

## Untersuchungen zur Kavitation und Reinigung bei Megaschall

A. Otto<sup>1</sup>, T. Nowak<sup>1</sup>, R. Mettin<sup>1,\*</sup>, F. Holsteyns<sup>2</sup>, A. Lippert<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Deutschland*

<sup>2</sup> *SEZ AG, SEZ-Straße 1, 9500 Villach, Österreich*

\* *Email: R.Mettin@physik3.gwdg.de*

### Einleitung

Ultraschallreinigung ist weit verbreitet und eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der akustischen Kavitation [1, 2]. Allerdings werden die genauen Mechanismen und die Optimierung von Parametern immer noch untersucht. Das gilt insbesondere für den Bereich hoher Frequenzen, in dem eine sanftere Reinigung von Oberflächen erreicht werden kann und somit eine Behandlung auch von Nanostrukturen ohne Zerstörung angestrebt wird.

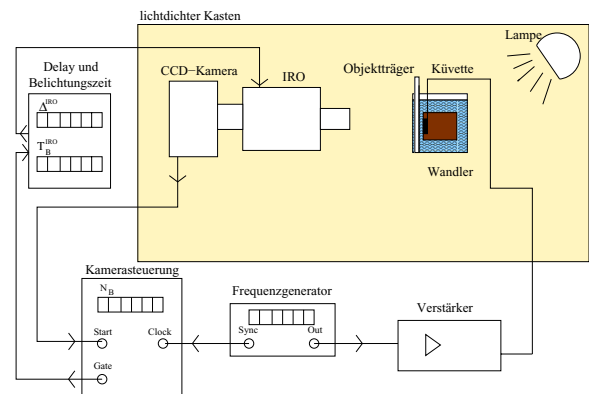
Hier berichten wir von Beobachtungen der Sonolumineszenz von Ultraschallfeldern in Wasser bei Frequenzen über 200 kHz. Die Leuchterscheinungen werden mit orts- und phasen aufgelösten Messungen untersucht, wobei die zeitliche Abfolge der Lichtemission in verschiedenen räumlichen Bereichen sichtbar wird.

Darüberhinaus wird die Korrelation des Leuchtens mit der Reinigung von Testverschmutzungen an glatten Oberflächen untersucht [3, 4].

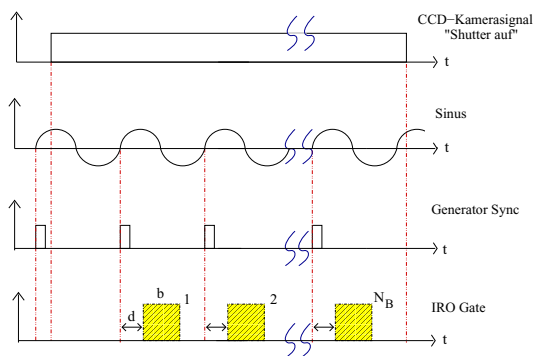
### Untersuchungsmethode

Um eine zeitliche Auflösung unterhalb der Periodendauer der akustischen Anregung zu erzielen, muss wegen der äußerst schwachen Lumineszenz ein Trick angewandt werden: Ein kurzes Zeitfenster wird mehrfach belichtet, und zwar phasenstarr zur Anregung. Setzt man einen mit der Anregung periodischen (Leucht-) Vorgang voraus, so kann auf diese Weise die effektive Belichtungs-

zeit im Prinzip beliebig erhöht werden, ohne die zeitliche Auflösung zu verlieren. Für die hier gezeigten Aufnahmen wurde der Kamerashutter für 8 s geöffnet. die Delayzeit  $d$  ist angegeben und die Belichtungszeit  $b$  betrug immer 100 ns (Bezeichnungen siehe Abb. 1) [5].



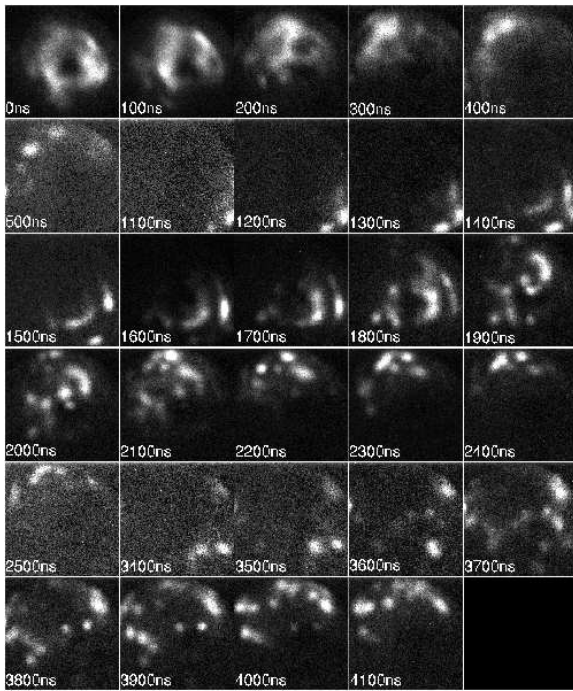
**Abbildung 2:** Schematischer Versuchsaufbau für orts- und phasen aufgelöste Sonolumineszenzmessungen. Vor die ansteuerbare CCD-Kamera (Ixon, Andor Technology) ist eine Bildverstärkereinheit (Intensified Relay Optics, IRO) geschaltet. Der Frequenzgenerator ist an den Verstärker und die Kamerasteuerung angeschlossen. Verschiedene Küvetten mit verschiedenen Resonanzfrequenzen können eingebaut werden. Eine Beleuchtung kann von schräg hinten durch eine Halogenlampe erfolgen. Der lichtempfindliche Teil des Aufbaus ist für Lumineszenzmessungen lichtdicht gekapselt.



**Abbildung 1:** Skizze zur Funktionsweise der Kamerasteuerung. Von der Kamera kommt ein Eingangssignal, daraufhin kommt ein Signal von dem äußeren Sinus, wenn er durch den Nulldurchgang von unten geht. Mit der Verzögerungszeit  $d$  wird dann die IRO betriebsbereit gemacht und verstärkt für die Zeit  $b$ . Dies entspricht der Belichtungszeit für eine einzelne Aufnahme. Bei jedem erneuten Nulldurchgang des Sinus wiederholt sich die Belichtung der IRO, bis sich der Kamera-shutter schließt.

### Ergebnisse bei 230 kHz

In einem Stehwellenfeld bei 230 kHz wurde eine Serie mit 100 ns Belichtungsintervallen aufgenommen (Versuchsaufbau siehe Abb. 2). In Abb. 3 sind Teile der Aufnahmeserie zu sehen. Die Bilder, in denen kein klares Leuchten sondern nur Rauschen zu sehen war, sind hier nicht gezeigt. Man kann zwei Leuchtsequenzen erkennen, die während der Anregungsperiode von unten nach oben durch das Bild wandern (1100 ns - 2500 ns und 3100 ns - 500 ns zyklisch anschließend,  $T/2$  versetzt). Hierbei emittieren jeweils lokalisierte Regionen mit elliptischer oder bogenartiger Form jeweils für etwa 400 ns ( $T/10$ ). Die leuchtenden Blasen sind folglich in Gruppen oder Cluster lokalisiert und vermutlich an das (nicht vermessene) Stehwellenmuster gebunden. Dafür spricht das stark phasenkorrelierte Leuchten in beiden Halbwellen des Schallfeldes und eine Ausdehnung der einzelnen Blasengruppen in der Größenordnung von  $\lambda/2$ . Das Wandern der Leuchtphase könnte an einer räumlich variierenden Anregungsphase des Schallwandlers liegen.



**Abbildung 3:** Sonolumineszenz vor einem 230 kHz-Wandler (100 V): phasenverschobene 100 ns-Fenster; Verzögerungszeiten  $d$  angegeben (volle Periode entspricht 4340 ns, Bildbreite ca. 2 cm).

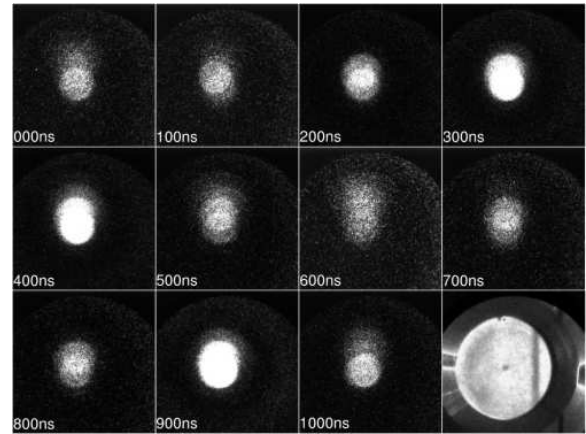
### Ergebnisse bei 1 MHz

Vor einem bei 1 MHz betriebenen Ultraschallwandler wurden ebenfalls die Leuchtzonen aufgenommen (Abb. 4). Hier ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Es leuchtet immer nur der kreisförmige Bereich (Durchmesser 0,61 cm) in der Mitte vor dem runden Wandler (Durchmesser 1,84 cm). Dieses punktwolkenartige Leuchten ist zu einigen Phasen wesentlich stärker (300, 400 und 900 ns, d.h.  $T/2$  später) als zu anderen. Vermutlich befinden sich mehrere leuchtende Schichten hintereinander. Allerdings gibt es keine Phase, in der keine Lumineszenz auftritt. Womöglich gibt es einen laufenden Wellenanteil, der eine kontinuierliche Kollapsphase erzeugt. Jedenfalls spiegelt die zentrierte Leuchtregion offenbar ein gut fokussiertes Schallfeld wider.

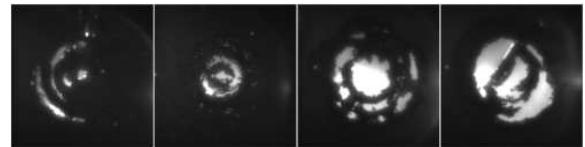
Um bei 1 MHz die Zonen der Reinigung sichtbar zu machen, wurde ein mit schwarzem, matten Sprühlack von einer Seite beschichteter Objektträger vor den Wandler gebracht. Die Abreinigungen, die dabei nach ca. 4 Sekunden entstanden, sind in Abb. 5 gezeigt. Die hellen Zonen (Farbabtrag) sind immer kreis- bzw. halbkreisförmig (was wahrscheinlich durch eine nicht exakt parallele Ausrichtung von Wandleroberfläche und Objektträger zu erklären ist). Die Orte der Reinigung stimmen mit denen der beobachteten Lumineszenz im Wesentlichen überein. Allerdings finden sich Lücken, in denen trotz Lumineszenzsignal nicht abgereinigt wurde.

### Diskussion

Bei beiden Aufnahmeserien ist deutlich eine Phasenabhängigkeit des Leuchtens zur Anregung zu erken-



**Abbildung 4:** Sonolumineszenz vor einem 1 MHz-Wandler (300 V): phasenverschobene 100 ns-Fenster; Verzögerungszeit  $d$  angegeben. Das letzte Bild zeigt den Wandler im Streulicht. Die Bildbreite beträgt 2 cm.



**Abbildung 5:** Abreinigung eines mit Lackspray beschichteten Objektträgers nach 4 Sekunden. Abgereinigte Stellen erscheinen hell. Die Bildbreite beträgt jeweils 2 cm.

nen, die beim 1 MHz-Aufbau schwächer ausgeprägt ist; dort ist ebenfalls die räumliche Verteilung homogener. Bei 230 kHz ist die Kavitation "fleckig" verteilt. Für 1 MHz konnte eine Korrelation von Leuchtzonen und Reinigung beobachtet werden, wobei der registrierte Leuchtbereich den Abreinigungsbereich überschätzt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei der Lumineszenzaufnahme auch Kavitation fern von der zu reinigenden Oberfläche aufgenommen wird und vermutlich direkt auf dem Objektträger die Blasenverteilung einer Ringmodenstruktur des Schallfeldes folgt.

### Literatur

- [1] F.R. Young, *Cavitation*, McGraw-Hill 1989.
- [2] T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble*, Academic Press 1994.
- [3] A. Lippert, P. Engesser, G. Ferrell, J. Klitzke, M. Köffler, F. Kunnig, J. Leberzammer, R. Obweiger, A. Pfeuffer, H. Sax, H. Okorn-Schmidt, *Solid State Phenomena Vols. 103-104 pp. 155-158*, Trans Tech Publications, Switzerland 2005.
- [4] F. Holsteyns, K. Lee, S. Graf, R. Palmans, G. Verbeeck, P. W. Mertens, *Solid State Phenomena Vols. 103-104 pp.159-162*, Trans Tech Publications, Switzerland 2005.
- [5] A. Otto, R. Mettin, W. Lauterborn, in: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2007 Stuttgart*, DEGA, Berlin, 2007, 127.