Schlussbericht

für das Teilprojekt

Darstellung von Siedeprozessen mittels PIV und Optischer Kohärenztomografie

im Rahmen des Verbundprojektes

Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserrektoren

31.07.2013

Projektnummer: 02NUK010I

Projektzeitraum: 01.08.2009 bis 31.01.2013

Projektleiter: Herr Prof. Dr. rer. nat. Edmund Koch

Ausf. Stelle: Technische Universität Dresden
Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus
Arbeitsgruppe Klinisches Sensoring und Monitoring
Fetscherstraße 74
01307 Dresden

Hinweis: Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02NUK010I gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1. Kurze Darstellung zu

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Teilprojektes ist die Visualisierung von Siedeprozessen mit hoher räumlicher und hoher zeitlicher Auflösung. Im Gegensatz zu etablierten Verfahren bietet die Optische Kohärenztomografie (OCT) die Möglichkeit, Dampfblasen dreidimensional und zeitlich aufgelöst darzustellen. Hauptsächliches Ziel war die Adaption des Messverfahrens OCT an die für OCT neuartige Anwendung und die Adaption an einen geeigneten Versuchstand (Deionat) der Hochschule Zittau/Görlitz. Daraus ergaben sich für die Arbeitsgruppe Klinisches Sensoring und Monitoring folgende Zielstellungen:

- Aufbau eines Versuchsstands zur gezielten Erzeugung von Einzelblasen und Blasenfilmen mit optischem Zugang (Versuchsstand Deionat).
- Aufbau eines Systems zur Darstellung von dynamischen dreidimensionalen Strukturen mit hoher zeitlicher Auflösung (Aufbau des schnellen OCT-Systems).
- Visualisierung von dreidimensionalen Gas-Flüssigkeitsstrukturen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und Bestimmung der Fluidgeschwindigkeit beim Blasensieden.
- Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen der theoretischen Modelle.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Infrastruktur und die Arbeitsplätze wurden durch die Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus bereitgestellt. Die Arbeitsgruppe Klinisches Sensoring und Monitoring verfügt über entsprechende Ausstattung, wie ein Optiklabor, Arbeitsplätze für Elektronikentwicklung, eine Mechanikwerkstatt und geeignete Software für Simulation, Konstruktion, Entwicklung und Gerätesteuerung, sodass der überwiegende Anteil der Aufgaben intern durchgeführt werden kann. Bei spezialisierten Fragestellungen konnte auf die Kenntnisse der Kooperationspartner im Verbundprojekt zurückgegriffen werden. Durch die interdisziplinelle personelle Zusammensetzung der Arbeitsgruppe stand auch intern ein großes Potential für die Projektbearbeitung zur Verfügung.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Vorhabens orientierte sich an den oben beschriebenen Zielen und an den im Fördermittelantrag beschriebenen Arbeitspaketen:

Erster Arbeitsschritt war der Aufbau eines schnellen OCT-Systems. Da kommerzielle Lichtquellen mit entsprechend hohen Repetitionsraten nicht zur Verfügung standen, wurde als Lichtquelle ein Fourier-domain mode locked (FDML) Laser konstruiert, welcher auch eine zukünftige Weiterentwicklung zu sehr hohen Repetitionsraten ermöglicht. Der Umfang des Arbeitsschrittes wurde durch die eigene Konzeptionierung und den Aufbau des Lasers und des dazu passenden high-speed OCT-Systems entsprechend vergrößert.

Begleitet wurden diese Arbeiten von Voruntersuchungen zur Visualisierung von Blasen in Fluiden. Im Anschluss wurde die OCT-Bildgebung an Tischversuchsständen und am Strömungskanal des Versuchsstandes Deionat an der Hochschule Zittau/Görlitz getestet. Abschließend erfolgte eine Auswertung und Aufbereitung der Messdaten.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt

Ein Schwerpunkt der 2003 gegründeten Arbeitsgruppe Klinisches Sensoring und Monitoring ist die Optischen Kohärenztomografie, deren technische und methodische Weiterentwicklung und die Applikation der OCT bei vorwiegend biomedizinischen Fragestellungen.

In der AG KSM standen mehrere OCT-Geräte unterschiedlicher Spezifikationen zur Verfügung, welche teilweise in Kooperation mit einem Industriepartner entwickelt worden waren. Entsprechende OCT-Geräte verfügten und verfügen auch derzeit meist über Tiefenscanraten von ca. 12 kHz und über Messköpfe, die eine dreidimensionale OCT-Bildgebung ermöglichen. Diese OCT-Systeme sind in der biomedizinischen Forschung an Tiermodellen, z. B. zur Bildgebung subpleuraler Alveolen für die Untersuchung der alveolären Dynamik [30, 31] und zur Darstellung von Blutgefäßen für die Untersuchung der Arteriosklerose [32, 33], eingesetzt worden.

Bei der Bildgebung von Siedeprozessen konnte nicht auf direkte Vorarbeiten zurückgegriffen werden. Allerdings stellt die Bildgebung von Dampfblasen, mit Hinblick auf Geometrie, Dynamik und auftretende physikalische Effekte, eine ähnliche Fragestellung dar wie die Bildgebung subpleuraler Alveolen, sodass ein Methoden- und Kenntnistransfer erfolgen konnte.

Um eine möglichst hohe Tiefenscanrate der OCT-Bildgebung zu ermöglichen, wurde der Einsatz eines kommerziell nicht verfügbaren FDML-Lasers als Lichtquelle favorisiert, da solche Laser in der Forschung erfolgreich eingesetzt wurden [34, 35] und gegenüber alternativen Lichtquellen sehr viel höhere Repetitionsraten erreichen können.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Teilprojekt wurde in das Forschungsverbundvorhaben „Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren“ integriert. Maßgeblich für die erfolgreiche Durchführung ist die Zusammenarbeit mit dem Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik der Hochschule Zittau/Görlitz, an dem ein Versuchsstand zur Untersuchung von Siedeprozessen unter variierbaren thermohydraulischen Bedingungen entwickelt wurde. Entsprechende Kenntnisse über die Erzeugung und Darstellung von Siedeprozessen konnten auf die OCT-Bildgebung übertragen werden. Um die Verwertbarkeit der Ergebnisse für theoretische Simulationen zu erreichen, wurden Zwischenergebnisse und der Projektfortschritt auch mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf diskutiert.

2. Eingehende Darstellung zu

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand der in Abschnitt 1.1 dargestellten Zielstellungen diskutiert:

2.1.1 Aufbau eines Versuchsstands zur gezielten Erzeugung von Einzelblasen und Blasenfilmen mit optischem Zugang (Versuchsstand Deionat).

Innerhalb des Verbundprojekts wurde an der Hochschule Zittau/Görlitz ein Versuchsstand mit Strömungskanal aufgebaut, welcher die Erzeugung von Siedeprozessen an unterschiedlichen Geometrien und bei variierbaren Parametern ermöglicht (Abb. 1). Für die OCT-Bildgebung kann dabei eine Versuchsgeometrie mit Indiumzinnoxid (ITO)

beschichtetem Fenster verwendet werden, welches beheizbar und gleichzeitig optisch transparent ist. Damit ließen sich oberflächennahe Siedeprozesse untersuchen. Die Fenstergeometrie wurde auf den OCT-Messkopf angepasst. Die eingesetzte ITO-Beschichtung ist allerdings nur für moderate Wärmestromdichten geeignet, was die Untersuchung bzw. Visualisierung des Filmsiedens bzw. des Übergangverhaltens zum Filmsieden ausschloss. Neben diesem stationären Versuchsstand wurden zwei Tischversuchsstände konstruiert, welche für Voruntersuchungen eingesetzt wurden.

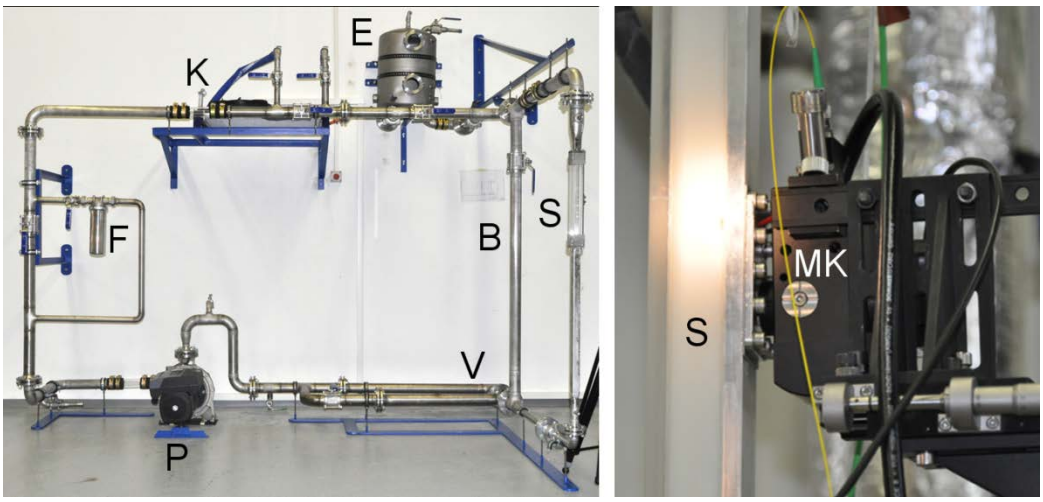

Abb. 1: Links: Versuchsstand Deionat an der Hochschule Zittau/Görlitz mit Entgaser (E), Kühler (K), Filter (F), Pumpe (P), Vorwärmer (V), Bypass (B) und Messtrecke (S). Rechts: Strömungskanal (S) und OCT-Messkof (MK), welcher vor dem ITO-beschichteten Fenster angeordnet ist.

2.1.2 Aufbau eines Systems zur Darstellung von dynamischen dreidimensionalen Strukturen mit hoher zeitlicher Auflösung (Aufbau des schnellen OCT-Systems).

Schwerpunkt in der ersten Projektphase war die Konzeptionierung und der Aufbau eines zur Bildgebung von dynamischen Siedeprozessen geeigneten OCT-Systems, wobei die Forderung einer wesentlich (ca. eine Größenordnung) höheren Geschwindigkeit maßgeblich war. Zum damaligen Zeitpunkt als auch noch gegenwärtig stellen Swept-Source OCT-Systeme, welche als Lichtquelle einen Fourier-domain mode locked (FDML) Laser verwenden, die aussichtsreichste Alternative zum Erreichen einer hohen Repetitionsrate dar. Die FDML-Laser umgehen dabei die Limitation herkömmlicher durchstimmbarer Laser und können in erweiterter Form Tiefenscanraten von mehreren 100 kHz erreichen. Durch Verwendung dieser Technologie gelang der Aufbau eines high-speed OCT-Systems, welches Tiefenscanraten von ca. 120 kHz bei einer axialen Auflösung von 10 µm gestattet. Neben dem Vorteil einer höheren Geschwindigkeit, ist das OCT-System durch die Verwendung einer durchstimmbaren Lichtquelle gut für die Messung hoher axialer Geschwindigkeiten mittels der phase-resolved Doppler-Methode geeignet, da im Gegensatz zu Spektrometer basierten OCT-Systemen keine Signaldämpfungsartefakte auftreten und kein erweitertes Dopplermodell notwendig ist. Zur Detektion wurde der in der Arbeitsgruppe entwickelte 3D-Messkopf mit integriertem modifiziertem Michelson-Interferometer verwendet, welcher über ein Singlemodefaser-Netzwerk mit der Lichtquelle bzw. dem Detektor verbunden ist (Abb. 2). Zur numerischen Reskalierung der im Zeitverlauf gemessenen Interferenzspektren in den Wellenzahlraum wurde ein fasergekoppeltes Mach-Zehnder Interferometer verwendet. Dadurch müssen zwei Interferenzspektren mit einer Zweikanal-Datenerfassungskarte detektiert werden.

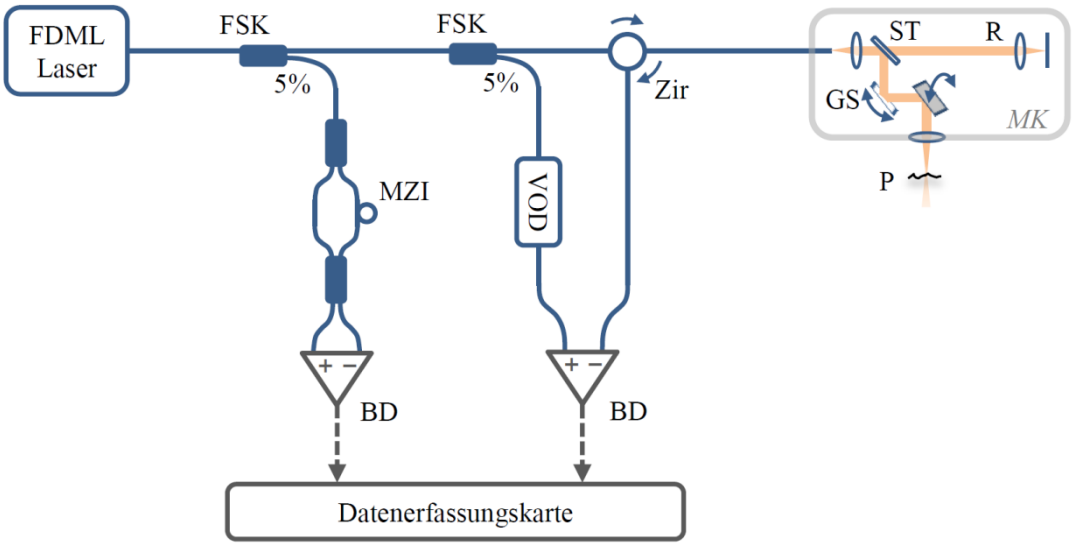

Abb. 2: Vereinfachter Aufbau des high-speed OCT-Systems. Das emittierte Licht des Fourier domain mode locked (FDML) Lasers wird in dem Singlemodefaseraufbau durch einen Zirkulator (Zir) zum OCT-Messkopf (MK) geleitet. Dieser enthält ein Michelson-Interferometer mit Strahlteiler (ST), Referenzarm (R) und Galvanometerscannern (GS) zur transversalen Strahlablenkung über der Probe (P). Rückreflektiertes Licht propagiert über den Zirkulator zu einem Balanced Detektor (BD). Für die Balanced Detektion wird an einem Faserschmelzkoppler (FSK) ein Teil des Laserlichtes ausgekoppelt und dessen Leistung mit einem variablen optischen Dämpfer (VOD) angepasst. Die OCT-Interferenzspektren müssen in den Wellenzahlraum reskaliert werden. Dafür wird ein Mach-Zehnder Interferometer als Referenz verwendet. Mit einer Datenerfassungskarte werden beide Interferenzspektren simultan detektiert.

Neben der Konstruktion des OCT-Systems wurde unter LabVIEW eine Software für die Datenerfassung und für die Datenprozessierung entwickelt, welche die Anforderungen und Randbedingungen des high-speed OCT-Systems berücksichtigt. Wesentlich war dabei die Gewährleistung einer hinreichenden Phasenstabilität des Interferenzsignals für die phase-resolved Doppler-OCT.

Das konstruierte high-speed OCT-System gestattet durch die vergrößerte Repetitionsrate der Tiefenscans und der Schnittbilder eine Visualisierung dynamischer Siedeprozesse bei moderaten Wärmestromdichten bzw. Blasenablösefrequenzen, wobei sowohl eine strukturelle Bildgebung mit hoher Auflösung als auch eine Geschwindigkeitsmessung mit der phase-resolved Doppler Methode möglich ist.

2.1.3 Visualisierung von dreidimensionalen Gas-Flüssigkeitsstrukturen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und Bestimmung der Fluidgeschwindigkeit beim Blasensieden.

In Vorstudien wurde untersucht, unter welchen Bedingungen eine Bildgebung von Siedeprozessen mit OCT möglich ist. Da die OCT die Rückstreuintensität bzw. die Reflexion in der Schnittebene darstellt, müssen dem Fluid streuende Partikel zugegeben werden, um einen Kontrast zwischen Fluid und den Dampfblasen zu erhalten. Anderenfalls wäre nur ein Fresnel-Reflex am Pol der Blase sichtbar. Als Kontrastmittel hat sich Intralipid bewährt, welches auch in diesem Projekt für grundlegende Experimente verwendet wurde. Es wurden auch Versuche mit anderen Streupartikeln unternommen. Mit diesen konnten aber bisher nicht gleichwertige Ergebnisse erreicht werden. Vielversprechende Nanopartikel-

Suspensionen sind für die Verwendung im Versuchsstand Deionat mit einem Volumen von 90 l zu teuer.

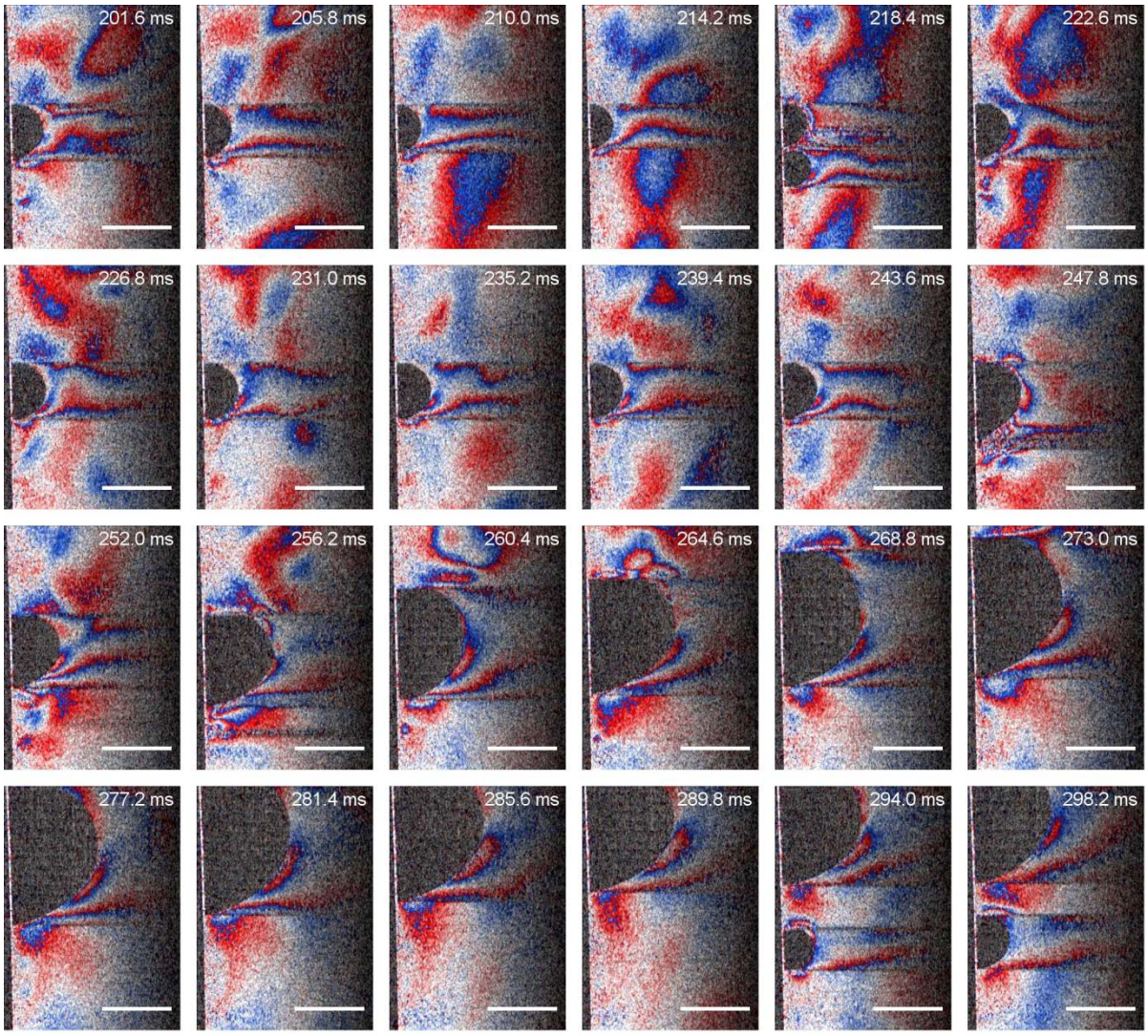

Abb. 3: Der Ausschnitt einer OCT-Schnittbildsequenz zeigt den Zeitraum 201,6 ms bis 298,2 ms. Das Fluid erscheint hell streuend, die Dampfblasen erscheinen als dunkle Halbkreise an der ITO-beschichteten Innenwand (helle vertikale Linie) des Strömungskanals. Die Schnittbildrate beträgt 238 Hz. In der Sequenz sind der Wachstumsprozess einer Dampfblase und das Ablösen von der Siedekeimstelle zu beobachten. Zusätzlich zur strukturellen Information ist farbkodiert die axiale (hier horizontale) Geschwindigkeitskomponente dargestellt. Für kleine axiale Geschwindigkeiten bedeutet Weiß keine axiale Bewegung, Blau eine Bewegung bis 30 mm/s im Bild nach rechts und Rot eine Bewegung bis 30 mm/s nach links. Wird dieser Messbereich überschritten, wiederholt sich die Farbskala entsprechend, was an Farbsprüngen von Rot nach Blau oder umgekehrt zu erkennen ist. Durch Brechung und Reflexion kommt es hinter der Blase zu Artefakten (Schatten, Sprünge in der Geschwindigkeit).

Es konnte gezeigt werden, dass die Blasengeometrie in der OCT-Schnittebene erkennbar ist. Die dreidimensionale Struktur lässt sich für quasistatisch wachsende Blasen visualisieren. Für praktisch relevante Wärmestromdichten treten allerdings höhere Blasenfrequenzen auf, die eine zeitlich aufgelöste Darstellung der kompletten 3D-Struktur mit der Repetitionsrate des konstruierten OCT-Systems nicht ermöglichen. Eine weitere Steigerung der Repetitionsrate bzw. der Datenaufnahme ist aufgrund der zusätzlichen Kosten und des notwendigen Entwicklungsaufwandes erst in einem Folgeprojekt angedacht.

Daher konzentrierte sich die Bildgebung auf zeitlich aufgelöste Schnittbilddarstellung von Siedeprozessen. Die dabei erreichte zeitliche Auflösung von 238 Hz ist ausreichend für moderate Wärmestromdichten, was in Experimenten am Versuchsstand Deionat demonstriert wurde. Eine beispielhafte Schnittbildsequenz mit sichtbarem Blasenwachstum ist in Abb. 3 dargestellt. Die Prozessparameter sind 95 °C Eintrittstemperatur, 6,2 W/cm^2 Wärmestromdichte und ca. 200 mm/s aufwärtsgerichtete Hauptströmungsgeschwindigkeit in einer Tiefe von 1 mm. Neben der strukturellen Bildgebung konnte mit der phase-resolved Doppler-OCT simultan die axiale Geschwindigkeitskomponente dargestellt werden.

Neben der Bildgebung und Prozessierung der OCT-Datensätze war ein weiterer Schwerpunkt die Bestimmung der Blasengeometrie, um relevante Parameter zu extrahieren. Mit einem Segmentierungsalgorithmus konnte die Blasengeometrie in den Schnittbildern bestimmt werden. Ein Tracking der Blasen erlaubt die Trennung individueller Dampfblasen und die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs charakteristischer geometrischer Parameter, wie am Beispiel des Durchmessers in Abb. 4 gezeigt. Für unterschiedliche Prozessparameter zeigen sich unterschiedliche Wachstumsverhalten der Dampfblasen.

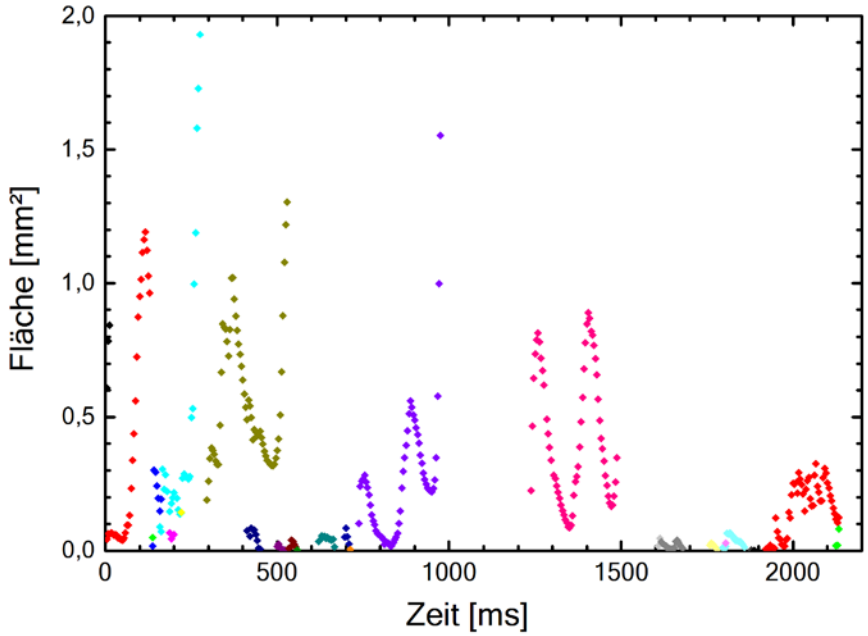

Abb. 4: Das Diagramm zeigt die mit dem Segmentierungsalgorithmus bestimmten Flächen der Dampfblasen im Schnittbild im zeitlichen Verlauf. Individuelle Blasen sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Für den Zeitraum 201,6 ms bis 298,2 ms kann mit der OCT-Schnittbildsequenz in Abb. 3 verglichen werden.

In den Untersuchungen wurden auch einige Charakteristika der OCT-Bildgebung deutlich, welche die Auswertung und die Aussagekraft gegenwärtig noch einschränken. Grundsätzlich tritt an den Grenzschichten zwischen Dampf und Fluid Brechung und Reflexion auf, sodass zum einen hinter den Rändern der Blasen Schatten entstehen und zum anderen der Laserstrahl hinter der Grenzschicht abgelenkt wird, was zu einer Verzerrung im Bereich des Fluids hinter den Blasen führt. Diese Artefakte erschweren die Bestimmung der Blasengeometrie und die Doppler-Bildgebung. Eine weitere Einschränkung ergibt sich durch die fehlende Information aus der zweiten transversalen Richtung senkrecht zur Schnittebene. Darüber hinaus ist die Schnittbildrate gegenwärtig nicht ausreichend, um Siedeprozesse bei hohen Blasenablösefrequenzen zu untersuchen. Bei einer in einem Folgeprojekt angestrebten Steigerung der Repetitionsrate um eine weitere Größenordnung wäre eine

Schnittbildrate erreichbar, die vergleichbar ist zur zeitlichen Auflösung der high-speed Videometrie.

Die Visualisierung der Dampfblasen sollte auch eine parallele Bildgebung mit einer Kamera einschließen. Die derzeit zur Verfügung stehenden und verwendeten Kameras gestatten nicht eine entsprechend hohe Bildrate bei hinreichender Auflösung. Die in der Arbeitsgruppe in Zittau vorhandene high-speed Kamera ließ sich aus Gründen des optischen Aufbaus nicht in den Versuchsaufbau integrieren. Die Beschaffung einer geeigneten high-speed Kamera im Rahmen dieses Projektes war zu kostenintensiv, so dass die Kombination der OCT-Bildgebung mit high-speed Videometrie hier zunächst nicht verfolgt wurde und in einem Folgeprojekt bearbeitet werden soll.

Da für die OCT-Bildgebung die Eindringtiefe in das streuende Fluid je nach Konzentration auf wenige Millimeter limitiert ist, können nur oberflächennahe Siedeprozesse untersucht werden, sodass eine weitere Anpassung der Bildgebung auf andere Heizelementgeometrien nicht notwendig war.

2.1.4 Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen der theoretischen Modelle.

Die Ergebnisse der Experimente am Versuchsstand Deionat wurden auch mit dem Ziel einer Nutzbarmachung der Ergebnisse zum Vergleich mit theoretischen Vorhersagen diskutiert. Entsprechende Anregungen sind in die Entwicklung des Segmentierungsalgorithmus eingeflossen.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind im Verwendungsnachweis enthalten, welcher dem Zuwendungsgeber gesondert zugestellt wird.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Erhöhung der Sicherheit beim Betrieb von Kernreaktoren sind umfangreiche Kenntnisse über Siedeprozesse notwendig, die es erlauben entsprechende Wärmetransportphänomene theoretisch vorherzusagen. Simulationen müssen dabei physikalische Vorgänge über mehrere Größenskalen einbeziehen, sodass auch die Untersuchung kleinskaliger Siedephänomene notwendig ist. Dafür waren und sind Messverfahren zu entwickeln, welche selbst oder in Kombination mit anderen Verfahren einen umfangreichen experimentellen Zugang zu den dreidimensionalen dynamischen Vorgängen gestatten.

Innerhalb dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass die OCT einen alternativen Ansatz bei der Untersuchung mikroskaliger Siedeprozesse darstellt, da durch die Tomografie, im Vergleich zur Videometrie, eine zusätzliche Dimension zugänglich wird. Deshalb wurde das Verfahren der OCT technisch und methodisch weiterentwickelt, um Siedeprozesse zeitlich und räumlich hochaufgelöst bildzugeben.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Rahmen dieses Projektes konnte demonstriert werden, dass sich die OCT prinzipiell für die Bildgebung von Siedeprozessen bzw. Mehrphasenströmungen eignet. Es wird anvisiert, in Folgeprojekten das Potential der OCT bei der Untersuchung von Siedeprozessen weiter auszureizen. Dabei sind mit dem konstruierten high-speed OCT-System, mit dem

Versuchsstand Deionat an der Hochschule Zittau/Görlitz, mit dem entwickelten Segmentierungsalgorithmus und mit den gewonnenen Erfahrungen die Voraussetzungen für weitere Studien gegeben, welche anwendungsnahe Ergebnisse liefern können. Über das Projekt hinaus wurden mit dem high-speed OCT-System bereits erste Studien zur mehrdimensionalen Geschwindigkeitsmessung in Fluiden durchgeführt.

Das konstruierte high-speed OCT-System soll darüber hinaus weiterhin in der AG KSM für weitere Projekte in der biomedizinischen Forschung zur Verfügung stehen. Im Vordergrund stehen dabei Fragestellungen, die eine schnelle Bildgebung benötigen. Entsprechend wird das high-speed OCT-System zur vierdimensionalen Bildgebung subpleuraler Alveolen am Tiermodell eingesetzt [4]. Damit ist es möglich, die Lungendynamik auf mikroskopischer Skala zu untersuchen, indem die strukturelle Änderung einzelner Alveolen während der Beatmung aufgezeichnet werden kann. Da direkt mehrere Volumenstapel innerhalb eines einzigen Atemzyklus detektiert werden können, ist die high-speed OCT weniger anfällig gegenüber Bewegungsartefakten.

Außerdem kommt das high-speed OCT-System in einer Kooperation mit der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde zur kombinierten strukturellen und funktionellen Bildgebung des humanen Trommelfells zum Einsatz [2]. Dabei konnten bereits die Oszillationen des humanen Trommelfells *ex vivo* in einem für die Sprachwahrnehmung wichtigen Frequenzbereich bis ca. 6 kHz räumlich aufgelöst und frequenzaufgelöst gemessen werden. Auch in dieser Anwendung bietet die schnelle Repetitionsrate den Vorteil einer geringeren Anfälligkeit gegenüber Bewegungsartefakten und soll in Zukunft eine online 3D-Darstellung gestatten. Im Gegensatz zu häufig verwendeten, auf Spektrometern basierenden, OCT-Systemen kann das swept-source OCT-System zur Doppler-Messung bei hohen Geschwindigkeiten verwendet werden, ohne dass eine Signaldämpfung und eine Abweichung vom klassischen Dopplermodell beobachtet wird.

2.5 Fortschritte bei anderen Stellen

Während des Vorhabens ist nicht bekannt geworden, dass ähnliche Ergebnisse mit dem gleichen Ziel bzw. der gleichen Methode an anderen Stellen erreicht wurden. Entsprechend konnte das hier entwickelte Messverfahren/-prinzip in Publikationen und auf Konferenzen als innovatives Verfahren präsentiert werden.

Die technische Entwicklung der OCT hat innerhalb des Projektzeitraums auch zur Weiterentwicklung bzw. zu Neuentwicklungen im Bereich schneller Lichtquellen geführt. Maßgeblich sind dabei FDML-Laser [36] und VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) [37], welche für die schnelle OCT-Bildgebung demonstriert wurden. Der aktuelle FDML-Laser kann mit geringen Modifikationen auf entsprechende Geschwindigkeiten aufgerüstet werden.

2.6 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes sind Beiträge auf Konferenzen und in Fachzeitschriften entstanden oder befinden sich derzeit in Vorbereitung.

Publikationen in Fachzeitschriften:

[1] S. Meissner, J. Herold, L. Kirsten, C. Schneider, E. Koch „3D optical coherence tomography as new tool for microscopic investigations of nucleate boiling on heated surfaces", International Journal of Heat and Mass Transfer 55, S. 5565–5569, (2012)

[2] A. Burkhardt, L. Kirsten, M. Bornitz, T. Zahnert, E. Koch: “Investigation of the human tym-panic membrane oscillation ex vivo by Doppler optical coherence tomography”, Journal of Biophotonics, doi:10.1002/jbio.201200186, (2012)

[3] C. Schneider, L. Kirsten, S. Meissner, A. Hurtado, E. Koch, R. Hampel, „Small scale boiling experiments using two-dimensional imaging with high-speed camera and optical coherence tomography”, Kerntechnik 78 (1), S. 54-56, (2013)

[4] L. Kirsten, M. Gaertner, C. Schnabel, S. Meissner, E. Koch: “Four-dimensional imaging of murine subpleural alveoli using high-speed optical coherence tomography”, Journal of Biophotonics 6(2), S. 148 – 152, (2013)

Konferenzbeiträge mit Proceedings:

[5] L. Kirsten, J. Walther, P. Cimalla, S. Meißner, M. Mehner, E. Koch „Fourier Domain Mode Locked Laser for high-speed Optical Coherence Tomography“, Jahrestagung der DGBMT, Biomedizinische Technik, 55 (S1), (2010)

[6] L. Kirsten, J. Walther, P. Cimalla, M. Gaertner, C. Schnabel, S. Meissner, E. Koch “High-speed OCT imaging of subpleural lung tissue”, Jahrestagung der DGBMT, Biomedizinische Technik, 56 (S1), (2011)

[7] L. Kirsten, J. Walther, P. Cimalla, M. Gaertner, S. Meissner, E. Koch “Optical coherence tomography for imaging of subpleural alveolar structure using a Fourier domain mode locked laser”, Proceedings of SPIE 8091, Optical Coherence Tomography and Coherence Techniques V, 809118, (2011)

[8] C. Schneider, R. Hampel, A. Traichel, J. Herold, L. Kirsten, S. Meissner, E. Koch, A. Hurtado “Experimental Investigation of nucleate boiling on optically transparent heated surfaces with optical coherence tomography (OCT) and infrared”, Proceedings of ICONE (19), 19-43866, (2011)

[9] C. Schneider, R. Hampel, A. Traichel, J. Herold, L. Kirsten, S. Meissner, E. Koch, A. Hurtado „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, S. 14-30, (2011)

[10] L. Kirsten, M. Gaertner, C. Schnabel, S. Meissner, E. Koch: „Four-dimensional optical coherence tomography imaging of subpleural alveoli in mice“, Jahrestagung der DGBMT, Biomedizinische Technik 57 S1, S. 319 – 321, (2012)

[11] L. Kirsten, S. Meissner, C. Schneider, R. Hampel, E. Koch „Optical coherence tomography as new tool for the investigation of boiling phenomena on heated surfaces“ ECI – 8th International conference on boiling and condensation heat transfer 2012, Proceedings, (2012)

[12] L. Kirsten, S. Meissner, C. Schneider, R. Hampel, E. Koch „Untersuchung von Siedevorgängen an beheizten Oberflächen mittels Optischer Kohärenztomographie“, Proceedings der 20. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 4. - 6. September 2012, Universität Rostock, Hrsg.: Ruck, B., Leder, A., Dopheide, D., (2012)

[13] L. Kirsten, M. Gärtner, C. Schnabel, S. Meissner, E. Koch „Vierdimensionale Bildgebung subpleuraler Alveolen am Tiermodell mit optischer Kohärenztomographie“, Dresdner Beiträge zur Medizintechnik Band14: 4. Dresdner Medizintechnik-Symposium, J. Füssel, E. Koch, H. Malberg, W. Vonau Ed., TUDpress, Dresden, S. 135 - 138, (2012)

[14] C. Schneider, R Hampel, A. Hurtado, S. Meissner, E. Koch, A. Traichel: „Experimental investigation of bubble behavior under PWR-specific subcooling and flow parameters by optical measurement methods” Proceedings of TOPSafe, (2012)

[15] C. Schneider, R. Hampel, A. Traichel, A. Hurtado, S. Meissner, E. Koch: Experimental investigation of nucleate boiling on capillary tubes under PWR- specific subcooling and

flow parameters, Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings of ICONE20, 2012-54640, (2012)

[16] C. Schneider, R. Hampel, A. Hurtado, S. Meissner, E. Koch, A. Traichel: Experimentelle Untersuchung des Einflusses von DWR spezifischen Flüssigkeitsunterkühlungen und Strömungsgeschwindigkeiten auf das Wärmetransportverhalten beim Blasensieden, Proceedings, Jahrestagung Kerntechnik - Workshop „Kompetenzerhalt in der Kerntechnik“, (2012)

[17] C. Schneider, R. Hampel, A. Hurtado, S. Meissner, E. Koch, A. Traichel: Experimental investigation of flow boiling heat transfer on optically transparent ITO-surfaces and capillary tubes, Proceedings of 7th International Youth Nuclear Congress IYNC 2012, (2012)

[18] A. Burkhardt, L. Kirsten, M. Bornitz, T. Zahnert, E. Koch: “Vibration of the human tympanic membrane measured with OCT in a range between 0.4 kHz and 6.4 kHz on an ex vivo sample”, Proceedings of SPIE 8805, Head and Neck Optical Diagnostics, 880507, (2013)

[19] L. Kirsten, C. Schnabel, M. Gaertner, E. Koch: “Four-dimensional optical coherence tomography imaging of total liquid ventilated rats”, Proceedings of SPIE 8802, Optical Coherence Tomography and Coherence Techniques VI, 88020F, (2013)

[20] L. Kirsten, T. Domaschke, J. Walther, S. Meissner, C. Schneider, R. Hampel, E. Koch, „Untersuchung des Blasensiedens mit optischer Kohärenztomographie und Quantifizierung der Blasengeometrie“, 21. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, (2013) *in Vorbereitung*

Konferenzbeiträge ohne Proceedings:

[21] L. Kirsten J. Walther, P. Cimalla, S. Meissner, M. Mehner, E. Koch: “High-speed optical coherence tomography using a Fourier domain mode locked laser”, Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, (2011)

[22] L. Kirsten, J. Walther, P. Cimalla, S. Meissner, M. Mehner, E. Koch “Effect of detuning in Fourier domain mode locked lasers on the performance of optical coherence tomography“, Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Dresden, (2011)

[23] C. Schneider, L. Kirsten, S. Meissner, A. Hurtado, E. Koch, R. Hampel: „Kleinskalige Siedeexperimente unter Einsatz zweidimensionaler Bildgebung mit High-speed Kamera und Optischer Kohärenztomographie“, KTG Fachtag „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“, Dresden-Rossendorf, (2012)

[24] L. Kirsten, S. Meissner, C. Schneider, R. Hampel, E. Koch, „Investigation of Boiling Phenomena on Heated Surfaces by optical coherence tomography“, 10th Multiphase Flow Conference, Dresden, (2012)

[25] T. Domaschke, L. Kirsten, J. Walther, C. Schneider, R. Hampel, E. Koch: „Application of high-speed optical coherence tomography for image acquisition in boiling processes“, OPTO conference Torun, (2013)

Abschlussarbeiten:

[26] Diplomarbeit, Lars Kirsten, „Aufbau eines Fourier Domain Mode Locked Lasers für die Optische Kohärenztomografie“, (2010)

[27] Bachelorarbeit, Juliane Herold, “Visualisierung der Geometrie und Geschwindigkeit von Siedevorgängen auf heißen Oberflächen mittels Optischer Kohärenztomografie”, (2011)

[28] Bachelorarbeit, Philipp Büttner, „Messung von Geschwindigkeitsfeldern in Fluiden mit high-speed optischer Kohärenztomografie“, (2013)

[29] Diplomarbeit, Thomas Domaschke, „High-speed Doppler OCT zur Untersuchung von Siedevorgängen“, *in Bearbeitung*

Sonstige Referenzen zum Schlussbericht

[30] S. Meissner, L. Knels, E. Koch “Improved 3D Fourier Domain Optical Coherence Tomography by index matching in alveolar structures“, Journal of Biomedical Optics, 14(6), 064037, (2009)

[31] S. Meissner, L. Knels, A. Krueger, T. Koch, E. Koch „Simultaneous three-dimensional optical coherence tomography and intravital microscopy for imaging subpleural pulmonary alveoli in isolated rabbit lungs”, Journal of Biomedical Optics 14(5), 054020, (2009)

[32] J. Walther, G. Mueller, H. Morawietz, E. Koch “Analysis of in vitro and in vivo bidirectional flow velocities by phase-resolved Doppler Fourier-domain OCT”, Sensors and Actuators A: Physical, 156(1), 14-21, (2009)

[33] G. Müller, S. Meissner, J. Walther, M. Cuevas, E. Koch, H. Morawietz “Analysis of murine vascular function in vivo by optical coherence tomography in response to high fat diet”, Hormone and Metabolic Research 41(7), 537 – 541, (2009)

[34] R. Huber, M. Wojtkowski, J. G. Fujimoto: “Fourier Domain Mode Locking (FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography,” Optics Express 14(8), 3225-3237, (2006)

[35] M. Gora, K. Karnowski, M. Szkulmowski, B. Kaluzny, R. Huber, A. Kowalczyk, M. Wojtkowski: "Ultra high-speed swept source OCT imaging of the anterior segment of human eye at 200 kHz with adjustable imaging range," Optics Express 17(17), 14880-14894, (2009)

[36] W. Wieser, B. Biedermann, T. Klein, C. Eigenwillig, R. Huber: "Multi-Megahertz OCT: High quality 3D imaging at 20 million A-scans and 4.5 GVoxels per second," Optics Express 18(14), 14685-14704, (2010)

[37] B. Potsaid, V. Jayaraman, J. G. Fujimoto, J. Jiang, P. J. S. Heim, A. E. Cable: “MEMS tunable VCSEL light source for ultrahigh speed 60kHz - 1MHz axial scan rate and long range centimeter class OCT imaging”, Proc. SPIE 8213, Optical Coherence Tomography and Coherence Domain Optical Methods in Biomedicine XVI, 82130M, (2012)

Anlage 1 Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Im Rahmen des Verbundprojektes „Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren“ tragen auch die Ergebnisse dieses Teilprojektes zur Sicherheitsforschung im Bereich der nuklearen Reaktortechnik und zum Kompetenzerhalt im Bereich der Kernenergie auf höchstem wissenschaftlichem Niveau bei. Darüber hinaus sind die Ergebnisse des Projektes für die Grundlagenforschung im für die Kernenergieforschung relevanten Bereich der Mehrphasenströmung relevant. Das Projekt diente außerdem der Ausbildung von Studenten und Doktoranden im Bereich der OCT und der Intensivierung der Kooperationen mit den Partnern des Verbundprojektes.

2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

Es wurde demonstriert, dass die Optische Kohärenztomografie zur räumlich hochaufgelösten und zeitlich aufgelösten Bildgebung von Siedeprozessen verwendet werden kann. Im Rahmen des Projektes wurde ein high-speed OCT-System aufgebaut und es wurde die OCT-Bildgebung an einer Versuchsstrecke an der Hochschule Zittau/Görlitz durchgeführt. Die aufgenommenen Schnittbildsequenzen gestatten die Bestimmung der Blasengeometrie und des Wachstumsverhalten einzelner Blasen. Für Details wird auf den Schlussbericht, Kap. 2.1 verwiesen.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Innerhalb dieses Projektzeitraums konnte gezeigt werden, dass die high-speed OCT zur Untersuchung von Siedeprozessen geeignet ist. Das entstandene OCT-System und der Versuchsstand in Zittau sollen für Folgeprojekte verwendet werden. Mit einer Weiterentwicklung des OCT-Systems und des Messverfahrens kann es ermöglicht werden, Siedeprozesse auch bei höheren Heizleistungen mit einer der high-speed Videometrie vergleichbaren zeitlichen Auflösung zu untersuchen, sodass mit dem Verfahren für die Grundlagenforschung und für die Entwicklung numerischer Modelle umfangreiche relevante Daten generiert werden können, welche mit anderen Messverfahren nicht oder nur schwer zugänglich sind.

Darüber hinaus wird das high-speed OCT-System in der Arbeitsgruppe und innerhalb von Kooperationen vorwiegend im biomedizinischen Bereich eingesetzt. Schwerpunkte sind die vierdimensionale Bildgebung subpleuraler Alveolen am Tiermodell und die kombinierte strukturelle und funktionelle Bildgebung des humanen Trommelfells mit Messung der Trommelfelloszillation unter Schallanregung. In diesen biomedizinischen Anwendungen sind umfangreiche tierexperimentelle Studien und Studien an Präparaten und an Probanden in der Durchführung oder geplant.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung führten

keine

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden und sollen weiterhin in Fachzeitschriften und auf Konferenzen präsentiert werden.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die finanzielle Zuwendung wurde entsprechend des Verwendungsnachweises für die vorgesehenen Investitionen bzw. Ausgaben verwendet.

Wie dem Schlussbericht zu entnehmen ist, standen zu Beginn des Vorhabens keine geeigneten kommerziellen Lichtquellen für die high-speed OCT zur Verfügung, sodass der Aufbau eines FDML-Lasers mit zugehörigem high-speed OCT-System durchgeführt wurde. Durch den entsprechend höheren Arbeitsaufwand ergab sich eine Zeitverschiebung für die nachfolgenden Arbeitspakete. Außerdem traten durch die Fehlfunktion eines zentralen Bauteils (Fabry-Perot Filter) des FDML-Lasers weitere Verzögerungen auf.

Anlage 2 – siehe Berichtsblatt/Document Control Sheet

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Darstellung von Siedeprozessen mittels PIV und Optischer Kohärenztomografie	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Koch, Edmund Kirsten, Lars	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.01.2013
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Dresden Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus Klinisches Sensoring und Monitoring Fetscherstraße 74 01307 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 02NUK010I
	11. Seitenzahl 15
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 37
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 4
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik

In Kernkraftreaktoren sind Kühlungsanalgen von enormer Bedeutung, um eine Überhitzung des Reaktorkerns zu vermeiden. In diesen Kühlungsanalgen spielt der effiziente Wärmetransport der Wärme von Brennstäben zur Kühlflüssigkeit eine große Rolle. Da die Blasenbildung auf den Wärmetransport und somit auf die Kühlung der Brennelemente einen großen Einfluss hat, soll der Prozess der Blasenbildung im mikroskopischen Bereich näher untersucht werden. Alle momentan eingesetzten Verfahren zur Darstellung des Blasensiedens liefern nur zweidimensionale Projektionen oder können nur einzelne Momentaufnahmen dreidimensional erfassen.

2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung

Ziel dieses Projektes ist die Visualisierung von Siedeprozessen mit hoher räumlicher und hoher zeitlicher Auflösung. Hauptsächliches Ziel war die Adaption des Messverfahrens Optische Kohärenztomografie an die für OCT neuartige Anwendung und die Adaption an einen geeigneten Versuchstand (Deionat) der Hochschule Zittau/Görlitz.

3. Methode

Mit Hilfe eines schnellen OCT-Systems sollen Blasen in Fluiden visualisiert werden. Die OCT-Bildgebung soll an Tischversuchsständen und am Strömungskanal des Versuchsstandes Deionat an der Hochschule Zittau/Görlitz getestet werden. Abschließend erfolgte eine Auswertung und Aufbereitung der Messdaten.

4. Ergebnis

Es wurde demonstriert, dass die Optische Kohärenztomografie zur räumlich hochaufgelösten und zeitlich aufgelösten Bildgebung von Siedeprozessen verwendet werden kann. Im Rahmen des Projektes wurde ein high-speed OCT-System aufgebaut und es wurde die OCT-Bildgebung an einer Versuchsstrecke an der Hochschule Zittau/Görlitz durchgeführt. Die aufgenommenen Schnittbildsequenzen gestatten die Bestimmung der Blasengeometrie und des Wachstumsverhalten einzelner Blasen.

5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten

Es konnte gezeigt werden, dass die high-speed OCT zur Untersuchung von Siedeprozessen geeignet ist. Das entstandene OCT-System und der Versuchsstand in Zittau sollen für Folgeprojekte verwendet werden. Mit einer Weiterentwicklung des OCT-Systems und des Messverfahrens kann es ermöglicht werden, Siedeprozesse auch bei höheren Heizleistungen mit einer der high-speed Videometrie vergleichbaren zeitlichen Auflösung zu untersuchen, sodass mit dem Verfahren für die Grundlagenforschung und für die Entwicklung numerischer Modelle umfangreiche relevante Daten generiert werden können, welche mit anderen Messverfahren nicht oder nur schwer zugänglich sind.

19. Schlagwörter
Siedeprozesse, Blasensieden, high-speed Optische Kohärenztomografie

20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Visualization of boiling procedures with PIV and optical coherence tomography	
4. author(s) (family name, first name(s)) Koch, Edmund Kirsten, Lars	5. end of project 31.01.2013 6. publication date planned 7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Dresden Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus Klinisches Sensoring und Monitoring Fetscherstraße 74 01307 Dresden	9. originator's report no. 10. reference no. 02NUK010I 11. no. of pages 15
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 37 14. no. of tables 0 15. no. of figures 4
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

1. Current state of science and technology

In nuclear power plants, cooling systems are of crucial importance to prevent the reactor from overheating. In these cooling systems, efficient heat transport of heat from the fuel rods to the cooling fluid plays an important role. Because bubble formation has a crucial influence on the heat transport and therefor on the cooling of the fuel rods, the process of bubble formation on a microscopic scale is to be examined in detail. All currently used methods for the visualization of bubble boiling provide only two-dimensional projections or acquire only single three-dimensional snap-shots.

2. Motivation / aim of study

Aim of this project is the visualization of boiling procedures with high spatial as well as temporal resolution. The main aim was the adaption of the measurement method optical coherence tomography to this application being new to OCT and the adaption to an appropriate measurement unit (Deionat) at the University Zittau/Görlitz.

3. Methods

With the help of a high-speed OCT-system, bubbles in fluids shall be visualized. OCT-imaging is to be tested at table-top experimental set-ups and at the flow channel of the experimental set-up Deionat at the University Zittau/Görlitz. Afterwards measurement data were analyzed and processed.

4. Results

It was demonstrated that optical coherence tomography can be utilized to image boiling procedures with high spatial and temporal resolution. In the scope of this project, a high-speed OCT-system was constructed and OCT-imaging was tested at an experimental set-up at the University Zittau/Görlitz. The acquired cross-sections allow determining the bubble geometry and growth characteristics of single bubbles.

5. Conclusion/ application

It was shown that high-speed OCT is adequate to investigate bubble procedures. The constructed OCT-system and the experimental set-up in Zittau shall be used for future projects. With the further development of the OCT-system and the enhancement of the measurement process it will be possible to investigate boiling processes with higher heating capacity and with a resolution being similar to high-speed videometry, so that extensive data for basic research and for the development of numeric models can be generated with this method, which are not or only extremely difficult accessible with other methods.

19. keywords
Boiling procedures, bubble boiling, high-speed optical coherence tomography

20. publisher	21. price