

# Messtechnische Untersuchungen der Kavitationswirkung in der Ultraschallreinigung

Jens Strobel<sup>1 2</sup>, Nina Bretz<sup>1 2</sup>, Maximilian Staudacher<sup>2</sup>, Reinhard Lerch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen-Nürnberg, 91052, Erlangen, Deutschland

<sup>2</sup> CR/APT1, Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart, Deutschland, Email: Jens.Strobel@lse.eei.uni-erlangen.de

## Einleitung

In der industriellen Fertigung besitzt die ultraschallunterstützte Tauchreinigung als kostengünstiges und effizientes Reinigungsverfahren ein breites Einsatzspektrum. Durch den wachsenden Anteil präzisionsgefertigter Bauteile steigen die Anforderungen an die Reinigungsqualität stetig. Gleichzeitig besteht das Ziel der Verkürzung der Reinigungszeiten.

Der Hauptreinigungseffekt wird durch die Mechanismen beim Kollaps von Kavitationsblasen in der Nähe der Bauteiloberfläche erreicht. Hierzu wird ein quantitatives Verfahren zur Messung der lokalen Reinigungswirkung durch Kavitationserosion vorgestellt. Die Wirkung der Einflussparameter Ultraschallanregung, Gasgehalt und Oberflächenspannung auf das Schallfeld und das Reinigungsergebnis wird untersucht.

## Experimenteller Aufbau

Für die Untersuchungen wird ein rotationssymmetrischer Aufbau nach Abbildung 1 verwendet. Dabei ermöglicht die optische Zugänglichkeit durch die Verwendung eines Plexiglaszylinders eine direkte Beobachtung der zu untersuchenden Reinigungsvorgänge. Um unabhängig von der Eigenerwärmung durch Kavitation auf eine konstante Temperatur zu regeln, kann mit einer Infrarot-Wärmequelle berührungslos ohne Schallfeldstörung Wärme eingebracht werden. Die resultierende Schallfeldverteilung wird mit einem Hydrophon Reson TC 4013 gemessen. Die Ansteuerung des Ultraschallwandlers erfolgt über einen Funktionsgenerator und einen Verstärker.

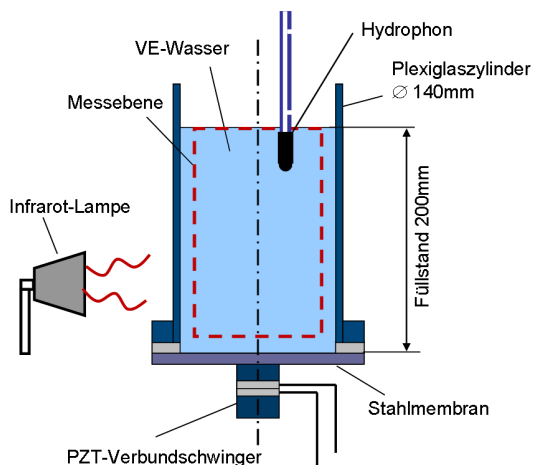


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau

## Kavitationstestschicht

Es wurde eine Testschicht zur quantitativen Bestimmung von Kavitationserosion auf Bauteiloberflächen und ein Bildverarbeitungsverfahren zur Übertragung in ein Maß der Reinigungswirkung entwickelt. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, Reinigungsuntersuchungen bei Variation von Einflussgrößen durchzuführen. Die Reproduzierbarkeit der Kavitationsbeständigkeit ermöglicht hieraus die Ableitung optimierter Parameter.

Untersuchungen zu Mechanismen beim Kavitationsangriff auf einer Oberfläche sind aus der Literatur bekannt. Neben der Beschreibung der abgestrahlten Leistung beim wandnahen Blasenkollaps existieren Modelle zur energetischen Betrachtung des Materialverhaltens bei Kavitationseinwirkung [2]. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde ein Testschichtaufbau bestehend aus einem galvanisch abgeschiedenen 3-Schichten-System entwickelt. Dabei wird direkt auf dem Grundkörper Nickel zur vergleichbaren Haftvermittlung auf verschiedenen Grundmaterialien aufgebracht. Um die Schichtabtragung der oberen Testschicht aus Kupfer an praxisrelevante Reinigungsdauern anzupassen, wurde eine Zwischenschicht aus Zinn zur definierten Herabsetzung der Testschichthaftung eingebracht.

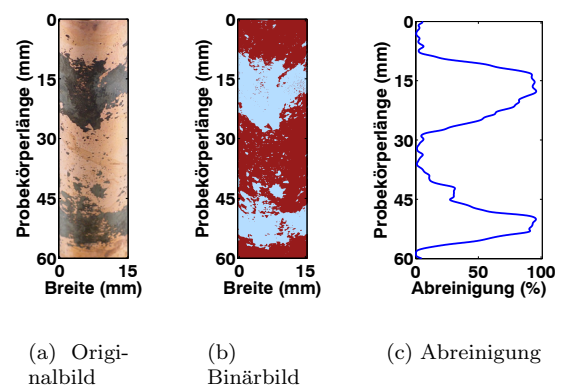


Abbildung 2: Bildverarbeitung der Testschichtablösung in ein Reinigungsmaß

Die Auswertung der Abreinigung erfolgt über eine eigens dafür entwickelte Bildverarbeitung. Hierbei wird der rote Farbkanal aus dem Originalbild extrahiert, eine Kompensation unterschiedlicher Beleuchtungsverteilung durchgeführt und über einen dynamischen Grauwertlevel in ein Binärbild überführt. Das Vorgehen ist in Abbildung 2 verdeutlicht.

## Einflussparameter

Den maßgeblichsten Einfluss bei der Kavitation besitzt die lokale Druckamplitude als treibende Kraft beim Aufziehen und Kollaps der Kavitationsblasen. Die Korrelation von Reinigungswirkung und Schalldruckverteilung konnte durch die Kavitationstestschicht nachgewiesen werden. In Untersuchungen wurde der Zusammenhang von Anregung und Schallfeldausbildung im Medium bewertet. Die Ergebnisse der mittleren Druckamplitude entlang der Zylindermittelachse bei konstanter Anregungsfrequenz von 27,2 kHz verdeutlicht Abbildung 3.

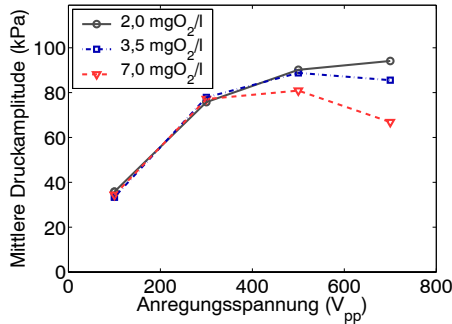


Abbildung 3: Mittlere Druckamplitude entlang der Zylindermittelachse bei Variation der Anregungsspannung

Dabei zeigt sich ein gedämpfter Druckanstieg ab dem Einsetzen von Kavitation im Medium bei circa 300  $V_{pp}$ . Deutlich ist der Effekt des Gehalts an gelöstem Gas zu erkennen. Hierzu wurde der Sauerstoffanteil, repräsentativ für den relativen Gesamtgasgehalt, über ein titrimetrisches Verfahren mit den Testset Aquamerck der Firma Merck bestimmt. Verstärktes Ausgasen führt zur Bildung massiver Blasenstrukturen, die schallreflektierend und absorbierend wirken.

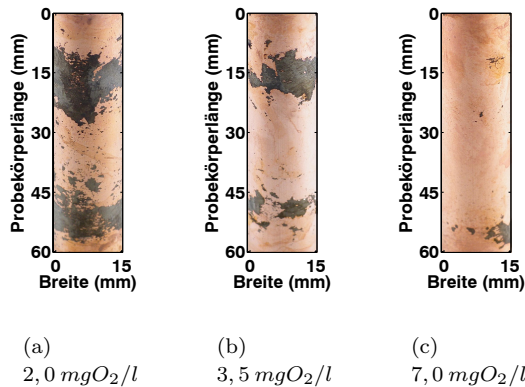


Abbildung 4: Einfluss des Gasgehalts auf das Reinigungsergebnis nach 30 s Ultraschallreinigung bei einer Anregungsspannung von 700  $V_{pp}$  (dunkle Zonen entsprechen Testschichtablösung)

Die sich daraus ergebende starke Rückwirkung des Gasgehalts auf das Reinigungsergebnis veranschaulicht die Testschichtablösung auf zylindrischen Probekörpern in Abbildung 4.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Oberflächenspannung, welche die Blasenoberfläche stabilisiert,

aber auch der Blasenwandbewegung beim Aufweiten entgegensteht. Das statische Druckgleichgewicht nach Gl. 1 leitet sich aus der Young-Laplace-Gleichung ab. Dabei stehen den äußeren Kräften aus Umgebungsdruck  $p_\infty$  und resultierendem Druck der Oberflächenspannung  $\sigma$  bei einem Blasenruheradius  $R_0$  der Gegendruck im Inneren der Blase durch die Summe aus Gaspartialdruck  $p_G$  und Dampfdruck  $p_V$  entgegen [1]

$$p_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} = p_G + p_V. \quad (1)$$

In Untersuchungen wurde die Schalldruckamplitude entlang der Mittelachse des Plexiglaszylinders bei 26 kHz, 200 mm Füllstand und einer Anregungsspannung am Ultraschallwandler von 100  $V_{pp}$  betrachtet. Dabei konnte eine deutliche Reduktion der Druckamplitude (vgl. Abbildung 5) bei steigender Tensidkonzentration, d.h. sinkender Oberflächenspannung, festgestellt werden, welche asymptotisch beim Erreichen des CMC-Wertes (Oberfläche komplett mit Tensid belegt) abklingt. Die Ergebnisse korrelieren mit Untersuchungen von Iwai et al. [3]. Bei sinkender Oberflächenspannung wird eine größere Anzahl von Gasblasen stabilisiert, die reflektierend und dämpfend auf das Druckfeld wirken.

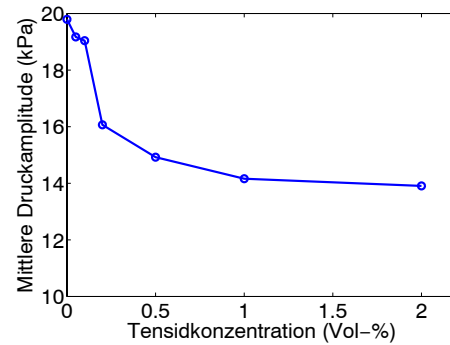


Abbildung 5: Mittlere Druckamplitude bei Variation der Tensidkonzentration (Vol-%)

## Zusammenfassung

Eine durch Tensidzugabe reduzierte Oberflächenspannung führt ebenso wie ein erhöhter Gasgehalt zur verstärkten Stabilisierung von Gasblasen und zur Herausbildung komplexer, schallabsorbierender Blasenstrukturen. Daraus resultiert eine Dämpfung des Schalldrucks und eine reduzierte Reinigungswirkung.

## Literatur

- [1] BRENNEN, C. E.: *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, 1995
- [2] DULAR, M. ; STOFFEL, B. ; SIROK, B. : Development of a cavitation erosion model. In: *Wear* 261 (2006), S. 642 – 655
- [3] IWAI, Y. ; LI, S. : Cavitation erosion in waters having different surface tensions. In: *Wear* 254 (2003), S. 1 – 9