

Experimentelle Untersuchungen zur Kavitation und Reinigungswirkung in der Ultraschallreinigung

Jens Strobel^{1,2}, Nina Bretz^{1,2}, Reinhard Lerch¹

¹ Lehrstuhl für Sensorik, Universität Erlangen-Nürnberg, 91052, Erlangen, Deutschland

² Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart, Deutschland, Email: Jens.Strobel@de.bosch.com

Einleitung

Ultraschall hoher Intensität wird in der Tauchreinigung präzisionsgefertigter Bauteile eingesetzt. Der Forderung nach Verkürzung der Prozessdauer bei gleichzeitig steigender Reinigungsqualität werden heutige empirische Ansätze bei der Auslegung von Reinigungsbädern in zunehmendem Maße nicht mehr gerecht. Für eine optimale, an das Bauteil angepasste Reinigung ist ein erweitertes Prozessverständnis erforderlich. Der Hauptreinigungseffekt wird durch die Mechanismen beim Kollaps von Kavitationsblasen in der Nähe der Bauteiloberfläche erreicht. Für eine Charakterisierung der Ultraschallreinigung ist es deshalb neben der Ermittlung der Schalldruckverteilung erforderlich, Kavitationserscheinungen wie Blasenverhalten und Erosionswirkung zu untersuchen.

Experimenteller Aufbau

Für die Untersuchungen wurde ein rotationssymmetrischer Aufbau nach Abbildung 1 verwendet. Die optische Zugänglichkeit durch die Verwendung eines Plexiglaszylinders ermöglicht eine direkte Beobachtung der zu untersuchenden Abreinigungsvorgänge.

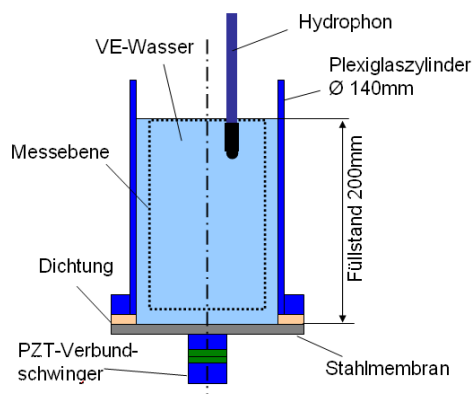


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau

Die im Folgenden gezeigten Untersuchungen wurden bei einer Anregungsfrequenz f von 27, 2kHz und einer Sinus-Anregungsspannung von $600V_{pp}$ durchgeführt. Durch Eigenerwärmung erreicht das Medium dabei eine Temperatur von ca. 43°C . Die resultierende Schallfeldverteilung, bestimmt mit einem Hydrophon Reson TC 4013, ist in Abbildung 2 dargestellt. Es zeigt sich eine horizontale Schichtung der Schalldruckmaxima mit einem Abstand h zur schallweichen Grenzfläche Medium / Luft von [1] :

$$h = \frac{n}{4} \cdot \frac{c}{f}$$

mit $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ und $c = 1534\text{m/s}$

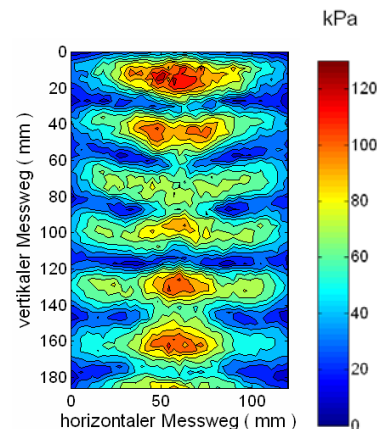


Abbildung 2: Amplitude des Schallwechseldrucks

Kavitationstestschicht zur Reinigungsbewertung

Ziel ist die Entwicklung einer Testschicht für Kavitationserosion und einer Bildverarbeitung zur Übertragung in ein Maß der Reinigungswirkung. Diese Testschicht soll auf metallische Prüfkörper aufgebracht zur Standardisierung der Ultraschallreinigung dienen.

Aus der Literatur ist Kavitationserosion bei duktilen Metallen bekannt, so untersuchten Dular [2] et al. Strömungskavitation bei Kupfer, Moussatov [3] et al. auf Bleiplatten.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde eine Testschicht auf Basis eines galvanisch abgeschiedenen 3-Schichten-Systems entwickelt. Dabei wird direkt auf dem Grundkörper eine Haftvermittlungsschicht aufgebracht, die eine vergleichbare Kavitationsbeständigkeit des Testschichtaufbaus auf verschiedenen Grundmaterialien ermöglicht. Um die Schichtabtragung der eigentlichen, oberen Testschicht aus Kupfer an praxisrelevante Reinigungsdauern anzupassen, wurde eine Zwischenschicht zur definierten Herabsetzung der Testschichthaftung eingebracht.

Die Auswertung der Abreinigung erfolgt über eine entwickelte Bildverarbeitung. Hierzu wird das Bauteil nach erfolgter Reinigung unter definierten Beleuchtungsverhältnissen mehrfach abgelichtet, um über der gesamten Bauteiloberfläche Erosionszonen zu detektieren. Ausgewertet wird die Grauwertinformation des roten Farbka-

nals (vgl. Abbildung 3). Ein möglicher Helligkeitsverlauf wird durch eine FFT-Filterung kompensiert. Die verbleibende Testschichtbelegung wird bei diesen Prüfkörpern über eine radiale Mittelung des Grauwerts aus den erzeugten Binärbildern berechnet.

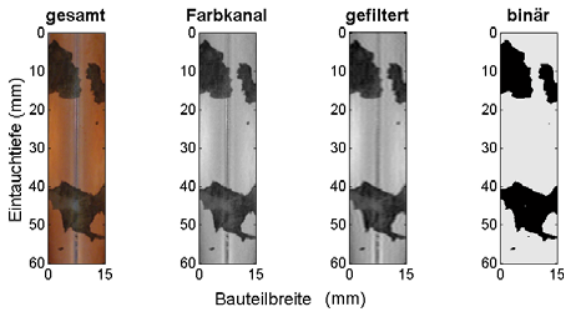


Abbildung 3: Abreinigungsbewertung im roten Farbkanal (dunkle Zonen entsprechen Testschichtabtrag)

Reinigungsuntersuchungen

Prüfkörper mit einer Testschichtdicke von $1\mu\text{m}$ wurden nacheinander entlang der Mittelachse in das kavitierende Schallfeld nach Abbildung 2 für eine Dauer von 5 Minuten eingebracht. Das Ergebnis der Abreinigung stellt Abbildung 4 dar. Die Gegenüberstellung mit der im Bereich der Bauteilbreite radial gemittelten Schalldruckverteilung zeigt die erwartete Korrelation von Schalldruckmaxima mit größtem Reinigungseffekt.

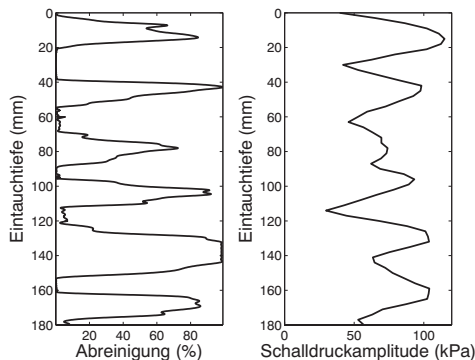


Abbildung 4: Schichtabreinigung entlang der Mittelachse

Zur Bestimmung des Einflusses der Reinigungsdauer wurden die gleichen Prüfkörper in der Schallfeldmitte direkt unterhalb der Wasseroberfläche eingebracht. Abbildung 5 zeigt das Resultat. Zwar lassen die Versuche eine Verbesserung der Abreinigung mit zunehmender Reinigungsdauer erkennen, jedoch ist in den Schalldruckminima auch nach langer Zeit keine Reinigungswirkung zu erreichen. Aus diesem Grund wurden Prüfkörper entlang der Mittelachse um 60mm in einer kontinuierlichen Bewegung während einer Dauer von ebenfalls 5 Minuten verfahren. Hierdurch konnte eine optimale, homogene Abreinigung von fast 100% über der gesamten Bauteiloberfläche erreicht werden.

Zur Anpassung an unterschiedliche Reinigungsaufgaben

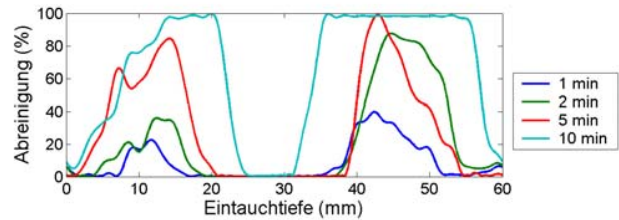


Abbildung 5: Einfluss der Reinigungsdauer

kann die Dicke der Kupferschicht variiert werden. Die mit einer Versuchsdauer von 2 Minuten durchgeführten Untersuchungen nach Abbildung 6 belegen die dadurch gezielt einstellbare Kavitationsbeständigkeit. Die Testschicht kann deshalb bei der Prozessüberwachung sowohl als Prüfverfahren für minimal erforderliche Reinigungswirkung als auch zur Überwachung der zulässigen oberen Grenze (Bauteilbeschädigung) genutzt werden.

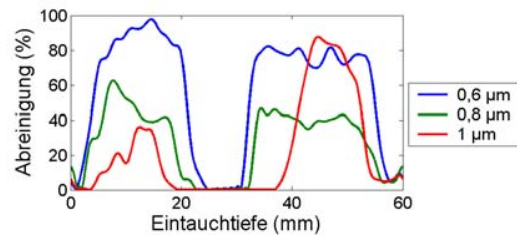
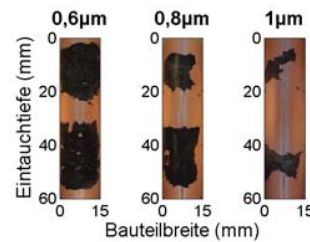


Abbildung 6: Einfluss der Testschichtdicke

Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass der entwickelte 3-Schicht-Aufbau der Kavitationstestschicht auf Prüfkörpern aufgebracht ein reproduzierbares Maß der Reinigungswirkung liefert. Über die Variation der Testschichtdicke kann das Verfahren an unterschiedliche Reinigungsanforderungen angepasst werden.

Literatur

- [1] BLEVINS, R. D.: *Formulas for natural frequency and mode shape*. Malabar, Florida : Krieger Publishing Company, 1979
- [2] DULAR, M. ; BACHERT, B. ; STOFFEL, B. ; SIROK, B. : Relationship between cavitation structures and cavitation damage. In: *Wear* 257 (2004), S. 1176 – 1184
- [3] MOUSSATOV, A. ; GRANGER, C. ; DUBUS, B. : Ultrasonic cavitation in thin liquid layers. In: *Ultrasonics Sonochemistry* 12 (2005), S. 415 – 422