

Untersuchung des Blasensiedens mit optischer Kohärenztomografie und Quantifizierung der Blasengeometrie

Investigation of nucleate boiling using optical coherence tomography and quantification of the bubble geometry

Lars Kirsten¹, Thomas Domaschke¹, Julia Walther¹, Sven Meissner¹, Clemens Schneider², Rainer Hampel², Edmund Koch¹

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

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

Optische Kohärenztomografie, Blasensieden, beheizte Oberfläche, Segmentierung
optical coherence tomography, nucleate boiling, heated surface, segmentation

Zusammenfassung

Zur wandnahen Visualisierung des Blasensiedens an einem beheizten ITO-beschichteten Borosilikatfenster in einem Strömungskanal wird in dieser Studie die high-speed optische Kohärenztomografie (OCT) eingesetzt, welche eine hohe räumliche Auflösung bis 12 µm und eine zeitliche Auflösung für Schnittbilder von 238 Hz ermöglicht. Durch Segmentierung wurde die Kontur der Dampfblasen in den OCT-Schnittbildern ermittelt und die Blasengeometrie quantifiziert. Wesentliche Parameter, wie die Fläche der Dampfblasen in der Schnittansicht und der Blasendurchmesser, konnten im Zeitverlauf für die einzelnen Dampfblasen gemessen werden.

Einleitung

Die Untersuchung von Wärmetransportphänomenen und Siedevorgängen in industrietechnischen und nuklearen Anlagen ist besonders mit Hinblick auf den Übergang vom Blasensieden zum Filmsieden relevant. Ein Ansatz sind numerische Simulationen, die allerdings experimentelle Daten als Eingangsgrößen und für die Validierung der Ergebnisse benötigen. Dabei sollen die Siedeprozesse möglichst räumlich und zeitlich hochaufgelöst und dreidimensional visualisiert werden, wobei sowohl die Geometrie der Dampfblasen als auch die Strömung des Fluids wichtige Informationen beinhalten. In diesem Kontext sind besonders eine Kombination verschiedener Bildgebungsverfahren und eine Einbeziehung alternativer Messtechniken vielversprechend.

Als alternatives Bildgebungsverfahren zur Visualisierung von Siedeprozessen wurde bereits die optische Kohärenztomografie (OCT) vorgestellt (Meissner et al. 2012, Schneider et al. 2013), die als interferometrisches Verfahren hochauflösende Tiefschnittbilder liefern kann, wobei die OCT komplementär zu etablierten Verfahren, wie der high-speed Videometrie, ist. Die Fourier-domain OCT verwendet breitbandiges, nahinfrarotes Licht, welches in einem Interferometer in einen Proben- und einen Referenzstrahl aufgespalten wird. Das rückgestreute bzw. rückreflektierte Licht wird superponiert und es werden die Interferenzspektren

gemessen, aus denen im Wesentlichen via Fouriertransformation je eine Tiefenlinie (A-Scan) berechnet werden kann. Schnittbilder und Volumenstapel sind aus mehreren A-Scans zusammengesetzt, welche während einer lateralen Strahlablenkung detektiert werden. Da bei der OCT rückgestreutes bzw. rückreflektiertes Licht detektiert wird, ist nur ein optischer Zugang notwendig. Die OCT eignet sich dabei für die Untersuchung trüber Medien, wobei der Kontrast zwischen Dampfblasen und Fluid die räumlich hochaufgelöste Visualisierung der Dampfblasen bei Siedeprozessen ermöglicht. Neben der strukturellen Bildgebung können mit OCT auch Aussagen über die Geschwindigkeit des Fluids getroffen werden. Auch im Falle des Blasensiedens konnte z. B. mit der phase-resolved Doppler-OCT simultan die axiale Geschwindigkeitskomponente tiefenaufgelöst gemessen werden (Meissner et al. 2012).

Bisher wurde die high-speed OCT nur qualitativ am Beispiel des Blasensiedens demonstriert (Meissner et al. 2012, Schneider et al. 2013). Darauf aufbauend, befasst sich diese Studie mit der Quantifizierung der Blasengeometrie aus OCT-Schnittbildsequenzen durch Verwendung eines Segmentierungsalgorithmus, welcher die Struktur der Dampfblasen aus den OCT-Grauwertbildern extrahiert. Wichtige geometrische Parameter, wie die Fläche der Dampfblasen in den OCT-Schnittbildern, können mit 238 Hz zeitlich aufgelöst für die individuellen Blasen bestimmt werden.

Methoden

Bei dem hier verwendeten high-speed OCT-System (Kirsten et al. 2013) wird als Lichtquelle ein schnell durchstimmbarer Laser verwendet, welcher nach dem Fourier domain mode locking (FDML) Prinzip (Huber et al. 2006, Wieser et al. 2010) arbeitet. Die Interferenzspektren

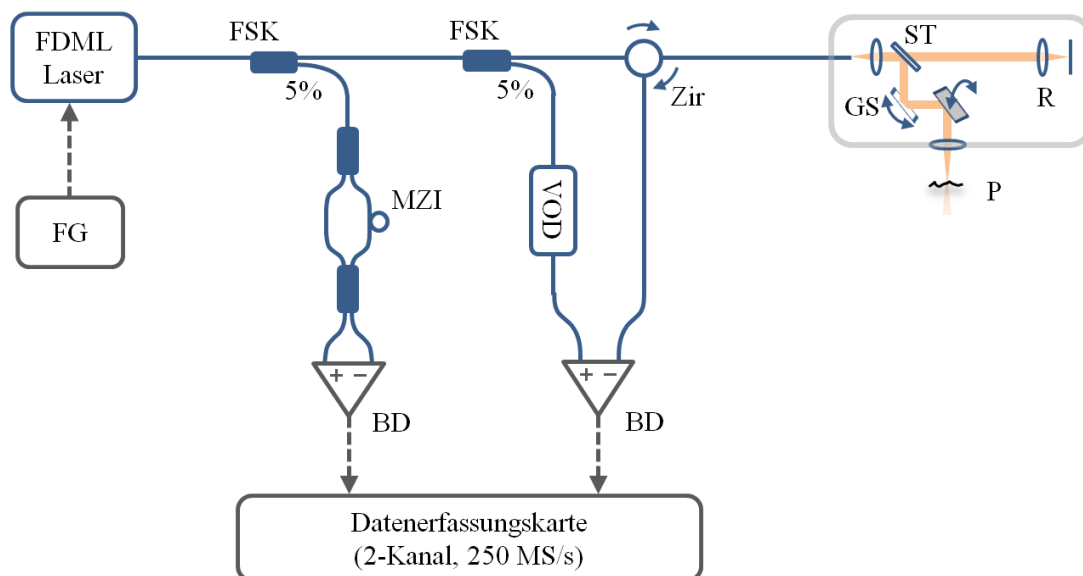


Abb. 1: In dem high-speed OCT-System wird ein Fourier domain mode locked (FDML) Laser als schnell durchstimmbare Lichtquelle verwendet, welcher mit einem Funktionsgenerator (FG) angesteuert wird. Das emittierte Licht wird in dem Singlemodefaser-Aufbau durch einen Zirkulator (Zir) zum OCT-Messkopf geführt, welcher ein modifiziertes Michelson-Interferometer mit Strahlteiler (ST), Referenzarm (R) und Galvanometerscanner (GS) zur lateralen Strahlablenkung über der Probe (P) enthält. Rückreflektiertes Licht propagiert über den Zirkulator zu einem Balanced Detektor (BD). Für die Balanced Detektion wird ein Teil des Laserlichtes verwendet, welches vorher an einem Faserschmelzkoppler (FSK) ausgekoppelt wurde und dessen Leistung mit einem variablen optischen Dämpfer (VOD) angepasst wird. Für die Reskalierung der OCT-Interferenzspektren in den Wellenzahlraum wird als Referenzinterferometer ein Mach-Zehnder Interferometer verwendet. Beide Interferenzspektren werden simultan mit einer Datenerfassungskarte aufgezeichnet.

werden mit einem Detektor im Zeitmultiplex gemessen. Der Aufbau des OCT-Systems ist in Abb. 1 skizziert. Der FDML-Laser generiert Wellenlängendurchläufe um 1300 nm Zentralwellenlänge, wobei die nutzbare Repetitionsrate unter Ausnutzung des Buffering-Prinzips (Huber, Adler et al. 2006) 122 kHz beträgt. Die Auflösung des OCT-Systems beträgt 12 μm lateral und bis zu 9 μm axial in Luft.

Die Bildgebung von Siedeprozessen wurde an einem Strömungskanal der Hochschule Zittau/Görlitz (Schneider et al. 2011) durchgeführt, dessen Messstrecke zusammen mit dem OCT-Messkopf in Abb. 2 dargestellt ist. Als Fluid wurde eine Intralipid-Emulsion eingesetzt, um einen Kontrast zwischen den Dampfblasen und dem Fluid zu erhalten. Ein optisch transparentes und elektrisch leitfähiges Indiumzinnoxid (ITO) beschichtetes Borosilikatfenster an einer Wand des Strömungskanals ermöglicht die Visualisierung der Siedeprozesse direkt hinter der beheizten ITO-Oberfläche mit OCT. Für den hier eingestellten Volumenstrom beträgt die aufwärtsgerichtete Strömungsgeschwindigkeit in einer Tiefe von 1 mm hinter der ITO-Grenzschicht ca. 200 mm/s. Weitere Prozessparameter waren 95 °C Eintrittstemperatur des Fluids und 6,2 W/cm² Wärmestromdichte.

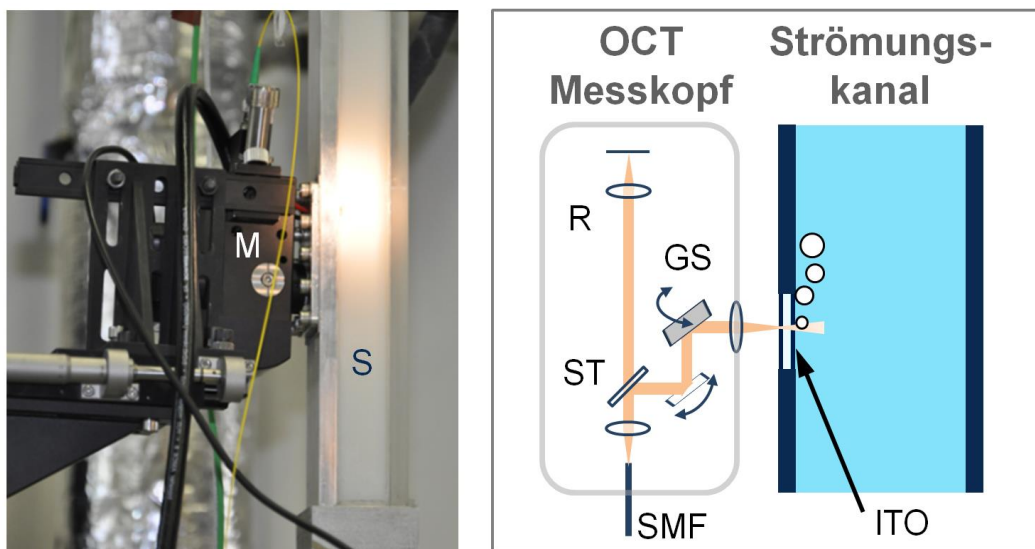


Abb. 2: Links: Der OCT-Messkopf (M) wurde vor dem ITO-beschichteten Borosilikatfenster der Messstrecke (S) positioniert. Die Strömung der Intralipid-Emulsion ist aufwärtsgerichtet. Rechts: Der über eine Singlemodefaser (SMF) angeschlossene Messkopf enthält ein Michelson-Interferometer mit Strahlteiler (ST), Referenzarm (R) und Galvanometerscannern (GS) im Probenarm. Über das Borosilikatfenster ist die wandnahe Untersuchung der Siedeprozesse möglich.

Ein typisches OCT-Schnittbild, welches aus 450 A-Scans besteht, ist in Abb. 3A dargestellt und zeigt das streuende Fluid (hell), eine Dampfblase (dunkel) und die ITO-beschichtete Innenseite des Borosilikatfensters als helle vertikale Linie links im Bild. Typische Bildartefakte sind horizontale Schatten hinter den Rändern der Dampfblase, welche durch Brechung und Reflexion an der Dampf-Fluid-Grenzschicht hervorgerufen werden. Für die zeitlich aufgelöste Darstellung der Siedeprozesse wurde über 2,15 s eine Schnittbildsequenz mit 238 Hz Schnittbildrate aufgezeichnet.

Um die Geometrie der Dampfblasen zu quantifizieren, wurde in jedem Schnittbild der Sequenz mit dem Programm ImageJ (NIH, USA) eine automatisierte Segmentierung durchgeführt, welche die Konturen der Dampfblasen bestimmt. Dazu wird das Grauwertbild (Abb. 3A) zunächst räumlich geglättet (Mean Filter) und es erfolgt eine Kontrastoptimierung. Eine weitere Glättung der Grenzfläche und eine Eliminierung kleinerer Bildartefakte werden durch ein

iteratives Dilatieren, Erodieren und Glätten erreicht. Mit einem Schwellwert wird anschließend ein Binärbild (Abb. 3B) erzeugt, aus dem mittels der Funktion „Analyze Particles“ in ImageJ die Grenzfläche (Abb. 3C) ermittelt wird. Entsprechende Parameter, wie z. B. der laterale Durchmesser, der axiale Durchmesser und die Fläche der Dampfblase im Schnittbild, können aus dieser Geometrie bestimmt werden. Über ein Tracking der Dampfblasen können mehrere Dampfblasen in den Schnittbildern voneinander unterschieden werden und es konnte die zeitliche Entwicklung für die individuellen Blasen extrahiert werden.

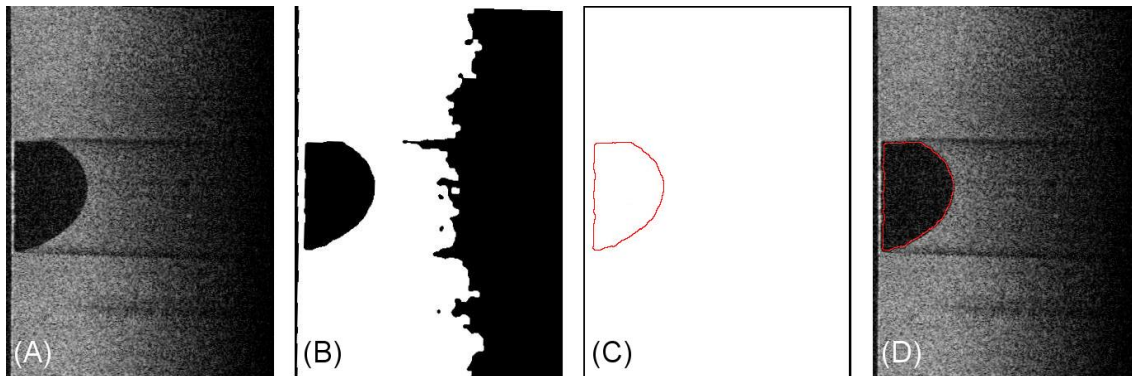


Abb. 3: (A) Original OCT-Schnittbild, bestehend aus 450 A-Scans (horizontale Linien). Die Ausdehnung beträgt 325 Pixel x 450 Pixel bzw. 2,6 mm x 3,6 mm. Das Fluid erscheint hell, die Dampfblase dunkel und die ITO-beschichtete Oberfläche des Borosilikatfensters ist als vertikale helle Linie links im Bild erkennbar. (B) Binärbild nach Bildbearbeitung des Originalbildes. (C) Aus dem Binärbild bestimmte Blasenkontur. (D) Überlagerung des OCT-Schnittbildes mit der ermittelten Blasenkontur (rot).

Ergebnisse und Diskussion

Die Siedeprozesse wurden mit einer Schnittbildrate von 238 Hz aufgezeichnet. Der Ausschnitt aus einer 2,15 s langen Aufnahme in Abb. 4 zeigt den Wachstumsprozess einer Dampfblase. Die Aufnahmedauer von 4,2 ms pro Schnittbild ist ausreichend, um bei moderaten Wärmestromdichten eine hinreichend hohe zeitliche Auflösung zu erzielen. Sehr schnelle Prozesse, wie die Fusion zweier Dampfblasen z. B. zum Zeitpunkt 247,8 ms in Abb. 4, sind dagegen schwer zu interpretieren und erscheinen durch die 4,2 ms lange Aufnahmedauer im Schnittbild unter Umständen verzerrt. Durch Brechung und Reflexion entstehen hinter den Rändern der Blasen Schatten, welche in allen Schnittbildern zu erkennen sind. Die Eindringtiefe in die Intralipid-Emulsion beträgt ca. 1,5 mm.

Die Ergebnisse der Segmentierung sind am Beispiel der Fläche der Dampfblasen in der Schnittebene in Abb. 5 dargestellt. Der Vergleich mit der Schnittbildsequenz in Abb. 4 liefert eine Übereinstimmung der ermittelten Flächen. Diejenigen Dampfblasen, welche nicht komplett innerhalb des Schnittbildes liegen, werden nicht zur Auswertung verwendet, z. B. die Zeitpunkte 277,2 ms bis 298,2 ms. Im Zeitverhalten der Dampfblasenfläche zeigen sich verschiedene Prozesse. Neben einer schnellen Zunahme der Fläche, wie auch in Abb. 4 zu erkennen, wurden auch Oszillationen der Fläche beobachtet, z. B. im Zeitintervall 750 ms bis 1 s in Abb. 5. Da in den OCT-Schnittbildern keine Informationen zur Ausdehnung und Position der Dampfblasen in die zweite laterale Richtung senkrecht zur Bildebene enthalten sind, kommen sowohl eine Oszillation des Dampfblasenvolumens als auch eine transversale Bewegung der Dampfblasen als Ursache in Frage. Die Dampfblasen erreichten in diesem Bildfeld und für diese Prozessparameter eine maximale Blasenfläche von etwa $1,0 \text{ mm}^2$. Für höhere (kleinere) Volumenströme wurden entsprechend geringere (größere) Blasenflächen bzw. Blasendurchmesser beobachtet. Durch die Bildbearbeitung wird die Blasengeometrie weitgehend korrekt wiedergegeben. Geringe Abweichung der segmentierten Blasenkontur

verglichen mit dem OCT-Bild entstehen durch die Bildbearbeitung, wobei die Blasenkontur meist eine etwas kleinere Fläche einschließt, als durch manuelle Segmentierung gewählt würde.

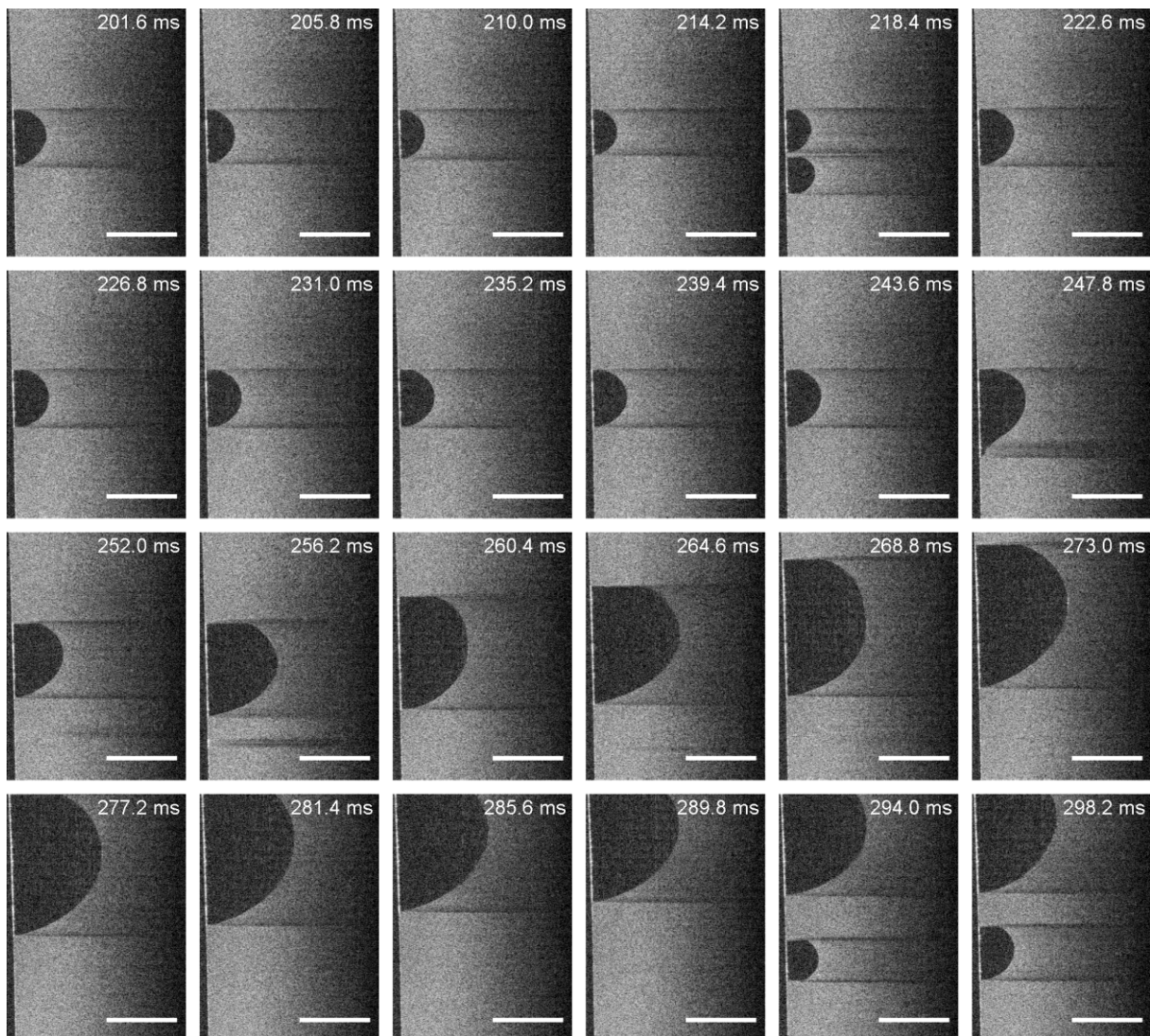


Abb. 4: Der Ausschnitt einer OCT-Schnittbildsequenz zeigt die Größenzunahme einer Dampfblase an der beheizten ITO-beschichteten Innenwand des Borosilikat-Fensters (helle vertikale Linie links in den Schnittbildern) und das Entlanggleiten der Dampfblase an der Innenwand ab dem Zeitpunkt 260,4 ms. Die zeitliche Auflösung von 238 Hz Bildrate korrespondiert mit einer Aufnahmedauer von 4,2 ms je Schnittbild. Maßstab 1 mm.

In dieser Studie wurde demonstriert, dass sich mit high-speed OCT wandnahe Siedeprozesse in streuenden Fluiden räumlich und zeitlich hochaufgelöst bildgeben lassen und dass eine automatisierte Segmentierung der Blasengeometrie und eine Quantifizierung charakteristischer Parameter möglich sind. Durch die Komplementarität zu herkömmlichen Messverfahren bietet sich in Zukunft eine Kombination der OCT mit high-speed Videometrie an, um Aussagen über die dreidimensionale Blasengeometrie zu gewinnen. Durch eine weitere Erhöhung der Repetitionsrate des FDML-Lasers ist in Zukunft eine höhere Schnittbildfrequenz möglich.

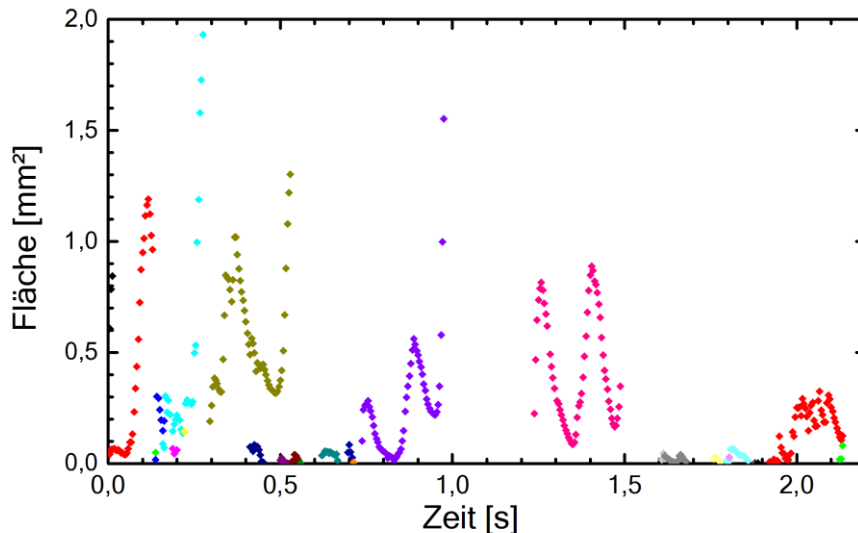


Abb. 5: Die Flächen der Dampfblasen in den OCT-Schnittbildern, welche mit dem oben beschriebenen Segmentierungsalgorithmus aus der OCT-Schnittbildsequenz bestimmt wurden, zeigen den zeitlichen Verlauf für die einzelnen Dampfblasen, welche durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet sind.

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

- 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., 2013: „Four-dimensional imaging of murine subpleural alveoli using high-speed optical coherence tomography“, Journal of Biophotonics, Vol. 6, No. 2, pp. 148-152
- 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, Vol. 55, No. 21-22, pp. 5565-5569
- Schneider, C., Hampel, R., Traichel, A., Herold, J., Kirsten, L., Meissner, S., Koch, E., Hurtado, A., 2011: „Experimental investigation of nucleate boiling on heated surfaces under sub cooled conditions“ 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, Proceedings of NURETH, pp. 14-30
- Schneider, C., Kirsten, L., Meissner, L. Hurtado, A., Koch, E., Hampel, R., 2013: „Small scale boiling experiments using two-dimensional imaging with high-speed camera and optical coherence tomography“, Kerntechnik, Vol. 78 (2013), No. 1, pp. 54-56
- Wieser, W., Biedermann, 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“, Optics Express, Vol. 18, No. 14, pp. 14685-14704