

ANWENDUNG DER DIGITALEN HOLOGRAPHIE ZUR UNTERSUCHUNG VON ZWEIFHASENSTRÖMUNGEN UND PHASENÜBERGÄNGEN

USE OF DIGITAL HOLOGRAPHY FOR ANALYSIS OF TWO-PHASE FLOWS AND PHASE CHANGE PHENOMENA

G. Bloch, G. Heideker, S. Götz, T. Sattelmayer

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

Digitale Holographie, Zweiphasenströmung, Phasenwechsel, Interferometrie
Digital Holography, Two-Phase Flow, Phase-Change, Interferometry

Zusammenfassung

Die Holographie weicht als interferometrisches Verfahren deutlich von den aktuell in der Strömungsmesstechnik eingesetzten bildgebenden Lasermethoden wie PIV, LDA oder PDA ab. Hauptvorteil der Holographie stellt hierbei die Möglichkeit der Rekonstruktion einer gesamten aufgezeichneten Lichtwelle, und somit die Erfassung eines dreidimensionalen Volumens ohne Einschränkungen in der Schärfentiefe und unter Einsatz lediglich einer Kamera dar. Im aktuellen Forschungsvorhaben an der TU München wurden unter Einsatz hochauflösender CCD-Bildsensoren holographische Untersuchungen an Mehrphasenströmungen mit und ohne Phasenwechsel durchgeführt. Zur Rekonstruktion wurden Algorithmen entwickelt, mit denen eine automatische Erfassung der Größe sowie der räumlichen Position von Objekten wie Partikeln oder Gasblasen erfolgen kann. Die Ergebnisse zeigen die Anwendbarkeit der digitalen Holographie auf Problemstellungen der Mehrphasenströmung. Weitere Ergebnisse sowie Limitationen des Verfahrens werden diskutiert.

Einleitung

Beim Einsatz bildgebender Verfahren in der Strömungsmesstechnik stellt sich in vielen Anwendungen das Problem einer begrenzten Schärfentiefe des Aufnahmeverfahrens, so dass nur Teilebenen des betrachteten Volumens ausgewertet werden können und Informationen über die Bereiche vor und hinter der Schärfenebene verloren gehen. Eine Alternative stellt hierbei die bereits in der Vergangenheit vielfach in der Strömungsmesstechnik eingesetzte Holographie dar (Hauf et al.1991), die diese Limitation umgeht und eine Auswertung des gesamten Volumens ermöglicht. Aufgrund der aufwändigen Entwicklungsschritte beim klassischen analogen Verfahren mit beschichteten Photoplatten oder Filmen sowie den hohen Anforderungen an Bildauflösung und Rechenleistung bei digitaler Aufnahme und Auswertung wurde die Holographie in der Strömungsmesstechnik zuletzt aber nur vereinzelt eingesetzt. In Anbetracht der rasanten Entwicklung hochauflösender Bildsensoren und leistungsstarker Rechner innerhalb der letzten Jahre erscheint die digitale Holographie in zunehmendem Maße als geeignetes Verfahren zur Untersuchung unterschiedlicher Strömungsphänomene. An der TU München wurden bereits in der Vergangenheit Untersuchungen zum Einsatz der digitalen Holographie in der Strömungsmesstechnik durchgeführt (Ilchenko 2007), auf die in der vorliegenden Arbeit aufgebaut werden konnte. Hierzu wurden zunächst verschiedene kleinskalige Versuchsstände zur Untersuchung von Mehrphasenströmungen erstellt und die

bereits vorhandenen Algorithmen weiterentwickelt und zum Einsatz in der Mehrphasenmessung optimiert.

Theoretische Hintergründe

Die Holographie basiert auf den bereits von Huygens formulierten Grundprinzipien der Wellenphysik. Durch eine interferometrische Aufnahme zweier Wellenfronten auf einem Speichermedium, beispielsweise einer Photoplatte oder einem CCD-Bildsensor, entsteht ein Muster das eine Speicherung von sowohl Intensität als auch Phase der auftreffenden Wellenfronten darstellt. Das Aufnahmemedium speichert also Amplitude (Intensität) und Phase der auftreffenden Wellenfronten, aus denen dann die ursprünglichen Welleninformationen für den gesamten dreidimensionalen Raum rekonstruiert werden können.

Eine schematische Darstellung von Aufnahme und Rekonstruktion eines Hologramms ist in Abb. 1 dargestellt. Der hier gezeigte Aufbau entspricht dem in-line Aufbau nach Gabor, bei dem sich alle Elemente auf einer optischen Achse befinden, was der aufgrund der geringen Winkelempfindlichkeit der CCD-Sensoren für die digitale Holographie die günstigste Variante darstellt (Schnars u. Jüptner 2005).

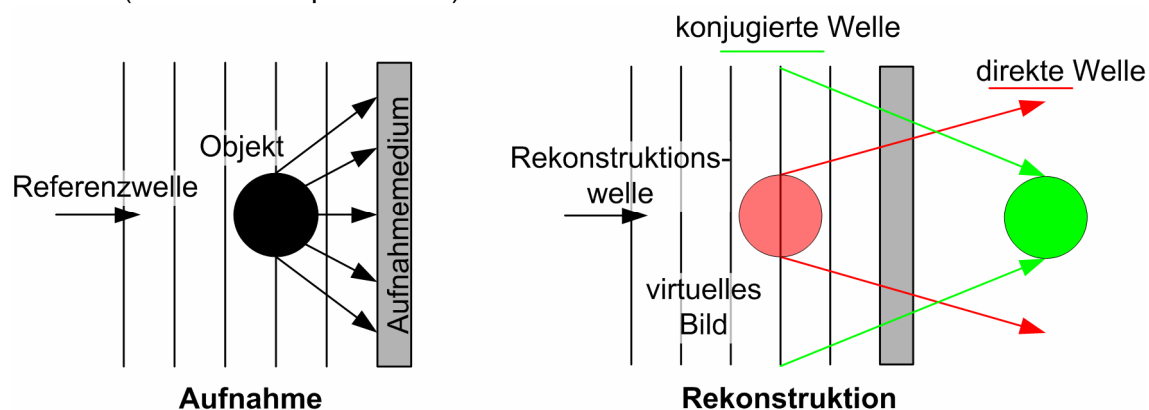


Abb. 1: Schematische Darstellung von Aufnahme (links) und Rekonstruktion (rechts) eines in-line Hologramms (nach Eichler 1993).

Abb. 2 stellt den Versuchsaufbau in der in-line Konfiguration schematisch dar. Das Objekt wird hier mit einer Referenzwelle aus einer kohärenten Lichtquelle beleuchtet, dargestellt als ebene Welle. Das auftreffende Licht wird am Objekt gebeugt und interferiert auf dem Aufnahmemedium mit dem ungebeugten Anteil der Referenzwelle. Das entstehende Interferenzmuster wird als Hologramm bezeichnet. Zur Rekonstruktion wird das Hologramm nochmals mit der ursprünglichen Referenzwelle, die nun als Rekonstruktionswelle dient, beleuchtet. Hierbei wirkt das Hologramm als Gitter, an dem die Rekonstruktionswelle gebeugt wird. Die entstehende Beugung 1. Ordnung stellt hierbei eine genaue Wiedergabe der ursprünglich aufgezeichneten Wellenfront dar.

Numerisch kann die Rekonstruktion durch Auswertung des Beugungsintegrals in einer definierten Ebene vor dem Hologramm durchgeführt werden. Hierzu existieren verschiedene Ansätze (Schnars u. Jüptner 2005), in der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund geringerer Rechenintensität die Auswertung des Beugungsintegrals mittels der Fourier-Transformierten der Impuls-Antwort-Funktion gelöst (Goodman 2005). Die Detektion der Tiefenposition von Objekten erfolgte analog Ilchenko 2007 durch schrittweise Rekonstruktion der Tiefenebenen und anschließender Analyse der Verläufe der Intensitätsgradienten. An der tatsächlichen Tiefenposition der Objekte werden diese in der Rekonstruktion scharf abgebildet und der Gradientenverlauf nimmt ein Maximum an, das vom Programm erfasst werden kann (siehe hierzu auch Abb. 3).

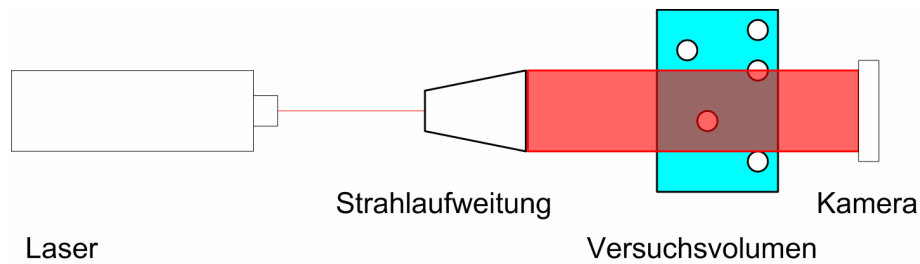


Abb. 2: schematische Darstellung des für die Versuche genutzten in-line Aufbaus.

Partikelexperimente zur Genauigkeitsanalyse

Um die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu ermitteln, wurden Experimente mit Polystyrol-Feststoffpartikeln durchgeführt, die auf eine Planglassscheibe aufgebracht wurden. Als Kamera wurde eine handelsübliche Spiegelreflexkamera vom Typ Canon D60 mit einer Sensorgröße von $22,7 \times 15,1 \text{ mm}^2$ und einer Auflösung von 3072×2048 Pixeln verwendet. Zur Beleuchtung wurde ein HeNe Laser mit einer Leistung von 50 mW eingesetzt. Die Versuche wurden stets auf einem vibrationsisolierten Tisch durchgeführt.

In den Versuchen wurde die Scheibe mit den Partikeln in verschiedenen Winkeln zum Laserstrahl platziert, und die resultierenden Ergebnisse der Holographie mit den realen Positionen verglichen. Die Tiefenpositionsbestimmung basierte auf der bereits oben erläuterten Gradientenmethode. In Abb. 3 sind für ein Experiment mit einer Planglassscheibe im Abstand von 503 mm zur Bildebene die Verläufe der Gradienten über der Tiefenposition für zwei ausgewählte Partikel dargestellt. An der Position der Planglassscheibe bei $z = 503 \text{ mm}$ sind deutlich ausgeprägte Maxima zu erkennen. Anhand dieser Maxima weist der Algorithmus jedem Partikel eine Tiefenposition zu, die im Anschluss als Matrix ausgegeben wird.

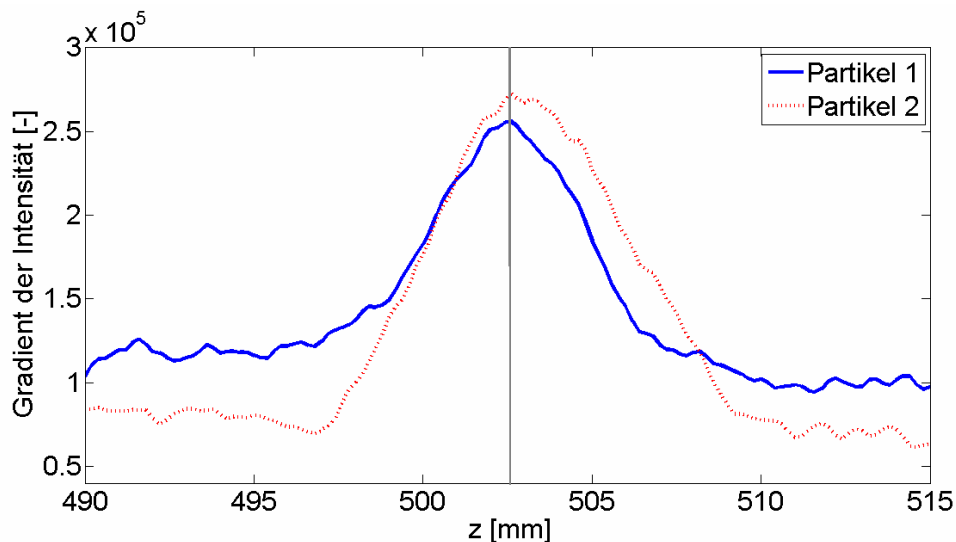


Abb. 3: Charakteristische Verläufe der Gradientenmaxima für 2 unterschiedliche Polystyrolpartikel auf einer Planglassscheibe über der Tiefenposition.

In Abb. 4 sind die ermittelten Tiefenpositionen für eine größere Anzahl an Partikeln auf einem Bildausschnitt von 2000×2000 Pixeln dargestellt. Erkennbar ist hier auch die Streuung der Partikel um einen Mittelwert, die hier bis zu $\pm 3 \text{ mm}$ betrug. Diese Streuung kann zum Einen auf Mängel im Versuchsaufbau wie ungleichmäßiger Ausleuchtung des Volumens, leichte Unebenheiten der Partikelschicht auf der Planglassscheibe sowie Toleranzen in den Befestigungselementen zurückgeführt werden. Des Weiteren kommen stochastische Fehler im Algorithmus bei Erfassung der Partikel und Bestimmung der Gradientenmaxima in Frage.

Die gemittelte Abweichung der Tiefenposition der Partikel betrug in den durchgeführten Versuchen $\pm 0,5$ mm.

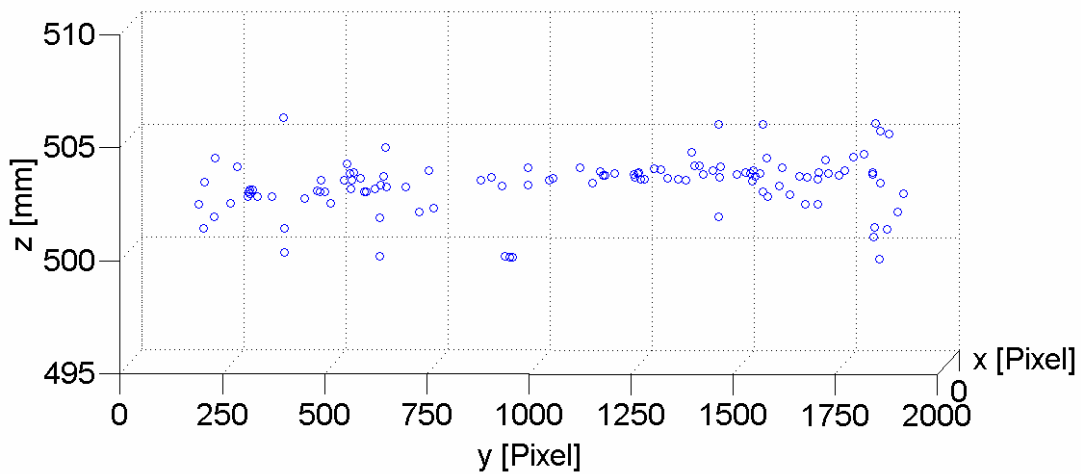


Abb. 4: Rekonstruktion der Partikelpositionen auf einer Planglassscheibe für einen Ausschnitt von 2000 x 2000 Pixeln.

Einsatz der digitalen Holographie zur Untersuchung adiabater Zweiphasenströmungen

Zu den bisher gezeigten Messungen wurden noch weitgehend die bereits von Ilchenko 2007 vorgestellten Algorithmen verwendet. Zur Nutzung der Holographie bei der Untersuchung von Mehrphasenströmungen mussten zunächst Anpassungen an den Auswertungsalgorithmen vorgenommen werden. Hierzu wurde die Partikelerfassung zunächst um einen Teil zur Erfassung größervolumiger Objekte wie Gasblasen erweitert. Des Weiteren wurden Mechanismen zur automatischen Erfassung des Umfangs der Objekte sowie Filter zur Abtrennung kleinskaliger Objekte wie Verunreinigungen durch Staub etc. implementiert.

Um die neuen Algorithmen zu evaluieren wurde ein Versuchskanal aus Plexiglas mit einer Länge von 500 mm und einem quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 40 mm aufgebaut. Der Kanal wurde vertikal montiert und mit Wasser befüllt. Von unten konnten über eine Kanüle mit Innendurchmesser 0,5 mm Luftblasen erzeugt werden. Der Versuchsaufbau zur Holographie wurde hier ebenfalls als in-line Konfiguration betrieben. Um die Position der Blasen zu kennen wurden die Hologrammaufnahmen jeweils kurz nach dem Austritt der Blase aus der Kanüle durchgeführt.

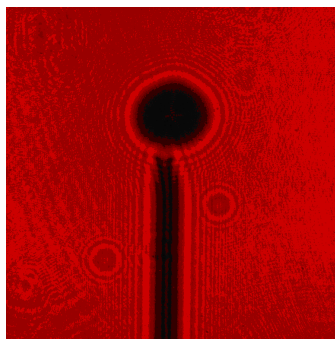


Abb. 5: Hologrammaufnahme einer Luftblase beim Austritt aus der Kanüle.

Abb.5 zeigt die Hologrammaufnahme einer Blase beim Austritt aus der Kanüle. Rekonstruktion und Tiefendetektion erfolgten wie bei den Partikelversuchen mittels FFT und Gradientenbestimmung. In Abb. 6 sind die rekonstruierten Intensitäten der Wellenfronten für die Positionen dargestellt, an denen jeweils die Gradienten von Blase bzw. Kanüle ein Maximum annehmen. Deutlich zu erkennen sind hier die scharfen Konturen der beobachteten Objekte. Die Abweichung von ca. 1,2 mm zwischen Blase und Kanüle stimmte mit den Beobachtungen aus Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitsvideometrie überein, bei denen sich ebenfalls ein Ablösen der Blasen in Richtung der Bildebene zeigte.

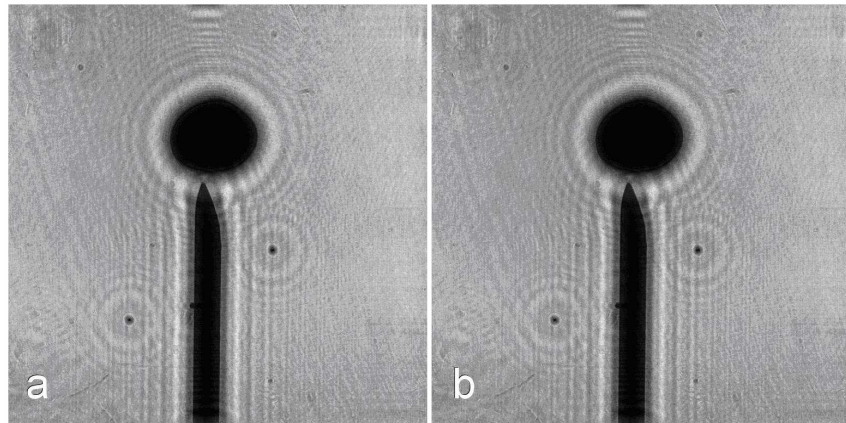


Abb. 6: Darstellung der Intensität der rekonstruierten Wellenfronten für die Positionen der Gradientenmaxima für die Kanüle bei $z = 461,4$ mm (a) und die Luftblase bei $z = 460,2$ mm (b).

In Abb. 7 sind die Gradientenverläufe für die Kanüle sowie die Luftblase dargestellt. Hier zeigte sich für die Blase ein stark schwankendes Verhalten des Intensitätsgradienten. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, dass bei der Rekonstruktion der einzelnen Tiefenebenen ein schrittweises Zusammenziehen der Interferenzringe zu auftritt, das zu fälschlicherweise verringerten Gradienten führt.

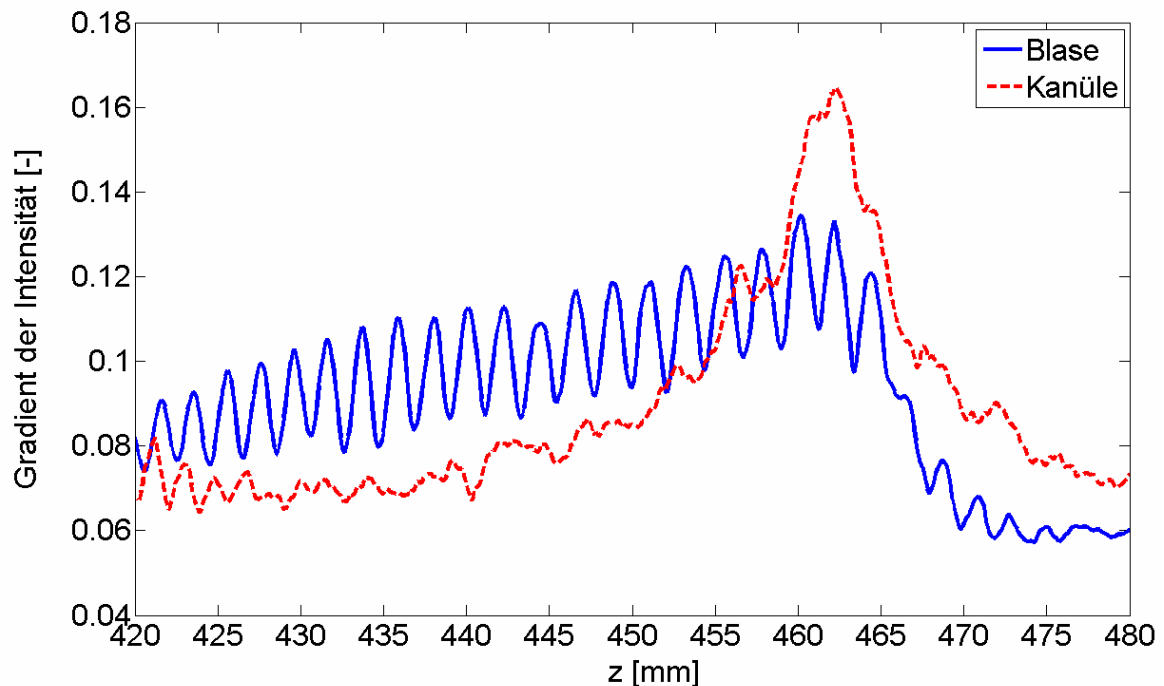


Abb. 7: Darstellung des Gradienten der Intensität für die in Abb. 5 und Abb. 6 gezeigten Kanüle und Luftblase.

Somit konnte gezeigt werden, dass die auf Basis der Arbeit von Ilchenko 2007 neu entwickelten Algorithmen zu Anwendung in adiabaten Zweiphasenströmungen grundsätzlich geeignet sind. Mit den Algorithmen können in Blasenströmungen automatisch die Umfänge sowie die Tiefenpositionen von Gasblasen mit hoher Genauigkeit erfasst werden, des Weiteren konnte die Eignung des in-line Aufbaus als robuste Basis für die Anwendung der digitalen Holographie bestätigt werden. Allerdings zeigte der verwendete Algorithmus Schwächen bei Blasen, deren Form deutlich von der einer Kugel abwich. So konnte die Tiefenposition größerer Blasen mit ovalem oder sichelförmigem Querschnitt nur unzureichend ermittelt werden. Als Grund konnte hierbei eine Unschärfe der Randbereiche bereits bei der Aufnahme ermittelt werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Oberflächenschwingungen der Blasen sowie Bewegungsunschärfen verursacht wurde. Zur weiteren Untersuchung wurden hier für die Zukunft Versuche mit anderen Stoffgemischen, beispielsweise einem zäheren Fluid zur Reduzierung der Aufstiegsgeschwindigkeit sowie der Einsatz leistungsstärkerer Laser zur Reduktion der Belichtungszeit vorgesehen.

Einsatz zur Untersuchung von Strömungen mit Wärme- und Phasenübergängen

Zum Einsatz der digitalen Holographie bei der Untersuchung von Strömungen in denen Wärmeübergänge und somit auch Dichtegradienten auftreten, sind zunächst einige Schwierigkeiten zu beachten. So führen die auftretenden Dichtegradienten zu einer zusätzlichen massiven Ablenkung des genutzten Laserstrahls, so dass das erhaltene Interferenzmuster deutlich gestört wird, und von dem verwendeten Algorithmus nicht mehr effektiv verarbeitet werden kann. In Abb. 8 sind hierfür beispielhaft Hologrammaufnahmen an einer elektrisch beheizten Nadel ($d = 3\text{mm}$) gezeigt, die in ein niedrigsiedendes Kältemittel (Dodekafluoromethylpentanon, erhältlich als 3M Novec 649) bei Raumtemperatur eingebracht wurde. Mit steigender Überhitzung ist hier eine starke Schlierenbildung zu beobachten, die ab Teilbild f mit eintretendem Phasenübergang zusätzlich durch die Mischbewegung aufsteigender Siedebblasen verstärkt wird. In Teilbild h schließlich ist selbst die Kontur der Nadel aufgrund der hochdynamischen Durchmischungsprozesse nur noch ansatzweise erkennbar. Des Weiteren führt die Ablenkung des Laserlichts aufgrund der Dichtegradienten um die Nadel zu einer optischen Vergrößerung des Heizers, die sich ebenfalls negativ auf die Rekonstruktion auswirkt.

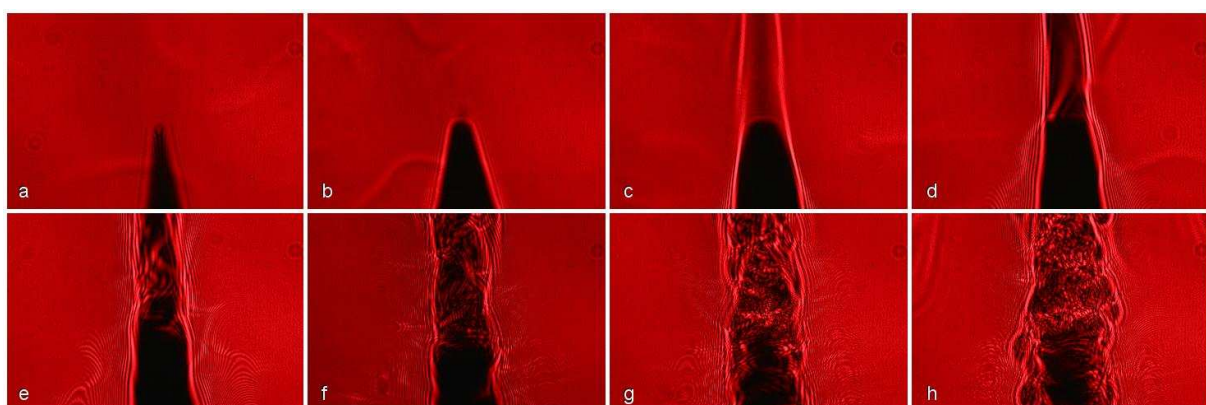


Abb. 8: Holographische Aufnahmen an einer erhitzten Nadel in einem niedrig siedenden Kältemittel bei steigender Überhitzung.

Der Einsatz der digitalen Holographie erscheint daher vor allem im Bereich geringer Überhitzungen mit nur wenigen Siedebblasen sinnvoll, wird allerdings auch hier durch die Überlagerung mit Schlieren aufgrund von Dichtegradienten deutlich erschwert. Mit dem verwendeten Algorithmus war es nicht möglich, innerhalb der konvektiven Strömung befindliche Dampf-

blasen zu erfassen und zu rekonstruieren. Allerdings gelang es in Vorversuchen, einzelne Dampfblasen aus der Hauptströmung zu separieren und holographisch aufzunehmen. In Abb. 9 ist ein Ausschnitt einer Hologrammaufnahme gezeigt, bei der im Randbereich der turbulenten Durchmischung oberhalb der Heizernadel aufsteigende Dampfblasen zu erkennen sind.

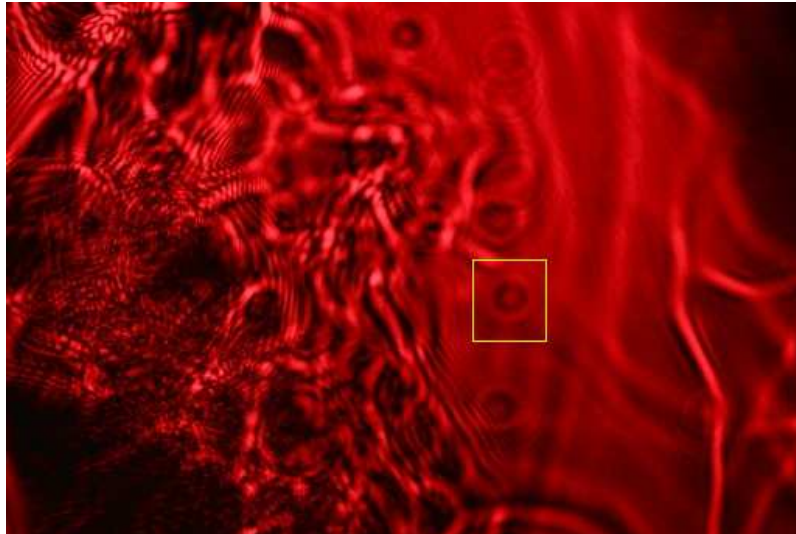


Abb. 9: Holographische Aufnahme einzelner Dampfblasen im Randbereich der turbulenten Durchmischungszone oberhalb der Heizernadel.

Diese wurden mit den neu entwickelten Algorithmen rekonstruiert, wobei für die in markierte Dampfblase beispielhaft der in Abb. 10 gezeigte Gradientenverlauf ermittelt wurde. Hierdurch konnte die Eignung der verwendeten Algorithmen zur Bestimmung der Tiefenposition von Dampfblasen bestätigt werden.

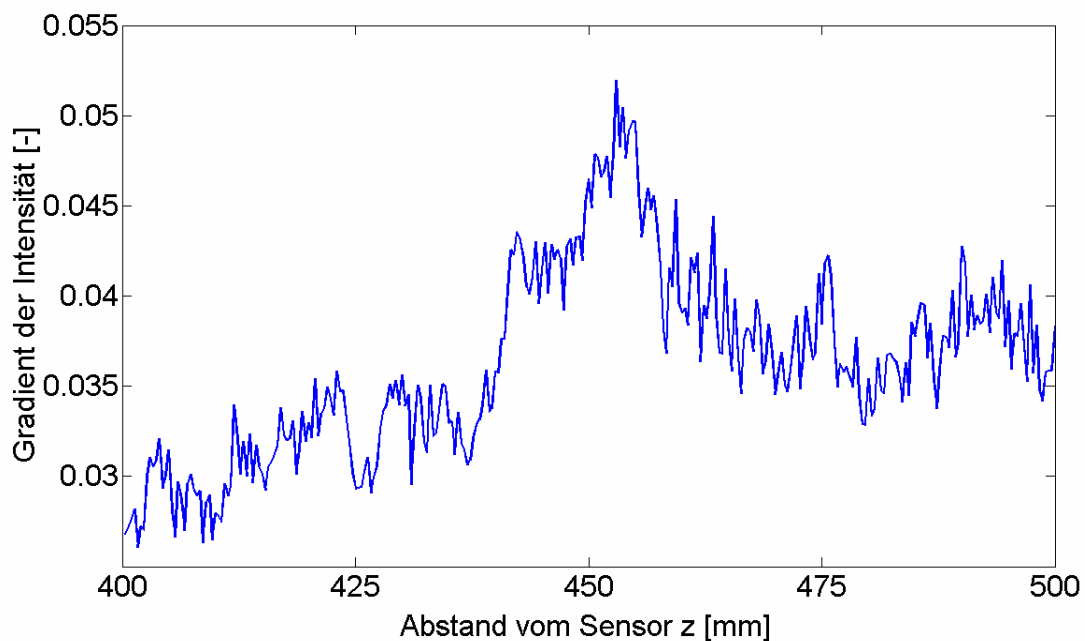


Abb. 10: Gradientenverlauf für die in Abb. 9 markierte Dampfblase.

Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte eine Eignung der weiterentwickelten Algorithmen zur digitalen Holographie bei der Untersuchung von Zweiphasenströmungen mit und ohne Phasenübergängen gezeigt werden. Für die Versuche in adiabaten Strömungen zeigten sich gute Ergebnisse bei kleineren Blasen und geringen Aufstiegsgeschwindigkeiten. Bei komplex geformten Blasen und größeren Geschwindigkeiten zeigten sich allerdings noch Schwächen in der Auswertung. Für die Zukunft ist eine weitere Verbesserung der genutzten Programme zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten vorgesehen. Hierzu sollen unter anderem Versuche mit alternativen Stoffsystemen und kürzeren Belichtungszeiten durchgeführt werden.

Beim Einsatz in Strömungen mit Wärmeübergang zeigten sich deutliche Einschränkungen aufgrund der Störungen durch die Dichtegradienten innerhalb der Flüssigkeit. Bei Separierung der Dampfblasen konnten diese aber analog der Gasblasen in den adiabaten Versuchen erfasst und rekonstruiert werden. Hier bietet sich neben einer Einschränkung auf sehr geringe Überhitzungen und Dampfanteile eine Erweiterung des Algorithmus zur Nutzung als digitale holographische Interferometrie an, mit der hier Temperaturgradienten in der Umgebung der Dampfblasen gezielt erfasst werden könnten.

Eine Limitation der digitalen Holographie stellt außerdem die nach wie vor verhältnismäßig geringe Größe der erhältlichen Bildsensoren dar. So sind derzeit handelsübliche digitale Kameras mit so genannten Vollformatsensoren im Format von ca. $24 \times 36 \text{ mm}^2$ für die Holographie nur bedingt geeignet, da durch den nötigen Verzicht auf abbildende Optik die Größe des beobachteten Volumens stets der Größe des Chips entspricht. Für das aktuelle Forschungsvorhaben wurde daher ein hochauflösendes Kamerasystem mit einer Sensorgröße von $49 \times 37 \text{ mm}^2$ und einer Auflösung von 50 Megapixeln beschafft. Hiermit wurden ebenfalls erste Versuche zur Bestimmung der Tiefenposition von Partikeln durchgeführt, die ein vielversprechendes Verhalten zeigten. Für die Zukunft wird mit diesem System die Beobachtung größerer Fluidvolumina möglich sein, wodurch eine nennenswerte Erhöhung der Leistungsfähigkeit der digitalen Holographie zu erwarten ist.

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 BMBF-Förderkonzeptes „Energie 2020+“ unter dem Förderkennzeichen 02NUK010E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Literatur

- Eichler, J., Ackermann, G., 1993: "Holographie", Berlin (Springer)
Goodman, J., 2005: "Introduction to Fourier optics", Englewood, Colo. (Roberts)
Hauf, W., Grigull, U., Mayinger, F., 1991: "Optische Meßverfahren in der Wärme- und Stoffübertragung" Berlin (Springer)
Ilchenko, V., 2007: "Digitale holographische Geschwindigkeitsmessung mittels Kreuzkorrelation und Partikelverfolgung (DHPIV)", Dissertation TU München
Kreis T., Adams M., Jüptner W., 1997: "Methods of Digital Holography: A Comparison." Proceedings of SPIE, Vol. 3098, pp. 224-233
Schnars U., Jüptner W., 2005 : "Digital Holography", Berlin (Springer)