



8. Workshop

Kavitation: Vom Modell zur Anwendung

29. November – 01. Dezember 2021, Kloster Drübeck

Organisation:

Prof. Dr. Claus-Dieter Ohl

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Physik

Dr. Robert Mettin

Georg-August-Universität Göttingen
Drittes Physikalisches Institut



New jet in town: The "bullet" jet explained	4
Rosselló, Juan Manuel	4
Optische Vermessung der instationären Kontaktlinienbewegung bei der diffusionsgetriebenen Keimbildung	5
B.C. Depp, G. Hatzissawidis, G.J. Ludwig, P.F. Pelz.....	5
Cavitation in lipid bilayers poses strict negative pressure stability limit in biological liquids	6
Matej Kanduč, ¹ Emanuel Schneck, ^{2,3} Philip Loche, ⁴ Steven Jansen, ⁵ H. Jochen Schenk, ⁶ and Roland R. Netz ⁴	6
Thermally assisted Heterogeneous Cavitation through Gas Supersaturation	7
P. Pfeiffer, J. Eisener and C.-D. Ohl.....	7
Über das Deformations- und Versagensverhaltens von Elastomeren infolge von Kavitation -On the deformation and failure behavior of elastomers due to cavitation	8
Eric Euchler	8
Simulating cavitation bubbles near elastic structures using OpenFOAM	10
Hendrik Reese ¹ , Siew-Wan Ohl ¹ , Claus-Dieter Ohl ¹	10
From bubble-bacterium interaction to waste activated sludge treatment by cavitation	11
Dular, Matevz	11
Numerische Simulation ausgedehnter Spitzenwirbelkavitation eines Propellers mit einer Randlelementmethode mit Relaxationszonen	12
Roland Gosda, Moustafa Abdel-Maksoud.....	12
Work in Progress: Modellierung der Ablösung von Porenkeimen und des Diffusionsprozesses bei Spitzenwirbelkavitation	13
Robin Robrecht, Peter F. Pelz	13
Übergang von Schicht- zu Wolkenkavitation bei der Umströmung eines NACA0015-Profiles	14
G. Hatzissawidis, Dr.-Ing. G.J. Ludwig, Prof. Dr.-Ing. P.F. Pelz	14
Räumliche und zeitliche Skalen der Wolkendynamik als Grundlage für die Entwicklung eines generischen Experiments	15
L. Kerres, Dr.-Ing. G. J. Ludwig, Prof. Dr.-Ing. P. F. Pelz	15
Compressible multi-scale Euler-Lagrange simulations of cavitating flows	16
Peters, Andreas	16
Precision Cleaning with Single Cavitation Bubbles seeded in a Jet	17
Mnich, Dominik	17
Investigation of surface damage caused by multiple laser-induced single bubble cavitation events	18
Jonas Kühlmann ¹ , Christina Lopez de Arcaute y Lozano ² , Stefanie Hanke ² , Sebastian Kaiser ¹	18
Jet formation of bubbles expanding and collapsing right at a solid boundary - a numerical investigation on the influence of viscosity	19
Christiane Lechner ¹ , Max Koch ² , Werner Lauterborn ² , Robert Mettin ² , Tim Hupfeld ⁴ , Gaëtan Laurens ³ , David Amans ³ , Bilal Gökce ⁵ , Stephan Barcikowski ⁴	19
Influence of surface roughness on the cavitation resistance of austenitic steel and nickel-aluminium bronze	20
C.M. Lopez de Arcaute y Lozano ¹ , J. Kühlmann ² , S.A. Kaiser ² , S. Hanke ¹	20
Damage from single cavitation bubbles near boundaries	21
Fabian Reuter	21
Influence of cavitation bubble dynamics on the size of nanoparticles synthesized by double-pulsed laser ablation in liquids	22
Farbod Riahi ^{1,2} , Stephan Barcikowski ² , Bilal Gökce ^{1,2}	22



Acoustic cavitation bubble structures in viscous liquids	23
Atiyeh Aghelmaleki ^{1,3} , Sergey Lesnik ² , Hossein Afarideh ³ , Gunther Brenner ² , Robert Mettin ^{1*}	23
Reduced-order modelling of acoustic emissions from cavitation bubbles	24
Fabian Denner, Suraj Gangani, Jonas Gümmer, Sören Schenke	24
Nonlinear dynamics of ultrasound waves radiated from cavitation bubbles	25
Sören Schenke, Fabian Sewerin, Berend van Wachem, Fabian Denner	25
Numerische Simulation der Blasendynamik und lokalen Entmischung in binären Dodekan/Heptan-Mischungen	26
Jean Manuel Bermudez-Graterol, Romuald Skoda	26
Acoustic Resonance and Atomization for Gas-Liquid Systems in Microreactors	27
Robert Mettin ² ,.....	27
Iterative modelling of sound field and bubble distribution in acoustic cavitation	28
Stephens, Dwayne Savio	28
Viskoses Pumpen von Flüssigkeiten mit Kavitationsblasen	31
Robin Schädel, Hendrik Reese, Fabian Reuter, Claus-Dieter Ohl	31
Modellierung und experimentelle Parametrierung von Dampf- und Gaskavitation in der Ölhydraulik	32
Osterland, Sven	32
Cavitation control of sheet and unsteady cloud cavitation using miniature vortex generator (MVG)	35
Ebrahim Kadivar	35
Methode zur Kopplung von Strömungssimulation und einem Erosionsmodell zur quantitativen Vorhersage von Erosion	36
F. Schreiner, M. Haese, R. Skoda	36
Investigation of Inertial Cavitation of Sonosensitive and Biocompatible Nanospheres in Flow Through Tissue Mimicking Phantoms Employing Focused Ultrasound	37
Benedikt George.....	37
FLUID DYNAMICS AND DAMAGE ANALYSIS IN RESONANT ACOUSTOFLUIDIC NEBULIZERS	38
Roudini, M and Winkler, A	38
Cavitation on and in the cells	40
Borich, Anna	40



New jet in town: The "bullet" jet explained

Rosselló, Juan Manuel



Optische Vermessung der instationären Kontaktlinienbewegung bei der diffusionsgetriebenen Keimbildung

B.C. Depp, G. Hatzissawidis, G.J. Ludwig, P.F. Pelz

Technische Universität Darmstadt, Institut für Fluidsystemtechnik

Das Verständnis über die Entstehung von Kavitation unter technisch relevanten Bedingungen wurde über den Mechanismus der diffusionsgetriebenen Keimbildung grundlegend erweitert [1]. Wandgebundene Keime in einer Scherströmung können in übersättigter Flüssigkeit infolge diffusiven Stofftransports anwachsen. Haben die Gasblasen eine kritische Größe erreicht, lösen sie ab und der Zyklus beginnt erneut. Der im Vortrag vorgestellte Prüfstand dient der Untersuchung der Bewegung der Dreiphasenkontaktlinie der Keime während der Wachstums- und Ablösephase. Die Messtrecke ist zu diesem Zweck optisch zugänglich konstruiert. Die dynamische Be- und Entnetzung an der Dreiphasenkontaktlinie wird mittels Hochgeschwindigkeitskamera (Bildfrequenz ca. 100 000 Hz) beobachtet. Anordnung und Gestalt von zylindrischen Poren als generische Vertiefungen werden auf transparenten Prüfobjekten aus Polydimethylsiloxan (PDMS) vorgegeben. Die dimensionslosen Kennzahlen der Kontaktliniendynamik werden bestimmt und anhand derer ein Versuchsplan erstellt. Die Grenzen des Messsystems werden aufgezeigt, und in ersten Versuchen der Einfluss des Kantenradius der Poren auf die Bewegung der Kontaktlinie untersucht.

[1] GROß, T. F. ; PELZ, P. F.: Diffusion-driven nucleation from surface nuclei in hydrodynamic cavitation. In: Journal of Fluid Mechanics 830 (2017), S. 138–164.

Kontakt: benedict.depp@fst.tu-darmstadt.de



Cavitation in lipid bilayers poses strict negative pressure stability limit in biological liquids

Matej Kanduč,¹ Emanuel Schneck,^{2,3} Philip Loche,⁴ Steven Jansen,⁵ H. Jochen Schenk,⁶ and Roland R. Netz⁴

¹ Department of Theoretical Physics, Jožef Stefan Institute, 1000 Ljubljana, Slovenia

² Biomaterials Department, Max Planck Institute of Colloids and Interfaces, 14476 Potsdam, Germany

³ Physics Department, Technische Universität Darmstadt, 64289 Darmstadt, Germany

⁴ Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin, 14195 Berlin, Germany

⁵ Institute of Systematic Botany and Ecology, Ulm University, 89081 Ulm, Germany

⁶ Department of Biological Science, California State University, Fullerton, CA 92831

Many biological and technological processes involve liquids under negative pressure. A prominent example is plants, which use negative pressures to suck water from the soil into their leaves. A long-debated mystery is why the maximal negative pressures are approximately -100 bar. We investigated [1] how small solutes and lipid bilayers, both constituents of all biological liquids, influence the formation of cavities under negative pressures. We quantified cavitation rates on biologically relevant length scales and timescales by combining molecular dynamics simulations with kinetic modeling. In contrast to small solutes, we find that lipid bilayers increase the rate of cavitation, which remains unproblematically low at the pressures found in most plants. Only when the negative pressures approach -100 bar does cavitation occur on biologically relevant timescales. Our findings suggest that the presence of lipid aggregates imposes an upper stability limit for the magnitude of negative pressures in biological liquids [1].

[1] M Kanduč, E Schneck, P Loche, S Jansen, HJ Schenk, RR Netz, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.117 (20), 10733-10739

Kontakt: matej.kanduc@ijs.si



Thermally assisted Heterogeneous Cavitation through Gas Supersaturation

P. Pfeiffer, J. Eisener and C.-D. Ohl

Institut für Physik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Gas and vapor pockets stabilized in hydrophobic pores is at present the most accepted model for heterogeneous nucleation of a cavitation bubble. The bubbles nucleate once the pressure is reduced below the Blake threshold. Here, we demonstrate that besides gaseous pockets also a gas supersaturated spot on a substrate acts as a nucleus for cavitation. The supersaturation is achieved by either dissolving a bubble or by local heating a surface below the boiling temperature. The experiments are conducted in a thin film of water, which is sandwiched between two glass slides. One slide is coated with a thin gold layer for plasmonic heating, which is in direct contact with the water film. The pressure at the heated spot is reduced by a transient rarefaction wave. The experimental findings suggest that the local gas supersaturation is responsible to nucleate cavitation bubbles and thus connects the two distinct phase transitions, i. e. cavitation and boiling.

Kontakt: patricia.pfeiffer@ovgu.de



Über das Deformations- und Versagensverhaltens von Elastomeren infolge von Kavitation -On the deformation and failure behavior of elastomers due to cavitation

Eric Euchler

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

For elastomers, the mechanisms behind the deformation and damage behavior are not fully understood so far. This study aimed to investigate cavitation in elastomers subjected to constrained tensile deformation. In fact, cavitation damage is characterized by the formation and growth of internal defects – so-called cavities – induced by multiaxial stress [1, 2]. In practice, multiaxial stress may occur due to strain constraints which appear, for example, at loaded tire treads or in bearings and bumpers. For laboratory experiments, a simplified geometry, i.e. disk-shaped poker-chip or pancake specimen, is used to generate highly multiaxial stress situations initiating cavitation. In the literature [2], the diameter-to-thickness ratio is often called shape factor, S . Here, S quantifies the diameter D and the thickness t of pancake specimens by eq. (1). For uniaxial tension, $S \rightarrow 0$, but in the case of multiaxial tension $S \gg 0$.

$$S = D / (4 \cdot t) \quad (1)$$

In this study, dedicated experimental techniques were applied to investigate the mechanical properties and cavitation behavior of unfilled and carbon black (CB) reinforced styrene-butadiene rubber (SBR) pancake specimens; $S \in [0, 10]$. Via in situ dilatometry, the cavitation process was characterized indirectly by an increase of the pancake specimen's volume due to the formation and growth of cavities [3]. Additionally, the evolution of the cavity population was investigated by high-resolution X-ray microtomography of different beam sources, i.e. tube-based (μ CT) and synchrotron radiation-based (SR μ CT). The data obtained by in situ μ CT measurements show that the cavitation onset is an unstable fracture process that changes into a stable growth of cavities to release the induced stress concentrations [3, 4].

In particular, the cavitation process in unfilled SBR is indicated by the results illustrated in Figure 1 merging experimental data of in situ dilatometry and μ CT as well as optical analysis of the fracture surface of a ruptured pancake specimen. The engineering stress-strain curve shows a specific shape that is in contrast to the rubber-like behavior known from uniaxial tension: (i) high initial stiffness, which is attributed to the contribution of the bulk modulus; (ii) local stress maximum, which is related to the deformation stage where most of the cavities have been formed as indicated by the semitransparent 3D- μ CT illustration (A); (iii) steady-state in the engineering stress-strain curve, while the volumetric strain increases with strain representing the growth of cavities; (iv) catastrophic rupture of the pancake specimen revealing the final cavity population on the fracture surface (B).

Additional advanced experiments were realized on investigating nanocavitation in the crack tip zone of notched planar specimens, typically used for fatigue crack propagation tests [4]. Here, the early stage of cavitation was analyzed by in situ small-angle-X-ray scattering (SAXS) experiments performed at Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg. The results suggest a high dependency of the resistance against cavitation on the initial properties of the rubber network, e.g. entanglements or crosslinking distribution, thus, contributing to the overall fatigue properties of the rubber vulcanizates. Further experiments are planned to study the relation between cavitation in the crack process zone and crack growth rate at fatigue loading.

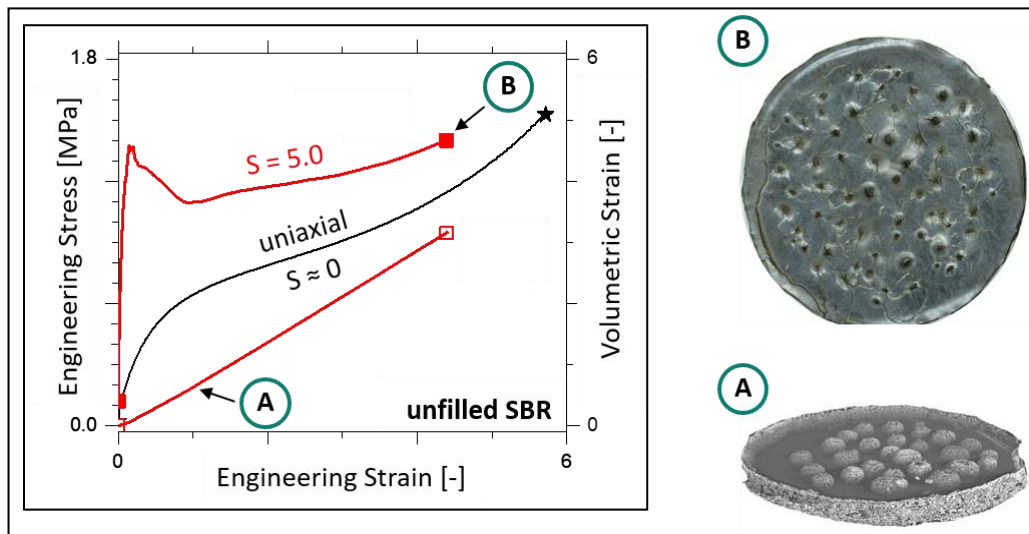


Figure 1. Experimental data obtained by in situ dilatometry (left), μ CT (A) and optical analysis (B) indicating the cavitation process in unfilled SBR due to constrained tensile deformation (red curves). For comparison, the engineering stress-strain curve for unfilled SBR under uniaxial tension is represented by the black curve.

To sum up, cavitation in rubber vulcanizates is often attributed to interfacial failure between the soft rubber matrix and rigid filler particles. However, the results of this study show that cavitation can even be detected in elastomers free of fillers, such as CB, and free of zinc oxide (ZnO), which is usually added to activate the sulfur vulcanization. This reveals that the cavitation phenomenon is not exclusively triggered by the rubber-filler interactions. The experimentally obtained results of the present study contribute to a better understanding of the macroscopic stress-strain relation as a consequence of rubber network changes under highly constrained tensile loading. Next, a precise description of the origin of cavities considering the degree of rubber network heterogeneity and the microstructural changes before micro-cavitation will be in the focus of investigations. In the future, experimental results will be used to enhance constitutive theories and computational analysis, too.

References

- [1] Gent, A.N.; Lindley, P.B. (1959). "Internal Rupture of Bonded Rubber Cylinders in Tension". Proc. R. Soc. London, Ser. A, 249(1257), 195.
- [2] Hocine, N.A.; Hamdi, A.; Naït Abdelaziz, M.; Heuillet, P.; Zaïri, F. (2011). "Experimental and finite element investigation of void nucleation in rubber-like materials". Int. J. Solids Struct., 48(9), 1248.
- [3] Euchler, E.; Bernhardt, R.; Schneider, K.; Heinrich, G.; Wießner, S.; Tada, T. (2020). "In situ dilatometry and X-ray microtomography study on the formation and growth of cavities in unfilled styrene-butadiene-rubber vulcanizates subjected to constrained tensile deformation". Polymer, 187122086.
- [4] Euchler, E.; Bernhardt, R.; Wilde, F.; Schneider, K.; Heinrich, G.; Tada, T.; Wießner, S.; Stommel, M. (2021). "First-Time Investigations on Cavitation in Rubber Parts Subjected to Constrained Tension Using In Situ Synchrotron X-Ray Microtomography (SR μ CT)". Adv. Eng. Mater., 2001347.
- [5] Euchler, E.; Schneider, K.; Heinrich, G.; Wiessner, S.; Bernhardt, R.; Tada, T.; Roth, S.V. (2018). "Exploring the failure behavior of rubber vulcanizates under constraint conditions via small-angle-X-ray-scattering (SAXS)" in "13th Fall Rubber Colloquium", Hannover.



Simulating cavitation bubbles near elastic structures using OpenFOAM

Hendrik Reese¹, Siew-Wan Ohl¹, Claus-Dieter Ohl¹

¹*Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*

Cavitation bubbles cause erosion of solid surfaces in liquids. Investigating this mechanism experimentally is difficult because of the very small time and length scales involved. Thus, simulations that supplement experimental work can help to understand these fast dynamics. The interactions between a cavitation bubble and an elastic surface is investigated numerically using a fluid-structure-interaction solver in OpenFOAM. The solver models viscosity, surface tension and compressibility of the fluid and employs a linear elasticity model for the solid. Shockwave emission and jet formation both cause high stresses in the solid. Wave propagation as well as normal and shear stresses in the solid are discussed.

Kontakt: hendrik.reese@ovgu.de



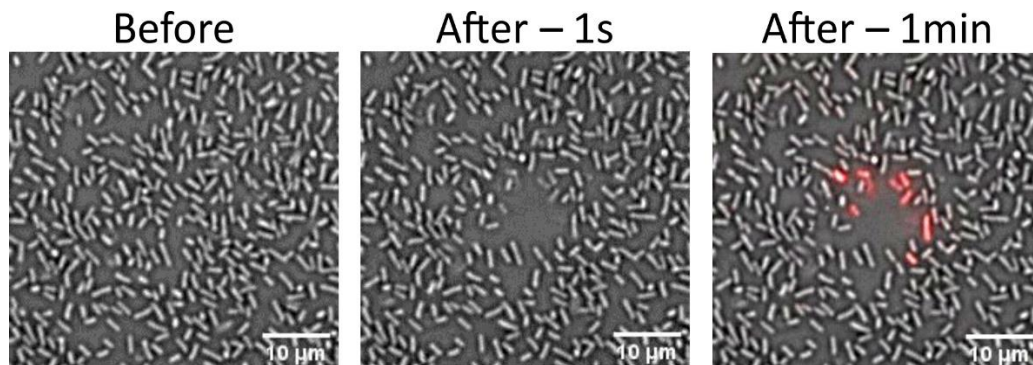
From bubble-bacterium interaction to waste activated sludge treatment by cavitation

Dular, Matevz

University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering

In the first part, I will focus on the latest developments in the understanding the interaction between a single cavitation bubble and bacteria. To observe this interaction, a novel methodology of generating single microscopic cavitation bubble at a precise position relative to a microscopic object (eg. bacteria) was developed. The whole setup was coupled with the optical tweezer system, which enabled the measurements of forces that form during and after the bubble collapse. The bubble collapse process was recorded by a high-speed camera at 2Mfps. At the same time, we observed the bacterial (*Escherichia coli*) response by fluorescence images recorded with a EMCCD camera. The experimental study was complemented by numerical simulations.

The second part will show efforts to scale up the process and the development of cavitation generator for mechanical and chemical decomposition of pollutants. The efficiency of the newly developed generator was confirmed by processing waste sludge loaded with filamentous bacteria at the pilot level



Kontakt: Matevz.Dular@fs.uni-lj.si



Numerische Simulation ausgedehnter Spitzenwirbelkavitation eines Propellers mit einer Randelementmethode mit Relaxationszonen

Roland Gosda, Moustafa Abdel-Maksoud

Technische Universität Hamburg, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie

Die Vorhersage der breitbandigen, kavitationserregten Druckschwankungen eines Schiffspropellers hat in den letzten Jahren zunehmend an Relevanz gewonnen. Neben der durch die Schichtkavitation vornehmlich in der ersten Blattfrequenz induzierten Druckschwankungen treten Druckschwankungen der Spitzen- und Nabenwirbelkavitation im Spektrum der höheren Blattfrequenzen auf. Neben dem allgemeinen Schallpegel haben auch einzelne Frequenzbereiche einen Einfluss auch Meereslebewesen. Diese haben unterschiedliche Frequenzbereiche, die sie zur Orientierung und Kommunikation untereinander nutzen. Deshalb ist es wichtig, die anthropogene Lärmbelastung aufgrund der Spitzenwirbelkavitation bereits im Entwurfsprozess bestimmen zu können und mit in die Bewertung einfließen zu lassen.

Mit gängigen Finite-Volumen-Verfahren mit Kavitationsmodellen basierend auf dem Volume-of-Fluid-Ansatz lassen sich die Spitzenwirbelkavitations-induzierten Druckschwankungen nur unter erheblichem Aufwand brauchbar vorhersagen. Ein alternativer Ansatz ist die Nutzung eines Randelementverfahren im Rahmen einer potentialtheoretischen Modellierung. Für Einzelblasen wurde dieser Ansatz bereits erfolgreich verfolgt. Mithilfe einer achsensymmetrischen Formulierung können die Druckschwankungen unter der Hypothese, dass die Druckschwankungen hauptsächlich von der Variation des Kavitationsvolumens entlang der Wirbelachse abhängen, effizient berechnet werden. Um den Übergang zur Schichtkavitation an der Blattspitze und die Betrachtung einer endlichen Kavität zu modellieren werden Relaxationszonen eingesetzt. Für die Validierung der Methode werden Ergebnisse aus Simulationen und Messungen verglichen. Außerdem werden das berechnete Spektrum der Druckschwankungen und optische Ausdehnung der Kavität entlang der Wirbelachse den entsprechenden Messergebnissen gegenübergestellt.

Kontakt: roland.gosda@tuhh.de



Work in Progress: Modellierung der Ablösung von Porenkeimen und des Diffusionsprozesses bei Spitzenwirbelkavitation

Robin Robrecht, Peter F. Pelz

Technische Universität Darmstadt, Institut für Fluidsystemtechnik, Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Es ist bekannt, dass Diffusion ein entscheidender physikalischer Mechanismus bei Wachstum und Ablösung von Porenkeimen (wandgebundenen Gasblasen) ist [1, 2]. Das Wachstum der Porenkeime und die anschließende Ablösung einer freien Blase ist ein periodischer, selbsterregter Vorgang. Während die Diffusion für die Wachstumsphase verantwortlich ist, ist der hoch-dynamische Ablösevorgang bisher schlecht verstanden. Es wird gezeigt, wie der Ablösevorgang als Evolution der freien Oberfläche mittels numerischer Randelementmethode modelliert werden kann.

Die Erkenntnisse über diffusions-getriebene Keimbildung [1, 2] motivieren außerdem die Untersuchung und Modellierung von Diffusion auch bei anderen Kavitationsprozessen – hier bei Spitzenwirbelkavitation [3]. Hierzu wird ein analytischer Modellansatz unter Berücksichtigung von Diffusion zur Beschreibung von Hysterese bei Ein- und Aussetzen der Kavitation vorgestellt.

- [1] Groß & Pelz: Diffusion-driven nucleation from surface nuclei in hydrodynamic cavitation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017.
- [2] Groß, Bauer, Ludwig, Fernandez Rivas & Pelz: Bubble nucleation from micro-crevices in a shear flow. *Experiments in Fluids*, 2017.
- [3] Amini, Reclari, Sano, Iino, Dreyer & Farhat: On the physical mechanism of tip vortex cavitation hysteresis. *Experiments in Fluids*, 2019.

Kontakt: robin.robrecht@fst.tu-darmstadt.de



Übergang von Schicht- zu Wolkenkavitation bei der Umströmung eines NACA0015-Profils

G. Hatzissawidis, Dr.-Ing. G.J. Ludwig, Prof. Dr.-Ing. P.F. Pelz

Technische Universität Darmstadt, Institut für Fluidsystemtechnik

In diesem Vortrag wird gezeigt, dass das Modell Pelz et al. (JFM, 2017) nicht nur für eine Innenströmung, sondern auch bei einer Außenströmung (NACA0015) das Schichtwachstum und den Übergang von Schicht- zu Wolkenkavitation vorhersagt. Das Modell besteht aus zwei Teilen: (i) Erstens wird die Schichtlänge bestimmt. Dabei wird die Kavitationsschicht am Schichtbeginn von ablösenden wandgebundenen Keimen „gefüttert“, die am Schichtende kollabieren. Durch Gleichsetzen der Kollapszeit mit der Keimbildungsfrequenz wird mittels der Rayleigh-Plesset Gleichung die Schichtlänge bestimmt. (ii) Zweitens sagt das Modell den Übergang von Schicht- zu Wolkenkavitation vorher. Für vorgegebene Kavitationszahl und Anstellwinkel existiert eine kritische Reynoldszahl, oberhalb derer periodische großskalige Wolkenkavitation auftritt. Dabei wird die Eindringtiefe des viskosen Flüssigkeitsfilms, auch Re-Entrant Jet genannt, mit der Schichtlänge verglichen. Erreicht der viskose Flüssigkeitsfilm den Schichtbeginn, spricht man von Wolkenkavitation, sonst von Schichtkavitation.

Kontakt: Grigorios.Hatzissawidis@fst.tu-darmstadt.de



Räumliche und zeitliche Skalen der Wolkendynamik als Grundlage für die Entwicklung eines generischen Experiments

L. Kerres, Dr.-Ing. G. J. Ludwig, Prof. Dr.-Ing. P. F. Pelz

Technische Universität Darmstadt, Institut für Fluidsystemtechnik

Dieser Vortrag stellt ein generisches Experiment zur Untersuchung der Dynamik der Kavitationswolke vor. Das Experiment dient der Validierung eines analytischen, eindimensionalen Modells¹ für Kavitationswolken. Die Kavitationswolke wird als Wirbelring, dessen Zirkulation - konsistent mit dem dritten Helmholtzschen Wirbelsatz- konstant längs der Wolke ist, modelliert. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Zirkulation der Wolke durch das Ablösen, induziert durch den Reentrant Jet, einer Kavitationsschicht aufgeprägt wird.

Die Wolke, bestehend aus Einzelblasen deren Radius sich als kontinuierliche Funktion des Ortes darstellen lässt, wird als torusförmiges Gebilde beschrieben und als eindimensionales, disperses Medium mit kontinuierlicher Dichteverteilung unter Berücksichtigung der Blasendynamik betrachtet. Die Strömung außerhalb der Wolke wird als Potentialströmung angenommen. Die Dynamik einer toroidalen Kavitationswolke wird über die zeitliche und räumliche Änderung ihrer Gestalt, dem dimensionslosen Wolkenradius, beschrieben.

Zur Beurteilung des Einflusses der im Modell definierten dimensionslosen Parameter i.e. (i) Dampfgehalt, (ii) Interaktionsparameter und (iii) Anregung auf die Dynamik einer Kavitationswolke sind die charakteristischen Zeit- und Längenskalen entscheidend. Somit ist für die Konzeptionierung eines generischen Experiments eine Größenordnungsabschätzung der dimensionsbehafteten zeitlichen und räumlichen Skalen erforderlich. Es gilt die Entstehung und die Dynamik der Einzelblasen, der Kavitationswolke sowie die dynamische und kinematische Anregung durch Zirkulation und Dehnung darzustellen und zu skalieren. Die Herausforderung ist, dass die verschiedenen Skalen i.e. Eigenfrequenz der Wolke oder der Blasen sich über Größenordnungen hinweg unterscheiden. Diese Skalen dienen als Grundlage für die Entwicklung des generischen Prüfstandes und die Auswahl der Messtechnik.

Kontakt: lara.kerres@fst.tu-darmstadt.de

¹ J. Buttenbender, P. F. Pelz (2012): the influence of imposed strain rate and circulation on bubble and cloud dynamics, Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation, Singapore



Compressible multi-scale Euler-Lagrange simulations of cavitating flows

Peters, Andreas



Precision Cleaning with Single Cavitation Bubbles seeded in a Jet

Mnich, Dominik



Investigation of surface damage caused by multiple laser-induced single bubble cavitation events

Jonas Kühlmann¹, Christina Lopez de Arcaute y Lozano², Stefanie Hanke², Sebastian Kaiser¹

¹Universität Duisburg-Essen, IVG - Reaktive Fluide, Carl-Benz-Str. 199, 47057 Duisburg, Germany

²Universität Duisburg-Essen, ITM - Werkstofftechnik, Lotharstraße 1, 47057 Duisburg, Germany

The resistance of technical alloys to cavitation is typically investigated using ultrasound sonotrodes. Due to the large number and stochastic nature of the acoustically generated bubbles, in general the resulting damage cannot be assigned to individual bubble events. However, by means of focused laser pulses it is possible to generate individual bubbles that are precisely reproducible in location, time and size. Here, series of single bubbles provide defined, repeated stress on surfaces of technical alloys. The dynamics of the bubble collapse are recorded by high-speed imaging while the incremental increase in damage is recorded in situ by optical microscopy, and this is complemented by ex-situ techniques to yield a detailed picture of the damage evolution. This enables examining the development of damage during the incubation and erosion phases, as well as correlating the details of the collapse processes with material changes. This in-situ imaging is validated by ex-situ confocal microscopy. The current experiments were carried out on a NiAl bronze, a multi-phase alloy representative of the materials used, e.g. for ship propellers.

Kontakt: jonas.kuehlmann@uni-due.de



Jet formation of bubbles expanding and collapsing right at a solid boundary - a numerical investigation on the influence of viscosity.

Christiane Lechner¹, Max Koch², Werner Lauterborn², Robert Mettin², Tim Hupfeld⁴, Gaétan Laurens³, David Amans³, Bilal Gökce⁵, Stephan Barcikowski⁴

¹Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, TU Wien, Austria

²Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Germany

³Institut Lumière Matière, Université Claude Bernard Lyon 1, France

⁴Lehrstuhl für Technische Chemie I, Universität Duisburg-Essen, Germany

⁵Lehrstuhl Werkstoffe für die additive Fertigung, Universität Wuppertal, Germany

The dynamics of a single bubble generated by focusing a laser directly at a solid target is studied numerically for liquids with different viscosities. Numerical modeling sets in after recombination of the plasma, when the bubble has already formed. The model consists of a bubble filled with a small amount of non-condensable gas in a compressible liquid obeying the Tait equation of state. Initially, a hemi-spherical bubble under high internal pressure is placed directly at the solid. The subsequent dynamics, expansion and collapse, is investigated by solving the Navier Stokes equations discretized with the finite volume method. The volume of fluid method is used to capture the interface between liquid and gas. The model is implemented in the open source software package OpenFOAM.

For three different liquids (water, PAO6, PAO40) the numerically obtained bubble shapes are compared to the shapes extracted from experimental images, showing excellent agreement. The dynamics of the bubbles is discussed. In particular, numerical simulations can resolve the formation of a very fast jet of the order of 1000 m/s, which results from self impact of an annular inflow during bubble collapse. With increasing viscosity the annular inflow is damped and jets with decreasing speed form by involution of the bubble wall. For millimeter-sized bubbles we find jet formation from self impact in water, jet formation by involution of the bubble wall in PAO6 and no jet formation in PAO40.

Kontakt: christiane.lechner@tuwien.ac.at

Influence of surface roughness on the cavitation resistance of austenitic steel and nickel-aluminium bronze

C.M. Lopez de Arcaute y Lozano¹, J. Kühlmann², S.A. Kaiser², S. Hanke¹

¹ *Materials Science and Engineering, Institute for Metal Technologies (ITM), University Duisburg-Essen, Lotharstr. 1, 47057 Duisburg, Germany*

² *IVG-Reactive Fluids, University Duisburg-Essen, Carl-Benz-Str. 199, 47057 Duisburg, Germany*

Cavitation is described as the formation and collapse of gas bubbles in fluids due to local pressure changes [1]. The implosion of these bubbles in the immediate vicinity of a surface can lead to shock waves and microjets, inducing plastic deformation and erosion of the material [2]. The wear resistance of materials is highly influenced by the surface properties of the material. One simple way to change these properties is to change the surface topography via the final manufacturing step. For cavitation erosion it is oftentimes assumed that a smoother surface finish will yield better erosion resistance. In other cases, surface structuring is attempted to reduce the aggressiveness of cavitation attack on a surface [3].

Nevertheless, the effects of surface properties on cavitation erosion are not fully understood to date.

In this study the damage evolution during ultrasonic cavitation of an austenitic steel (316L; 1.4441) and a nickel-aluminium bronze (CuAl10Ni5Fe5) at two different surface roughness values (ground with 80 grit sandpaper and polished with silica) were investigated, using light microscopy, confocal microscopy, as well as scanning electron microscopy. Mass loss curves were recorded during the experiments. Additionally, the materials were exposed to series of single laser-induced bubbles in order to study the effects of surface roughness on bubble dynamics. For both materials, the mass loss curves of the polished samples show a tendency of a slightly higher mass loss over cavitation time. This phenomenon is mainly visible in the early damaging stages of the material and is also evident from the microscopic analysis. After short ultrasonic cavitation times the polished samples show plastic deformation e.g., slip lines, whereas the ground samples show a later onset of the plastic deformation, maintaining large parts of the original surface for a longer time. Apparently, the surface finishing by polishing did not improve the cavitation resistance of the materials. On the contrary, strain hardening induced by grinding appears to delay the onset of cavitation erosion.

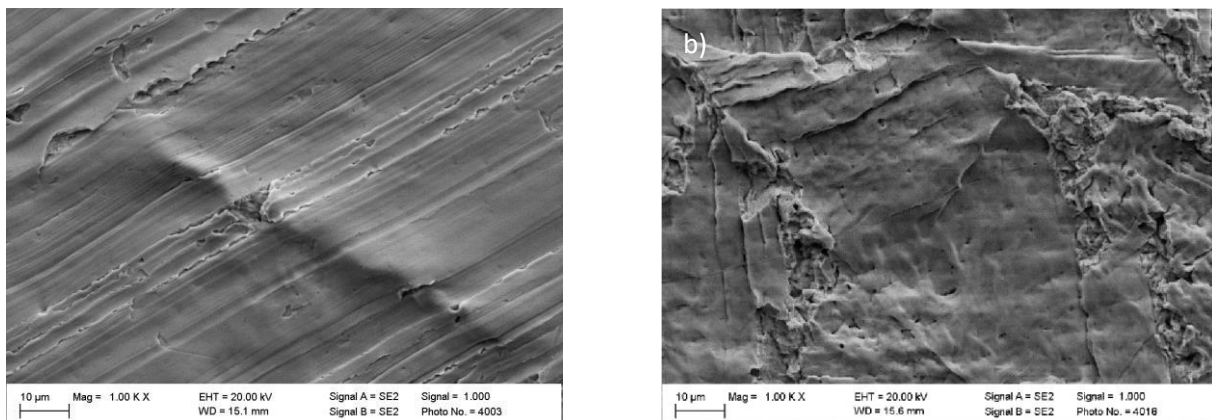


Figure 1: Austenitic steel after 2h of ultrasonic cavitation a) ground b) polished surface

[1] Gesellschaft für Tribologie e.V. (German Society of Tribology); Arbeitsblatt 7: Tribologie – Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, 2002

[2] H. Czichos, K.H. Habig; Tribologie Handbuch, second ed., Vieweg Verlag, 2003, p. 147ff.

[3] Y. Zhu, J. Zou, W. L. Zhao, X. B. Chen, H. Y. Yang, Tribology International 2016, 102, 419 – 428.



Damage from single cavitation bubbles near boundaries

Fabian Reuter

¹Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



Influence of cavitation bubble dynamics on the size of nanoparticles synthesized by double-pulsed laser ablation in liquids

Farbod Riahi^{1,2}, Stephan Barcikowski², Bilal Gökce^{1,2}

¹ *University of Wuppertal, Materials Science and Additive Manufacturing*

² *University of Duisburg-Essen, Technical Chemistry I and Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE)*

Contact: riahi@uni-wuppertal.de

Ligand-free nanoparticles synthesized by laser ablation in liquids [1] have attracted great interest in areas such as catalysis [2], biotechnology [3] and additive manufacturing [4]. For each of these application areas an efficient production of stable nanoparticles with defined particle sizes is crucial. However, in this laser-based synthesis method, a precise control of the particle size proves to be difficult. This contribution investigates the dynamics of simultaneously laser-induced cavitation bubbles on a metal target by Rayleigh-Plesset modelling and time-resolved diffused shadowgraphy. Our results indicate that the laser-induced cavitation bubbles can promote the agglomeration of nanoparticles in this highly interactive thermodynamic environment. Moreover, it is shown that by varying the lateral distance between the two laser beams, nanoparticle size distributions can be significantly altered. Accordingly, we potentially offer a new approach to the production of size-manipulated nanoparticles and aid in the scientific investigation of the cavitation bubble dynamics involved in laser ablation in liquids.

References:

- [1] Zhang, D., Gökce, B. and Barcikowski, S. Laser synthesis and processing of colloids: fundamentals and applications. *Chemical reviews*, 117(5), pp.3990-4103. (2017)
- [2] Reichenberger, S., Marzun, G., Muhler, M. and Barcikowski, S. Perspective of surfactant-free colloidal nanoparticles in heterogeneous catalysis. *ChemCatChem*, 11(18), pp.4489-4518. (2019)
- [3] Streich, C., Akkari, L., Decker, C., Bormann, J., Rehbock, C., Müller-Schiffmann, A., Niemeyer, F.C., Nagel-Steger, L., Willbold, D., Sacca, B. and Korth, C. Characterizing the effect of multivalent conjugates composed of A β -specific ligands and metal nanoparticles on neurotoxic fibrillar aggregation. *ACS nano*, 10(8), pp.7582-7597. (2016)
- [4] Hupfeld, T., Wegner, A., Blanke, M., Doñate-Buendía, C., Sharov, V., Nieskens, S., Piechotta, M., Giese, M., Barcikowski, S. and Gökce, B. Plasmonic Seasoning: giving color to desktop laser 3D printed polymers by highly dispersed nanoparticles. *Advanced Optical Materials*, 8(15), p.2000473.(2020)



Acoustic cavitation bubble structures in viscous liquids

Atiyeh Aghelmaleki^{1,3}, Sergey Lesnik², Hossein Afarideh³, Gunther Brenner², Robert Mettin^{1*}

¹*Third Institute of Physics, Georg-August-University Göttingen,
Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Germany*

²*Institute of Applied Mechanics, Clausthal University of Technology,
Adolph-Roemer-Straße 2A, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany*

³*Department of Energy Engineering and Physics, AmirKabir University of Technology, Tehran
15875-4413, Iran*

While many studies of acoustic cavitation are concerned with pure water, tap water or sea water, the behaviour of acoustic bubbles in different liquid media is less well documented. There exist, however, numerous applications in other liquids, for instance in oils, acids, or molten metals. An important liquid parameter is viscosity, which in many cases is higher as compared to water. Experiments have shown that in bubble structures and individual bubble dynamics can be considerable distinct from the water case for elevated viscosity, and that simple extrapolation might not work. Rising viscosity can increase the damping of individual bubble oscillations and the drag on moving bubbles, but also the acoustic forces on and between the bubbles, the Bjerknes forces, are potentially affected.

Here we systematically investigate changes of bubble structures and bubble dynamics under an ultrasonic horn transducer at 20 kHz. Viscosity is incrementally increased by addition of ethylene glycol. Among other phenomena, we observe a remarkable bubble pattern in form of a half sphere under the sonotrode tip. This structure has been reported by other authors before at elevated viscosity [1,2]. In particular in sulfuric acid, it was perceived as a sonoluminescing feature [3,4]. Apparently, it relies on a curved surface of neutral Bjerknes forces [5].

By employing high-speed videos and modeling of single and collective bubble dynamics, we try to further elucidate cavitation structures and their mechanisms in viscous liquids. As well, the bubble activity with respect to sonoluminescence is examined for varying viscosity.

[1] T. Lepoint, personal communication on the “Montgolfière structure” (2004)

[2] Tzanakis, I., Lebon, G.S.B., Eskin, D.G., Pericleous, K.A.: Characterizing the cavitation development and acoustic spectrum in various liquids. *Ultrason. Sonochem.* 34 (2017), 651.

[3] Xu, H., Eddingsaas, N.C., Suslick, K.S.: Spatial separation of cavitating bubble populations: the nanodroplet injection model. *J. Am. Chem. Soc.* 131 (2009), 6060.

[4] Thiemann, A., Holsteyns, F., Cairós, C., Mettin, R.: Sonoluminescence and dynamics of cavitation bubble populations in sulfuric acid. *Ultrason. Sonochem.* 34 (2017), 663.

[5] Rosselló, J.M., Dellavale, D., Bonetto, F.J.: Stable tridimensional bubble clusters in multi-bubble sonoluminescence (MBSL). *Ultrason. Sonochem.* 22 (2015), 59-69.

Kontakt: atiyeh.aghelmaleki@phys.uni-goettingen.de



Reduced-order modelling of acoustic emissions from cavitation bubbles

Fabian Denner, Suraj Gangani, Jonas Gümmer, Sören Schenke

Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Acoustic waves emitted by cavitation bubbles are the primary component of important applications, such as ultrasound imaging, can serve as a reference value to monitor cavitation activity *in situ* and may serve to validate computational models. However, quantifying the acoustic waves emitted by cavitation bubbles turns out to be difficult: the small and extremely transient phenomenon is very challenging to measure in experiments with sufficient accuracy, state-of-the-art CFD methods struggle to predict the amplitude of acoustic emissions reliably and reduced-order models are based on many limiting simplifications (e.g. spherical symmetry). In this contribution we present our recent work on predicting acoustic emissions of microbubbles using Rayleigh-Plesset models and, more generally, reduced-order models. With the aim of better understanding and improving the capabilities of such reduced-order models, we specifically focus on the modelling assumptions used to describe the bubble dynamics and the propagation of acoustic waves in the liquid. Our results reveal distinct regimes in which the amplitude of the waves emitted by a cavitating microbubble follows specific scaling laws, a clear delineation of stable and inertial cavitation for coated microbubbles as well as a simplified model for the wave amplitude and shock formation of waves propagating away from the bubble. However, our results also raise new questions that further highlight the difficulties associated with predicting the acoustic emissions of cavitation bubbles.

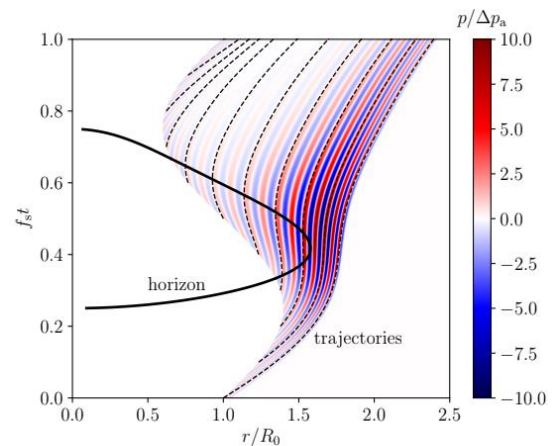
Kontakt: fabian.denner@ovgu.de

Nonlinear dynamics of ultrasound waves radiated from cavitation bubbles

Sören Schenke, Fabian Sewerin, Berend van Wachem, Fabian Denner

Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

In this contribution, we present a coupled bubble-pressure-wave solver. One of the major problems with Rayleigh-Plesset type models is that they can only predict the pressure at the bubble wall, whereas in practical applications such as medical ultrasound treatment, one is typically interested in the pressure signal at some distance away from the bubble wall. Moreover, the comparison between model predictions and experimental measurements of ultrasound pressure signals is associated with significant uncertainties concerning the modulation of the ultrasound wave on its way from the location of emission to an observation point. We employ the well known Westervelt equation to account for the cumulative nonlinear distortion of the propagating wave. The novelty of the present work lies in a transformation of a convective form of the Westervelt equation between a moving physical space and a fixed computational domain, in which the governing equation is solved with standard finite difference methods. The moving physical space naturally allows to simulate an oscillating wave emitting bubble wall, and the convective form allows to account for the non-uniform and transient fluid flow induced by the bubble wall motion. The time-dependent motions of the wave emitting boundary and the background fluid give rise to nonlinear Doppler modulations of the radiated wave and variations of the effective wave propagation speed. It is shown that this can result in strong amplifications of the radiated pressure amplitude, in particular when the bubble wall velocity approaches sonic speed. Even though simplifying assumptions are made in the computations, the results suggest that due to the aforementioned dynamics, modified $1/r$ -decay laws may not be sufficient to propagate bubble wall pressure amplitudes to some location away from the bubble wall.



Pressure distribution in the space-time plane for an oscillating sphere radiating acoustic waves at a wave frequency larger than the oscillation frequency. A strong amplification of the radiated wave amplitude is observed at supersonic velocity amplitude, where the horizon indicates the region of supersonic speed of the background fluid.

Kontakt: soeren.schenke@ovgu.de



Numerische Simulation der Blasendynamik und lokalen Entmischung in binären Dodekan/Heptan-Mischungen

Jean Manuel Bermudez-Graterol, Romuald Skoda

Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen, Ruhr-Universität Bochum

In gängigen CFD-Methoden werden Massentransfer-Kavitationsmodelle verwendet, z.B. [1-5], die auch als *Homogeneous Relaxation Models* [6] oder *Non-equilibrium Models* [7] bezeichnet werden. Diese Modellfamilie basiert auf einer vereinfachten blasendynamischen Beziehung, z.B. der Rayleigh-Gleichung, um die Verdampfungs- und Kondensationsrate zu berechnen, die wiederum als Quell- bzw. Senkenterm in eine Transportgleichung für die Massen- oder Volumenfraktion eingehen. Komplexe Fluide wie z.B. Kraftstoffe oder Hydrauliköle, die aus mehreren Einzelkomponenten bestehen, werden dabei als Einzelkomponenten-Pseudo-Fluid behandelt, welches sich nicht entmischen kann und damit keine von der lokalen Mischung abhängigen Stoff- und Transporteigenschaften aufweist.

Im Sinne des Schwerpunktthemas des Workshops *Vom Modell zur Anwendung* wird basierend auf der Vorarbeit [8] ein mathematisches Modell für die Simulation der Dynamik sphärischer Einzelblasen in binären Alkan-Mischungen vorgestellt, das ebendiese Entmischungsvorgänge beschreibt. Details des Massen- und Wärmetransports sowie Phasenübergangs werden aufgelöst, und Luftabsorption und -desorption werden beschrieben. Als gängige Komponenten von Kraftstoffen werden Mischungen aus dem Leicht- und Schwersieder Heptan und Dodekan untersucht. Ein versetzter Massenübergang von Heptan und Dodekan führt zu einer lokalen Entmischung beider Komponenten in der die Blase umgebenden Flüssigkeit und einer charakteristischen Gas-Speziesverteilung (Heptan- und Dodekan-Dampf sowie Luft) innerhalb der Blase. Ein Vergleich mit einem nicht-entmischbaren Pseudo-Fluid mit gleichen Initialeigenschaften zeigt, dass für eine schwingende Blase die Rückwirkung der lokalen Entmischung auf die Blasendynamik gering ist. Das stete Wachstum einer Blase in einer überhitzten Heptan-Dodekan-Flüssigkeitsmischung wird hingegen maßgeblich durch die lokale Entmischung beeinflusst, besonders für geringe Heptan-Anteile der Mischung. Diese Einzelblasenuntersuchung kann als Basis für die Entwicklung von Mehrkomponentenkavitationsmodellen für z.B. Kraftstoffe und Hydrauliköle dienen.

- [1] Schnerr, G. H. & Sauer, J. (2001). *Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics*. In ICMF 4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA.
- [2] Zwart, P. J., Gerber, A.G. & Belamri, T. (2014). *A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics*. In Proc. ICMF 2004 Int. Conf. Multiphase Flow, Yokohama, Japan.
- [3] Kubota, A., Kato, H. & Yamaguchi, H. (1992). *A new modeling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section*. *Journal of Fluid Mechanics*, 240 (1): 59-96.
- [4] Merkle, C.L., Feng, J. & Buelow, P.E.O. (1998). *Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation*. Proceedings 3. Int. Symp. Cavitation, Grenoble, France.
- [5] Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H. & Jiang, Y. (2002). *Mathematical basis and validation of the full cavitation model*, *Journal of Fluids Engineering*. 124(3): 617-624.
- [6] Bilicki, Z. & Kestin, J. (1990). *Physical aspects of the relaxation model in two-phase flow*. Proceedings of Royal Society London A, 428, 379–397.
- [7] Downar-Zapolski, P., Bilicki, Z., Bolle, L. & Franco, J. (1996). *The non-equilibrium relaxation model for one-dimensional flashing liquid flow*. *Int. J. Multiphase Flow*, 22(3), 473–483.
- [8] Bermudez-Graterol, J. M., Nickaen, M. & Skoda, R. (2021). *Numerical simulation of spherical bubble collapse by a uniform bubble pressure approximation and detailed description of heat and mass transfer with phase transition*. *Applied Mathematical Modelling* 96, 80–110.

Kontakt: romuald.skoda@ruhr-uni-bochum.de



Acoustic Resonance and Atomization for Gas-Liquid Systems in Microreactors

Keiran Mc Carogher¹, Dwayne S. Stephens², Zhengya Dong^{1,3}, M. Enis Leblebici⁴,
Robert Mettin²,
Simon Kuhn¹

¹*KU Leuven, Department of Chemical Engineering, Celestijnenlaan 200F, 3001 Leuven, Belgium*

²*Third Institute of Physics, Georg-August-University Göttingen,
Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Germany*

³*Current Address: Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory, Haibin Road 12,
Jinping District, 515063 Shantou, China*

⁴*Center for Industrial Process Technology, Department of Chemical Engineering, KU Leuven,
Agoralaan Building B, 3590 Diepenbeek, Belgium*

It is shown that a liquid slug in gas-liquid segmented flow in microchannels can act as an acoustic resonator to disperse large amounts of small liquid droplets, commonly referred to as atomization, into the gas phase. We investigate the principles of acoustic resonance within a liquid slug through experimental analysis and numerical simulation. A mechanism of atomization in the confined channels and a hypothesis based on high-speed image analysis that links acoustic resonance within a liquid slug with the observed atomization is proposed. The observed phenomenon provides a novel source of confined micro sprays and could be an avenue, amongst others, to overcome mass transfer limitations for gas-liquid processes in flow.

Kontakt: robert.mettin@phys.uni-goettingen.de



Iterative modelling of sound field and bubble distribution in acoustic cavitation

Stephens, Dwayne Savio

Reduzierung der Aktivität von Biomasse mittels Kavitation

Julius-Alexander Nöpel, Frank Rüdiger

Professur für Strömungsmechanik, Technische Universität Dresden

In den weitgehend geschlossenen Wasserkreisläufen von Papierwerken ist eine hohe Aktivität von Mikroorganismen vorhanden. Diese wird durch die Prozesstemperaturen von 40 – 50 °C, weitgehend anaerobe Umgebungsbedingungen sowie den wachsenden Anteil an Altpapier stark gefördert. Bei der Verwendung von Altpapier werden hohe und tendenziell steigende Mengen an „organischen Nährstoffen“ für Mikroorganismen in die Prozesswasserkreisläufe eingetragen. Genannt werden können hier zum Beispiel Stärke und Anteile aus im Pulper redispergierten Barrierebeschichtungen, die zunehmend zur Substitution von Kunststoffverpackungen eingesetzt werden. Neue disruptive Technologieansätze zur Hemmung des Bakterienwachstums und zur Reduzierung der Bakterienbeladung im Prozesswasserkreislauf der Papierfabrik sind somit von großem Interesse, insbesondere dann, wenn diese (physikalischen) Lösungsansätze eine Reduzierung des Einsatzes von Chlorverbindungen ermöglichen. Ein solcher Lösungsansatz ist die Kavitationsbehandlung. Die beim Blasenkollaps auftretenden Kavitationsimpulse im Blasenfeld, verbunden mit hohen lokalen Temperatur- und Druckgradienten, führen zu einer Denaturierung der Zellwände der Mikroorganismen und verhindern damit eine weitere Zellteilung. Die hier vorgestellten Forschungsergebnisse sind Bestandteil einer Verfahrensentwicklung zur Deaktivierung von Mikroorganismen in Prozesswasser mittels Kavitation. Für die kontinuierliche Prozesskontrolle und die gezielte Prozessführung ist außerdem der Zusammenhang zwischen der Reduzierung der Mikroorganismen und kontinuierlich messbaren Größen zur Prozesswassercharakterisierung wichtig. In den bisherigen Untersuchungen konnte mittels hydrodynamischer Kavitation eine Keimzahlreduzierung um 99 Prozent erreicht werden, wobei eine Erhöhung des pH-Wertes und des Redoxpotenzials festgestellt wurde. Das Kavitationsgebiet wurde in diesem Fall mit einer Venturidüse erzeugt. Das Redoxpotenzial ist ein Maß für die Belastung an Mikroorganismen im Wasser. Je niedriger das Redoxpotential, desto höher ist die Belastung an Mikroorganismen, da diese den Sauerstoff im Wasser verbrauchen. Abbildung 1 stellt Ergebnisse von DIP-SLIDE Tests aus zwei Versuchen sowie Änderungen des pHWerts und des Redoxpotenzials dar. Die Tests in Abbildung 1, links, zeigen Ergebnisse von mittels Kavitation behandeltem Prozesswasser, die Tests in Abbildung 1, rechts, zeigen Ergebnisse von unbehandeltem Prozesswasser zu gleichen Zeitpunkten. Es ist erkennbar, dass die Kavitationsbehandlung zu einer Änderung der Keimbelastung (KBE/ml) um zwei Größenordnungen (nach Hersteller-Skala in KBE/ml von 10^6 auf 10^4) geführt hat. Die Testergebnisse ohne Kavitationsbehandlung zeigen eine annähernd konstante Keimbelastung von 10^7 KBE/ml. Während des Versuches mit Kavitation konnte eine Zunahme des Redoxpotenzials von $\Delta E^0 = 47$ mV gemessen werden, ohne Kavitation verblieb es auf annähernd konstantem Niveau. Die Erhöhung des Redoxpotenzials korreliert mit der Abnahme an Mikroorganismen.

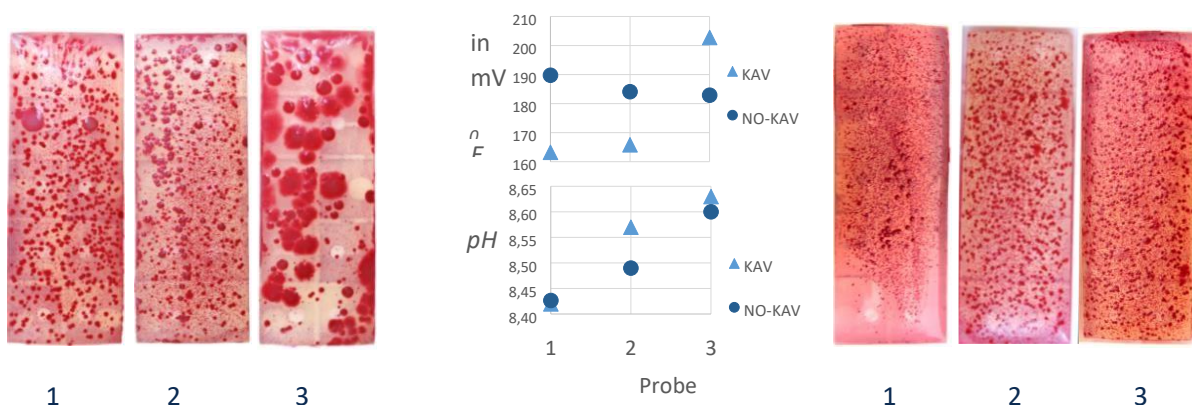




Abbildung 1: Vergleich von Tests und Messergebnissen aus Versuchen mit unbehandeltem und mittels Kavitation behandeltem Prozesswasser; Links: Behandlung mit Kavitation, Rechts: ohne Kavitation (nur Zirkulation im Versuchsaufbau), Mitte: Änderungen des pH-Wertes und des Redoxpotenzials; Zeitpunkte der Probennahmen: 1 – zu Behandlungsbeginn, 2 – zur Halbzeit der Behandlung, 3 – nach Abschluss der Behandlung

Kontakt: julius-alexander.noepel@tu-dresden.de



Viskoses Pumpen von Flüssigkeiten mit Kavitationsblasen

Robin Schädel, Hendrik Reese, Fabian Reuter, Claus-Dieter Ohl
Institution

If a cavitation bubble collapses near a solid wall, it generates a liquid jet that is directed towards the wall. If this wall is located between two liquid reservoirs and both are connected through a small hole below the bubble, the liquid jet could be used as a micro-pump. For this purpose, experiments were carried out by capturing single, optically generated cavitation bubbles via using high-speed videography. The flow between the two reservoirs is made visible by using liquids of different optical density via schlieren optics, evaluated and correlated with the bubble dynamics. The distance of the bubble to the wall is varied and analysed for the pumping behaviour. The experimental results are finally compared with volume of fluid simulations taking compressibility and viscosity into account. Different flow regimes with respect to the stand-off distance are identified and flow velocities are given.

Kontakt: robin.schaedel@ovgu.de



Modellierung und experimentelle Parametrierung von Dampf- und Gaskavitation in der Ölhydraulik

Osterland, Sven
TU Dresden

Das Auftreten von Kavitation in hydraulischen Komponenten und Systemen ist meist unvermeidbar und hat negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Maschinen und Anlagen. Die Weiterentwicklung hydraulischer Komponenten und Systeme hin zu höheren Leistungsdichten und Lebensdauern, wird dadurch herausgefordert. Zur Minimierung der negativen Effekte der Kavitation muss diese der numerischen Strömungssimulation zugänglich gemacht werden, um kavitationsbedingte Probleme bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess effizient und zielgerichtet identifizieren und Gegenmaßnahmen ableiten zu können.

In der Fachliteratur finden sich Modelle für Dampf- und Gaskavitation, welche jedoch nur sehr eingeschränkt auf ölhydraulische Strömungen übertragbar sind, da diese empirischen Parameter enthalten, welche für das Medium Wasser bestimmt wurden, jedoch für Mineralöl unbekannt sind.

In diesem Paper wird ein allgemeingültiges, praktikables und validiertes Berechnungsmodell für Dampf-, Gas- und Pseudokavitation in ölhydraulischen Strömungen inklusive ihrer empirischen Parameter zu vorgestellt.

Da Dampf- und Gaskavitation auf grundlegend unterschiedlichen physikalischen Prozessen beruhen, müssen diese sowohl im Experiment als auch in der CFD klar voneinander getrennt und analysiert werden. Auf der experimentellen Seite werden dazu komplexe Referenzversuche an einer realitätsnahen Ventilströmung durchgeführt und die kavitierende Strömung für zahlreiche realitätsnahe Betriebspunkte mittels Shadowgrafie visualisiert und detailliert untersucht. Mit dieser Methode und dem Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera wird die Kavitation hochauflösend in Raum und Zeit vermessen und quantifizieren. Der Versuchsstand zur Strömungsvisualisierung verfügt über einen speziellen luftdichten Hydrauliktank, in welchem die Menge der im Öl gelösten Luft beliebig eingestellt und mittels einer Clark-Elektrode gemessen werden kann. Durch die vollständige Entgasung des Öls ist es möglich, die Gaskavitation vollständig zu unterdrücken und somit Zustände der reinen Dampfkavitation sicherzustellen und diese separat zu vermessen.

Auf Seite der Strömungssimulation wird in Ansys CFX ein komplexes, ganzheitliches Euler-Euler Mehrphasenmodell aufgebaut. Die benötigten Stoffwerte des verwendeten Mineralöls werden experimentell bestimmt. Als Dampfkavitationsmodell wird das Modell von Zwart-Gerber-Belamri und als Gaskavitationsmodell das Modell von Lifante verwendet. Alle Phasen werden kompressibel modelliert. Der Einfluss der Turbulenzmodellierung auf die Kavitationsgebiete wird mit dem SST-Modell (RANS) und dem WALE-Modell (LES) untersucht. Es zeigt sich, dass eine LES-Turbulenzmodellierung für eine korrekte Beschreibung der Kavitationsgebiete zwingend notwendig ist, da nur so das momentane und lokale Druckfeld aufgelöst und damit die Kavitation richtig berechnet wird. Zur Rekonstruktion der Phasengrenzen und zur Quantifizierung der Kavitationsintensität wird die Methode der „virtuellen Shadowgrafie“ entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

Die berechneten Kavitationsintensitäten werden mit den experimentellen Ergebnissen sowohl räumlich verteilt als auch integral verglichen. Zunächst für die reine Dampfkavitation, im Anschluss für Dampf- und Gaskavitation werden verschiedene Modellparametersets systematisch mit den Versuchsergebnissen verglichen und die optimalen empirischen Modellparameter ermittelt. Die ermittelten Parameter werden durch den Vergleich der Kavitationsintensitäten über den gesamten Betriebsbereich validiert.

Für die Dampfkavitation konnte eine optimale Parametrierung des ZGB-Modells bestimmt werden, welche die räumlich verteilte und integrale Kavitationsintensität über den gesamten Betriebsbereich sehr gut berechnet. Für das Gaskavitationsmodell nach Lifante konnte eine Vorzugparametrierung bestimmt werden, welche die wesentlichen Aspekte der Gaskavitation praxistauglich abbildet.

In dem Forschungsprojekt gelungen ist, hochwertige und belastbare experimentelle Daten zur räumlichen Verteilung der Kavitation für unterschiedliche Betriebspunkte und Sättigungszustände des Öls mittels optischer Methoden direkt zu messen. Durch ein effektives Entgasungskonzept konnten dabei die Effekte der Dampf- und Gaskavitation klar voneinander getrennt werden.

Sehr kurz werden weiterführende experimentelle Ergebnisse zum Einfluss der im Öl gelösten Luft auf die Kavitationserosion präsentiert, welches zeigen, dass die Kavitationserosion in hydraulischen Komponenten durch Dampfkavitation hervorgerufen wird – nicht durch Gaskavitation. Im Gegenteil die durch Gaskavitation freiwerdende gelöste Luft dämpft den Massenabtrag durch Kavitationserosion um den Faktor 4,4-5,1. Die Ergebnisse zum Einfluss der gelösten Luft auf die Kavitationserosion sind in /1/ detailliert dargestellt.

Die präsentierten Ergebnisse und die für Mineralöl parametrisierten Kavitationsmodelle ermöglichen die simulative Weiterentwicklung und Optimierung hydraulischer Komponenten unter Einbeziehung der Kavitation. Die Ergebnisse der Erosionsversuche zeigen, dass die Weiterentwicklung von hydraulischen Komponenten und Systemen hin zur Verwendung von luftfreiem Öl oder steigenden Leistungsdichten durch die Kavitationserosion überproportional herausgefordert sein wird.

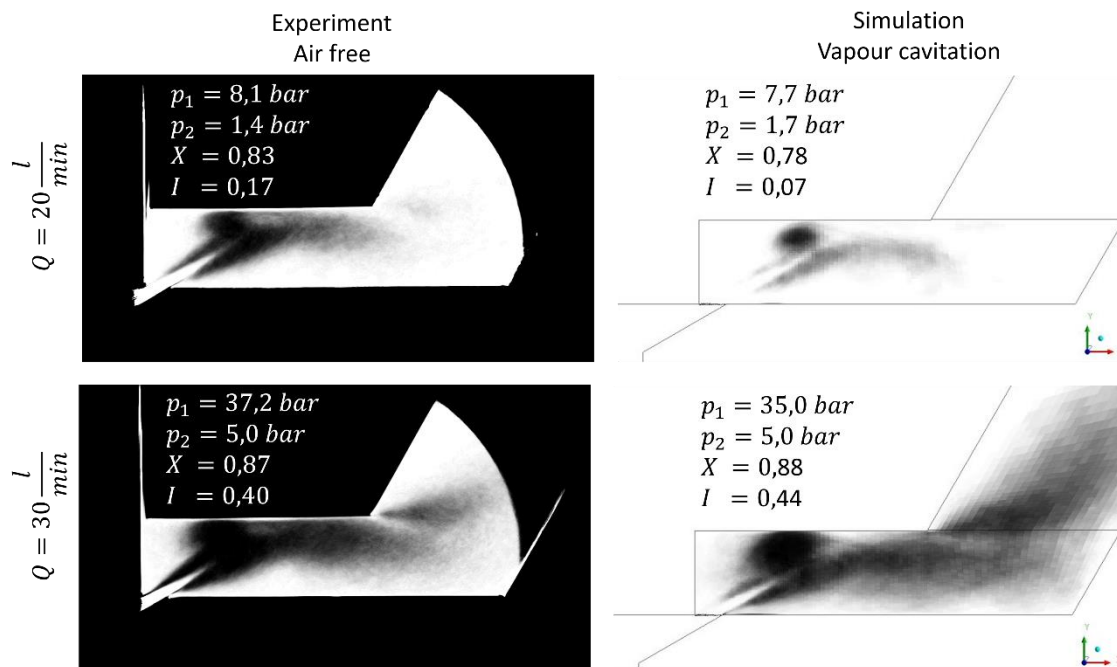


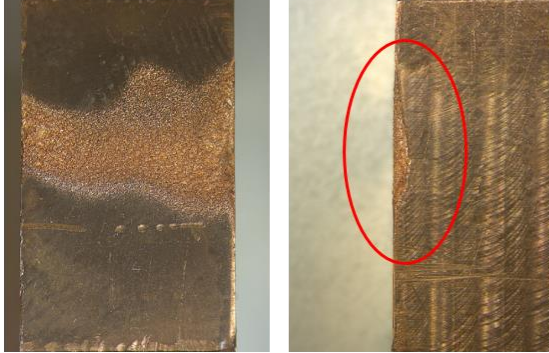
Figure 1: Comparison of the spatial distribution of cavitation intensities between air-free experiments and the simulation with pure vapour cavitation with optimal parameters; Grey scalar corresponds to bubble presence probability; X – cavitation coefficient, I – integral cavitation intensity

Air-free hydraulic oil

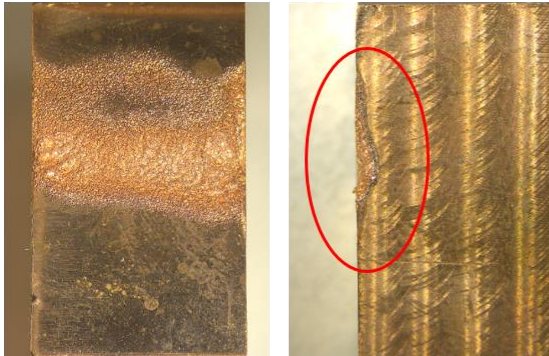
Top view

Side view

Test V08: mass loss: **24.2mg**



Test V10: mass loss: **24.1mg**

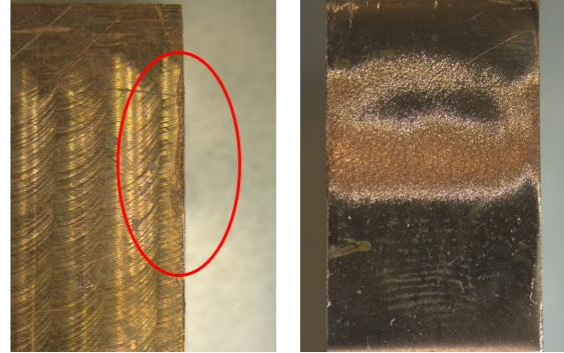


Air-containing hydraulic oil

Side view

Top view

Test V09: mass loss: **5,5mg**



Test V11: mass loss: **4,7mg**

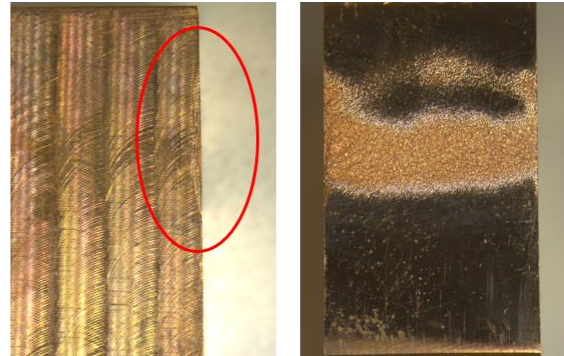


Figure 2: Copper samples eroded by cavitation; (V08 and V10: air-free; V09 saturated; V11 oversaturated); Much higher mass loss in absents of (dissolved) air $\Delta p = 143 \text{ bar}$, $Q = 97,5$, $T = 40^\circ\text{C}$, $t = 5h$

References

- /1/ Zwart, P.J, Gerber, A.G., Belamri T. A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics, ICMF, Yokohama, 2004
- /2/ Lifante, C, Frank, T. Untersuchung der Druckschwankungen höherer Ordnung am Hinterschiff unter Berücksichtigung der Kavitation am Propeller, Abschlussbericht ANSYS Germany, Otterfing, 2008
- /3/ Osterland, S., Müller L., Weber J. Influence of air dissolved in hydraulic oil on cavitation erosion. International journal of fluid power, 2021, In Review



Cavitation control of sheet and unsteady cloud cavitation using miniature vortex generator (MVG)

Ebrahim Kadivar

Institute of Ship Technology, Ocean Engineering and Transport Systems, University of
Duisburg-Essen, 47057 Duisburg, Germany

Email: ebrahim.kadivar@uni-due.de

Abstract:

Cavitation can appear on ship rudders and propellers due to the collapse of cavitation bubbles near the solid surfaces. Cavitation causes structural vibration, noise emissions and erosion in the maritime and hydraulic machinery systems. Measures to reduce or avoid undesirable cavitation-related consequences may importantly contribute to a better economic operation of ships and hydraulic machinery. This work deals with developing efficient passive flow control method to control and suppress the deleterious effects of cavitation in different cavitating regimes such as sheet and cloud cavitation. For this aim, a wedge-type miniature vortex generator (MVG) was developed to control the cavitation and to stabilize the cavitation-induced instabilities. First, a high-speed visualization of cavitation around hydrofoil without cavitation control was performed to analyze the cavitation dynamics. Second, a particle image velocity technique was applied to measure the mean flow velocity profiles around the surface and in the wake region. Third, a hydroacoustic measurement was carried out to record local pressure pulsations in the wake region of the hydrofoil. Finally, the effects of the cavitation control on the quantitative parameters such as pressure pulsations, velocity profiles and shedding frequency were analyzed and compared with the hydrofoil without cavitation control. The results showed that the amplitude of the pressure pulsations induced by the cavity collapse near the wake region of the hydrofoil were mitigated for the hydrofoil with the effect of MVG. The results also revealed that the implemented cavitation control method is an effective method to mitigate the cavitation regions and to suppress the unsteady behavior of the cavitation.



Methode zur Kopplung von Strömungssimulation und einem Erosionsmodell zur quantitativen Vorhersage von Erosion

F. Schreiner, M. Haese, R. Skoda

Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen, Ruhr-Universität Bochum

Zur Simulation zweier gängiger Testfälle zur Untersuchung von Kavitationserosion – eine rotationssymmetrische Düse (Grenoble-Testfall) [1] und eine standardisierte Ultraschall-Sonotrode – wird ein kompressibler dichtebasierter in-house Strömungslöser verwendet. Durch eine zeitliche Auflösung im Bereich von Nanosekunden werden Druckwellenausbreitung und -stöße abgebildet. Mit diesem Verfahren konnten an beiden Testfällen die Strömungsaggressivität berechnet und erosionsensitive Wandbereiche reproduziert werden [2,3,4]. Erste Ergebnisse mit einem gekoppelten CFD-Erosionsmodell zur Berechnung der Inkubationszeit konnten von [4,5,6] erzielt werden. Eine Berechnung des zeitlichen Fortschreitens der Erosion in Form der Materialabtragsrate ist bisher noch nicht erfolgt.

Die zitierten Arbeiten basieren auf einer direkten Kopplung von wandnah detektierten Einzelblasenkollapsen mit einem Erosionsmodell für duktile Stähle [1]. Es hat sich gezeigt, dass der Ort der minimalen Inkubationszeit falsch vorhergesagt wird, was auf eine Übergewichtung von selten auftretenden, starken Kollapsen und Vernachlässigung von häufigen, schwächeren Lasten zurückgeführt wird. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird ein CFD-Lastkollektivmodell vorgeschlagen, das auf Micro-Jet und Joukowski-Stoß aufbaut. Dabei wird angenommen, dass selbst moderate Drücke $O(10 \text{ bar})$ als treibende Kraft eines Joukowski-Stoßes zu einem potentiell erosiven Strömungszustand führen. Um eine Überschätzung erosiver Zustände bei hohem Systemdruck auszuschließen, wird als zusätzliche Bedingung für einen erosiven Strömungszustand eine hohe Kondensationsrate überprüft. Die Kopplung des resultierenden CFD-Lastkollektivs an das Erosionsmodell [1] zeigt eine gute Übereinstimmung des Ortes der minimalen Inkubationszeit mit den experimentell ermittelten Erosionszonen. Zur quantitativen Bestimmung von Inkubationszeit und Abtragsrate ist allerdings eine testfallabhängige Kalibrierung des Lastkollektiv-Modells erforderlich. Es kann davon ausgegangen werden, dass für ein prädiktives Modell die Strömungszusammenhänge auf der Mikroskala, also z.B. der Mikro-Jet, direkt aufgelöst werden müssen.

Das gekoppelte CFD-Lastkollektiv-Erosionsmodell kann aufgrund des modularen Ansatzes auf weitere CFD-Löser und ggf. Erosionsmodelle ausgeweitet werden.

- [1] Franc, J. P., 2009. Incubation time and cavitation erosion rate of work-hardening materials, *Journal of Fluids Engineering*, **131**, 0213031–02130314. doi: 10.1115/1.3063646.
- [2] Schreiner, F., Hanke, S., Skoda, R., 2021. Assessment of flow aggressiveness and erosion damage topography for different gap widths in ultrasonic cavitation testing, *Wear*, **484–485**, 203989. doi: 10.1016/j.wear.2021.203989
- [3] Mihatsch, M. S., Schmidt, S. J., Adams, N. A., 2015. Cavitation erosion prediction based on analysis of flow dynamics and impact load spectra, *Physics of Fluids*, **27**:103302. doi: 10.1063/1.4932175
- [4] Mottyll, S., 2017. Numerical 3D Flow Simulation of Cavitation at Ultrasonic Horns and Assessment of Flow Aggressiveness, Erosion Sensitive Wall Zones and Incubation Time, Ruhr University Bochum, PhD Thesis.
- [5] Mihatsch, M. S., 2016. Numerical Prediction of Erosion and Degassing Effects in Cavitating Flows, TU Munich, PhD Thesis.
- [6] Schreiner, F., Mottyll, S., Skoda, R., 2019. A Method for the Coupling of Compressible 3D Flow Simulations with a Cavitation Erosion Model for Ductile Materials and Assessment of the Incubation Time, Proc. in the VIII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE 2019), R. Bensow and J. Ringsberg (editors), pp 83-98. Gothenburg, Sweden

E-Mail: felix.schreiner@ruhr-uni-bochum.de, Internetseite: www.hsm.rub.de



Investigation of Inertial Cavitation of Sonosensitive and Biocompatible Nanospheres in Flow Through Tissue Mimicking Phantoms Employing Focused Ultrasound

Benedikt George

[Department of Microsystems Engineering - IMTEK](#), Laboratory for Electrical Instrumentation and Embedded Systems, Albert-Ludwigs-University Freiburg, Freiburg, Germany, benedikt.george@imtek.uni-freiburg.de

Ula Savsek, Department of Chemistry and Pharmaceuticals, Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany, ula.savsek@fau.de

Dagmar Fischer, Department of Chemistry and Pharmaceuticals, Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany, dagmar.fischer@fau.de

Helmut Ermert, Section of Experimental Oncology and Nanomedicine, University Hospital Erlangen, Erlangen, Germany, helmut.ermert@fau.de

Stefan J. Rupitsch, [Department of Microsystems Engineering - IMTEK](#), Laboratory for Electrical Instrumentation and Embedded Systems, Albert-Ludwigs-University Freiburg, Freiburg, Germany, stefan.rupitsch@imtek.uni-freiburg.de

Introduction

In drug delivery applications for chemotherapeutics, a promising approach is the use of drug carriers to reduce the total amount of cytostatics while minimizing side effects. In addition, the carriers, loaded with the drug, can be guided to the tumorous tissue via the vascular system, allowing a local drug release. In our case, drug release is activated due to the sonosensitive behavior of the nanospheres by inertial cavitation caused by focused ultrasound. For measuring the cavitation effect, a passive cavitation detection (PCD) setup has been employed. So far, the nano carriers were simply filled in laboratory vessels, which did not mimic blood vessels in tissue. Now, we designed flow-through tissue mimicking phantoms to investigate the cavitation behavior in thin vessels as well as to verify our drug delivery approach for its clinical suitability.

Methods

The flow-through tissue-mimicking phantoms feature a square cross sectional layout which each having a centrally extending channel representing a blood vessel. The phantoms have lateral edge lengths of 20, 40, and 60 mm, the diameters d_c of the vessel mimicking flow-through channels are 1, 2, and 3 mm, respectively, which are typical blood vessel diameters. The phantoms' material consist of a polyvinyl alcohol-water mixture whose sound velocity and acoustic wave impedance are comparable to the corresponding values of biological tissue. Cavitation is excited by a burst signal with the characteristic parameters burst length = 0.6 ms, duty cycle = 0.02%, frequency $f = 750$ kHz, wavelength $\lambda \approx 1.5$ mm, negative pressure amplitude = 1.25 MPa yielding the mechanical Index $MI \approx 1.44$. Thus, the maximal $MI = 1.9$, allowed for diagnostic ultrasound levels, is not exceeded. During the cavitation investigation, the nanospheres are pumped through the phantom. The flow velocities correspond to the physiological velocities in blood vessels ($v_f = 0.05$ m/s - 0.1 m/s).

Results

Investigations have shown that the drug releasing cavitation effect associated to the sonosensitive and biocompatible nanospheres also occurs in fine vessel structures, even in the case of vessel diameters $d_c < \lambda$. These results confirm the applicability of our drug delivery approach in chemotherapy.

Kontakt: benedikt.george@imtek.uni-freiburg.de

FLUID DYNAMICS AND DAMAGE ANALYSIS IN RESONANT ACOUSTOFLUIDIC NEBULIZERS

Roudini, M and Winkler, A

Leibniz Institute for Solid State and Materials Research Dresden, Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden, Germany

Compact Surface Acoustic Wave (SAW) atomizers are attracting widespread interest in many technical processes due to their capability to create directed fine mist aerosols with a narrow size distribution which are difficult to obtain with conventional atomizers. They show considerable advantages over other conventional nebulizers, and, in particular, ultrasonic atomization, in that they use significantly less power, do not require moving parts, orifices (e.g., nozzles) or meshes, and are suited to produce micrometer-sized droplets with adjustable diameters between approximately 0.5 and 30 μm . SAW atomizers operate by interaction of standing or traveling wave excited on the surface of a piezoelectric substrate with a liquid film placed in its propagation path (Fig 1). The adjustable droplet size range by means of a simple chip-scale platform is demonstrated as possible key components for various applications, including miniaturized inhalation therapy [1], material deposition [2,3], liquid chromatography / spectroscopy [4,5] and olfactory displays [6]. However, the physical origin of the SAW-generated aerosol remains still unclear, limiting predictable device design.

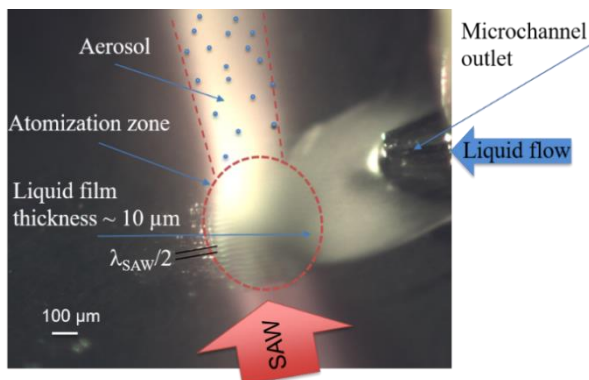


Fig 3– Water film, acoustically generated and stabilized by interaction of SAW with a microchannel outlet on piezoelectric LiNbO_3 coated with 500nm SiO_2 during aerosol generation; standing waves formed in front region lead to modulation of film height, visible as parallel stripes with $\lambda/2$ distance.

When high-frequency acoustic waves are excited with high power or in resonant systems, as required for microfluidic applications including fluid atomization and acoustic tweezers, with very high local amplitudes (up to 10 nm) can lead to damages on the substrate. During the analysis of acoustofluidic chips, a yet unknown damage mechanism of the substrate surface, i.e. the native LiNbO_3 surface, the overlying SiO_2 layer or the finger electrodes was observed. This damage mechanism leads to a detachment of initially small, later larger particles from the substrate (shown in Fig 4), which can lead to functional impairment or even failure of the device. The damages occur in the regions of high SAW amplitude within the atomization zone following the standing wave nodes, or if travelling waves are applied, in an extended surface region. In each investigated case, an overlying liquid film was required for the damage, while the other areas of the chip exposed to high SAW amplitudes remained intact. Chemical or electrochemical corrosion can be excluded for the materials used and the timescale is much too small for acoustic-/stress migration.

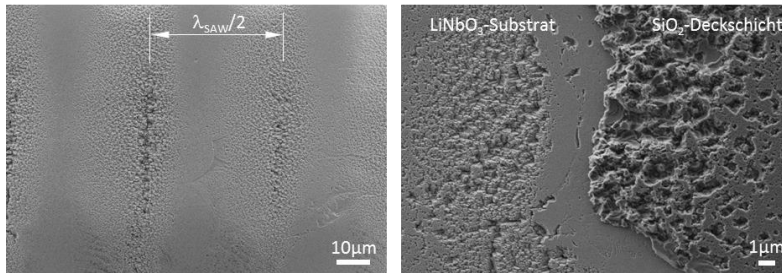


Fig 4 – SEM image of typical damage pattern in the atomization zone after prolonged exposure to a standing SAW during the liquid atomization on the surface of a) a LiNbO_3 substrate and b) in a region of a damaged and partially detached SiO_2 cover layer on LiNbO_3 substrate with commencing substrate damage.

A possible explanation for the observed patterns of the damages provide the mechanism of cavitation erosion. In the literature, the occurrence of the cavitation at high frequencies (above 10 MHz) as used for the liquid atomization or acoustic tweezers has been estimated as unlikely or non-existent [1,7-9]. For SAW acoustofluidic devices, however, a resonance of the longitudinal pressure wave in an acoustically stabilized liquid film or a fluid inside a microchannel is the cause, whereby local high-pressure differences can occur. The existence of the observed damage mechanism is highly critical for resonant acoustofluidic devices as it can reduce the device lifetime, alter the device behavior and cause micro-/nanoparticle generation critical for future human medical devices.

Kontakt: m.roudini@ifw-dresden.de

References

- [1] A. Rajapaksa, A. Qi, L. Y. Yeo, R. Coppel, and J. R. Friend, *Lab on a Chip* **14**, 1858 (2014).
- [2] A. Winkler, A. Kirchner, P. Bergelt, R. Hühne, and S. Menzel, *Journal of Sol-gel science technology* **78**, 26 (2016).
- [3] M. Darmawan, K. Jeon, J. M. Ju, Y. Yamagata, and D. Byun, *Sensors and Actuators A: Physical* **205**, 177 (2014).
- [4] L. Monkkonen, J. S. Edgar, D. Winters, S. R. Heron, C. L. Mackay, C. D. Masselon, A. A. Stokes, P. R. Langridge-Smith, and D. R. Goodlett, *Journal of Chromatography A* **1439**, 161 (2016).
- [5] Y. Huang, S. H. Yoon, S. R. Heron, C. D. Masselon, J. S. Edgar, F. Tureček, and D. R. Goodlett, *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* **23**, 1062 (2012).
- [6] T. Nakamoto, K. Hashimoto, T. Aizawa, and Y. Ariyakul, in *Frequency Control Symposium (FCS), 2014 IEEE International (IEEE, 2014)*, pp. 1.
- [7] A. Qi, L. Yeo, J. Friend, and J. Ho, *Lab on a Chip* **10**, 470 (2010).
- [8] L. Bllaci, S. Kjellström, L. Eliasson, J. R. Friend, L. Y. Yeo, and S. Nilsson, *Analytical Chemistry* **85**, 2623 (2013).
- [9] L. Y. Yeo and J. R. Friend, 605 (2010).



Cavitation on and in the cells

Borich, Anna