

## Potential der High Speed optischen Kohärenztomografie bei der Untersuchung des Blasensiedens

### Potential of optical coherence tomography for the investigation of nucleate boiling

Lars Kirsten<sup>1</sup>, Thomas Domaschke<sup>1</sup>, Julia Walther<sup>1</sup>, Sven Meissner<sup>1</sup>,  
Clemens Schneider<sup>2</sup>, Rainer Hampel<sup>2</sup>, Edmund Koch<sup>1</sup>

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

E-Mail: lars.kirsten@tu-dresden.de

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

Optische Kohärenztomografie, Blasensieden, Segmentierung, Doppler  
optical coherence tomography, nucleate boiling, segmentation, Doppler

#### Zusammenfassung

Es wird die High Speed optische Kohärenztomografie (OCT) als alternatives Verfahren für die Untersuchung des Blasensiedens an beheizten Oberflächen vorgestellt. Mit High Speed OCT können Dampfblasen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung visualisiert werden. Die Blasengeometrie konnte mit einem entwickelten Segmentierungs- und Trackingalgorithmus automatisiert bestimmt und für individuelle Dampfblasen im Zeitverlauf dargestellt werden. Simultan zur Bildgebung der Blasengeometrie konnte mit Doppler-OCT die Bildgebung der axialen Geschwindigkeitskomponente des Fluides realisiert werden. Die OCT ist für die Bildgebung der Blasengeometrie in streuenden Fluiden geeignet und bietet den Vorteil einer komplementären Bildgebung im Vergleich zur Shadowgrafie. Durch die derzeitige Entwicklung von Ultra High Speed OCT-Systemen ist eine zukünftige Steigerung der Bildrate bis in den kHz-Bereich denkbar.

#### Einleitung

Siedeprozesse an beheizten Oberflächen sind wesentliche Wärmetransportprozesse mit einer Vielzahl von Anwendungen, von kleinskaligen Siedeprozessen in Mikrokanälen bei der Elektronik Kühlung bis hin zu großskaligen Siedeprozessen in industrietechnischen Anlagen oder Kernreaktoren. Die experimentelle Untersuchung kleinskaliger Siedeprozesse ist für die Grundlagenforschung relevant und außerdem notwendig, um numerische Simulationen zu überprüfen und um Eingangsp Parameter für numerische Simulationen bereitzustellen. Um möglichst umfangreiche experimentelle Daten über das Blasenwachstum und über die Fluidströmung in der Umgebung der Dampfblasen bzw. in der Nähe der beheizten Oberfläche zu gewinnen, werden typischerweise Methoden der High Speed Videometrie bzw. Shadowgrafie und der Particle Image Velocimetry eingesetzt.

Als neuartiges Bildgebungsverfahren im Bereich der Fluidmesstechnik wurde bereits in vorausgehenden Machbarkeitsstudien die High Speed OCT zur Bildgebung des Blasensiedens

in streuenden Fluiden eingesetzt (Meissner et al. 2012, Kirsten et al. 2015). Die optische Kohärenztomografie (OCT) ist ein interferometrisches Messverfahren, bei dem in einem Interferometer das vom Untersuchungsgebiet rückreflektierte Licht mit Referenzlicht superponiert wird. Dabei werden breitbandige und meist nahinfrarote Lichtquellen eingesetzt und es wird das Spektrum des interferierenden Lichtes detektiert. Diese Interferenzspektren zeigen Modulationen, deren Modulationsfrequenz proportional zur Tiefe in der Probe ist, aus der Licht rückreflektiert wurde. Mit einer Fouriertransformation lässt sich deshalb aus einem Interferenzspektrum eine Tiefenlinie der Reflektivität, ein sogenannter A-Scan, berechnen. Durch eine laterale Strahlablenkung können Schnittbilder (B-Scans) und Volumenstapel aufgezeichnet werden, die aus mehreren benachbarten A-Scans zusammengesetzt sind. Die OCT ermöglicht die Bildgebung streuender Substanzen mit einer räumlichen Auflösung in der Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$ . Neben der Möglichkeit, die Geometrie von Dampfblasen hochaufgelöst zu bestimmen, kann mit der phasenaufgelösten Doppler-OCT die axiale Geschwindigkeitskomponente des Fluides simultan quantifiziert werden.

Im Folgenden werden Ergebnisse der High Speed OCT-Bildgebung zur räumlich und zeitlich aufgelösten Bildgebung der Blasengeometrie und der Fluidströmung vorgestellt. Es werden die Möglichkeiten und das zukünftige Potential der High Speed OCT bei der Untersuchung des Blasensiedens diskutiert.

## Methoden

Es wurde ein High Speed Swept Source OCT-System eingesetzt, bei dem als breitbandige Lichtquelle ein schnell durchstimmbarer Fourier domain mode locked (FDML) Laser verwendet wird, der die Wellenlänge repetitiv mit 120 kHz um die Zentralwellenlänge von 1300 nm durchstimmt. Das vom Laser emittierte Licht wird in einen Messkopf geleitet, der ein modifiziertes Michelson-Interferometer beinhaltet (siehe Abb. 1). Mit einem Detektor werden im Zeitmultiplex die Interferenzspektren aufgezeichnet. Die laterale Ablenkung der Laserstrahlen wird durch Galvanometerscanner realisiert, die im Probenarm des Interferometers integriert sind. Die axiale Auflösung des OCT-Systems beträgt 13.5  $\mu\text{m}$  in Luft, die laterale Auflösung beträgt 11.5  $\mu\text{m}$ . Simultan zur OCT-Bildgebung ist durch Verwendung eines dichroitischen Strahlteilers eine Kamera basierte Videometrie möglich. Für Details zu dem High Speed OCT-System wird auf Kirsten et al. (2015) verwiesen.

Die Bildgebung der Blasengeometrie wurde an einem einfachen Fluidreservoir/Tischversuchsstand (Meissner et al. 2012) mit 50 ml Fassungsvermögen durchgeführt. Das Fluidreservoir ist mit einem Borosilikatfenster ausgestattet, welches an der Innenseite mit einer Indiumzinnoxid-(ITO)-Schicht versehen ist. Diese ITO-Schicht ist elektrisch leitfähig und optisch transparent, sodass an der Innenseite des Fensters Blasensieden induziert werden konnte und sich mit OCT durch das Fenster hindurch die Dampfblasen visualisieren ließen. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abb. 1 dargestellt. Als Fluid wurde eine 1 % SMOFlipid Emulsion verwendet, welche die benötigten Streuzentren im Fluid bereitstellt, sodass ein Kontrast zwischen Fluid und Dampf bei der OCT-Bildgebung erreicht wird.

Mit der OCT lassen sich Schnittbilder aufzeichnen, deren Orientierung in Abb. 1 in einem Koordinatensystem dargestellt ist und der x-z-Ebene entspricht. Für die Videometrie, welche Projektionen, d. h. Bilder in der x-y-Ebene im Sinne der Shadowgrafie, liefert, erfolgte eine rückwärtige Beleuchtung. Die aufgezeichneten Kamerabilder dienen der Justierung während der Messung und zur qualitativen Überprüfung der OCT-Bildgebung.

Weiterführende Experimente zur Doppler-Bildgebung wurden an einem Strömungskanal der Hochschule Zittau/Görlitz durchgeführt (Schneider et al. 2012, Kirsten et al. 2015), bei dem in einem vertikalen Strömungskanal Blasensieden erzeugt werden kann. Der Kanal mit

Querschnitt  $28 \times 28 \text{ mm}^2$  wird aufwärts vom Fluid durchströmt. Er besitzt analog zum Tischversuchsstand ein ITO-beschichtetes Borosilikatfenster. Der Versuchsstand ermöglicht die Einstellung der thermohydraulischen Parameter Volumenstrom, Fluideintrittstemperatur und Heizleistung an der ITO-Schicht.

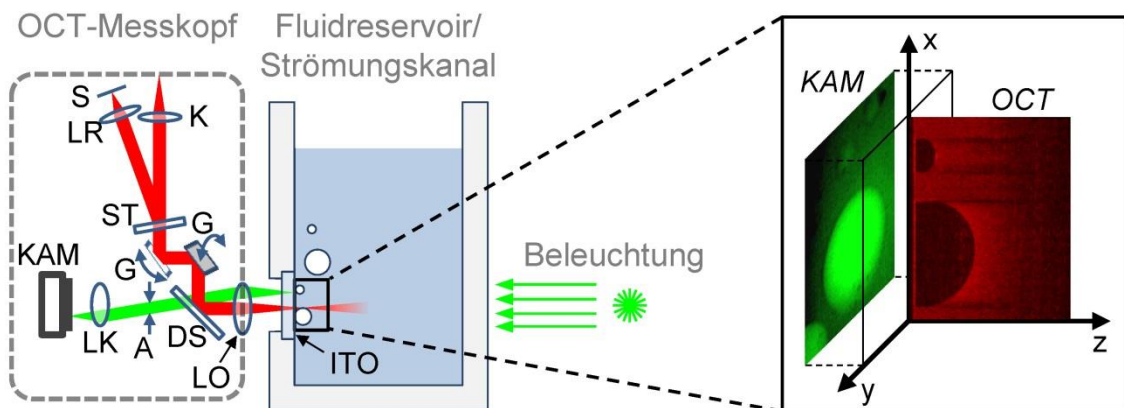


Abb. 1: Messanordnung mit OCT-Messkopf und Flüssigkeitsreservoir (bzw. dem Strömungskanal). Der Messkopf beinhaltet ein modifiziertes Michelson-Interferometer für die OCT-Bildgebung (roter Strahlengang) und eine VIS-Kamera für die Videometrie (grüner Strahlengang). Am Indiumzinnoxid (ITO) beschichteten Borosilikatfenster wird Blasensieden induziert. Rechts sind ein OCT-Schnittbild und ein Kamerabild im verwendeten Koordinatensystem dargestellt. Abkürzungen: A: Aperturblende, DS: Dichroitischer Spiegel, G: Galvanometerscanner, K: Kollimator, KAM: Kamera, LK: Mikrovideolinse, LO: Objektivlinse, LR: Linse im Referenzarm, S: Spiegel, ST: Strahlteiler.

## Ergebnisse und Diskussion

### (a) Strukturelle Bildgebung zur Bestimmung der Blasengeometrie

Bei der Bildgebung der Blasengeometrie wurden Sequenzen aus 384 OCT-Schnittbildern mit einer Bildrate von 234 Hz aufgezeichnet. Synchron zu jedem OCT-Schnittbild wurde ein Kamerabild aufgenommen. Die Heizleistung betrug  $6.4 \text{ W/cm}^2$  und die Fluidtemperatur  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . In Abb. 2 ist als Beispiel ein Ausschnitt der Sequenz (Frame 42 bis 59) dargestellt. Dabei sind die OCT- und Kamerabilder paarweise nebeneinander angeordnet. Die Kamerabilder (jeweils links) zeigen die Projektion entsprechend der Shadowgrafie, d. h. die x-y-Ebene, in der bereits die Dampfblasen als helle Kreisflächen erkennbar sind. Die OCT-Schnittbilder (jeweils rechts) repräsentieren die x-z-Ebene, d. h. den Tiefenschnitt in die Bildebene hinein. Die laterale Position der OCT-Schnittebene ist in den Kamerabildern in der Mitte als rote vertikale Linie dargestellt.

Jedes der gezeigten OCT-Schnittbilder besteht aus 440 A-Scans, wobei die OCT-Bildgebung von links erfolgt und jeder A-Scan einer horizontalen Linie im OCT-Schnittbild entspricht. Am linken Rand der OCT-Schnittbilder ist die Innenseite des Fensters als helle vertikale Linie erkennbar. Das Fluid, eine SMOFlipid Emulsion, erscheint hell streuend, während die Dampfblasen dagegen als dunkle Halbkreise erkennbar sind. Um diesen Kontrast zwischen Fluid und Dampf zu erreichen, ist das Hinzufügen von Partikeln/Streuzentren notwendig (Meissner et al. 2012).

Prinzipiell kommt es an den Dampf-Fluid-Grenzschichten zu Brechung bzw. u. U. zu Totalreflexion. Bei den untersuchten Dampfblasen mit einem Kontaktwinkel von etwa  $90^\circ$  wird der Laserstrahl erst an der Rückseite der Blase, d. h. an der Dampf-Fluid-Grenzschicht gebrochen. Dies wirkt sich aber nur auf die Bildbereiche hinter den Dampfblasen aus, also im OCT-Bild rechts der Dampfblasen. Die Blasengeometrie kann daher weitestgehend exakt visualisiert werden. Lediglich an den Rändern der Blase kommt es zu horizontalen Schatten im OCT-Bild, welche durch Totalreflexion verursacht werden.



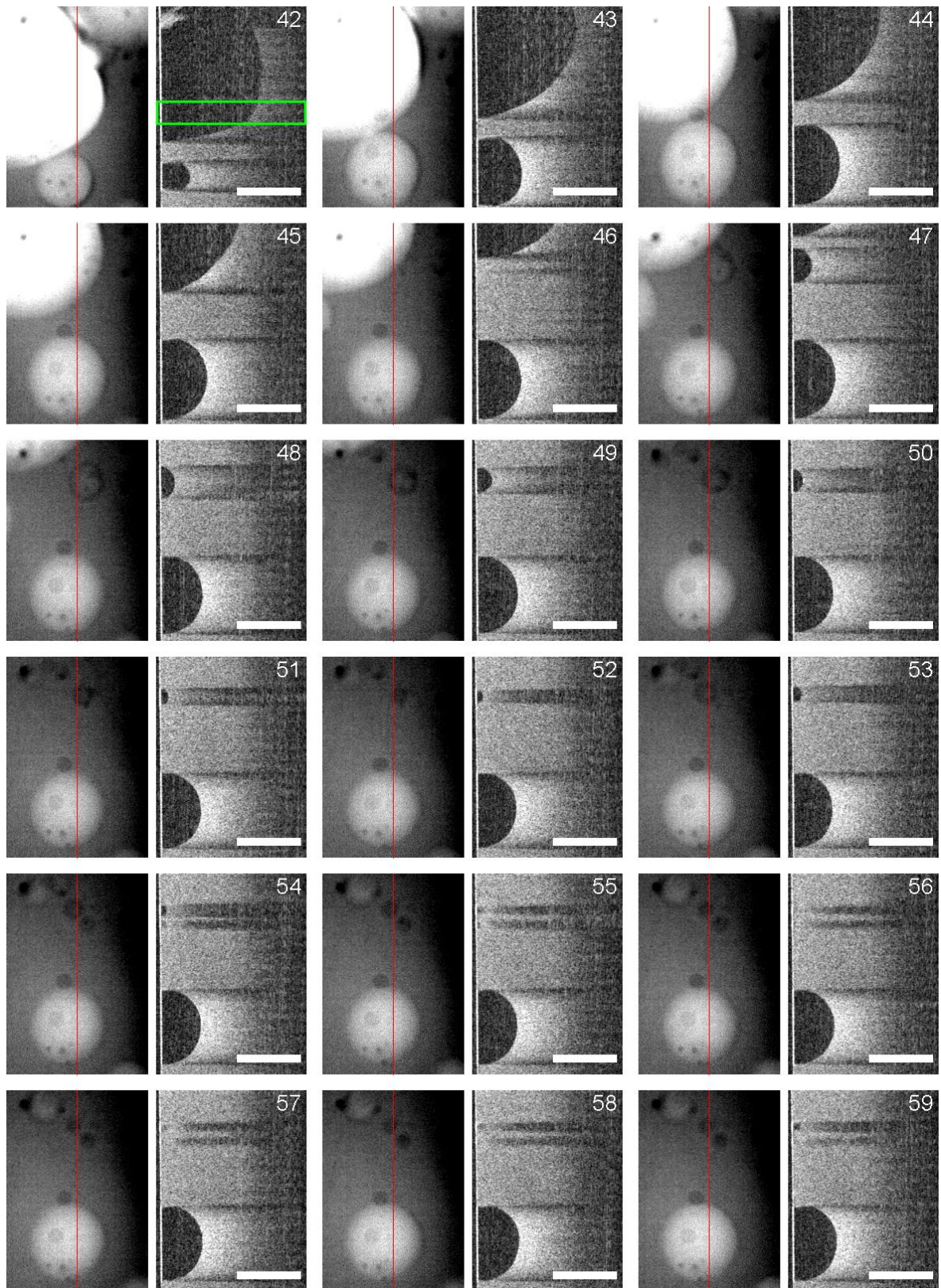


Abb. 2: Paarweise angeordnete OCT-Schnittbilder (jeweils rechts) und zugehörige Kamerabilder (jeweils links) für die Frames 42 bis 59 (Zeitintervall 0,175 s bis 0,248 s) einer insgesamt 384 Frames bzw. 1,64 s langen Sequenz. Die Bildrate von 234 Hz resultiert in einem zeitlichen Abstand zwischen den Frames von 4,27 ms. Die laterale Position der OCT-Schnittbilder ist als rote Linie in den Kamerabildern markiert. Die A-Scans in den OCT-Bildern, die während der Belichtungszeit der Kamerabilder aufgenommen wurden, sind im ersten OCT-Bild exemplarisch mit einer grünen Box gekennzeichnet. Maßstabsbalken entspricht 1mm für OCT- und Kamerabilder.

Bei der Interpretation bzw. dem Vergleich der OCT-Bilder mit den Kamerabildern muss auch die unterschiedliche Art der Bildaufnahme beachtet werden. Die Aufnahmedauer für den gezeigten Ausschnitt eines B-Scans beträgt 3,7 ms, wobei die einzelnen A-Scans innerhalb dieses Zeitfensters nacheinander detektiert werden. Die Kamerabilder werden allerdings mit einer Belichtungszeit von 0,4 ms aufgezeichnet, wobei die Belichtungszeit in Frame 42 in Abb. 2 exemplarisch als grüner Rahmen dargestellt ist. Bei hochdynamischen Prozessen, wie schnelles Blasenwachstum oder Blasenkoaleszenz, kann daher die mit OCT bestimmte Geometrie außerhalb dieses Bereiches von der Blasengeometrie in den Kamerabildern abweichen. Dies ist z. B. anhand der schnell wachsenden kleinen, unteren Blase in Frame 42 in Abb. 2 erkennbar. Bei den untersuchten Wachstumsprozessen sind die meisten OCT-Schnittbilder zu den Kamerabildern konsistent, wie auch in den restlichen Frames in Abb. 2.

Durch einen automatisierten Segmentierungsalgorithmus (Kirsten et al. 2015) kann ausgehend von den gezeigten 8-Bit OCT-Grauwertbildern eine Reduzierung des Rauschens, eine Binarisierung und die Extraktion der einzelnen Blasengeometrien erfolgen. Durch ein Tracking können einzelne Blasengeometrien anhand ihrer Position und Größe in aufeinanderfolgenden Schnittbildern einander zugeordnet werden. Somit kann für individuelle Dampfblasen der zeitliche Verlauf verschiedener geometrischer Parameter während des Blasenwachstumsprozesses automatisiert bestimmt werden. Das Ergebnis der Segmentierung und des Trackings ist für die gesamte Bildsequenz in Abb. 3 exemplarisch für die Blasenfläche im OCT-Schnittbild dargestellt. In Abb. 3 ist die Blasenfläche über der Zeit und der Frame-Nummer aufgetragen. Vom Algorithmus einander zugeordnete Blasen sind farblich einheitlich gekennzeichnet, wobei sich die Farben nach 10 unterschiedlichen Blasen wiederholen. Die grün markierte Blase ab Frame 42 repräsentiert die untere Dampfblase in der Sequenz in Abb. 2. Die Fläche der oberen Dampfblase, die ab Frame 47 erkennbar ist, nimmt zunächst ab, bis die Blase nicht mehr im OCT-Schnittbild erfasst wird. Dies entspricht der dunkelblau markierten Fläche in Abb. 3. Danach entsteht in im OCT-Schnittbild eine neue Dampfblase, die in Abb. 3 nun hellblau gekennzeichnet ist.

Bei der OCT-Bildgebung wird nur eine Schnittebene bildgegeben, sodass mit OCT nur die Blasengeometrie in dieser Schnittebene ermittelt werden kann. Grundsätzlich kann eine Änderung der Blasenfläche im Schnittbild durch eine tatsächliche Änderung der Blasengröße aber auch durch eine laterale Bewegung der Dampfblase orthogonal zur Schnittebene verursacht werden. Bei den hier durchgeführten Experimenten wurde darauf geachtet, dass die

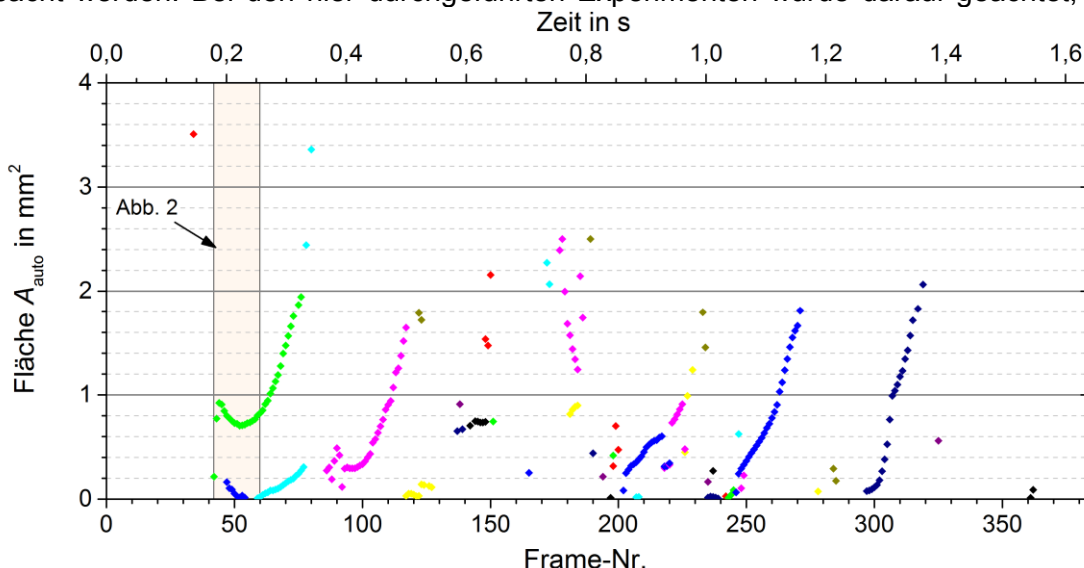


Abb. 3: Vom Segmentierungsalgorithmus bestimmte Flächen der Dampfblasen in den OCT-Schnittbildern. Die zeitliche Auflösung beträgt 4,27 ms. Vom Trackingalgorithmus einander zugeordnete Dampfblasen sind farblich einheitlich markiert, wobei sich die Farben nach 10 verschiedenen Dampfblasen wiederholen. Das in Abb. 2 dargestellte Zeitintervall ist hellrot markiert.

Dampfblasen nahe der Blasenmitte geschnitten werden. Zukünftig wäre eine Erweiterung der OCT-Bildgebung hin zu mehreren parallelen Schnittebenen oder einer vierdimensionalen Bildgebung denkbar, um die Blasengeometrie dreidimensional mit OCT erfassen zu können.

Die Genauigkeit der automatischen Segmentierung wurde durch Vergleich mit einer manuell durchgeführten Segmentierung für Blasenflächen zwischen  $0,02 \text{ mm}^2$  und  $2 \text{ mm}^2$  untersucht. Die Quantifizierung der Blasengeometrie wird maßgeblich durch die Wahl eines geeigneten Schwellwertes bei der Berechnung der Binärbilder beeinflusst. Bei dem verwendeten Schwellwert kommt es zu einer leichten Unterschätzung der Blasenfläche, wodurch die gefundene Blasenkontur zur Blasenmitte hin von der tatsächlichen Kontur abweicht. Für die vom Algorithmus bestimmten Flächen zeigt sich solch eine systematische Abweichung, die einem Versatz der Blasenkontur nach innen um 1,6 Pixel entspricht. Mit einer Korrekturfunktion kann diese systematische Messabweichung korrigiert werden. Die verbleibende Streuung (Standardabweichung kleiner als  $0,01 \text{ mm}^2$  über den gesamten Größenbereich) ist mit der Unsicherheit der manuellen Segmentierung vergleichbar.

#### *(b) Bildgebung der Fluidgeschwindigkeit mit Doppler-OCT*

Mit Doppler-OCT kann simultan zur strukturellen Bildgebung auch die Fluidgeschwindigkeit bildgegeben werden. Die hier verwendete Methode der phasenaufgelösten Doppler-OCT ermöglicht die Quantifizierung der axialen Geschwindigkeitskomponente. Eine axiale Bewegung resultiert in einer Phasendifferenz im Interferenzsignal zwischen aufeinanderfolgenden A-Scans, die proportional zur axialen Geschwindigkeitskomponente ist. Bei der phasenaufgelösten Doppler-OCT wird diese Phasendifferenz aus den komplexwertigen A-Scans tiefenaufgelöst berechnet. In Abb. 4 sind Bildsequenzen für verschiedene Volumenströme im Strömungskanal dargestellt. Die Heizleistung beträgt jeweils  $6.2 \text{ W/cm}^2$  und die Fluideintrittstemperatur  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Strömungskanal wird aufwärts durchströmt. Dabei ist die gemessene axiale Fluidgeschwindigkeit  $v_{ax}$  farbkodiert der Strukturinformation überlagert. Weiß bedeutet  $v_{ax} = 0$ , Rot kennzeichnet eine Bewegung des Fluides nach links mit  $v_{ax} = -30 \text{ mm/s}$  und Blau kodiert eine Bewegung des Fluides nach rechts mit  $v_{ax} = 30 \text{ mm/s}$ . Falls die Geschwindigkeit diesen eindeutigen Messbereich, der dem Bereich der Phasendifferenz von  $-\pi$  bis  $\pi$  entspricht, überschreitet, kommt es zu einem Phasensprung bzw. im Bild zu einem Farbsprung, nach dem sich die Farbskala entsprechend fortsetzt. In Abb. 4 ist die dargestellte Phasendifferenz über eine  $3 \times 3$  Pixelnachbarschaft komplex gemittelt (Walther und Koch 2011, Kirsten et al. 2015), um Phasenrauschen zu reduzieren.

In Abb. 4a, in Frame 82, ist die häufig zu erkennende Umströmung der Dampfblasen mit einem grünen Pfeil gekennzeichnet. Hinter der unteren Blasenhälfte ist eine Fluidbewegung nach rechts und hinter der oberen Blasenhälfte eine Fluidbewegung nach links messbar. Des Weiteren befindet sich seitlich der Blase im Bereich des Blasenfußes häufig ein Bereich mit einer Geschwindigkeitskomponente nach links (\* in Abb. 4a). Dies könnte ebenfalls mit der Umströmung der Blase im Bereich des Blasenfußes oder auch mit einem Zustrom zum Blasenfuß, an dem Fluid verdampft, erklärt werden.

Grundsätzlich kommt es an der Dampf-Fluid-Grenzfläche zur Brechung und damit zur Ablenkung des Laserstrahls. Dies ist in Abb. 4 jeweils in den zweiten B-Scans für exemplarische A-Scans (grüne Linie) eingezeichnet. Die grün gestrichelte Linie kennzeichnet den eigentlichen Verlauf des Laserstrahls/A-Scans hinter der Dampfblase. Durch die Strahlablenkung in Richtung oder entgegen der Hauptströmungsrichtung werden hinter der Dampfblase höhere axiale Geschwindigkeiten gemessen. Mit zunehmendem Volumenstrom (Abb. 4a-c) nehmen diese messbaren Geschwindigkeiten entsprechend zu und erreichen in Abb. 4c bereits maximal  $120 \text{ mm/s}$ . Entsprechende Muster der axialen Geschwindigkeit hinter der Dampfblase lassen sich durch numerische Simulationen bestätigen (Kirsten et al. 2015).

Der Vergleich der verschiedenen Volumenströme in Abb. 4 zeigt, dass mit zunehmenden Volumenstrom die Turbulenz im Fluid (entfernt von der Wand) zunimmt. Dagegen nimmt bei geringem Volumenstrom (und damit reduziertem Wärmeabtransport) der Blasendurchmesser



und die Blasenablösefrequenz zu. In Abb. 4a zeigt sich dem entsprechend eine deutliche durch Blasendynamik verursachte Fluidbewegung in Wandnähe.

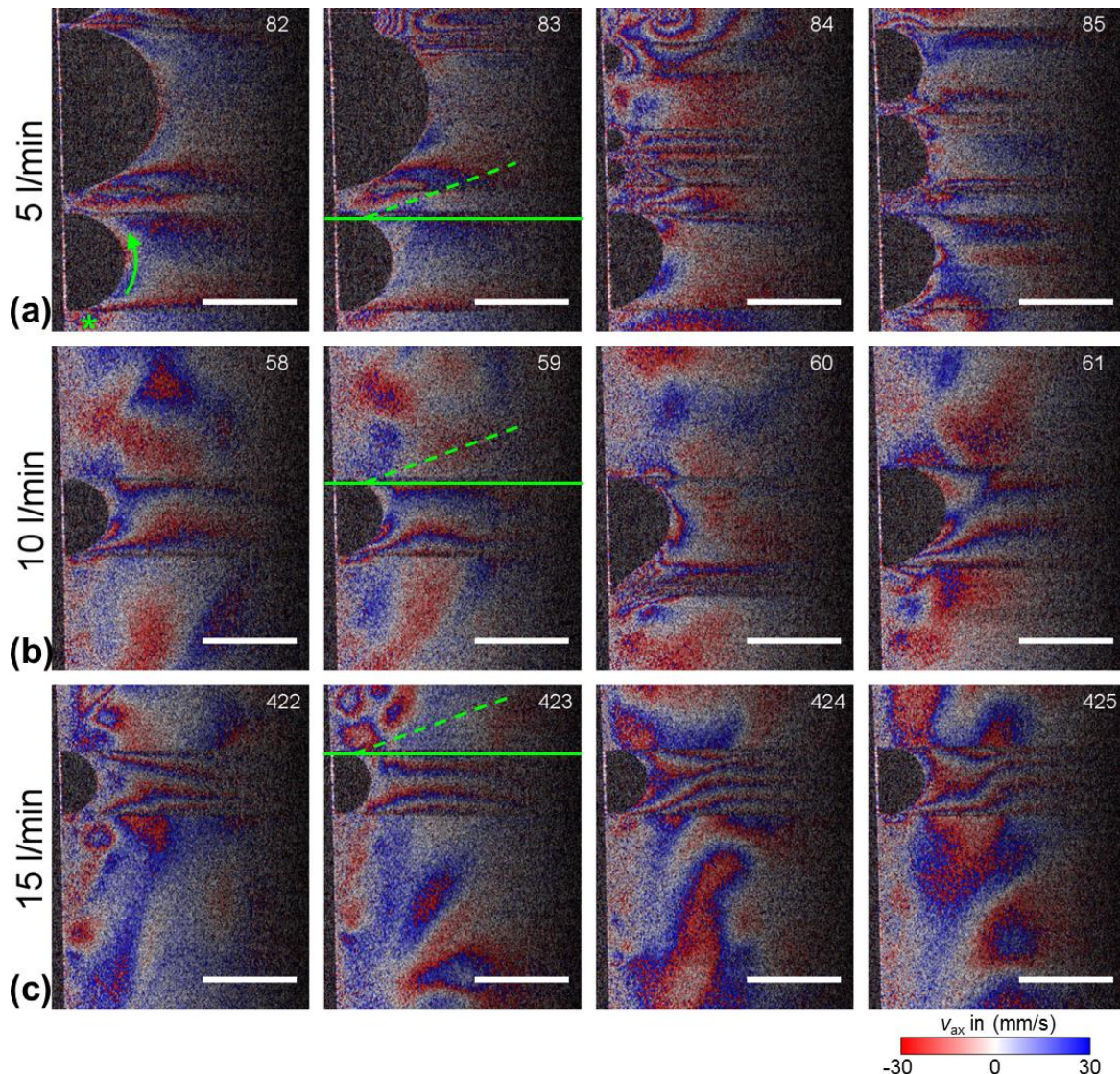


Abb. 4: Für Volumenströme (a) 5 l/min, (b) 10 l/min und (c) 15 l/min im Strömungskanal ist jeweils eine Sequenz aus 4 OCT-Schnittbildern (mit Frame-Nr. gekennzeichnet) dargestellt. Die Schnittbildrate von 238 Hz resultiert in einem zeitlichen Abstand zwischen einzelnen Schnittbildern von 4,2 ms. Der grüne Pfeil in (a), Frame-Nummer 82, kennzeichnet die Umströmung der Dampfblase. Unterhalb der Dampfblasen in der Nähe des Blasenfußes (\*) ist häufig eine Geschwindigkeitskomponente in Richtung der beheizten Wand messbar. Für die verschiedenen Volumenströme ist jeweils im zweiten Schnittbild ein A-Scan (durchgehende grüne Linie) und der tatsächliche Verlauf des Laserstrahls (gestrichelte grüne Linie) unter Berücksichtigung der Brechung gekennzeichnet. Maßstabsbalken entspricht 1 mm in Luft.

### Zusammenfassende Diskussion

In dieser Studie wurde die High Speed OCT zur Bildgebung des Blasensiedens eingesetzt, wobei die Blasengeometrie in der OCT-Schnittbilderebene räumlich hochaufgelöst und mit einer zeitlichen Auflösung von 234 Hz visualisiert werden konnte. Für Dampfblasen der Größen zwischen  $0,02 \text{ mm}^2$  und  $2 \text{ mm}^2$  konnten Parameter der Blasengeometrie mit einem Segmentierungs- und Trackingalgorithmus automatisiert quantifiziert und für individuelle Dampfblasen dargestellt werden. Mit der phasenaufgelösten Doppler-OCT konnte simultan zur strukturellen Bildgebung die axiale Komponente der Fluidgeschwindigkeit gemessen werden. Der eindeutige Messbereich beträgt  $\pm 30 \text{ mm/s}$ , wobei höhere Geschwindigkeiten unter Beachtung der auftretenden Phasensprünge messbar waren. Die OCT eignet sich da-

mit zur Visualisierung und Quantifizierung der Blasengeometrie und der Fluidströmung beim Blasensieden.

Da die OCT rückgestreutes Licht misst, benötigt sie nur einen optischen Zugang zum Untersuchungsgebiet, was einen Vorteil gegenüber den Verfahren der Videometrie/Shadowgrafie bzw. Particle Image Velocimetry darstellt. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der hier gewählten Versuchsanordnung die Dampfblasen aus Richtung des Blasenfußes bildgegeben werden können. Sich seitlich neben oder hinter der Blase befindliche weitere Dampfblasen wären für die Bildgebung deshalb nicht störend. Entsprechend ist auch die Untersuchung des Blasensiedens bei höheren Wärmestromdichten und im Übergangsbereich zum Filmsieden zukünftig denkbar. Für die Bestimmung der dreidimensionalen Blasenstruktur wäre eine Erweiterung hin zu mehreren parallelen Schnittebenen oder zu einer vierdimensionalen Bildgebung notwendig. Mit PIV-ähnlichen Bildgebungs- und Bildverarbeitungsmethoden könnte eine Erweiterung der Geschwindigkeitsmessung auf wenigstens zwei Komponenten in der OCT-Schnittebene erfolgen, wie dies für kleinere Geschwindigkeiten bereits realisierbar ist (Mujat et al. 2013).

Für die High Speed OCT werden derzeit sehr schnell durchstimmbare FDML-Laser (Wieser et al. 2010) und Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) als Lichtquellen entwickelt, sodass zukünftig eine weitere Steigerung der Bildrate mindestens um den Faktor 10 realisierbar wäre. Damit könnte die Bildrate bis in den kHz-Bereich gesteigert werden. Außerdem würde sich der Messbereich der Fluidgeschwindigkeit entsprechend vergrößern, sodass zukünftig auch hochdynamische Prozesse des Blasensiedens mit Doppler-OCT untersucht werden können.

### 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 wurde gemeinsam durch den Europäischen Sozialfonds sowie die MICRO-EPSILON Optronic GmbH gefördert.

### Literatur

Kirsten, L., Domaschke, T., Schneider, C., Walther, J., Meissner, S., Hampel, R., Koch, E., 2015: „Visualization of dynamic boiling processes using high-speed optical coherence tomography“, *Experiments in Fluids*, Vol. 52, No. 3

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

Mujat, M., Ferguson, R. D., Iftimia, N., Hammer, D. X., Nedyalkov, I., Wosnik, M., Legner, H., 2013: „Optical coherence tomography-based micro-particle image velocimetry“, *Optics Letters*, Vol. 38, No. 22, pp. 4558-4561

Potsaid, B., Jayaraman, V., Fujimoto, J. G., Jiang, J., Heim, P. J. S., Cable, A. E., 2012: „MEMS tunable VCSEL light source for ultrahigh speed 60kHz - 1MHz axial scan rate and long range centimeter class OCT imaging“, *Proc. SPIE 8213*, 82130M

Schneider, C., Hampel, R., Traichel, A., Hurtado, A., Meissner, S., Koch, E., 2012: „Experimental Investigation of Nucleate Boiling on Capillary Tubes Under PWR Specific Subcooling and Flow Parameters“, *Proc. 20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME 2012 Power Conference*, Vol. 5, pp. 349-356

Walther, J., Koch, E., 2011: „Enhanced joint spectral and time domain optical coherence tomography for quantitative flow velocity measurement“, *Proc. SPIE 8091*, 80910L

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