

# Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Phasenmuster in Ultraschall-Wandleranordnungen auf die Schalldruckverteilung und die Kavitation

Reinhard Sobotta und Christoph Jung

Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG, D-Singen

## 1. Einführung

Werden in einem Korb gut verteilte und gleich positionierte Teile mittels Tauchreinigung in einer Ultraschallwanne (US-Wanne) gereinigt, so wird für alle Teile das gleiche Reinigungsergebnis dann erwartet, wenn das durch Reflexion der abgestrahlten Schallwellen an den das Flüssigkeitsvolumen begrenzenden Flächen erzeugte Stehwellenfeld zeitlich ausgemittelt wird. Bekannt sind dazu

- langsame Oszillation (0.1-1 Hz) des Reinigungskorbes zur periodischen Änderung seines Abstandes zur schallabstrahlenden Fläche,
  - Variation der US-Frequenz (sweep:  $f = f_0 \pm 1$  kHz) mit 10-100 Hz.
- Dabei wird mit sweep auch eine verringerte Schalldruck-Überhöhung in Bereichen positiver Überlagerung von abgestrahlter und reflektierter Welle im Stehwellenfeld in Kauf genommen.

In dieser Arbeit wird untersucht, ob sich durch andere als herkömmlich benutzte (Abb. 1a, b) Phasen-Muster der HF-Beschaltung der US-Wandler homogenere Schalldruck-Verteilungen im Stehwellenfeld erreichen lassen. Einem Vorschlag von Kuttruff /1/ folgend, können für Stehwellenfelder in US-Wannen mit hinreichend vielen US-Wandlern an ihren US-abstrahlenden Flächen durch Phasen-Muster ihrer HF-Beschaltung mit minimaler räumlicher Autokorrelation (Abb. 1c für den einfachsten Fall von 3 US-Wandlern in Linie) homogenere Schalldruck-Verteilungen erhalten werden.

+++

+ - +

+ + -

Abb. 1a: Phasen synchron verteilt.    Abb. 1b: Phasen Schachbrett-verteilt.    Abb. 1c: Phasen minimal autokorreliert verteilt.

Bei Anregung mit der Bandbreite  $\Delta f$  der für größere US-Wannen im Frequenzbereich dichter benachbarten Resonator-Eigenmoden und bei HF-Beschaltung der Wandler mit minimal autokorreliertem Phasen-Muster sollte sich für Wannen mit hinreichend vielen US-Wandlern auf einer Wandfläche eine homogenere Schalldruck-Verteilung, ähnlich einem diffusen Schallfeld, ergeben /1/.

## 2. Vergleich verschieden großer befüllter US-Wannen mit einem akustischen Raum und Nachhallzeit-Messungen

Das Schallfeld im Flüssigkeitsvolumen  $V$  üblicher US-Geräte mit US-Wandlern am Boden ist durch Blech ( $d \geq 1$  mm, daher annähernd schallhart) und die Grenzfläche Flüssigkeit/Luft (schallweich), der luftgefüllte akustische Raum (LAR) sei hingegen allseits schallhart reflektierend begrenzt. Betrachten wir ein mittelgroßes US-Gerät mit  $V = l \times b \times h = 0.28 \times 0.22 \times 0.15 \text{ m}^3$ . Bei gleichem Wert des dimensionslosen Produktes Wellenzahl\*Dimension,  $kx = 2\pi fx/c$ , zeigt sich mit  $c_w/c_L \sim 4.3$ ,  $f_{US}/f_{LAR} \sim 100$ , dass  $V$  einem LAR von  $6.5 \times 5.1 \times 3.5 \text{ m}^3$  ähnlich ist – akustisch ein nicht mehr kleiner Raum.

In Abb. 2 werden Anzahl und Verteilung der Eigenfrequenzen im verwendeten Anregungsbereich 39-40 kHz für die mittlere, eine kleinere ( $l \times b \times h = 0.19 \times 0.085 \times 0.050 \text{ m}^3$ ) und eine größere befüllte US-Wanne ( $l \times b \times h = 0.6 \times 0.5 \times 0.35 \text{ m}^3$ ) verglichen. Die Eigenmoden-Bandbreite in Abb. 2b ist aus der Nachhallzeit bestimmt (s. weiter unten). Für kleine Wannen erfordert die Anregung mehrerer Eigenmoden einen breiten sweep-Bereich bzw. die Anregung einer Eigenmode eine passende Anregungsfrequenz bei festgehaltenem Füllstand  $h$  aufzusuchen. Von mittleren Wannen lassen sich mit geeigneter gewählter, festgehaltener Anregungsfrequenz bereits mehrere Eigenmoden zugleich anregen.

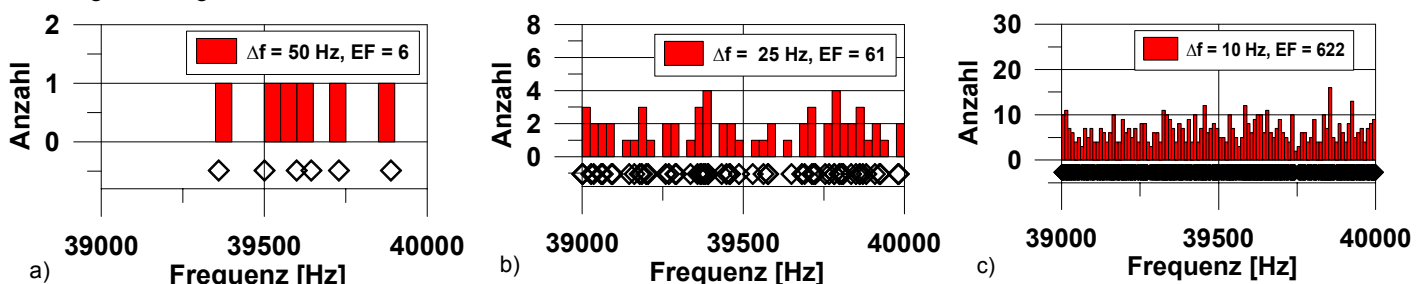


Abb. 2: Anzahl und Verteilung der Eigenfrequenzen EF für kleine (a), mittelgroße (b) und große (c) wasserbefüllte US-Wannen.

Mit ungeeignet gewählter Anregungsfrequenz kann aber auch zufällig keine Eigenmode angeregt und diese Anregung somit nicht als Stehwelle in die US-Wanne eingekoppelt werden. Auch für große Wannen bestimmt die Anregungsfrequenz, wie viele Eigenmoden zugleich angeregt werden. Die Histogramme zeigen also:

- Damit es entsprechend dem Vorschlag von Kuttruff /1/ durch eine HF-Beschaltung der US-Wandler mit minimal autokorreliertem Phasenmuster gelingt, mehrere Eigenmoden mit möglichst verschiedener räumlicher Verteilung (neben axialen auch tangential und schräge) zugleich anzuregen, sind demzufolge
- hinreichend große US-Wannen mit hinreichend vielen US-Wandlern an den schallabstrahlenden Flächen und die
- geeignete Wahl der Anregungsfrequenz bzw. ihres sweep-Bereiches nötig.

Die vorstehend anhand der für idealisierte akustisch abgeschlossene Räume zu erwartenden Verteilungen ihrer Eigenfrequenzen vorgenommenen Abschätzungen wurden experimentell mittels Bestimmung der Nachhallzeit  $T_N$  für die mittelgroße wasserbefüllte US-Wanne überprüft:

Für US-Frequenzen  $f$  oberhalb des 4-fachen der Schroeder-Frequenz  $f_S = 2000(T_N/V)^{1/2}$  [Hz],  $T_N$  in sec, wäre darin die Schalldruck-Verteilung als statistisch gleichverteilt, für  $f_S < f < 4f_S$  als dominiert durch Schall-Beugung und -Diffusion und für  $f < f_S$  als durch die jeweils angeregte Eigenmode des Resonators bestimmt anzusehen.

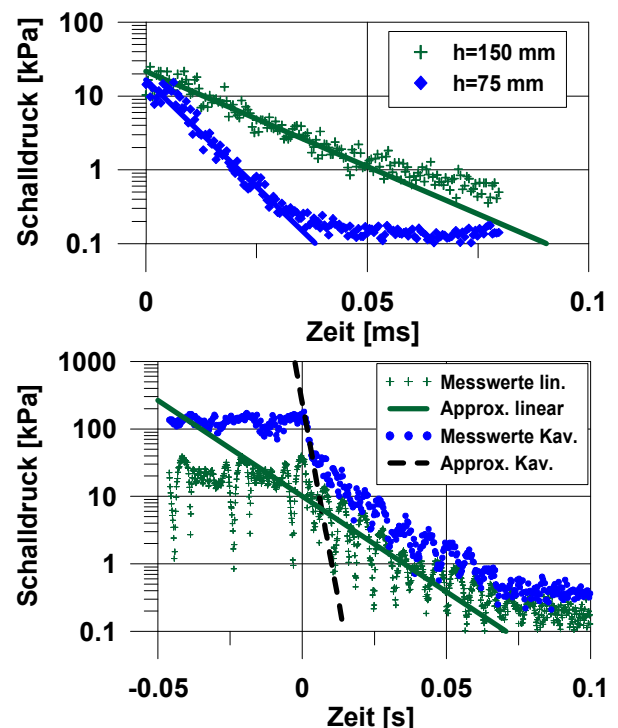


Abb.3: Nachhallzeiten mit  $0.28 \times 0.22 \times 0.15 \text{ m}^3$  US-Wanne. Oben: bis  $h=0.15$  und  $0.75 \text{ m}$  wasserbefüllt, mit weißem Rauschen angeregt. Unten:  $h=0.15 \text{ m}$ , mit  $40 \pm 0.25 \text{ kHz}$  sweep angeregt, mit Intensitäten unter-(grün) bzw. oberhalb Kavitationsschwelle (blau).

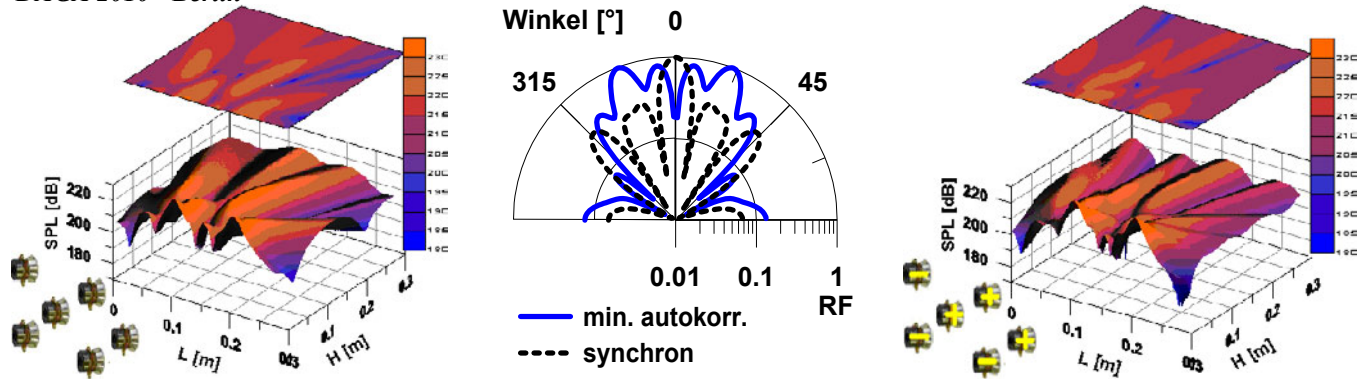


Abb. 4: Berechnete Nahfeld-Schallpegel-Verteilungen für synchrones (l) und min. autokorr. Phasen-Muster (r); m: Fernfeld-Richtcharakteristiken.

Die  $T_N$ -Messungen für die mittlere US-Wanne (Abb. 3) ergaben:  
 (1) Bei Anregung mit weißem Rauschen für  $h=0.15$  bzw.  $0.075$  m:  $T_N \sim 100$  und  $\sim 50$  ms. Das ergibt  $f_S \sim 6.6$  kHz, also unabhängig von  $h$ .  
 (2) Bei Anregung mit  $40 \pm 0.25$  kHz sweep ( $\pm 0.25$  kHz in 20 ms) unterhalb der Kavitationsschwelle /3/:  $T_N \sim 100$  ms. Mit

$$\Delta f = 2.2/T_N \quad (1)$$

ergibt sich daraus /4/ die Bandbreite der Eigenmoden bei 40 kHz - sie beträgt  $\sim 25$  Hz, wie bereits im Histogramm Abb. 2b benutzt.

(3)  $T_N$  erweist sich als identisch bei Anregung mit synchron und minimal autokorreliert verteiltem Phasen-Muster.

Bereits für die mittlere US-Wanne erfolgt also die Anregung bei 40 kHz oberhalb ihrer 4-fachen Schroeder-Frequenz  $f_S$ , so dass ein quasistochastisches, annähernd diffuses Schallfeld erzeugt wird. Damit lässt sich aus  $T_N$  mit der Sabine-Formel /2/ eine äquivalente Absorptionsfläche  $A_{eq}$  für die mittelgroße Wanne berechnen:

$$A_{eq} = 24Ln(10) * V/(c*T_N) = 0.00345 \text{ m}^2 \quad (2)$$

Das entspricht nur 1.3% der Resonator-Oberfläche  $S = 0.2732 \text{ m}^2$ .

### 3. Schallfelder und Kavitation bei Anregung mit synchronem und minimal autokorreliertem Phasen-Muster

Abb. 4 zeigt mittels Punktquellen-Synthese berechnete Schallpegel-Verteilungen (Nahfeld) und mit Wandler-Anordnung im schallhart angenommenen Boden berechnete normierte Richtcharakteristiken (Fernfeld) der mittleren US-Wanne für synchrones und minimal autokorreliertes Phasen-Muster. Sowohl Richtcharakteristik in Abstrahlrichtung als auch Schallpegel-Verteilung sind gleichmäßiger bei Anregung mit minimal autokorreliertem Phasen-Muster.

Abb. 5 zeigt die in der l-h-Schnittebene mittig oberhalb beider Wandler der mittleren Reihe mit einem Hydrophon punktweise abgetastet gemessenen Schallpegel-Verteilungen der mittleren US-Wanne bei Anregung mit  $40 \pm 0.25$  kHz sweep mit synchronem und

minimal autokorreliertem Phasen-Muster. Die Verteilung bei Anregung mit minimal autokorreliertem Phasen-Muster ist gleichmäßiger – insbesondere in Richtung hin zu den Wänden bei  $l = 0, L$ .

Abb. 6 stellt die in der gleichen l-h-Schnittebene wie bei Abb. 5 mit einem Hydrophon gemessenen Kavitationsrauschpegel /5/ der mittleren US-Wanne bei sweep-Anregung  $40 \pm 0.25$  kHz mit synchronem und minimal autokorreliertem Phasen-Muster dar.

Auch diese Verteilung ist bei Anregung mit minimal autokorreliertem Phasen-Muster gleichmäßiger – vor allem zu den Wänden hin.

### 4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass bereits für typische mittelgroße US-Tischgeräte mit Wannen-Abmessungen  $l \times b \times h = 0.28 \times 0.22 \times 0.15 \text{ m}^3$  und 6 Wandlern am schallabstrahlenden Wannenboden die Verwendung von minimal autokorrelierten Phasen-Mustern eine veränderte Schalldruckpegel-Verteilung ermöglicht. Mit größeren Wannenabmessungen und bei entsprechend zunehmender Wandler-Anzahl auf der schallabstrahlenden Fläche ist zu erwarten, dass die HF-Beschaltung mit minimal autokorrelierten Phasen-Mustern zunehmend gleichmäßigere Schallpegel-Verteilungen gegenüber den bisher üblichen HF-Beschaltungen mit synchronem oder schachbrett-artigem Phasen-Muster bewirken sollte.

### Literatur:

- /1/ H. Kuttruff: Offenlegungsschrift DE 10 2007 019 492 A1.
- /2/ H. Kuttruff in: Handbook of Acoustics, ed. by M. J. Crocker, Wiley & Sons, New York 1998, Seite 925 ff.
- /3/ Ch. Jung, R. Sobotta: Fortschr. d. Akustik, DAGA 2009, S.1348.
- /4/ D. H. Bies, C. H. Hansen in: Handbook of Acoustics, ed. by M. J. Crocker, Wiley & Sons, New York 1998, Seite 939 ff.
- /5/ R. Sobotta, Ch. Jung: Fortschr. d. Akustik, DAGA 2005, S. 581.

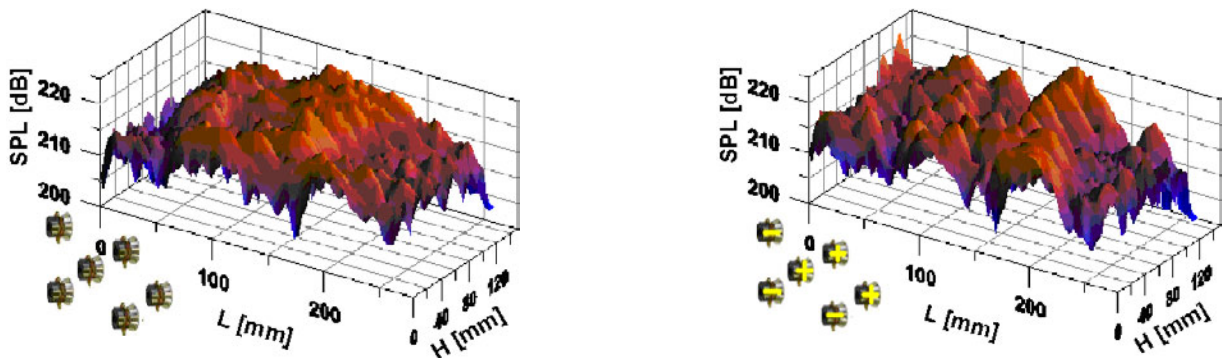


Abb. 5: Gemessene Schallpegel-Verteilung für synchrones (l) und minimal autokorrelierte (r) Phasen-Muster ( $40 \pm 0.25$  kHz sweep Anregung).

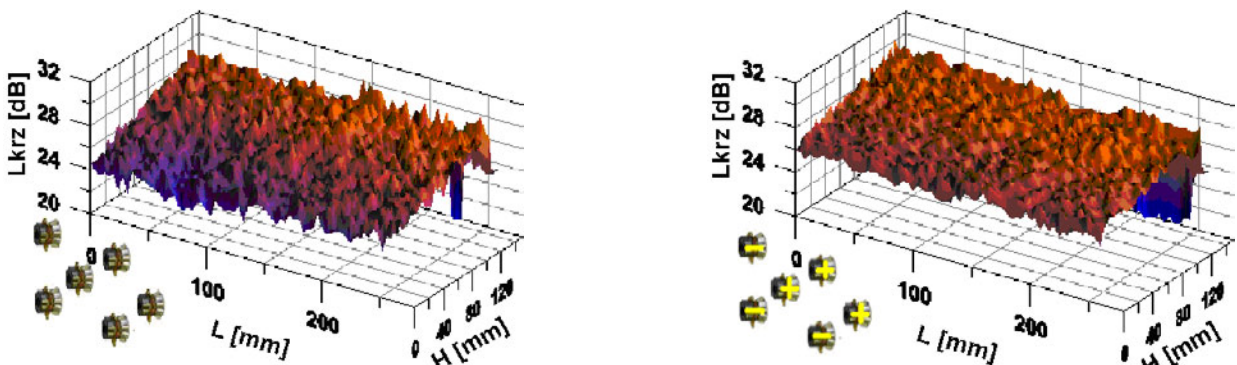


Abb. 6: Gemessene Kavitationsrauschpegel-Verteilung für synchrones (l) und minimal autokorrelierte (r) Phasen-Muster ( $40 \pm 0.25$  kHz sweep).