe Schicht turbulent wird.

In technischen Apparaten, in denen der Wärmetransport meist unter den Bedingungen der Zwangskonvektion erfolgt, sind die Strömungsgeschwindigkeiten durchweg wesentlich höher als bei Naturkonvektion und reichen von einigen m/s bis zu Schallgeschwindigkeit. Wärmetauschende Apparate sind in der Technik häufig in der Form von Rohrbündeln, wie im oberen

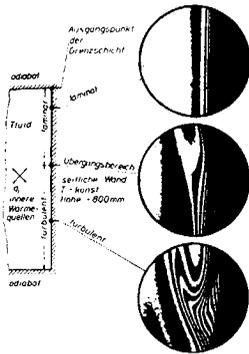


Fig. 4. Freie Konvektion an einer senkrechten Wand

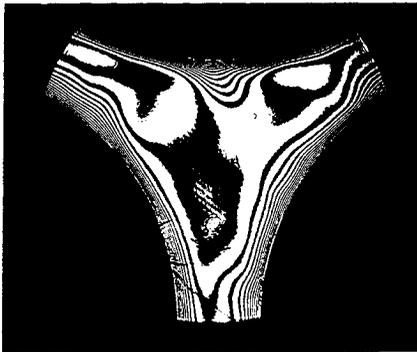
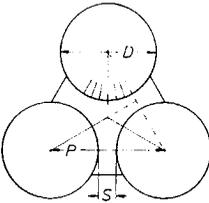


Fig. 5. Temperaturfeld im Stabebündel bei erzwungener Konvektion

Teil von Fig. 5 ausschnittsweise skizziert, aufgebaut, wobei die beiden Fluide, zwischen denen die Wärme übertragen wird, durch die Rohrwände getrennt sind und die wärmetauschenden Fluide axial längs der Rohrwand fließen. Schwierig ist die genaue Erfassung des örtlichen Wärmetransportes über den Umfang der Rohre auf deren Außenseite, da der Strömungsquerschnitt und damit die Wandeinflüsse variieren.

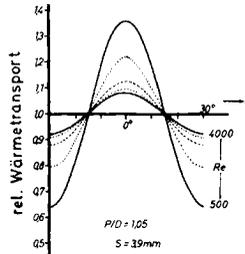


Fig. 6. Örtlicher zu mittlerem Wärmetransport über den Umfang eines Stabes im Bündel ( $\phi = 0^\circ$  und  $\phi = 30^\circ$  engerer Abstand zwischen den Stäben)

Für mäßige Strömungsgeschwindigkeiten ist das Temperaturfeld in einem solchen zwischen drei Rohren gebildeten Strömungskanal im unteren Teil von Fig. 5 dargestellt [7]. Das Beispiel gibt die Situation wieder, bei der sich in dem von Wänden am weitesten entfernten Bereich zwar bereits ein turbulenter Kern ausgebildet hat, an den engsten Stellen zwischen den Stäben aber gerade erst der Umschlag von laminarer Strömung zu turbulenter Strömung erfolgt ist. Es ist deutlich zu sehen, daß die Grenzschichtdicke und auch der Verlauf der Isothermen über den Stabumfang unterschiedlich ist, was darauf schließen läßt, daß die Wärmeabgabe örtlich nicht konstant ist.

Eine Auswertung (Fig. 6) bestätigt dies. Der Wärmetransport ist an der engsten Stelle zwischen den Stäben am geringsten und erreicht sein Maximum dort, wo der Abstand zum Nachbarstab am größten wird.

#### Rasch ablaufende Wärmeübergangs- und Strömungsvorgänge

Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, aber insbesondere auch bei Änderung des Aggregatzustandes des Fluides, sei es beim Sieden oder beim Kondensieren, laufen die Wärmetransportphänomene so rasch ab, daß das Auge zu träge ist, sie zu beobachten, und auch herkömmliche Kameras in ihrer Aufnahme Frequenz nicht ausreichen. Hier hat die moderne Hochgeschwindigkeitskinematographie gerade in jüngerer Zeit neue Möglichkeiten eröffnet. Käufliche Drehprismenkameras erlauben die Herstellung vorführfähiger Filme mit Aufnahme Frequenzen von bis zu 20000 Bildern pro Sekunde. Bei der Wiedergabe in herkömmlichen Projektoren ergibt sich dadurch ein etwa 1000facher Zeitdehnungseffekt, der für die Analyse und Beobachtung der meisten Strömungsvorgänge ausreicht. Verzichtet man auf die Vorführfähigkeit des aufgenommenen Filmes, so kann man ebenfalls im Handel befindliche Trommelkameras syn-



Fig. 7. Dampf-Flüssigkeitsverteilung und Tropfenspektrum in einem Siederrohr

chronisiert und in Verbindung mit Hochfrequenzblitzlampen einsetzen, die bei einer Blitzdauer von  $10^{-6}$  s über Bruchteile von Sekunden Bildfrequenzen bis zu 100 kHz ermöglichen. Diese Ultrakurzzeitfotografie und Hochgeschwindigkeitskinematographie sind in der Wärmeübertragung besonders dann von Nutzen, wenn es gilt, rasch veränderliche Grenzflächen, wie beim Sieden und in der Zweiphasenströmung, zu analysieren.

Abhängig von fluiddynamischen Parametern wie Mengenstrom, Gemischverhältnis und Kanalgeometrie stellen sich bei Zweiphasenströmungen, wie sie z.B. in den Siederrohren fossilbefeuerter Dampfkessel vorliegen, bestimmte örtliche Phasenverteilungen, sogenannte Strömungsformen, ein. Die Kenntnis der Phasenverteilung über den Strömungsquerschnitt ist von Bedeutung für eine zuverlässige Vorhersage des Wärmetransportes von der Wand an das Gemisch und zwischen seinen Komponenten, d.h. Dampf und Flüssigkeit. Bei hohem Dampfgehalt bildet sich eine Ringströmung aus mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm an der Wand und im Dampf Kern eingebetteten Flüssigkeitstropfen. Die Aufteilung der Flüssigkeit auf beide Zonen sowie die Größe und radiale Bewegung der im Dampf getragenen Tropfen läßt sich optisch dadurch erfassen, daß man versucht, axial in die Strömung zu blicken. Ein Ergebnis dieser Aufnahmetechnik zeigt Fig. 7, in der in fotografischen Aufnahmen die Ringströmung im Ausbildungsstadium und beim Übergang zu Sprühströmung mit dünnem Flüssigkeitsfilm dargestellt ist [8].

Der Flüssigkeitsfilm ist nicht, wie bei theoretischen Betrachtungen häufig angenommen wird, von gleichmäßiger Dicke über den Umfang der Rohrwand, und es bilden sich — besonders bei mittleren und kleineren Gas- bzw. Dampfgehalten — Flüssigkeitsbrücken über den Dampfraum aus. Die Phasengrenzfläche wechselt rasch, was den Transport und das thermodynamische Gleichgewicht zwischen den Phasen fördert.

Bei Grenzbelastungen der Heizfläche können jedoch Berechnungen, die auf der Annahme eines gleichmäßig dicken Flüssigkeitsfilmes beruhen, zu falschen Voraussetzungen, z.B. zu wesentlich zu hohen kritischen Heizflächenbelastungen, führen.

Die Tropfen im Gaskern werden stetig aus dem Flüssigkeitsfilm neu gebildet und treten auch in diesen Flüssigkeitsfilm wieder ein. Dies bewirkt einerseits einen Impulsaustausch zwischen den Phasen und damit einen Druckverlust, andererseits aber eine Verbesserung des Wärme- und Stofftransportes.

Beide Austauschvorgänge werden von der radialen Tropfengeschwindigkeit und von der Größenverteilung des Tropfenspektrums bestimmt. Aus den optischen Aufnahmen lassen sich, wie Fig. 7 rechts zeigt, diese Größen in einer Sprühströmung einwandfrei ermitteln. Wie zu erwarten, haben größere Tropfen geringere radiale Geschwindigkeiten und damit kleinere Austauschendenzen als kleine, die der Turbulenz des Gases bzw. des Dampfes besser folgen.

Phasenwechselvorgänge in Kanalströmungen mit Geschwindigkeiten der Flüssigkeitspartikel bis zu einigen m/s lassen sich mit Belichtungszeiten von  $10^{-6}$  s und Aufnahmefrequenzen der Hochgeschwindigkeitskamera von 10 bis 20000/s noch auswertbar erfassen. Für höhere Geschwindigkeiten und rascher veränderliche Vorgänge bedarf es einer Zeitlupentechnik größeren Auflösungsvermögens. Hierfür wird auch heute noch die bereits vor vielen Jahren von Cranz und Scharidin [9] angegebene Aufnahmetechnik verwendet, die Belichtungszeiten bis herab zu  $10^{-8}$  s ermöglicht.

Als Beispiel für das Auflösungsvermögen dieser Aufnahmetechnik zur Untersuchung von Strömungsvorgängen sei die Verteilung des Flüssigkeitsstrahles in einem Venturi-Wäscher dargestellt. Der Venturi-Wäscher dient zur Auswaschung von submikroben Stäuben oder Aerosolen aus Gasen mittels Flüssigkeiten — meist Wasser —, die an der engsten Stelle des

Venturi-Kanals seitlich zugeführt werden. Das Gas ist dabei auf Geschwindigkeiten bis zu 120 m/s beschleunigt. In der technischen Auslegung dieses Apparates wurde bisher in der Regel angenommen, daß die Flüssigkeit von dem Gas in einen Schwarm kleinster Tropfen zerteilt wird.

Aufnahmen mit der Craz-Schardinschen Funkenzeitlupenmethode zeigen, daß die Flüssigkeit in der Venturi-Kehle nicht in Tropfen, sondern in lamellen- und membranförmige Gebilde zerfällt, da die vom Gas aufgebrachten Impuls- und Schwerkkräfte die tropfenbildende Oberflächenspannung der Flüssigkeit zunächst weit überwiegen [10]. Eine so gebildete Membranform ist in der Mitte von Fig. 8 dargestellt, wobei dasselbe Flüssigkeitsteilchen in einem Abstand von  $10^{-8}$  s zweimal aufgenommen ist. Der Staudruck der Gasströmung bläht die Flüssigkeitsmembran auf, bis sie, wie aus der rechten Aufnahme in Fig. 8 an einem anderen Flüssigkeitsteilchen ersichtlich, zerplatzt und sich daraus eine Vielzahl von Tropfen äußerst kleinen Durchmessers bildet.

Für instationäre Vorgänge des Wärmetransportes bietet es sich an, die optischen Methoden der Hochgeschwindigkeitskinematographie und der Interferometrie zu kombinieren, um somit Informationen über ein rasch wechselndes Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld zu erhalten. Als Beleuchtungseinrichtung ist dann selbstverständlich statt der Funken-Blitz-Strecke ein Laser entweder mit kontinuierlichem Licht – wie der Gas-Laser – oder mit Kurzlichtimpulsen – wie der Rubin-Laser – zu verwenden. Gas-Laser machen den Einsatz von Drehprismenkameras notwendig und beschränken damit die Aufnahmefrequenz auf max. 20.000 Bilder pro Sekunde. Rubin-Laser haben zwar eine extrem kurze Blitzdauer von nur  $10^{-8}$  s, erlauben aber in der Regel nur Doppel-

blitze, also zwei Aufnahmen kurzen zeitlichen Abstandes.

Ein interessanter und experimentell schwer zugänglicher Vorgang ist der Wärmetransport zwischen den Phasen bei wachsenden und kondensierenden Dampfblasen [11]. Figur 9 zeigt eine Dampfblase, die sich soeben an einem elektrisch beheizten Draht von 0,4 mm Durchmesser bildet. Seitlich am Rand des Bildes erkennt man deutlich, daß sich um den Draht eine Grenzschicht großen Temperaturgefälles gebildet hat, was beweist, daß diese Zone stark aufgeheizt ist, sogar erheblich über die Temperatur der Blasenoberfläche, also die Sättigungstemperatur, was man einfach durch Abzählen der Isothermen von außen bis zur Blasenoberfläche bzw. bis zu Drahtoberfläche feststellen kann. Daraus ist die Erkenntnis abzuleiten, daß die Wärme aus dem Draht zunächst zur Überhitzung der Flüssigkeit dient, also ein nach den Gesetzen der reversiblen Thermodynamik instabiler Zustand herbeigeführt wird. Erst wenn die Überhitzung so hoch ist, daß sich aus einer Keimstelle – einer Rauigkeit – am Draht die Blase bilden kann, fließt die in der überhitzten Grenzschicht gespeicherte Wärme der Phasengrenze zu und läßt durch Dampfbildung die Blase rasch anwachsen. Am Blasenkopf sind die Temperaturverhältnisse von der Driftströmung der kurz zuvor entstandenen, bereits nach oben aufgestiegenen Blase beeinflusst, und unmittelbar am Blasenfuß hat die Blase die sich in der Flüssigkeit um den Heizdraht bildende überhitzte Grenzschicht seitlich verdrängt.

Einfacher, zumindest was die Anfangsbedingungen betrifft, scheinen die Verhältnisse zu sein, wenn man Sattdampf in gleichmäßig temperierte unterkühlte Flüssigkeit blasenförmig einbringt und den Wärmeübergang bei der Kondensation der Dampfblasen be-

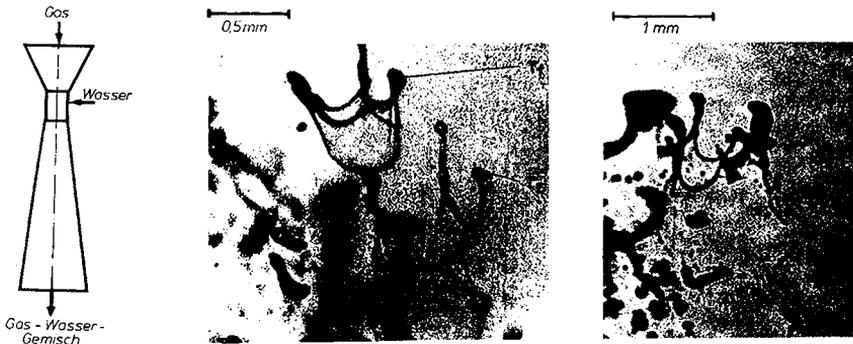


Fig. 8. Form und Zerfall von Flüssigkeitsteilchen in einer Gasströmung hoher Geschwindigkeit

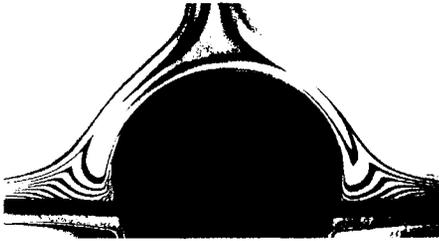


Fig. 9. Temperaturfeld um eine am beheizten Draht entstehende Dampfblase

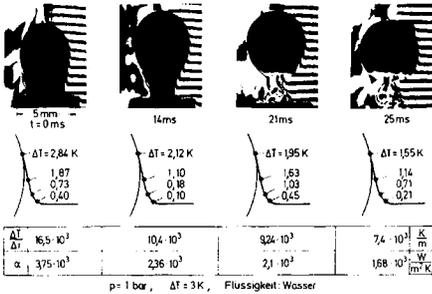


Fig. 10. Temperaturfeld um kondensierende Dampfblasen

trachtet. Im Prinzip gelten für den Wärmetransport an der Phasengrenze natürlich dieselben Gesetzmäßigkeiten wie beim Blasenwachstum. Aus Erfahrung weiß man, daß die Kondensationsgeschwindigkeiten sehr hoch sind, was sehr gute Wärmeübergangskoeffizienten an der Phasengrenze und damit sehr dünne Grenzschichten voraussetzt.

Ein auf die örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten auswertbares Interferenzbild benötigt Grenzschichten, in denen sich eine hinreichende Zahl von Interferenzstreifen identifizieren läßt. Bei kondensierenden Dampfblasen ist der Laufweg des Lichtstrahls wegen ihres kleinen Durchmessers kurz und der Einflußbereich des Kondensationsvorganges in der Flüssigkeit gering. Zur Erhöhung der Auswertgenauigkeit kann man zu einem einfachen optischen Trick greifen: Durch geringfügiges Verkippen eines Spiegels nach der Nullaufnahme des Holograms erzeugt man künstliche Interferenzstreifen, die dann durch das Temperaturfeld um die Blase abgelenkt werden. Figur 10 zeigt Momentaufnahmen einer kondensierenden Dampfblase, die in einer Flüssigkeit geringer Unterkühlung aufsteigt [12]. Das Auflösungsvermögen der herkömmlichen holographischen Interferenzmethode ohne Streifenvorgabe reicht nicht mehr aus, ein auswertbares Bild zu erzeugen, wie man aus dem

linken Teil jeder Blasenzone deutlich erkennt. Mit Streifenvorgabe ist die Auswertung mit guter Genauigkeit möglich. Durch Anlagern einer Flüssigkeitsschicht von Sättigungstemperatur, die sich bei Kondensationsvorgang bildet, nimmt der Wärmeübergangskoeffizient mit der Zeit ab, wodurch sich die Kondensationsgeschwindigkeit verringert.

## Schlußbemerkung

Der Einsatz optischer Methoden, z.B. der holographischen Interferometrie oder der Hochgeschwindigkeitskinematographie, hat selbstverständlich nicht nur den Zweck einer qualitativen Wissensvermittlung, sondern muß und soll dem Ingenieur und Naturwissenschaftler helfen, praktische Probleme zu lösen. Für eine optimale Auslegung von technischen Apparaten, Maschinen und Anlagen benötigt der Ingenieur eine zuverlässige mathematische Beschreibung der darin ablaufenden Vorgänge. Dies wiederum setzt voraus, daß eine klare und physikalisch richtige Vorstellung über den Ablauf der zu erwartenden Phänomene existiert, die ihrerseits eine Folge von Naturgesetzen sind.

Der zunehmende Einsatz von elektronischen Rechenmaschinen erlaubt es, auch komplizierte Vorgänge mathematisch zu beschreiben und durch numerische Lösung der Gleichungssysteme rechnerisch nachzuvollziehen, was einen vertieften Einblick in die physikalischen Zusammenhänge erfordert. Ihn zu vermitteln sind ganz besonders die optischen Meßmethoden in der Lage. Damit tragen sie wesentlich zum physikalischen Verständnis sowie zur Berechnung und Auslegung technischer Apparate bei.

- Gabor, D.: Nature 161, 777 (1948); Proc. Roy. Soc. A 197, 454 (1949); Proc. Phys. Soc. B 64, 449 (1951)
- Kiemle, H., Röss, D.: Einführung in die Technik der Holographie. Frankfurt/Main: Akad. Verlagsgesellschaft 1969
- Mayinger, F., Panknin, W.: 5th Int. Heat Transfer Conf., VI, p. 28, Tokio 1974
- Panknin, W.: CZ-Chem.-Techn. 3, 219 (1974)
- Hauf, W., Grigg, U.: Adv. Heat Transf. 6, 133 (1970)
- Mayinger, F., Steinberger, U.: Int. Symp. on Flow Visualization, Tokio 1977
- Panknin, W., Jahn, M., Reincke, H.-H.: 5th Int. Heat Transfer Conf., Tokio 1974
- Langner, H.: Dissertation TU Hannover 1978
- Cranz, C., Schardin, H.: Z. Phys. 56, 147 (1929)
- Mayinger, F., Neumann, M.: DICI MA Monogr. 80, 637 (1976)
- Mayinger, F., Nordmann, D., Panknin, W.: Chem.-Ing.-Techn. 46, 209 (1974)
- Mayinger, F., Nordmann, D.: ICHMT 1978 Int. Seminar, Dubrovnik 1978

Eingegangen am 6. Oktober 1978