

# Objektive Parameter zur Bestimmung der Wirkung von Kavitation

Matthias Jüschke, Christian Koch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 38116 Braunschweig, Bundesallee 100

E-Mail: christian.koch@ptb.de

## Einleitung

Bei der Planung, Dimensionierung und Optimierung von ultraschallunterstützten Prozessen in Industrie und Medizin werden sehr häufig Methoden angewandt, die auf empirischem Wissen oder Erfahrung beruhen. Objektive Anforderungen an Ausgangsgrößen wie z. B. die Reinigungsqualität können so nur schwer umgesetzt werden. Auch im internationalen Vergleich gibt es keinerlei Normen oder Absprachen, so dass Vergleiche zwischen Geräten oder Methoden nicht möglich sind. Hinzu kommt, dass alle Vorgänge sehr stark parameterabhängig sind, was eine Vorhersage weiter einschränkt.

Eine deterministische Modellierung und Beschreibung der Vorgänge z. B. durch numerische Modelle aller Wechselwirkungen hat sich als für praktische Fälle undurchführbar erwiesen. Eine Alternative ist die Konzentration auf die Anwendungseigenschaften und damit phänomenologische Parameter. In diesem Beitrag wird vorgeschlagen, Kavitationsprozesse mit vier Modellprozessen zu beschreiben, die unterschiedliche Aspekte der Kavitationswirkungen erfassen. Damit können die Prozesse auf unterschiedlichen Ebenen charakterisiert und die Ergebnisse anwendungsspezifischen Aspekten zugeordnet werden.

Eine wesentlich Voraussetzung für die Anwendung der Modellprozesse ist, ihre Relationen untereinander und ihre Spezifik für bestimmte Kavitationswirkungen zu kennen. Deshalb wurden Untersuchungen unter möglichst konstanten Bedingungen durchgeführt, die einen Vergleich der Prozesse ermöglichen.

## Modellprozesse

### Schallfeldmessung

Zunächst wird eine Schallfeldmessung durchgeführt, die wesentliche Informationen enthält, da das Schallfeld die treibende Kraft darstellt. Dazu wird der Schalldruck in der Prozessflüssigkeit zeit- und orts aufgelöst bestimmt [1]. Als Sensoren kommen Hydrophone (typischerweise kleine Wasserschallhydrophone) oder optische Fasersensoren zum Einsatz. Aus den Messungen werden verschiedene Parameter wie die Amplitude der Grundwelle (bei der Arbeitsfrequenz  $f_A$  des Geräts), die Subharmonische (bei  $f_A/2$ ), Ultraharmonische (bei  $1,5 f_A$ ), die 2. Harmonische (bei  $2 f_A$ ) und die Rauschleistung in verschiedenen Frequenzbereichen.

### Bestimmung der Erosionswirkung

Die Erosionswirkung wird mit Hilfe einer Aluminiumfolie bestimmt, die dazu in einem Rahmen aufgespannt und in das Bad eingetaucht wird. Die Beschallung erfolgt über etwa 5s bis ca. 30s und die Kavitation verursacht verschiedene Schadensbilder an der Folie. Ist die Wirkung eher schwach, wird

es nur eine Einbeulung der Folie geben. Stärkere Blaseneinwirkung verursacht eine Ablation von Aluminium allerdings ohne die Folie zu perforieren. Dies geschieht erst bei sehr starker Einwirkung.

Für eine Analyse werden die Folien getrocknet und mit einem optimierten Standardscanner digitalisiert. Eine speziell entwickelte Software detektiert die Beulen, die Ablationskrater und die Löcher separat pro Flächenelement und gewichtet sie mit einer Gewichtungsfunktion. Damit wird einem jeden Flächenelement eine quantitative Zahl zugeordnet, die eine Aussage über die Erosionswirkung macht.

### Sonochemische Wirkung

Die sonochemische Wirkung wird mit einer einfachen Modellreaktion, der Oxydation von Jod-Ionen  $I^-$ , die durch die Homolyse des Wassers bei den extremen Bedingungen in der Kavitationsblase ausgelöst wird, bestimmt. Der entstehende  $I_3^-$ -Komplex kann spektroskopisch bei einer Wellenlänge von 352 nm nachgewiesen und quantitativ bestimmt werden. Er steht in direktem Zusammenhang mit dem Potential der Kavitationsanordnung zu einer sonochemischen Reaktion [2], insbesondere der Zahl der Blasen und den mechanischen und thermischen Eigenschaften zum Zeitpunkt des Blasenkollapses.

Um eine orts aufgelöste Detektion zu erreichen, wird die KI-Startlösung in Polyethylenpäckchen gefüllt und diese mit einem Folienschweißgerät verschlossen. Damit kann die chemische Wirkung an ausgewählten Punkten im Bad bestimmt werden.

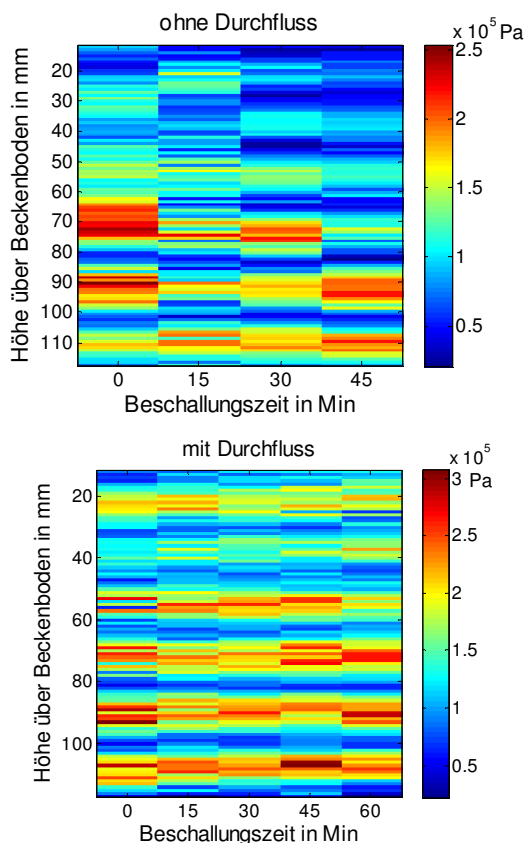
### Detektion von Sonolumineszenz

Durch die extremen Druck- und Temperaturbedingungen während des Kollapses einer Blase wird unter bestimmten Bedingungen auch Licht ausgesendet, das mit einer hochempfindlichen Kamera detektiert werden kann. Es enthält ebenfalls Informationen über die Stärke der Kavitation. Um die Stärke des Sonolumineszenzlichts zu erhöhen, wird Argon im Wasser gelöst. Um eine Ortsauflösung zu erhalten, wird die Testflüssigkeit wiederum in kleine Päckchen gefüllt.

## Experimenteller Aufbau und Ergebnisse

Alle Experimente wurden in einer Reinigungswanne (Elma, THI-5) mit 4 l Volumen durchgeführt. Die Arbeitsfrequenz  $f_A$  betrug 44,3 kHz. Die Wanne wurde extern mit Hilfe eines Signalgenerators und eines Verstärkers betrieben, damit verschiedene Anregungsmethoden und -frequenzen verwendet werden konnten. Strom und Spannung des Sendesignals werden simultan gemessen, um die eingespeiste Wirkleistung bestimmen zu können. Weiterhin werden die Temperatur und die Sauerstoffkonzentration des Wassers im Bad bestimmt.

Wesentliche Voraussetzung für die Messungen ist es, die Bedingungen konstant halten zu können. Dazu wurde ein Durchflusssystem aufgebaut, das die Badflüssigkeit kontinuierlich umwälzt, ohne störende Strömungen im Bad zu erzeugen. Abbildung 1 zeigt die Wirkung auf eine Schallfeldmessung die als senkrechter Scan über einem Wandler ausgeführt wurde. Deutlich ist eine Stehwellenstruktur zu erkennen, die nur bei eingeschaltetem Durchfluss auch langzeitstabil ist.



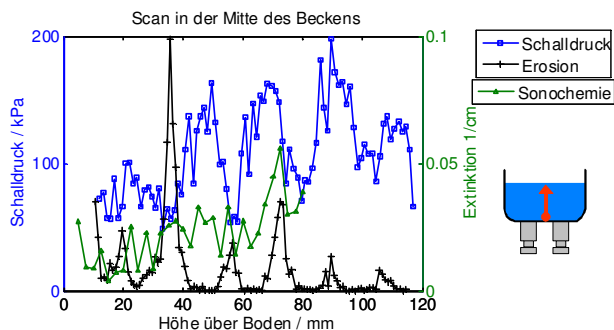
**Abbildung 1:** Schallfeldmessung mit und ohne Umwälzung der Badflüssigkeit

Um Vergleiche zwischen den einzelnen Modellprozessen zu ermöglichen, wurden Messungen unter möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt. Um aktive und passive Bereiche im Bad überstreichen zu können, wurden Linienscans vom Boden des Bades senkrecht bis zur Wasseroberfläche durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für eine Messung in der Wannenmitte, Abbildung 3 für eine Messung über einem der beiden Wandler.

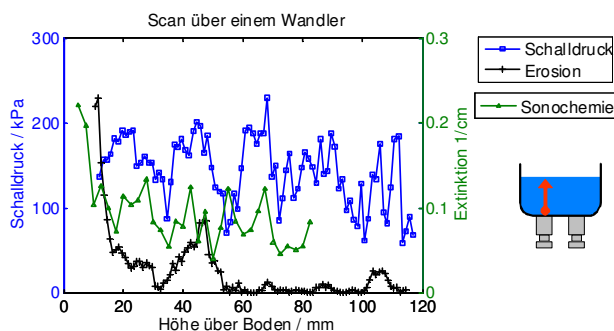
Alle Ergebnisse zeigen starke Streubreiten, wie sie bei der Messung in Kavitationsfeldern immer auftreten. Die Schallfeldmessungen wurden mit sehr geringem Punktabstand durchgeführt und nicht gemittelt, um zeitliche Veränderungen bemerken zu können. Man erkennt in beiden Abbildungen eine Stehwellenstruktur, die sich nur zum Teil in den Wirkungen widerspiegelt. Insbesondere die Detektion der sonochemischen Wirkung zeigt in der Wannenmitte keine ausgeprägte Struktur, jedoch über dem Wandler. Im Falle der Erosion verhält es sich eher umgekehrt. In weiteren Messungen zeigte sich, dass die Päckchen das Kavitationsfeld

auch verändern und untersucht werden muss, ob Proben in formstabilen Behältern einheitlichere Ergebnisse liefern.

Die Bestimmung der Erosion mit Hilfe der Aluminiumfolie ist sehr zuverlässig. Das starke Maximum in Abbildung 2 ist auf ein übergroßes Loch zurückzuführen. Parametervariationen haben gezeigt, dass die Beschallungszeit so eingestellt werden muss, dass solch große Abtragungen nicht auftreten.



**Abbildung 2:** Messung des Schalldrucks (blaue Linie, linke Achse), der sonochemischen Wirkung (grüne Linie, rechte Achse) und der Erosionswirkung (schwarze Linie, normiert) auf einer senkrechten Linie in der Mitte des Bades



**Abbildung 3:** Messung des Schalldrucks (blaue Linie, linke Achse), der sonochemischen Wirkung (grüne Linie, rechte Achse) und der Erosionswirkung (schwarze Linie, normiert) auf einer senkrechten Linie über einem Wandler

## Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass sich Eigenschaften von Kavitationsanwendungen durch Modellprozesse behandeln lassen. Die Messung des Schallfeldes, die Bestimmung der Erosionswirkung, eine sonochemische Modellreaktion und die Detektion von Sonolumineszenz überdecken eine weiten Anwendungsbereich und können zum Vergleich und der Beurteilung verwendet werden.

## Literatur

- [1] K.-V. Jenderka, C. Koch „Investigation of spatial distribution of sound field parameters in ultrasound cleaning baths under the influence of cavitation“ *Ultrasonics* **44** (2006), e401–e406.
- [2] S. Koda, T. Kimura, T. Kondo, H. Mitome, „A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system“, *Ultras Sonochem.* **10** (2003), 149