

UNTERSUCHUNG VON SIEDEVORGÄNGEN AN BEHEIZTEN OBERFLÄCHEN MITTELS OPTISCHER KOHÄRENZTOMOGRAPHIE

INVESTIGATION OF BOILING PROCEDURES ON HEATED SURFACES USING OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

Lars Kirsten¹, Sven Meissner¹, Clemens Schneider², Rainer Hampel², Edmund Koch¹

¹ Klinisches Sensoring und Monitoring, Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus, Technische Universität Dresden, Fetscherstraße 74, 01307 Dresden, Germany

² Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik, Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau, Germany

Optische Kohärenztomographie, Blasensieden, beheizte Oberfläche
optical coherence tomography, nucleate boiling, heated surface

Zusammenfassung

Die Untersuchung von Siedevorgängen an beheizten Oberflächen ist unter den Aspekten der bestmöglichen Effizienz und Sicherheit von zentraler Bedeutung in industrietechnischen und nuklearen Anlagen. Zur Visualisierung der Dynamik der Blasenentwicklung sowie korrelierender Strömungen an beheizten Oberflächen auf mikroskopischer Skala soll innerhalb dieser Studie die optische Kohärenztomographie (OCT) als interferometrisches Bildgebungsverfahren vorgestellt werden. Die OCT ermöglicht die räumlich hochaufgelöste (typisch 10 µm) Darstellung dynamischer Prozesse des Blasensiedens und erlaubt Aussagen über wandnahe Fluidströmungen durch Implementierung der phase-resolved Doppler Methode. Dabei werden Schnittbildraten von 238 Hz erreicht.

Einleitung

Die Erforschung von Wärmetransportphänomenen und Siedevorgängen an beheizten Oberflächen ist besonders in industrietechnischen und nuklearen Anlagen relevant. Gerade die Untersuchung des Übergangs vom Blasensieden zum Filmsieden ist unter den Aspekten der Effizienz und Sicherheit ein wesentlicher Schwerpunkt aktueller Forschung. Ein vielversprechender Ansatz sind numerische Simulationen von Siedeprozessen. Allerdings werden dafür experimentell ermittelte Daten und daraus extrahierte charakteristische Parameter des Siedeprozesses, sowohl als Eingangsparameter für die Simulation als auch zur Validierung der numerischen Modelle, benötigt. Bestenfalls sollten die Siedevorgänge experimentell bis in die mikroskopische Skala dreidimensional und zeitlich hochaufgelöst dargestellt werden können. Herkömmliche Verfahren, wie high-speed Kamera Imaging, liefern allerdings bei Zuständen hoher Blasendichte häufig schwierig interpretierbare Aufnahmen. Deshalb sind besonders komplementäre, tomographische Bildgebungsverfahren vielversprechend.

In dieser Machbarkeitsstudie soll die optische Kohärenztomographie (OCT) als Bildgebungsverfahren für die Untersuchung von Siedeprozessen vorgestellt werden. Die OCT (Huang et al. 1991) ist ein auf Weißlichtinterferometrie basierendes, berührungslos arbeitendes Verfahren, welches Schnittbilder und Volumenstapel hoher räumlicher Auflösung (typisch 10 µm)

liefert. Außerdem ist die OCT bereits in der biomedizinischen Forschung als Bildgebungsverfahren etabliert. Da sich mit Doppler OCT auch die Strömung des Fluides bildgeben lässt bzw. eine quantitative Bestimmung einzelner Geschwindigkeitskomponenten möglich ist, kann die OCT bei der Untersuchung von Siedeprozessen zur simultanen Bestimmung der Blasengeometrie sowie für die Visualisierung der Fluidströmung genutzt werden.

Methoden

Die OCT ist ein interferometrisches Bildgebungsverfahren, welches breitbandiges nahinfrarotes Licht, typischerweise im Spektralbereich um 800 nm oder um 1300 nm, nutzt. In einem Michelson-Interferometer wird der einfallende Strahl in einen Referenzstrahl und in einen Probenstrahl aufgeteilt. Rückreflektiertes oder rückgestreutes Licht wird superponiert und spektral aufgelöst detektiert. Die Frequenz der enthaltenen Modulationen im Interferenzspektrum sind dabei proportional zur optischen Weglängendifferenz im Interferometer und damit auch zur Tiefe in der Probe, aus der Licht zurückreflektiert wird. Somit ist die komplette Tiefeninformation in einem Interferenzspektrum kodiert und das Tiefenprofil wird durch eine Fouriertransformation zugänglich. Zwei- oder dreidimensionale Bilder werden während einer lateralen Strahlableitung detektiert.

Für grundlegende Studien wurde ein spectral-domain OCT System (Walther et al. 2009) verwendet, indem das Interferenzspektrum in einer Spektrometeranordnung detektiert wird. Als Lichtquelle kommt in diesem Fall eine breitbandige Superlumineszenzdiode um 845 nm

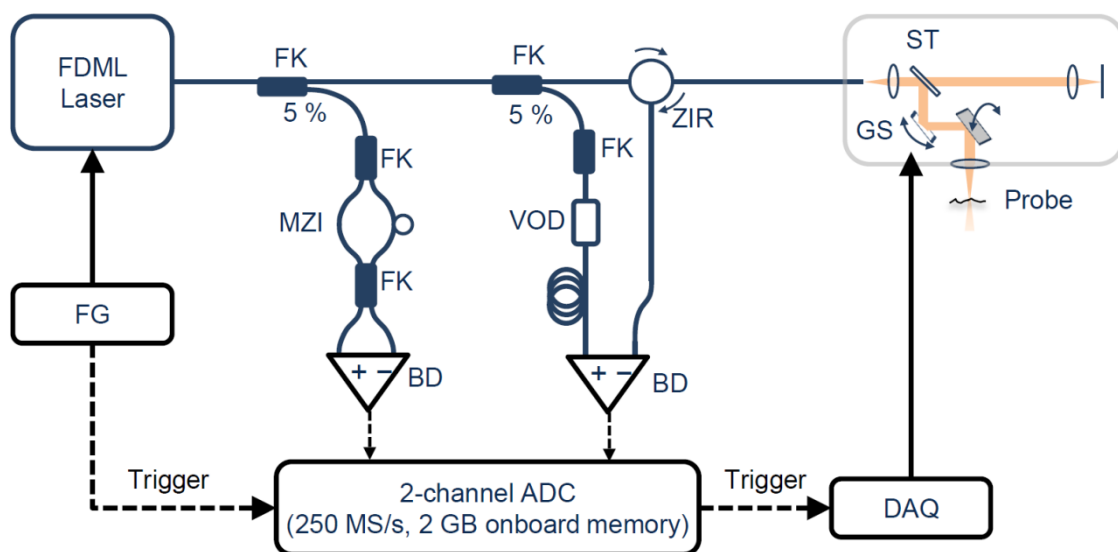


Abb. 1: Aufbau des high-speed OCT Systems. Das vom Fourier-domain mode locked (FDML) Laser emittierte Licht propagiert im Wesentlichen durch den Zirkulator (ZIR) zum Messkopf (grauer Rahmen), der das Michelson-Interferometer und die Galvanometerscanner (GS) zur Strahlableitung enthält. Das Licht wird am Strahlteiler (ST) in einen Referenzstrahl und in einen Probenstrahl aufgeteilt. Rückreflektiertes Licht wird superponiert und propagiert über den Zirkulator (ZIR) zu einem Balanced Detektor (BD). Zur Reduktion des Intensitätsrauschens wird für das Balanced Detection 5 % des Lichtes an einem Faserschmelzkoppler ausgekoppelt und über einen variablen optischen Dämpfer (VOD) zum Detektor geleitet. Für die Bereitstellung eines Kalibrierungssignals wird direkt nach dem FDML Laser 5 % des Lichtes zu einem Mach-Zehnder Interferometer (MZI) geführt. Die sinusförmige Ansteuerung des FDML Lasers erfolgt mit einem Funktionsgenerator (FG), der außerdem die Datenaufnahme mit der Datenerfassungskarte als auch die Galvanometeransteuerung mit einer DAQ Karte triggert.

Zentralwellenlänge zum Einsatz. Für das Erreichen höherer Tiefenscanraten und Schnittbildfrequenzen wird allerdings ein swept-source OCT System verwendet. Als Lichtquelle wird dabei ein durchstimmbarer Laser eingesetzt und das Interferenzspektrum wird mit einem Photodetektor im Zeitmultiplex detektiert. Besonders hohe Repetitionsraten lassen sich mit der Fourier-domain mode locked (FDML) Technologie (Huber et al. 2006, Wieser et al. 2010) erreichen. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Ringlasern wird dabei in den Resonator des FDML Lasers zusätzlich eine lange (km) Singlemodefaser eingefügt, die zu einer optischen Umlaufzeit von einigen μs führt. Durch synchrones Durchstimmen der Wellenlänge mit einem Fabry-Perot Filter bleibt der FDML Laser gleichzeitig auf dem gesamten Spektralbereich um 1300 nm aktiv, sodass keine physikalische Limitation für die Repetitionsrate existiert. Allerdings ist die Repetitionsrate durch elektromechanische Resonanzen des Fabry-Perot Filters bestimmt, die für das sinusförmige Durchstimmen der Wellenlänge genutzt werden, in diesem Fall 61 kHz. Pro Periode werden dabei zwei Wellenlängendurchläufe generiert, von denen nur der Vorwärtssweep (im Zeitverlauf zunehmende Wellenlänge) zur Bildgebung verwendet wird. Der ungenutzte Rückwärtssweep (im Zeitverlauf abnehmende Wellenlänge) wird unter Verwendung des buffered-FDML Prinzips (Huber, Adler et al. 2006) durch eine Kopie des Vorwärtssweeps ersetzt. Die resultierende Tiefenscanrate beträgt 122 kHz. Im high-speed OCT Setup (Abb. 1) wird das vom FDML-Laser emittierte Licht im Wesentlichen zum Scankopf geleitet, der das Michelson-Interferometer und die Galvanometerscanner zur Strahlableitung enthält. Mit einer Datenerfassungskarte werden sowohl das OCT Interferenzsignal als auch das Kalibrierungssignal eines Mach-Zehnder Interferometers detektiert, welches zur Reskalierung der Interferenzspektren in den Wellenzahlraum benötigt wird. Das verwendete high-speed OCT System (Kirsten et al. 2012) erreicht eine Tiefenauflösung um $10 \mu\text{m}$.

Zusätzlich zur strukturellen Information sind mit der phase-resolved Doppler OCT auch Aussagen über die Geschwindigkeit der Probe möglich. Ein sich bewegendes Streuteilchen hat in aufeinanderfolgenden Tiefenscans eine leicht unterschiedliche Tiefe; dies ist im Interferenzspektrum als Phasendifferenz sichtbar. Durch quantitative Bestimmung der Phasendifferenz aus benachbarten komplexwertigen Tiefenscans kann die Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung tiefenaufgelöst gemessen werden.

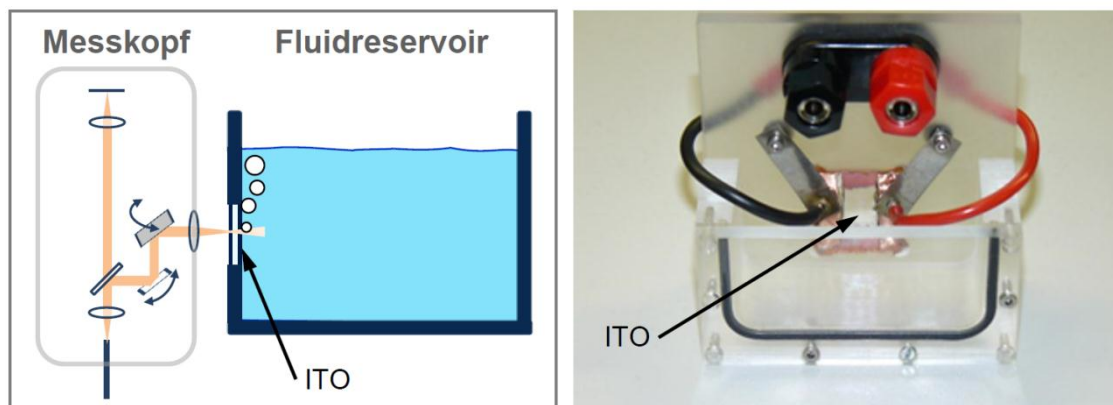


Abb. 2: Links: Prinzipskizze der Versuchsanordnung. Der Messkopf wird so positioniert, dass die OCT Bildgebung der Siedeprozesse durch ein Indium-Zinnoxid (ITO) beschichtetes Borosilikatsubstrat erfolgt. Rechts: Die Position dieses Fensters ist in der konstruierten Messkammer aus Plexiglas gekennzeichnet. Ebenfalls erkennbar ist die elektrische Kontaktierung.

Die OCT Bildgebung der Siedeprozesse erfolgt, wie in Abb. 2 dargestellt, durch ein Borosilikat-Fenster, welches mit einem Indium-Zinnoxid (ITO) Layer beschichtet ist. Der ITO Layer

ist optisch transparent sowie elektrisch leitfähig und ermöglicht somit die Bildgebung der Siedeprozesse direkt durch die beheizte Wand. Die in Abb. 2 gezeigte Messkammer wurde für Voruntersuchungen mit einem spectral-domain OCT System verwendet. Für die Visualisierung des Blasensiedens mittels high-speed OCT wurde ein Strömungskanal an der Hochschule Zittau/Görlitz verwendet (Schneider et al. 2011).

Ergebnisse

Typische OCT Schnittbilder von Dampfblasen in Flüssigkeit sind in Abb. 3 dargestellt. Um einen Kontrast zwischen Wasserdampf und Fluid herzustellen, müssen Streupartikel als Kontrastmittel dem Fluid zugegeben werden. Hier wurde das in der OCT Bildgebung verbreitete Intralipid als Lipid-Emulsion verwendet. Mit Kontrastmittel kann zwischen den dunkel erscheinenden Dampfblasen, die keine Streuteilchen enthalten, und dem mit Streupartikeln versetzten Fluid (erscheint hell) unterschieden werden. Ohne Streupartikel sind nur die Pole der Dampfblasen erkennbar (Abb. 3a), an denen Licht nach Fresnelreflexion in inverser Strahlrichtung zurückpropagiert. In den Schnittbildern treten an den Seiten der Blasen Artefakte (Schatten) auf. Diese werden durch Reflexion und Brechung an der Dampf-Fluid Grenzschicht verursacht, welches zu einer Strahlablenkung führt, die in der Schnittbildrekonstruktion bisher nicht berücksichtigt wurde. Neben zweidimensionaler Bildgebung kann mit der OCT auch die dreidimensionale Struktur der Dampfblasen dargestellt werden, wie in Abb. 3c veranschaulicht (Meissner et al. 2012). Vorteil der gewählten Messanordnung mit Bildgebung durch die ITO-Schicht ist der direkte Zugang zum Blasenfuß.

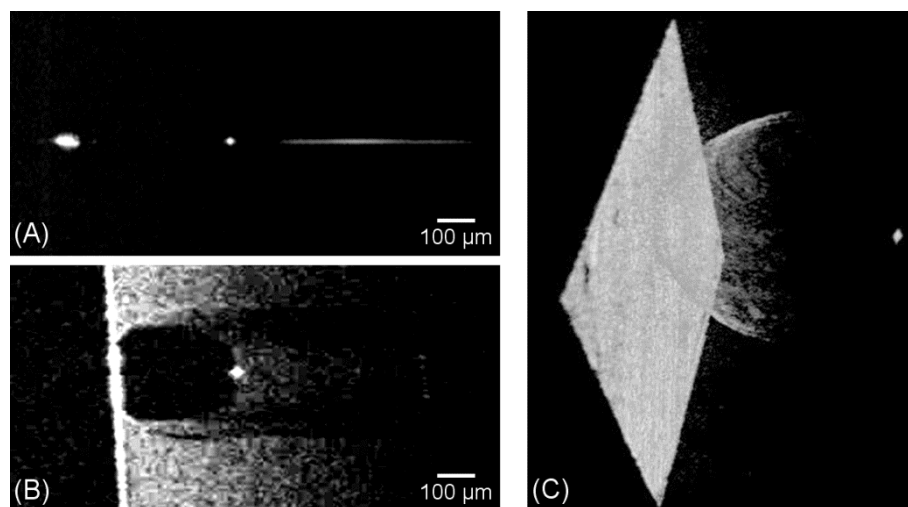


Abb. 3: (A) Dampfblase in reinem Wasser. Es sind nur Fresnel-Reflexionen an den Polen der Blase erkennbar. (B) Durch Zugabe von Intralipid entsteht ein Kontrast zwischen Wasserdampf (dunkel, innerhalb der Blase) und dem umgebenen Fluid (helle Streuzentren). Die helle vertikale Gerade ist die Grenzfläche Fluid zu ITO beschichtetes Borosilikatsubstrat. (C) Die 3D Ansicht einer Dampfblase zeigt im Wesentlichen die wandnahe Halbsphäre sowie den Fresnel-Reflex des hinteren Pols.

Mit der high-speed OCT Bildgebung konnte die Dynamik des Blasensiedens zeitlich hochaufgelöst visualisiert werden. Eine entsprechende Schnittbildsequenz ist in Abb. 4 gezeigt. Die dargestellten Schnittbilder wurden mit einer Rate von 238 Hz detektiert, wobei die präsentierten Schnittbilder aus jeweils 457 Tiefenscans bestehen. Die laterale Ausdehnung entspricht 3,6 mm, wobei die Eindringtiefe in die Intralipid-Emulsion ungefähr 2 mm beträgt. Die beheizte Wand (ITO Layer) des Borosilikatfensters ist wieder als vertikale Linie am jeweils linken Bildrand zu erkennen. Die OCT Bildgebung erfolgte analog zu den oben präsentierten

Schnittbildern von links. Die im Strömungskanal aufgeprägte Strömung des Fluides ist aufwärts gerichtet mit einer Flussgeschwindigkeit von ca. 200 mm/s in einer Tiefe von 1 mm hinter der beheizten Wand. In der Bildsequenz sind das Wachstum, das Ablösen von der Keimstelle und die Aufwärtsbewegung einzelner Blasen gut erkennbar. Entsprechende charakteristische geometrische Parameter, wie Blasendurchmesser, Blasenfußdurchmesser und Kontaktwinkel werden im gewählten zweidimensionalen Schnitt zugänglich.

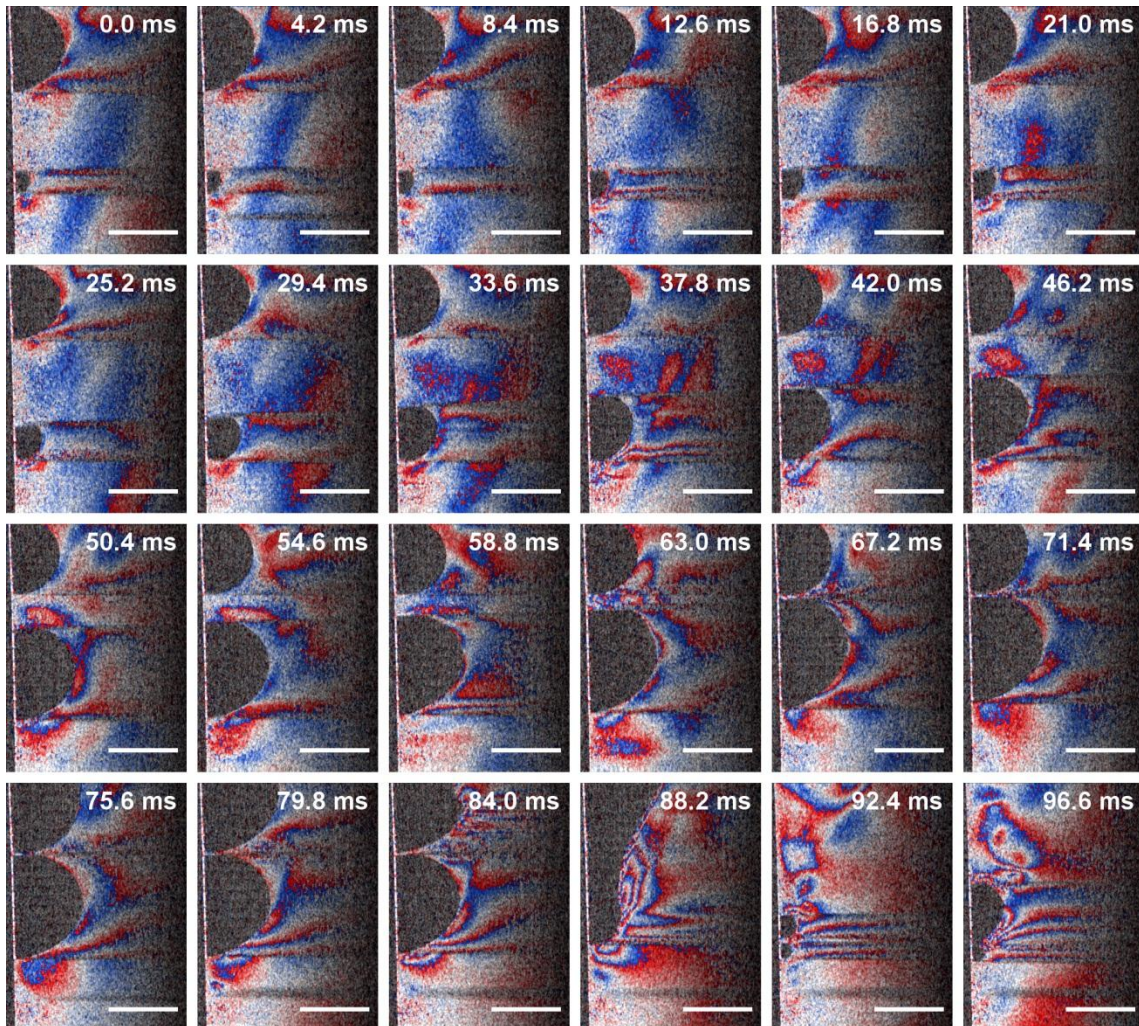


Abb. 4: Die Bilderserie zeigt einen Siedevorgang mit einer zeitlichen Auflösung von 238 Hz. Jedes einzelne Schnittbild wurde innerhalb von 4,2 ms aufgezeichnet und besteht aus 457 Tiefenscans. Der Maßstabsbalken entspricht 1 mm. Zusätzlich zur strukturellen Information ist farbkodiert die axiale Geschwindigkeitskomponente des Fluids dargestellt. Rot entspricht 30 mm/s nach links, Weiß 0 mm/s und Blau 30 mm/s nach rechts.

Simultan zur Darstellung der Blasengeometrie wurde mit der phase-resolved Doppler Methode die axiale Geschwindigkeitskomponente gemessen. Diese Information ist in Abb. 4 farbkodiert überlagert. Dabei entspricht Rot einer axialen Geschwindigkeit von 30 mm/s nach links, Weiß entspricht 0 mm/s und Blau entspricht 30 mm/s nach rechts. Überschreitet die Geschwindigkeitskomponente diesen Wertebereich, führt dies zu einem Phasensprung im Messsignal, was als Farbsprung von Blau nach Rot oder umgekehrt sichtbar wird.

Auch in diesen Schnittbildern sind Artefakte hinter den seitlichen Bereichen der Dampfblasen erkennbar, die ebenfalls durch Brechung und Reflexion entstehen. Dies führt zu einer Strahl- ablenkung, sodass Schatten entstehen und andere Geschwindigkeitskomponenten gemess-

sen werden, die hinter der Blase im Allgemeinen größer erscheinen, da der Strahl in Richtung der aufgeprägten Hauptströmung abgelenkt wird. Für quantitative Auswertungen kann in Zukunft eine Korrektur dieser Artefakte erfolgen, indem der genaue Strahlengang hinter den Dampfblasen berücksichtigt wird. Von besonderem Interesse für die Untersuchung von Quenchingprozessen ist auch die Strömung seitlich des Blasenfußes.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde die optische Kohärenztomographie als Bildgebungsmethode zur Untersuchung von Siedeprozessen vorgestellt. Durch Zugabe von Streuzentren in die Flüssigkeit lässt sich ein guter Kontrast zwischen Dampfblasen und der umgebenden Flüssigkeit erreichen. Mit high-speed OCT Bildgebung konnten Schnittbildraten von 238 Hz erreicht werden, sodass sich die Entwicklung einzelner Blasen zeitlich aufgelöst verfolgen lässt. Zusätzlich zu dieser strukturellen Information wurde durch Implementierung der phase-resolved Doppler Methode die axiale Geschwindigkeitskomponente des Fluides gemessen.

Ziel zukünftiger Untersuchungen ist die Bestimmung charakteristischer geometrischer Parameter, wie Blasendurchmesser, Kontaktwinkel, Ablösedurchmesser, Ablösefrequenz und Blasenfußdurchmesser. Aus der Darstellung der Strömung des Fluides sollen Aussagen über Konvektionsströmungen und Quenchingphänomene abgeleitet werden. Die so ermittelten umfangreichen, experimentellen Aussagen über die Siedeprozesse mit sehr guter räumlicher Auflösung von typischer Weise 10 μm und hoher zeitlicher Auflösung können z. B. als Input für numerische Simulationen als auch für deren Validierung verwendet werden.

Dankesworte

Die vorgestellte Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des gemeinsamen Projektes „fundamental research Energy 2020+“ unter den Projektnummern „02NUK010C“ und „02NUK010I“ unterstützt. Der Erstautor wird gemeinsam durch den Europäischen Sozialfonds sowie Micro-Epsilon Optronic GmbH, Germany gefördert.

Literatur

Huang, D., Swanson, E., Lin, C., Schuman, J., Stinson, W., Chanh, W., Hee, M., Flotte T., Gregory, K., Puliafito, C., Fujimoto, J., 1991: "Optical coherence tomography", *Science* Vol. 254, No. 5035, pp. 1178-1181

Huber, R., Wojtkowski, M., Fujimoto, J. G., 2006: „Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography“, *Optics Express*, Vol. 14, No. 8, pp. 3225-3237

Huber, R., Adler, D. C., Fujimoto, J. G., 2006: "Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s", *Optics Letters*, Vol. 31, No. 20, pp. 2975-2977

Kirsten, L., Gaertner, M., Schnabel, C., Meissner, S., Koch, E., 2012: „Four-dimensional imaging of murine subpleural alveoli using high-speed optical coherence tomography“, *Journal of Biophotonics*, DOI: 10.1002/jbio.201200027, in press

Meissner, S., Herold, J., Kirsten, L., Schneider, C., Koch, E., 2012: "3D Optical coherence tomography as new tool for microscopic investigations of nucleate boiling on heated surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.039, in press

Schneider, C., Hampel, R., Traichel, A., Herold, J., Kirsten, L., Meissner, S., Koch, E., Hurtado, A., 2011: "Experimental investigations of nucleate boiling on heated surfaces under saturated and sub cooled conditions" 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, Proceedings of NURETH, pp. 14-30

Walther, J., Mueller, G., Morawietz, H., Koch, E., 2009: "Analysis of in vitro and in vivo bidirectional flow velocities by phase-resolved Doppler Fourier-domain OCT", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 156, No. 1, pp. 14-21

Wieser, W., Bidermann, B. R., Klein, T., Eigenwillig, C. M., Huber, R., 2010: "Multi-Megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second", *Opt. Express*, Vol. 18, No. 14, pp. 14685-14704