

# Versuch einer Energiebilanz für ein Ultraschallbad unter Berücksichtigung ultraschallinduzierter Kavitation in Wasser

R. Sobotta\*, Ch. Jung\*, P. Koch, D. Krefting, W. Lauterborn, R. Mettin

Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen; \*ELMA Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG, Singen

## Einführung:

Handelsübliche Ultraschallbäder werden von Anwendern nach ihren geometrischen Dimensionen (Wanntiefe  $h$  und – grundfläche  $A$ ), nach der volumenbezogenen Ultraschall-Leistungsdichte  $P_{vol}$  [Watt/Liter] sowie nach sonstigen Ultraschall-Parametern (Frequenz, Signalform) ausgewählt. Sind die anderen Parameter ungefähr gleich, so werden Geräte verschiedener Hersteller anhand der volumenbezogenen Ultraschall-Leistungsdichte  $P_{vol}$  verglichen. In dieser Arbeit wird untersucht, ob dieser Vergleichsmaßstab eine physikalische Grundlage hat und wie diese zur Auslegung von Ultraschallbädern genutzt werden sollte. Es wird gezeigt, dass dem Schallfeld vermittelt durch die Kavitation volumenbezogen Leistung entzogen wird: Die für die Reinigungswirkung aufrecht zu erhaltende Dichte kavitierender Blasen  $N_B$  (Anzahl Blasen je  $cm^3$ ) bestimmt die akustisch einzutragende volumenbezogene Leistungsdichte  $P_{vol}$  [W/l]. Ferner wird gezeigt, dass die Existenz a) einer zur Erzeugung von Kavitation minimal nötigen akustischen Intensität  $I_{kav}$  ( $W/cm^2$ , Kavitationsschwelle) und b) einer Begrenzung für die stabil maximal einkoppelbare akustische Intensität  $I_{max}$  ( $W/cm^2$ , Ende des stabilen Intensitätsbereiches) einen Auslegungsbereich für Ultraschallbäder eingrenzen.

## Experimentelles:

Abb. 1 zeigt den zur Messung der eingetragenen akustischen Leistung verwendeten Aufbau. Die Messungen wurden in entgastem, entspanntem Leitungswasser bei 20-25°C ausgeführt. Der Wirkungsgrad des Wandlers wurde kalorimetrisch zu 92% bestimmt. Der Schalldruck bei der anregenden Frequenz  $f_0 = 26.4$  kHz wurde mit einem Hydrophon gemessen, dessen Ausgangssignal mit elliptischem Bandpass 4. Ordnung gefiltert wurde. Die Leistung wurde in der Richtung von hohen zu niedrigen Werten mit 2 Messwerten/sec in logarithmischer Abstufung durchfahren und mittels Leistungsmesser gemessen. Zeitgleich zu jedem Leistungsmesswert wurde der Effektivwert des gefilterten Schalldruckes ermittelt.

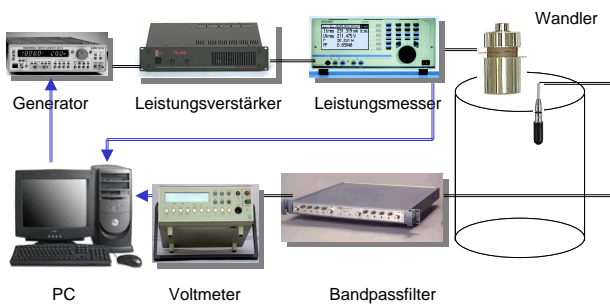


Abb. 1 Messaufbau

## Ergebnisse:

Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer solchen Messung im Bereich des 3. Schalldruckmaximums unterhalb des Wandlers in doppelt-logarithmischer Darstellung. Neben den Messpunkten ist auch der für hohe akustische Intensität extrapolierte lineare Verlauf eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass der gemessene Schalldruck  $p_a$  oberhalb der Intensität  $0.003$   $W/cm^2$  geringer ist als aus der eingetragenen akustischen Intensität  $I$  für zunächst konstant angenommene Impedanz  $Z$  erwartet:  $p_a < (I \cdot Z)^{1/2}$ . Oberhalb ca.  $0.1$   $W/cm^2$  steigt der gemessene Schalldruck trotz weiter erhöhter Intensität nicht mehr. Bei sehr hohen Intensitäten oberhalb  $3$   $W/cm^2$  fällt der gemessene Schalldruck sogar wieder ab.

Abb. 3 zeigt den Verlauf des gemessenen Schalldruckes in Abhängigkeit von der eingetragenen akustischen Intensität für 2 Messorte des Hydrophons in linearer Darstellung. Messort in Wandlernähe ist der Bereich des 1. Schalldruckmaximums, Messort am Reflektor ist der Bereich des 7. Maximums vom Wandler bzw. 1. Maximums vom Reflektor aus gezählt. 2 Effekte sind zu erkennen:

Effekt 1: Oberhalb  $8$   $W/cm^2$  existiert für beide Messorte zur eingestellten Intensität eindeutig ein Messwert für den Schalldruck. Fährt die Intensität von oben in den schraffierten Bereich von  $8$  bzw.  $8.5$  bis  $4.7$   $W/cm^2$  hinein, springt der Messwert für die Intensität zu  $4.7$   $W/cm^2$  – es existiert also eine Instabilität in diesem Intensitätsbereich. Im Intensitätsbereich unterhalb  $I_{max} \sim 4.7$   $W/cm^2$  existiert zu jeder Intensität wieder eindeutig ein Messwert für den Schalldruck.  
Effekt 2: Der Schalldruck am Reflektor liegt im gesamten Intensitätsbereich um das 2-3-fache unterhalb des Wertes in Wandlernähe.

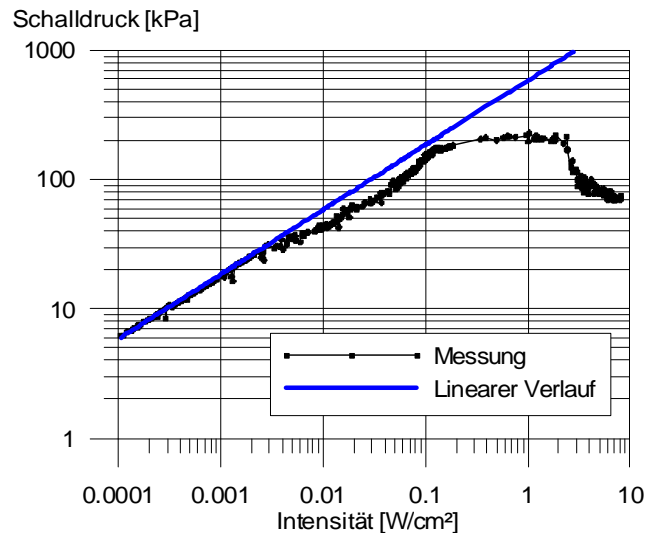


Abb. 2: Bei  $f_0$  gemessener Schalldruck als Funktion der Intensität an der Wandlerfläche und extrapolierte linearer Verlauf

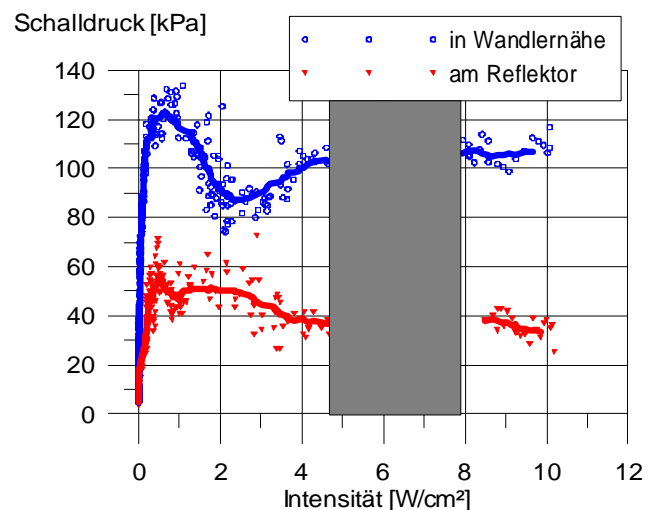


Abb. 3: Bei  $f_0$  gemessener Schalldruck als Funktion der Intensität an der Wandlerfläche

## Diskussion der Ergebnisse:

Zur Diskussion der Ergebnisse definieren wir mittels relativer Schalldruck- und Intensitätswerte in (1) den Kavitationswirkungsgrad KW:

$$KW = \{ 1 - p_{a,rel}^2 / I_{rel} \} \quad [\%] \quad (1)$$

$$\text{mit } p_{a,rel} = p_a(\text{exp.}) / p_a(\text{linear}) \leq 1 \quad (2)$$

$$\text{und } I_{rel} = I(\text{exp.}) / I(\text{linear}) \sim 1. \quad (3)$$

Ein Kavitationswirkungsgrad 0% zeigt an, dass dem Schallfeld keine Leistung entzogen wird – der gemessene Schalldruck entspricht dem aus  $p_a < (I \cdot Z)^{1/2}$  für die eingetragene akustische Intensität erwarteten Wert. Ein Wert nahe 100% hingegen zeigt an, dass die eingetragene akustische Intensität nahezu vollständig in andere Energieformen umgewandelt und der Schalldruck verringert ist. Der auf die genannte Weise definierte Kavitationswirkungsgrad ist allein aus Schalldruck-

messungen in Abhängigkeit von der akustischen Intensität bestimmbar und unterscheidet sich auch von daher von dem in /1/ definierten „cavitation index“.

Abb. 4 zeigt den aus einer Messung analog der in Abb. 2 dargestellten erhaltenen Kavitationswirkungsgrad in Abhängigkeit von der eingetragenen akustischen Intensität in logarithmischer Skala.

### Kavitationswirkungsgrad [%]

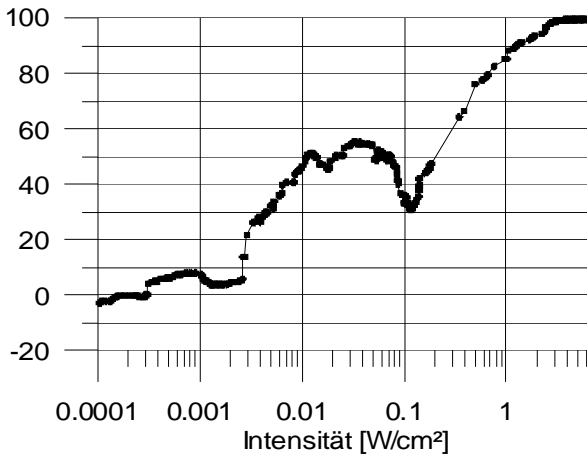


Abb. 4 Intensitätsabhängigkeit des Kavitationswirkungsgrades

Man erkennt, dass KW bereits oberhalb 0.003 W/cm<sup>2</sup> deutlich ansteigt, und visuelle Beobachtung weist hier auf den Bereich stabiler Blasenoscillationen hin. Oberhalb ca. 0.1 W/cm<sup>2</sup> werden die ersten „Streamer“ mit transienten Blasenoscillationen erkennbar. Dichte „Streamer“-Schleier beginnen im Bereich oberhalb 3 W/cm<sup>2</sup> aufzutreten - dort wo sich KW 100% nähert.

Allen aus Messungen wie Abb. 2 berechneten KW-Darstellungen ist gemeinsam, dass sie bei geringen Intensitäten < 0.003 W/cm<sup>2</sup> bei KW ~ 0 und oberhalb ~3 W/cm<sup>2</sup> bei KW ~ 100% einlaufen.

Der Bereich mit Schalldrücken noch oberhalb ~100 kPa und mit akustischen Intensitäten oberhalb der Kavitationsschwelle  $I > I_{kav}$  ~1 W/cm<sup>2</sup>, jedoch mit akustischen Intensitäten noch unterhalb des Endes des Stabilitätsbereiches  $I < I_{max}$  ~ 4.7 W/cm<sup>2</sup> (Abb. 3), ist der für die Ultraschallreinigung angewandte Bereich. Der Kavitationswirkungsgrad liegt also hier bei 90 – 100%.

Der nach Überschreiten des Instabilitätsbereiches (Abb. 3) mit akustischen Intensitäten oberhalb 8 W/cm<sup>2</sup> wieder stabil zugängliche Intensitätsbereich - jedoch mit nur noch bis zur halben Wellenlänge vom Wandler entfernt aufrecht erhaltenem Schalldruck - wird für Desintegratoren genutzt.

### Abschätzung einer Energiebilanz:

Im folgenden wird abgeschätzt, ob der bis zu nahe 100% ansteigende Kavitationswirkungsgrad (Abb. 4), verbunden mit sich im Volumen verringerndem Schalldruck (Abb. 2, 3) einen Leistungsentzug aus dem Schallfeld anzeigt, welcher mit plausiblen Dichten kollabierender Blasen erklärt werden kann:

Im Schallunterdruckbereich werden Blasenkeime ( $r \sim 0$ ) bis auf Maximalradius  $r_{max}$  aufgezogen, wobei Volumenarbeit gegen den Außendruck  $p_0$  und Oberflächenarbeit für die neue Grenzfläche  $A_B$  gegen die Oberflächenspannung  $\sigma$  geleistet werden:

$$W_{vol} = p_0 \cdot \Delta V = p_0 \cdot 4\pi r_{max}^3 \quad (4)$$

$$W_{OF} = A_B \cdot \sigma = 4\pi r_{max}^2 \cdot \sigma \quad (5)$$

Häufigkeitsverteilungen der Blasen über  $r_{max}$  wurden experimentell bestimmt /2, 3/, jedoch wurde der zugehörige Schalldruck dabei nicht bei der anregenden Frequenz  $f_0$  gefiltert gemessen. In /4/ wurde zwar gefiltert, jedoch fehlt der Bezug auf die akustische Intensität in [W/cm<sup>2</sup>]. Mit /2, 3/ ist die Annahme eines mittleren  $r_{max} \sim 35 - 70 \mu m$  für  $p_{a,max} \sim 120 kPa$  bei  $f_0 \sim 20-30 kHz$  bei 20°C,  $p_0 = 101.325 kPa$  in Wasser sinnvoll. Es wird angenommen, dass eine aufgezoogene Blase innerhalb der Periode  $1/f_0$  auch wieder kollabiert. Mit den genannten Annahmen erhält man den Leistungsentzug  $P_B$  durch periodische Vernichtung einer Blase und die Blasenanzahl  $n$  für den Entzug von 10 W akustischer Leistung:

$f_0$ [Hz]	$r_{max}$ [μm]	$P_B$ [mW]	$n$ (für Entzug von 10 W)
26000	35	0.47	21277 ~ 28 x 28 x 28
26000	70	3.80	2632 ~ 14 x 14 x 14

Die Auswertung experimentell in „Streamer“-Figuren bestimmter Blasenanzahl /2, 3/ ergeben Blasendichten  $N_B \sim 10 - 100 Blasen/cm^3$  für mittlere  $r_{max} > 30 \mu m$  in kavitierenden Volumenbereichen.

Bei auf das Gesamtvolumen bezogenen Leistungsdichten von  $P_{vol} = 10 W/l$  in Ultraschallgeräten würden demnach zum Entzug der eingebrachten akustischen Intensität ca. 21 Blasen/cm<sup>3</sup> mit mittlerem  $r_{max} = 35 \mu m$  oder 2-3 Blasen/cm<sup>3</sup> mit 70 μm ausreichen!

Berücksichtigt man Stehwellen mit einem Anteil kavitierender Volumenbereiche am Gesamtvolumen von  $V_k \sim 10\%$ , werden dort Blasendichten  $N_B \sim 210 - 26 Blasen/cm^3$  ( $r_{max} \sim 35 - 70 \mu m$ ) benötigt.

Für die Aufstellung einer quantitativen Energiebilanz ist also noch die Aufgabe zu lösen, die für die Ultraschallreinigung benötigten Blasendichten  $N_B$  und Radien  $r_{max}$  experimentell zu bestimmen.

### Schlussfolgerung für Auslegung von Ultraschallgeräten:

Folgendes Vorgehen für die Auslegung von Ultraschallbädern für die Reinigung wird vorgeschlagen:

- (1) Abgeleitet aus der Reinigungsaufgabe eines Anwenders ergeben sich für den Hersteller von Ultraschallreinigungsbädern für den Fall eines typischen Bades mit Ultraschall vom Boden die Parameter:  
 Bodenfläche:  $A$  [cm<sup>2</sup>],  
 Badtiefe:  $h$  [cm],  
 Blasendichte im kavitierenden Volumenanteil  $V_k$ :  $N_B$  [dm<sup>-3</sup>].

- (2) Bei Auslegung bzgl. der einzubringenden Ultraschall-Intensität  $I$  sind physikalische Randbedingungen und Parameter zu beachten:

Ende des stabilen Intensitätsbereiches:  $I < I_{max}$  [W/cm<sup>2</sup>],

Schwellenintensität (Kavitationsschwelle):  $I > I_{kav}$  [W/cm<sup>2</sup>].

Umgewandelte akustische Leistung je Blase:  $P_B$  [W/Blase].

- (3) Die sich eigentlich aus der für die Reinigungsaufgabe erforderlichen Blasendichte ergebende volumenbezogene Leistungsdichte  $P_{vol} = P_B \cdot N_B \cdot V_k / 100$  [W/l] (6)

wird bisher häufig vom Anwender oder Hersteller als gesetzter Parameter behandelt. Die wie gezeigt für diesen Auslegungsparameter gegebene physikalische Grundlage wird also bisher nicht genutzt.

Abb. 5 zeigt den sich aus den unter (2) genannten Randbedingungen ergebenden zulässigen Bereich für die Ultraschallintensität. Nur innerhalb dieses Bereiches können die benötigten volumenbezogenen Leistungsdichten  $P_{vol}$  gewählt werden. Aus Abb. 5 ergibt sich: Bei vorgegebener Badtiefe  $h$  können hohe volumenbezogene Leistungsdichten nur in kleinen Ultraschallbädern, geringere volumenbezogene Leistungsdichten nur in großen Ultraschallbädern realisiert werden.

### Volumenbez. Leistungsdichte [W/l]

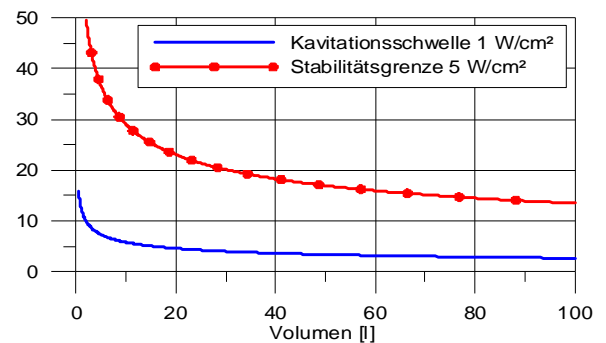


Abb. 5 Abhängigkeit der volumenbezogenen Leistungsdichte vom Volumen für die Kavitationsschwelle und die Stabilitätsgrenze

### Literatur:

- /1/ L. D. Rozenberg (Ed.): High-Intensity Ultrasonic Fields, Plenum Press, New York – London 1971, 347 ff.
- /2/ R. Mettin, S. Luther, W. Lauterborn: Proc. of 2nd Conf. on Ultrasound in Processing, Toulouse (France), 6-7 May 1999, pp 125-129.
- /3/ R. Mettin, S. Luther, O. Lindau, P. Koch and W. Lauterborn: Proc. Of ICMS Conference, 15-17 June 2000, Ufa (Russia), pp. 279-287.
- /4/ M.G. Sirotjuk in: L. D. Rozenberg (Ed.): High-Intensity Ultrasonic Fields, Plenum Press, New York – London 1971, p. 291.