

EINSATZ VON DIGITALER HOLOGRAFISCHER INTERFEROMETRIE ZUR ERFASSUNG VON TEMPERATURGRADIENTEN UND WÄRMETRANSPORT IN SIEDEVORGÄNGEN

APPLICATION OF DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR ANALYSIS OF TEMPERATURE GRADIENTS AND HEAT TRANSFER IN BOILING PROCESSES

G. Bloch, C. Jenke, J. Kuczaty, L. Böck, T. Sattelmayer

Technische Universität München, Lehrstuhl für Thermodynamik, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Holografische Interferometrie, Phasenwechsel, Zweiphasenströmung, Schlierenverfahren
Holographic Interferometry, Phase Change, Two-Phase Flow, Schlieren Imaging

Zusammenfassung

Die holografische Interferometrie bietet die Möglichkeit der zeit- und orts aufgelösten Untersuchung von Temperatur- und Dichtefeldern in wärmeübertragenden Anwendungen. Hierbei wird ein Versuchsvolumen mit kohärentem Licht durchstrahlt, das an den im Volumen auftretenden Dichtegradienten gebeugt wird. Im Anschluss an das Versuchsvolumen interferiert dieser Lichtstrahl mit einem zweiten, unbeeinflussten Strahl, so dass ein Interferenzmuster auf einem Aufnahmemedium erzeugt wird. Durch eine Überlagerung der Aufnahmen von beheiztem und unbeheiztem Zustand können durch analoge oder digitale Rekonstruktion vorhandene Temperaturgradienten sichtbar gemacht werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Aufbau zur digitalen holografischen Interferometrie genutzt, um Analysen der Wärmeübergänge in siedenden Strömungen zu ermöglichen. Als Lichtquelle diente ein He-Ne Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm, die Aufzeichnung erfolgte mit CCD Bildsensoren. Die Rekonstruktion der Aufnahmen erfolgte digital mit einem hierfür entwickelten Algorithmus. Die Versuche wurden mit einem niedrigsiedenden Kältemittel und Wasser durchgeführt. Die Dichtefelder für verschiedene Zustände konnten erfolgreich erfasst und rekonstruiert werden. Zur Validierung wurden zusätzlich Schlieren-Messungen durchgeführt, die Nutzbarkeit und Auflösungsvermögen des Verfahrens bestätigten.

Einleitung

Die Untersuchung von Strömungen mit Wärme- und Phasenübergängen stellt besondere Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik. So sind insbesondere die Dichte- und Temperaturfelder von großem Interesse, aber aufgrund der sehr schnell fluktuierenden und lokal begrenzten Vorgänge nur schwierig zu erfassen. Des Weiteren sind viele der gängig eingesetzten Messverfahren invasiv und führen somit potentiell zu einer Störung des untersuchten Systems. Optische Verfahren haben daher im Bereich der Mehrphasenströmung seit jeher einen hohen Stellenwert. Zu den klassischen Verfahren zählen hierbei neben dem Schlierenverfahren auch

verschiedene interferometrische Verfahren wie das Mach-Zehnder Interferometer und die holografische Interferometrie. Letztere bietet im Vergleich zum Mach-Zehnder Interferometer einen robusteren und optisch unempfindlicheren Aufbau sowie im Vergleich zum Schlierenverfahren höhere Empfindlichkeit bei kleinen Dichtegradienten (Hauf et al., 1991). Des Weiteren sind holografische Verfahren nicht durch eine Fokussierung auf eine Ebene des betrachteten Volumens beschränkt, sondern können das gesamte Volumen mit gleicher Genauigkeit erfassen (Eichler und Ackermann, 1993). Die holografische Interferometrie wurde als analoges Verfahren bereits in der Vergangenheit vielfach zur Untersuchung von Temperatur- und Dichtefeldern in wärmeübertragenden Anwendungen eingesetzt (siehe u.a. Van Dyke (1988); Lehner et al. (1999); Tauscher und Mayinger (1999); Lucic (2003); Manickham und Dhiri (2003)). Aufgrund des hohen Aufwands für die nasschemische Entwicklung der Holografieplatten wurden analoge holografische Verfahren in letzter Zeit nur noch selten eingesetzt. Mit der breiten Verfügbarkeit hochauflösender Bildsensoren und leistungsfähiger Rechner bietet sich daher mittlerweile eine Digitalisierung des Verfahrens an (Desse und Deron, 2009; Desse et al., 2008). Im Folgenden sollen die theoretischen Hintergründe, der praktische Einsatz des Verfahrens sowie die hierbei erzielten Ergebnisse präsentiert werden.

Theoretischer Hintergrund

Die Holografie basiert auf den Eigenschaften der Interferenz und Beugung von Lichtwellen und nutzt diese aus, um eine auftreffende Wellenfront vollständig zu rekonstruieren. Es wird hierbei nicht wie bei der klassischen Fotografie lediglich das Quadrat der Amplitude als Intensität aufgezeichnet, sondern ebenfalls die Informationen über die Phasenlage der auftreffenden Wellen (siehe z.B. Schnars und Jüptner (2005); Eichler und Ackermann (1993)). Hierzu wird ein Objektfeld, beispielsweise ein Strömungskanal, mit kohärentem Laserlicht durchstrahlt. Die dort durch Beugung entstehende Wellenfront, die sog. „Objektwelle“, trifft anschließend auf ein Aufnahmemedium. Gleichzeitig verläuft parallel zum untersuchten Objektfeld ein weiterer, unbeeinflusster Referenzstrahl und trifft ebenfalls auf den Sensor. Durch die Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle entsteht ein Interferenzmuster, welches als Hologramm bezeichnet wird, und dessen Amplitudenextrema durch die Phasendifferenzen zwischen den beiden Wellen definiert sind. Das Entstehen der Interferenzen auf dem Aufnahmemedium ist in Abb. 1 veranschaulicht. Bei der digitalen Holografie erfolgt die Aufnahme mittels eines Bildsensors, somit ist es möglich durch numerische Rekonstruktion jeweils eine Ebene der ursprünglichen Objektwelle zu ermitteln. Zur Berechnung dieser Ebene wird die Fourier-Transformierte der Impuls-Antwort-Funktion gem. Gl. 1 verwendet (Kreis, 1986; Ilchenko, 2007), wodurch ein Komplexfeld mit den Informationen über Phase und Intensität der Objektwelle ermittelt wird.

$$H = H(m_\xi, m_\eta) = \exp \left\{ \frac{2\pi j d}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \left(m_\xi + \frac{N_\xi^2 \Delta N_\xi^2}{2d\lambda} \right)^2}{N_\xi^2 \Delta N_\xi^2} - \frac{\lambda^2 \left(m_\eta + \frac{N_\eta^2 \Delta N_\eta^2}{2d\lambda} \right)^2}{N_\eta^2 \Delta N_\eta^2}} \right\} \quad (1)$$

m_ξ, m_η	Pixelposition [-]	j	Symbol komplexe Zahl $\exp(\dots j)$
λ	Wellenlänge [m]	N_ξ	Anzahl Pixel in ξ -Richtung [-]
ΔN_ξ	reale Pixelbreite ξ -Richtung [m]	N_η	Anzahl Pixel in η -Richtung [-]
ΔN_η	reale Pixelbreite η -Richtung [m]	d	Abstand zur Rekonstruktionsebene [m]

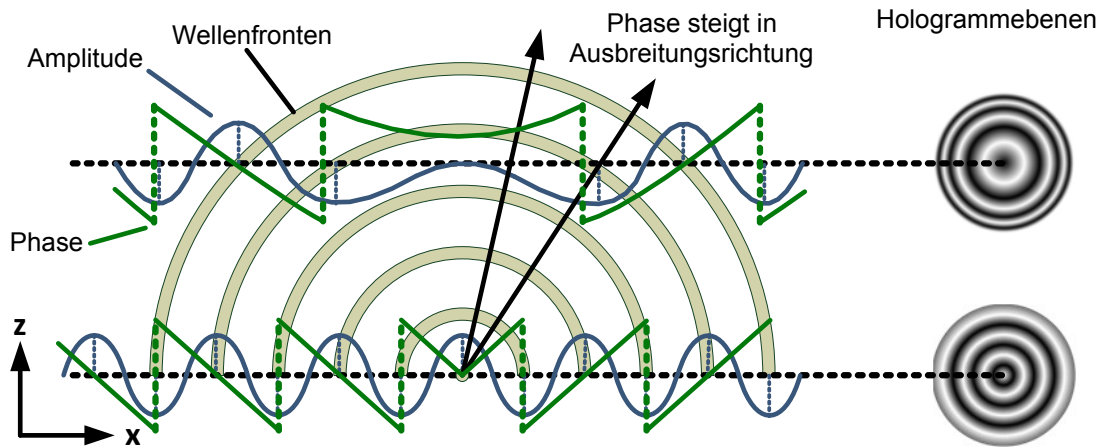


Abb. 1: Schematische Darstellung zur Entstehung der Interferenzmuster bei holografischen Verfahren

Aus dem Komplexfeld können die Phasenwerte extrahiert werden. Für ein holografisches Interferogramm werden zwei separate Hologrammaufnahmen genutzt. Die erste Aufnahme dient dabei als Ruhebild, welches beispielsweise die Messstrecke mit einem unbeheizten Fluid wiedergibt. Das Aktivbild hingegen soll unter Betriebsbedingungen aufgenommen werden, also z.B. die Messstrecke mit nun siedendem Fluid. Sowohl durch die unterschiedlichen Phasen des Fluides aufgrund entstehender Blasen, als auch durch die Temperaturgradienten entstehen Dichteunterschiede innerhalb der Messstrecke. Diese Dichteunterschiede führen wiederum zu unterschiedlichen Brechzahlen für Licht im betrachteten Medium, was eine relative Phasenverschiebung der ankommenden Wellenberge von Ruhe- und Aktivbild zur Folge hat. Zur Erstellung eines Interferogramms für eine gewählte Ebene werden nun die Differenzphasenwerte nach Schnars und Jüptner (2005) mit der in Gl. 2 angegebenen Fallunterscheidung berechnet.

$$\Delta\phi(\xi, \eta) = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2 & \text{für } \phi_1 \geq \phi_2 \\ \phi_1 - \phi_2 + 2\pi & \text{für } \phi_1 < \phi_2 \end{cases} \quad (2)$$

ϕ Phasenwinkel im Bereich von $[-\pi; \pi]$ ξ, η Pixelposition in ξ/η -Richtung

Mit dieser Überlagerung der beiden Aufnahmen entsteht das eigentliche holografische Interferogramm. Durch die existierenden Phasenunterschiede sind bei einer Darstellung der resultierenden Intensitäten Interferenzlinien erkennbar, deren Häufigkeit proportional zu den Dichtegradienten im betrachteten Volumen ist. Somit kann aus der Anzahl und den Abständen der Interferenzlinien auf Dichte- und somit Temperaturfelder geschlossen werden.

Versuchsaufbau

Das holografische Interferometer wurde als Quasi-Inline Konfiguration (Ilchenko, 2007) ausgeführt, d.h. analog zum Off-axis Aufbau (Eichler und Ackermann, 1993) mit zwei räumlich getrennten Strahlen. Das Verhältnis der Strahlintensitäten ist über einen variablen Strahlteiler einstellbar. Nach der Messstrecke werden die Strahlen über einen weiteren Strahlteiler wieder zusammengeführt, so dass beide Strahlen unter gleichem Winkel auf den Bildsensor treffen. Abb. 2 zeigt die praktische Ausführung des Aufbaus. Als Lichtquelle wurde ein Helium-Neon Laser

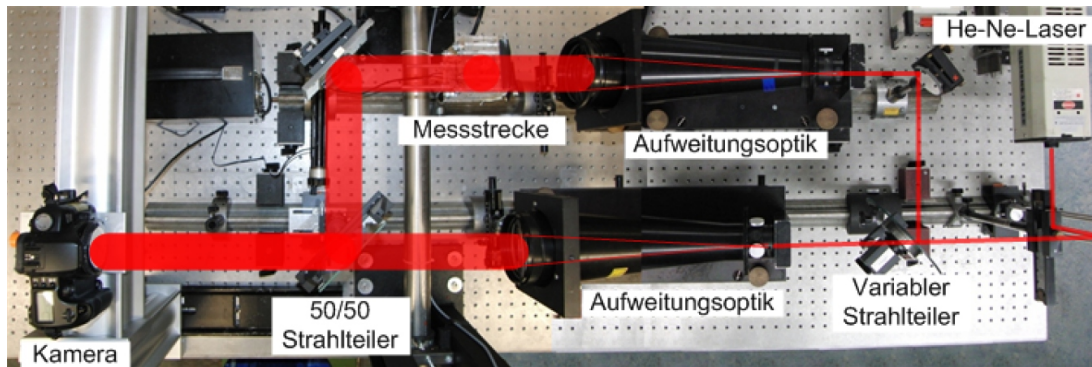


Abb. 2: Aufbau des eingesetzten holografischen Interferometers

mit einer Wellenlänge von 633 nm und einer Leistung von 40 mW eingesetzt. Es wurden Versuche mit drei verschiedenen Kamerasystemen durchgeführt, diese sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Eingesetzte Kameras

Kamera	Canon D60	Illunis RMV 50	Photron Fastcam SA5
Auflösung	3072x2048	8176x6132	1024x1024
Pixelgröße [μm]	7,4	6,0	20
Sensorgroße [mm^2]	22,7x15,1	49,1x36,8	20,5x20,5
max. Bildrate (bei max. Auflösung) [fps]	3	ca. 1	7000
min. Verschlusszeit [ms]	0,25	12,0	10^{-3}

Für die Schlierenaufnahmen wurde ein klassischer Z-Aufbau (Hauf et al., 1991; Mayinger und Feldmann, 2001) verwendet, als Lichtquelle diente eine Quecksilberdampflampe. Die verwendete Kamera war hier eine Canon EOS-1D Mk III mit einer Auflösung von 3.888x2.592 Pixel und einem Canon EF-Objektiv mit einer Brennweite von 400 mm.

Ergebnisse

Untersuchung von Temperaturgradienten am erhitzten Fluidstrom

Zur Validierung des verwendeten Rekonstruktionsalgorithmus wurden Versuche mit deionisiertem Wasser unterschiedlicher Temperatur durchgeführt. Dabei wurde ein Kanal aus Plexiglas mit einer Länge von 500 mm und einem quadratischen Querschnitt von $40 \times 40 \text{ mm}^2$ zunächst mit Wasser bei Raumtemperatur (ca. 23°C) gefüllt. Über ein Kupferrohr (Innendurchmesser 4 mm) wurde das erhitzte Fluid dem Kanal zugeführt und die entstehenden Temperatur- bzw. Dichtegradienten im Austrittsbereich des Kupferrohrs anschließend mittels digitaler holografischer Interferometrie untersucht. Dazu wurde eine Kamera des Typs Photron Fastcam SA5 (siehe Tab. 1) bei einer Bildrate von 1.000 fps verwendet. Die auftretenden Interferenzstreifen lassen Rückschlüsse auf die Temperaturverteilung im Fluid zu, wobei die Anzahl der Interferenzlinien mit der Größe des lokalen Temperaturgradienten korreliert. In Abb. 3 sind die ausgewerteten Interferogramme für drei verschiedene Einströmtemperaturen dargestellt. Der Abstand zwischen Objektebene und Kamerasensor beträgt hierbei 700 mm. Im unteren Bereich der Interferogramme ist jeweils das Kupferrohr zu erkennen, an welchem durch die Erwärmung während des Einspeisevorgangs ebenfalls Interferenzlinien auftreten. Das einströmende Fluid

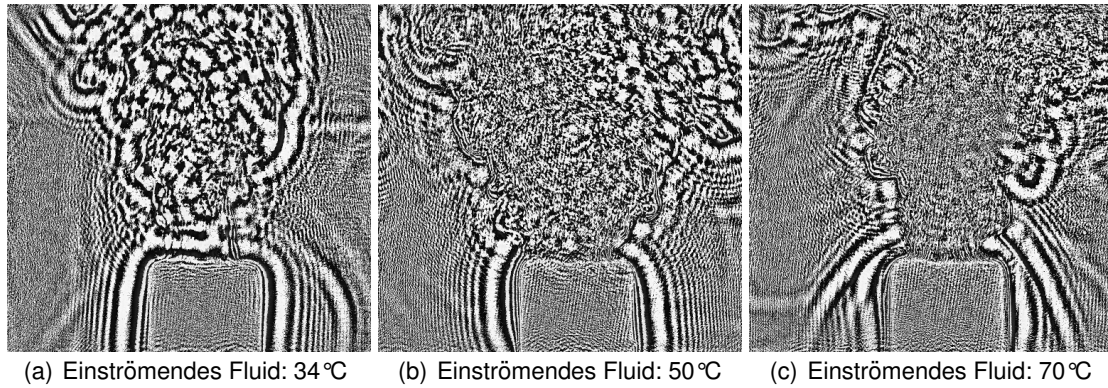


Abb. 3: Interferogramme der Einspeisung von erwärmter Flüssigkeit in einen Behälter

ist durch Interferenzlinien im Randbereich deutlich vom Umgebungsfluid zu unterscheiden. Aufgrund der Turbulenz im einströmenden Fluid treten innerhalb des Fluidstroms unregelmäßig verteilte Interferenzlinien auf. Diese sind umso zahlreicher je größer die Temperaturdifferenz zwischen eingespeistem Fluid und Umgebungsmedium. Des Weiteren treten im Randbereich des Freistrahls Interferenzlinien auf, die ebenfalls mit steigender Fluidtemperatur eine größere Anzahl und engere Verteilung aufweisen. Hiermit konnte die grundsätzliche Eignung des Verfahrens zur Ermittlung von Dichte- bzw. Temperaturfeldern nachgewiesen werden, des Weiteren konnte die Eignung für Hochgeschwindigkeitsmessungen gezeigt werden.

Untersuchung von Temperaturgradienten durch Einbringung einer Wärmequelle

Um die Möglichkeiten der interferometrischen Messung von Siedevorgängen zu untersuchen, wurde ein Experiment mit dem Kältemittel 3M Novec 649 (Siedetemperatur 49°C) als Versuchsmedium durchgeführt. Als Messstrecke diente eine rechteckige Plexiglaszelle mit Innenquerschnitt 40x30 mm², an deren Unterseite eine elektrisch beheizbare Lötnadel mit Durchmesser 3 mm eingebracht wurde. Der Aufheizvorgang wurde an mehreren Positionen und mit unterschiedlichen Kamerasystemen untersucht. Die dargestellten Interferogramme wurden jeweils für die Tiefenposition der Nadel rekonstruiert. Abb. 4 zeigt die Interferogramme der Lötnadel im unteren Bereich der Messzelle, dabei kann der Einfluss der Wärmezufuhr zu unterschiedlichen Zeiten beobachtet werden. Der Zeitabstand zwischen den gezeigten Einzelbildern beträgt ca. 0,5 s. Bild (a) zeigt das Interferogramm der Lötnadel zu Beginn des Aufwärmvorgangs. Seitlich der Lötnadel sind Interferenzlinien zu erkennen, welche auf ein Temperaturgefälle zwischen Lötnadel und umgebendem Fluid hinweisen. In Bild (b) ist auf beiden Seiten der Lötnadel jeweils eine Dampfblase zu erkennen, die nach außen hin von erwärmtem Fluid umgeben ist. Diese Dampfblasen befinden sich in Bild (c) an einer höheren Position, zudem kann beobachtet werden wie erwärmtes Fluid an der Lötnadel aufzusteigen beginnt. In Bild (d) liegt bereits eine deutlich ausgeprägte Strömung des erwärmten Fluides vor. Bild (e) zeigt eine Schlierenaufnahme zu einem vergleichbaren Betriebspunkt wie Bild (d). Die Schlierenaufnahmen zeigen hierbei ein qualitativ ähnliches Ergebnis, weisen aber weniger Details im Bereich der geringeren Dichtegradien auf. Damit konnte gezeigt werden, dass die genutzte Versuchsanordnung und die Rekonstruktionsalgorithmen mit etablierten Verfahren wie dem Schlierenverfahren vergleichbare Ergebnisse liefern und zudem eine höhere Empfindlichkeit aufweisen.

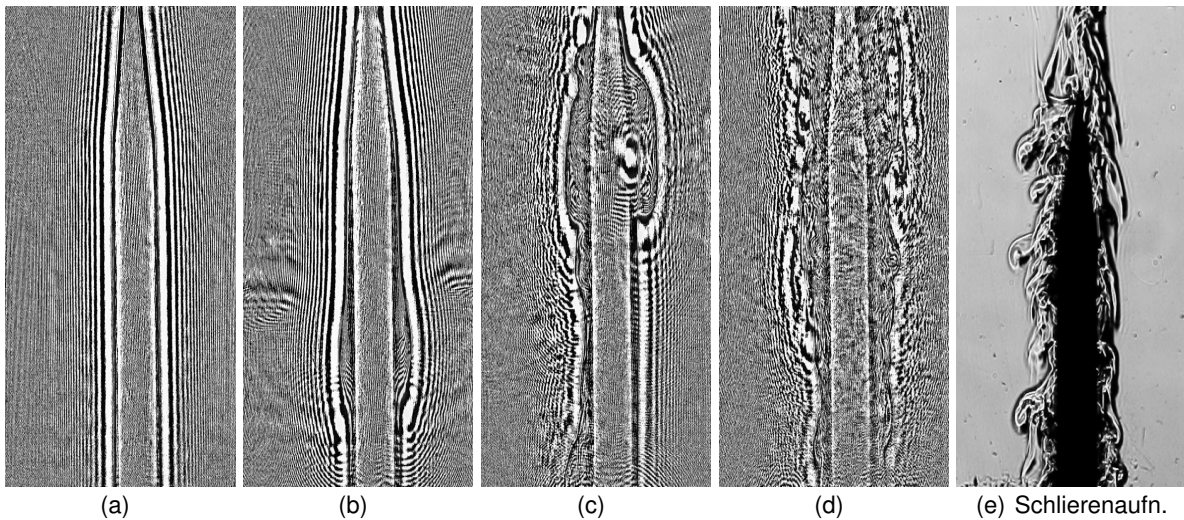


Abb. 4: Interferogramme und Schlierenaufnahme der erhitzten Lötinsel

Aufsteigender Fluidstrom im Bereich der beheizten Nadel

Im Folgenden wurde die Strömung oberhalb der Lötinsel detaillierter untersucht (siehe Abb. 5). Zudem fand ein Vergleich der Kamertypen Canon D60, Bild (a), und Illunis RMV50, Bild (b), statt (Kameradaten s. Tab. 1). In den unteren Bildbereichen ist die Spitze der Lötinsel zu erkennen. Oberhalb davon hat sich zum Zeitpunkt der Aufnahme in der Messzelle eine annähernd laminare Strömung ausgebildet, deren Temperaturverlauf durch die auftretenden Interferenzlinien erkennbar ist. Im vorliegenden Fall übersteigt die Sensorbreite der RMV 50 den inneren Bereich der Messzelle (gestrichelte Linie). Im oberen Bildbereich sind Interferenzlinien zu erkennen, welche das an die Oberfläche transportierte warme Fluid vom Umgebungsfluid abgrenzen. Hiermit konnte die Eignung des verwendeten Algorithmus für verschiedene Kamerasysteme nachgewiesen werden. Des Weiteren bietet der 50 MP-Mittelformat-Sensor der Illunis RMV 50 für zukünftige Versuche erhöhtes Potential im Vergleich zu Kleinbild-Sensoren, da hier die Auswertung größerer Bereiche ohne den Einsatz von Linsen ermöglicht wird.

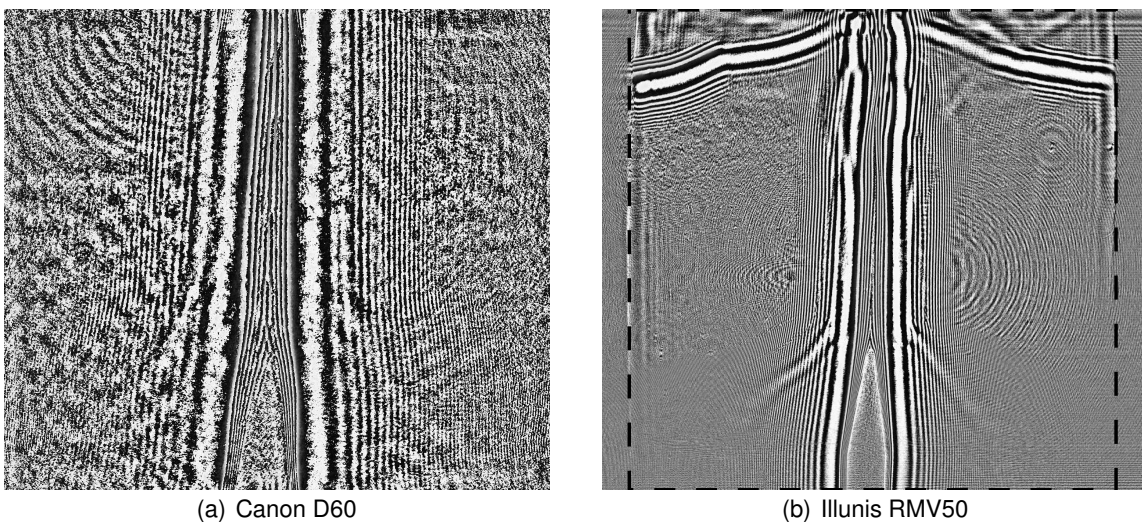


Abb. 5: Erhitzte Lötinsel im Kältemittel 3M Novec 649

Erwärmter Fluidstrom mit Dampfblasen

Im Folgenden wurden Aufnahmen im oberen Bereich der Messzelle bei siedender Flüssigkeit durchgeführt. In Abb. 6 sind in Bild (a) zunächst einzelne Dampfblasen durch koaxiale Interferenzlinien zu erkennen. Zudem ist im Nachlauf der Dampfblasen ein Dichtefeld sichtbar, da hier die Siedeblase als Wärmequelle fungiert und das Umgebungsfluid aufheizt. In Bild (b) ist im unteren Bildbereich das von der Löt-nadel aufsteigende warme Fluid zu sehen. Dieser Fluidstrom ist durch seine große Dichte an Interferenzlinien von der Umgebung abzugrenzen, in der sich ein quasistationärer Strömungszustand eingestellt hat, siehe Bild (c). Die Rückströmung des wärmeren Fluids an der Oberfläche ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Bild (d) zeigt wiederum eine Schlierenaufnahme des vergleichbaren Zustandes. Auch hier kann der höhere Detailgrad der Interferogramme festgestellt werden, so sind u.a. die geringen Dichtegradienten im Nachlauf der Dampfblasen bei der Schlierenaufnahme nicht bzw. nur eingeschränkt erkennbar.

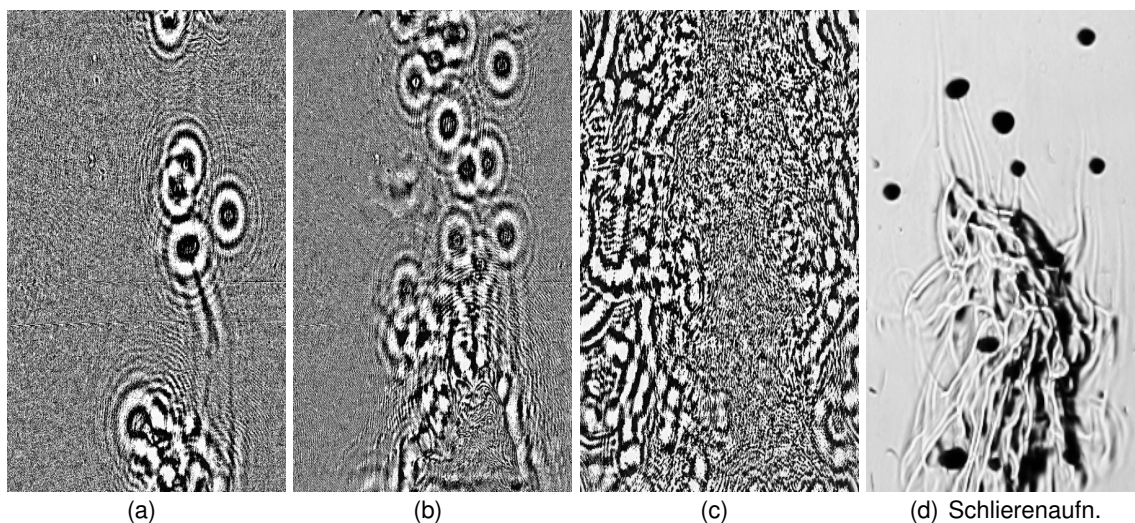


Abb. 6: Interferogramme und Schlierenaufnahme der siedenden Strömung oberhalb der Löt-nadel

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ein Verfahren zur volldigitalen Erfassung und Auswertung holografischer Interferogramme wurde entwickelt und an vereinfachten Geometrien zur Wärmeübertragung mit und ohne Phasenübergang erfolgreich eingesetzt. Durch die Nutzung von drei verschiedenen Kamertypen konnte die Übertragbarkeit des Verfahrens für unterschiedliche Sensorgrößen und Bauformen gezeigt werden. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit bis zu 1000 Bildern pro Sekunde konnten erfolgreich durchgeführt werden. Durch einen Vergleich mit Schlierenmessungen an derselben Geometrie konnten eine höhere Empfindlichkeit und bessere Auswertungsmöglichkeiten des interferometrischen Verfahrens gezeigt werden. Das eingesetzte System ermöglicht somit die sowohl zeit- als auch orts aufgelöste Messung von Dichtefeldern in Strömungen, aus denen wiederum die Temperaturverteilungen ermittelt werden können. Im weiteren Verlauf des Projektes soll insbesondere eine quantitative Auswertung der Aufnahmen implementiert werden, um exakte Aussagen über Temperatur- und Dichtefelder in Strömungen mit Wärme- und Phasenübergang zu ermöglichen. Hierbei können die aufgrund der Rekonstruktion zur Verfügung stehenden Phaseninformationen der aufgezeichneten Wellen einen deutlichen Vor-

teil gegenüber rein intensitätsbasierten Verfahren bieten. Als praktische Anwendung soll das Verfahren zukünftig zur Untersuchung von Siedevorgängen u.a. im technisch wichtigen Bereich der kritischen Wärmestromdichte eingesetzt werden, um vertiefte Informationen über die Mechanismen des Übergangs ins Filmsieden zu ermitteln.

Dankesworte

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) als Teil des Verbundprojekts „Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren“ im Rahmen des Förderkonzeptes „Energie 2020+“ des BMBF unter dem Förderkennzeichen 02NUK010E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

J. M. Desse und R. Deron. “Shadow, Schlieren and Color Interferometry”. The Onera Journal AerospaceLab, Issue1:1–10, 2009.

Jean-Michel Desse, Pascal Picart, und Patrice Tankam. “Digital Three-Color Holographic Interferometry for Flow Analysis”. Optics Express, 16:5471–5480, 2008.

J. Eichler und G. Ackermann. “Holographie”. Springer (Berlin), 1993.

Werner Hauf, Ulrich Grigull, und Franz Mayinger. “Optische Meßverfahren in der Wärme- und Stoffübertragung”. Springer, 1991.

Volodymyr Ilchenko. “Digitale holographische Geschwindigkeitsmessung mittels Kreuzkorrelation und Partikelverfolgung (DHPiV)”. Dissertation, Technische Universität München, 2007.

Thomas Kreis. “Digital holographic Interference-Phase Measurement Using the Fourier-Transform Method.”. Optical society of America, 3:847–855, 1986.

M. Lehner, D. Mewes, U. Dingreiter, und R. Tauscher. “Applied optical Measurements”. Springer, 1999.

Anita Lucic. “Fluid- und thermodynamische Transportphänomene beim unterkühlten Strömungssieden”. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Thermodynamik, 2003.

Sathish Manickham und Vijay Dhir. “Holographic Interferometric Study of Heat Transfer Associated With Single Vapor Bubble Sliding Along a Downward-Facing Heater Surface”. ASME Summer Heat Transfer Conference, 2003.

Franz Mayinger und Oliver Feldmann. “Optical Measurements - Techniques and Applications”. Springer, 2001.

U. Schnars und W. Jüptner. “Digital Holography”. Springer, 2005.

Robert Tauscher und Franz Mayinger. “Visualization of Flow Temperature Fields by Holographic Interferometry - Optimization of Compact Heat Exchangers”. Proceedings of PSFVIP-2, 1999.

Milton Van Dyke. “An Album of Fluid Motion”. The Parabolic Press, Stanford, 1988.