

Analyse des Hochfrequenzspektrums von Propellergeräuschen zur Detektion von Kavitationserosion

High Frequency Analysis of Propeller Noise for the Detection of Cavitation Erosion

Dr. habil. **Reinhard Schulze**
SVAttech GmbH, Potsdam

Summary:

Due to the sound propagation conditions in the sea water, the ship noise in the far field is generally interesting in a frequency range up to approximately 100 kHz. On the other hand, in the near field are echo sounders up to 1 MHz in use. The propeller-related low frequency ship noise is highly dependent on the cavitation properties of the propeller with a close correlation between visual cavitation phenomena and acoustic properties of the propeller. The assessment of harmful cavitation erosion, which is important in practice, is often problematic and time-consuming. The lecture presents theoretical approaches and test results, which speak for a strong correlation of acoustic phenomena in the high frequency range up to 1 MHz and cavitation erosion. After a theoretical analysis of single-bubble and bubble-cluster dynamics, results of measurements on erosion test stands and structure-borne noise measurements at a cavitation tunnel are presented. The results of these acoustic measurements then show a significant correlation in comparison to the results of erosion tests and full-scale observations and give indications for an improvement of the experimental methodology and the prognosis reliability.

Zusammenfassung:

Auf Grund der Schallausbreitungsbedingungen im Wasser interessieren die Schiffsgeräusche im Fernfeld im Allgemeinen nur in einem Frequenzbereich bis ca. 100 kHz. Im Nahfeld werden dagegen auch fein auflösende hochfrequente Echolote bis 1 MHz eingesetzt. Die propellerbedingten Schiffsgeräusche sind stark abhängig von den Kavitationseigenschaften des Propellers wobei im niedrigen Frequenzbereich ein enger Zusammenhang zwischen visuellen Kavitationserscheinungen und akustischen Eigenschaften des Propellers besteht. Die für die Praxis wichtige Einschätzung der schädlichen Kavitationserosion ist oft problematisch und aufwändig. In dem Vortrag werden theoretische Ansätze und Versuchsergebnisse, die für eine starke Korrelation von akustischen Erscheinungen im hochfrequenten Bereich bis 1 MHz und Kavitationserosion sprechen, dargestellt. Nach einer theoretischen Betrachtung der Einzelblasen- und Clusterdynamik werden Ergebnisse von Messungen an Erosionsprüfständen und Körperschallmessungen am Kavitationstunnel dargestellt. Die Ergebnisse dieser Akustikmessungen zeigen dann im Vergleich zu den Ergebnissen von Erosionsversuchen und Großausführungsbeobachtungen eine signifikante Korrelation und geben Hinweise für eine Verbesserung der Versuchsmethodik und der Prognosesicherheit.

1 Einleitung

Auf der Grundlage theoretischer Betrachtungen zur Einzelblasenkavitation mittels der Rayleigh-Plesset Gleichung ([1] bis [6]) wurde ein numerisches Verfahren zu deren Lösung entwickelt und das Spektrum einer kavitierenden Einzelblase im Wechselfeld abgeleitet. Durch Betrachtung vieler Blasen mit statistisch verteilten Anfangsbedingungen konnten Aussagen zum Geräuschkennlinienpektrum von Blasenclustern gewonnen werden. Unter Verwendung sehr schneller AD-Wandler, geeigneter Sensorik und entsprechender Software [11] konnten Körperschall- und Wasserschallmessungen an einem Erosionsprüfstand der Ruhr-Universität Bochum (RUB) mit

Unterstützung von Professor Pohl und Frau Blumenau vorgenommen werden. Schließlich konnten am Kavitationstunnel der SVA Potsdam GmbH akustische Versuche mit erosiv und nicht erosiv kavitierenden Propellern vorgenommen werden. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass signifikante Pegelanhebungen größer 200 kHz ein Hinweis auf erosive Kavitation darstellen können, wobei eine endgültige Abklärung des Charakters der Kavitation z.B. durch Lackabtragungsversuche erfolgen sollte. Die hier aufgezeigte Versuchsmethodik sollte dahingehend weiter verbessert werden, dass am rotierenden Propeller der direkte Körperschall bis ca. 1 MHz aufgezeichnet wird um den erosiven Anteil der Blasenimplosionen auf der metallischen Oberfläche direkter erfassen zu können. Abschließend wird noch ein Beispiel von hochfrequenten akustischen Großausführungsmessungen an einem Schiff mit kavitierendem Propeller gegeben.

2 Akustische Analyse von kavitierenden Einzelblasen und Blasenclustern

Anlehnend an die Darstellungen und Bezeichnungen aus [3] sei die Dynamik einer kavitierenden Wasserblase mit der Modellvorstellung aus Bild 1 durch die verallgemeinerte Rayleigh-Plesset-Gleichung (1) hinreichend gut beschrieben.

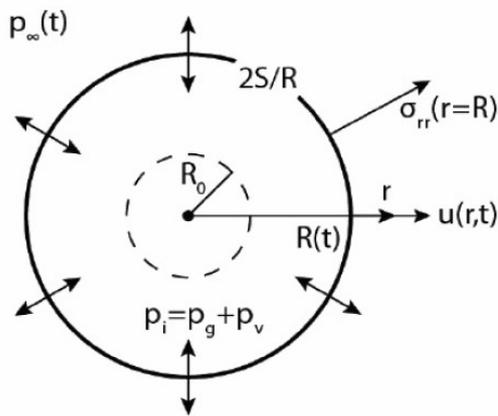


Bild 1: Kavitierende Einzelblase

$$(p_v - p_\infty(t)) + (p_\infty(0) - p_v + \frac{2 \cdot S}{R_0}) \cdot \left(\frac{R_0^3 - h^3}{R^3 - h^3}\right)^\gamma = \rho \cdot R'' \cdot R + \rho \cdot \frac{3}{2} \cdot R'^2 + \frac{2 \cdot S}{R} + \frac{4 \cdot \mu \cdot R'}{R} \quad (1)$$

Die numerische Lösung dieser Differentialgleichung zweiter Ordnung ist sehr aufwändig da sie für $R = 0$ singularär wird. Die numerische Lösung erfolgte mit den Parametern: $n = \gamma = \kappa = 1.4$ (isentrop), dem Dampfdruck von Süßwasser $p_v = 1700 [Pa, 15^\circ C]$, der Dichte $\rho = 1000 [\frac{kg}{m^3}]$,

dem van der Waals Radius for Luft $h = \frac{R_0}{8.5} [m]$ (vgl. [5]), der kinematischen Viskosität

$\nu = \frac{\eta}{\rho} = 0.000001 [\frac{m^2}{s}]$ und der Oberflächenspannung $S = 0.073 [\frac{kg}{s^2}]$. Für eine nicht implodierende Blase gelingt eine Näherungslösung (Minnaert-Gleichung (2)) durch

Linearisierung der Rayleigh-Plesset-Gleichung durch einen Lösungsansatz $R = R_0 + R_0 \cdot \phi \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t}$ und Einsetzen

$$\rho \cdot \omega^2 \cdot \phi \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} + (p_v - p_\infty(0)) + p_{g0} \cdot \left(\frac{R_0 + R_0 \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t}}{R_0}\right)^{3 \cdot n} = \tilde{p} \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \text{ woraus}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot n \cdot (p_\infty(0) - p_v)}{\rho \cdot R_0^2}} \quad (2)$$

und mit $n = \gamma = \kappa = 1.4$ (Polytropenexponent). Damit lässt sich also die Frequenz einer schwingenden Dampf- (Luft-) Blase in Wasser beschreiben.

Wird die Blasendynamik bzw. deren akustisches Verhalten als Monopolstrahler (pulsierende Kugel) interpretiert, dann gilt: Wird im Abstand r_2 den Schalldruck p_2 (einer einzelnen Blase) gemessen, dann lässt sich der Druck im Abstand r_1 wie folgt berechnen: $p_1 = \frac{r_2}{r_1} \cdot p_2$ (3)

In Bild 2 werden verschiedene Lösungen der Gleichung (1) in Druckwechselfeldern mit unterschiedlichen Frequenzen im Zeitbereich dargestellt.

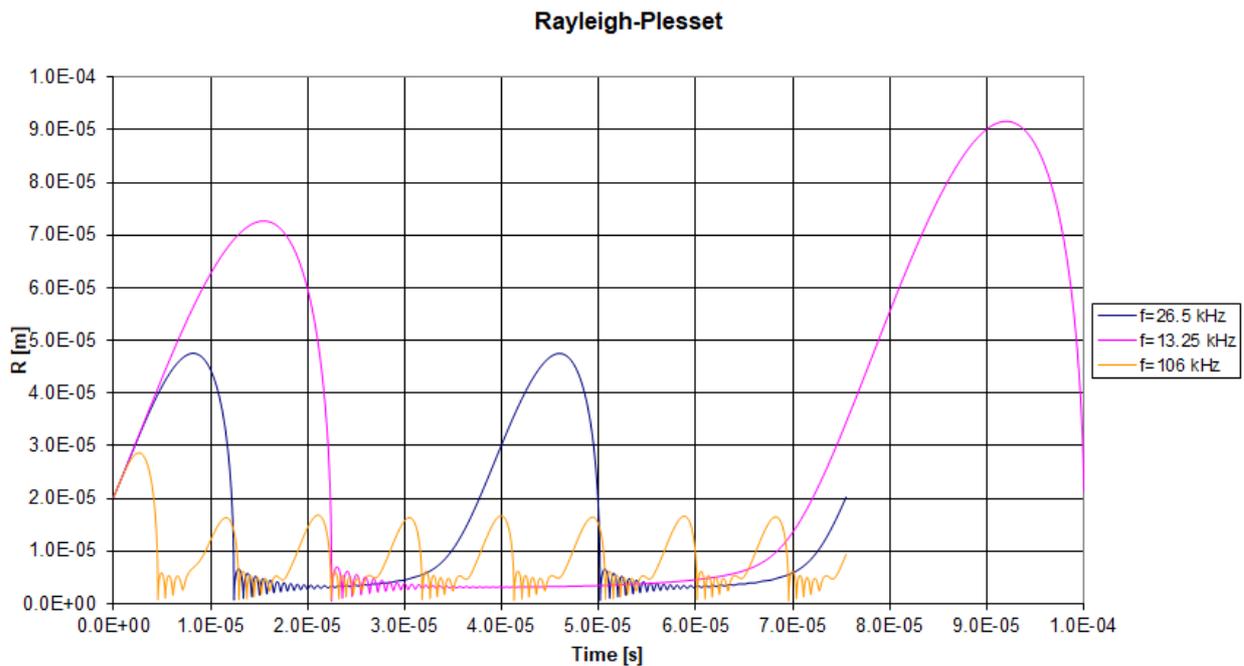


Bild 2: Beispiele von Lösungen der Rayleigh-Plesset Gleichung mit Blasenimplosionen

Für eine einzelne wiederkehrend implodierende Blase in einem 100 Hz Druckfeld wird das Terzspektrum der Schallabstrahlung in Bild 3 bis 40 kHz dargestellt. Für ein Blasencluster bestehend aus 100 Einzelblasen mit stochastisch verteilten Anfangsradien (Keimverteilung) wird in Bild 4 das dazugehörige Terzspektrum bis 40 kHz angegeben. Die schon aus Bild 2 ersichtliche extrem kurzzeitigen Implosion mit „Nachschwingen“ erzeugen also ein Frequenzspektrum bis zu höchsten Frequenzen.

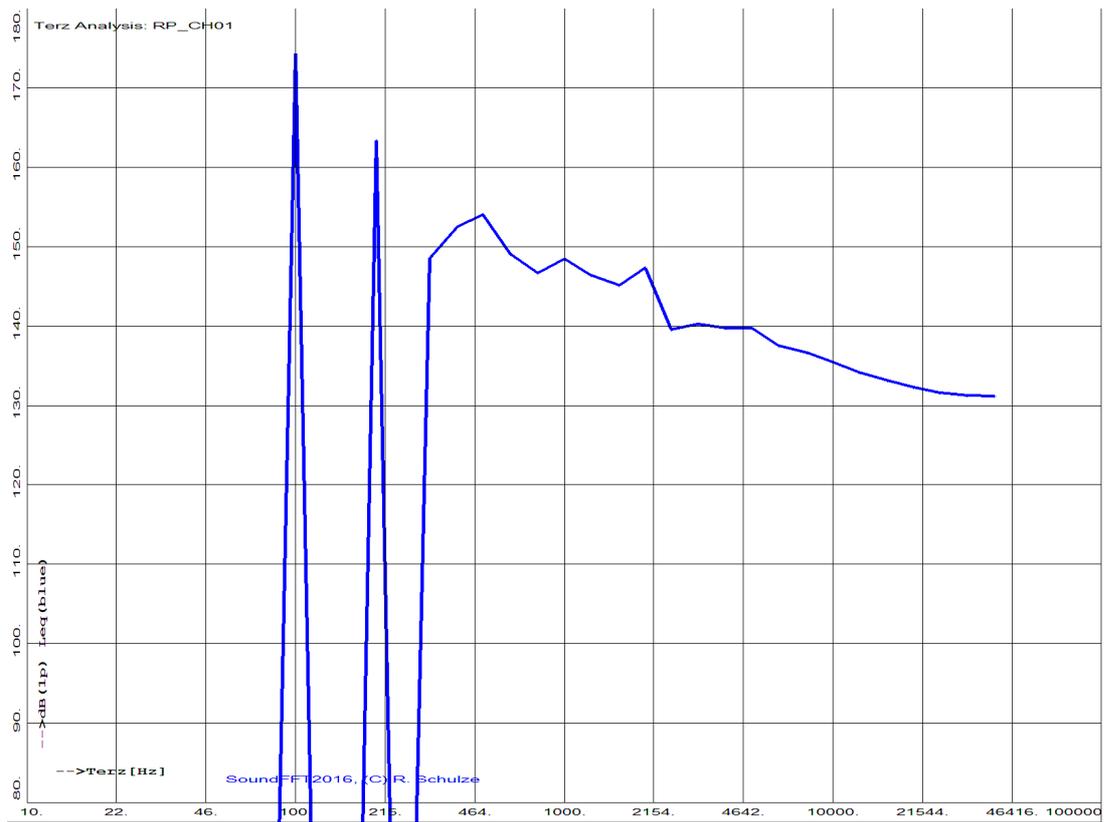


Bild 3: Terz-Spektrum einer kavitierenden Einzelblase im 100 Hz Druckfeld

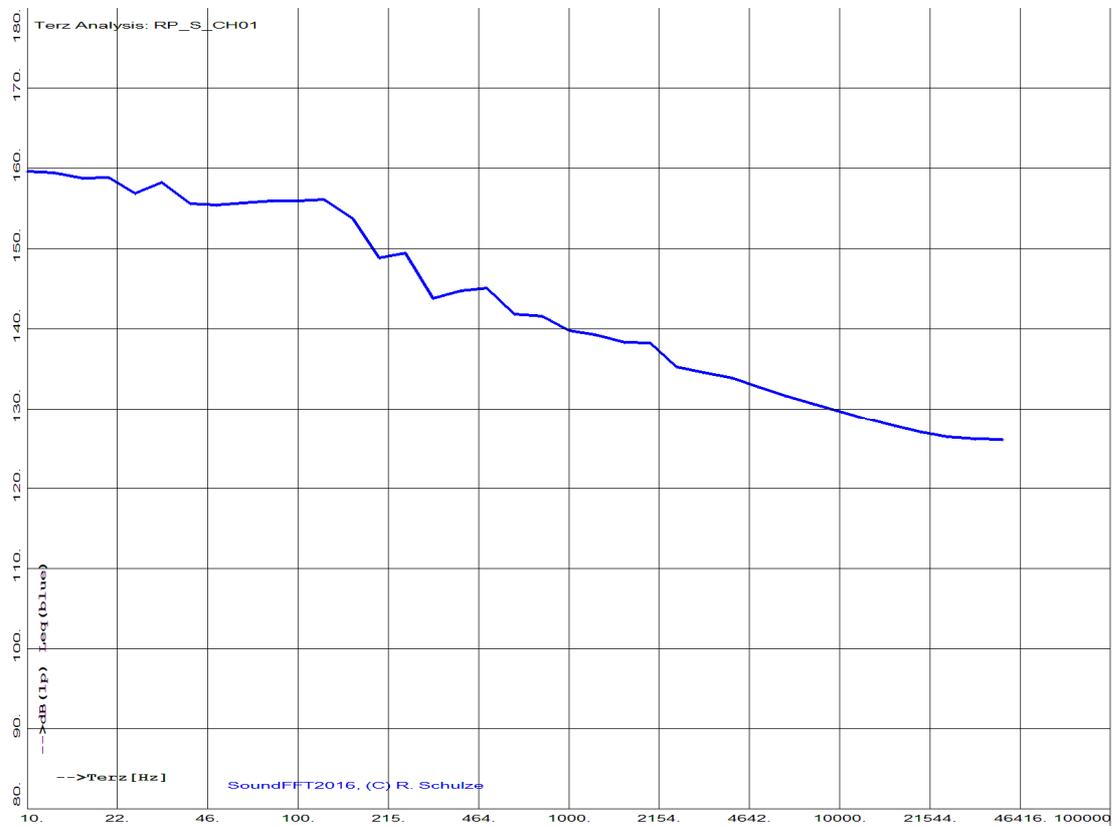


Bild 4: Terz-Spektrum eines kavitierenden Blasenclusters im 100 Hz Druckfeld

3 Körperschall und Wasserschallmessungen an einem Erosionsprüfstand

An einem standardisierten Erosionsprüfstand an der Ruhr-Universität Bochum konnten Körperschall- und Wasserschallaufzeichnungen mit einer Abtastrate von 1 MHz durchgeführt werden. Die Prinzipanordnung des verwendeten Erosionsprüfstandes ist in Bild 5 dargestellt. Die Anordnung mit Körperschallsensor unter der Probe wird in Bild 6 und die Verwendung eines Hydrophons (TC4013) wird in Bild 7 wiedergegeben. Das Ergebnis eines Erosionsversuches wird in Bild 8 gezeigt. Der Abtrag durch Erosion wird durch Wägen ermittelt und grafisch über der Zeit aufgetragen (Bild 9).

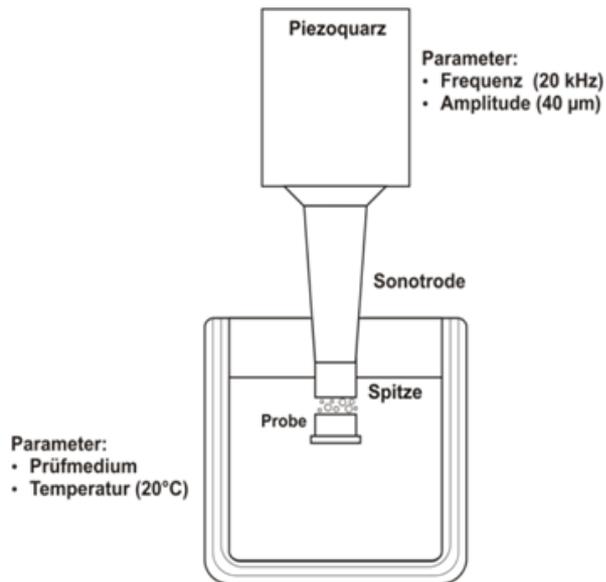


Bild 5: Prinzipdarstellung des Erosionsprüfstandes an der RUB (Prof. Pohl, M. Blumenau)

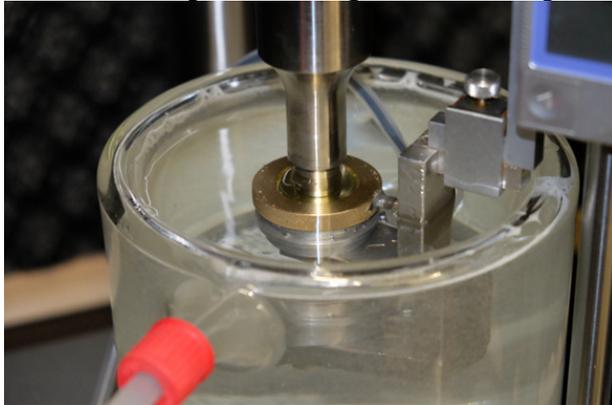


Bild 6: Erosionsprüfstandes an der RUB mit Körperschallsensor

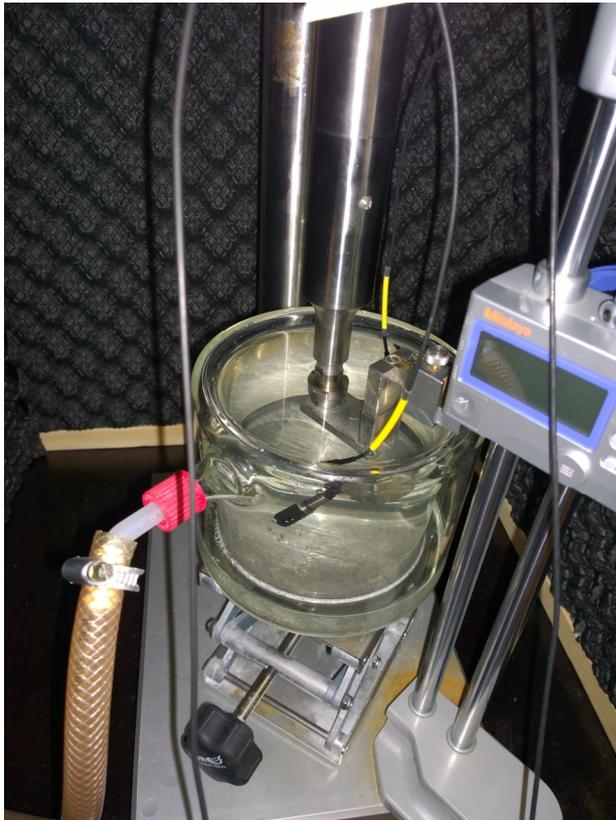


Bild 7: Erosionsprüfstandes an der RUB mit Hydrophon (TC4013)



Bild 8: Probe1 nach Abschluss der Prüfung

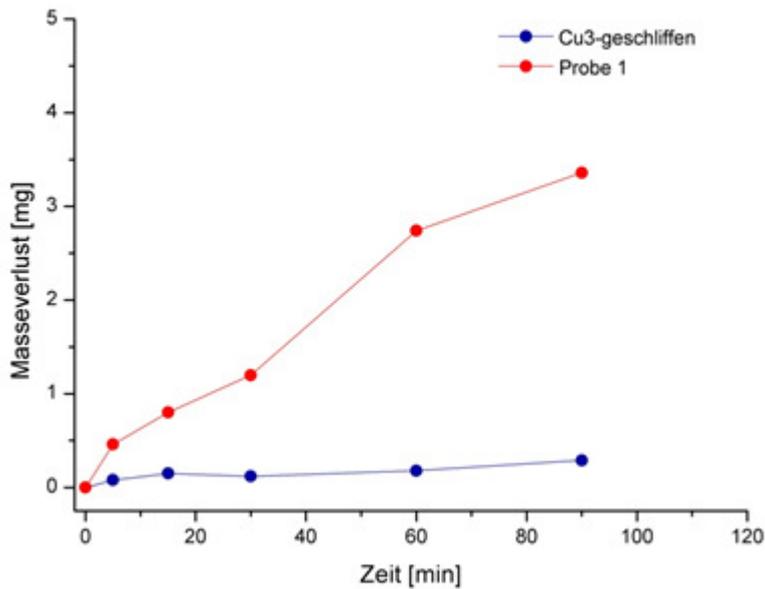


Bild 9: Durch Wägen ermittelte Stärke der Erosion über die Zeit für zwei Proben (RUB: Prof. Pohl, M. Blumenau)

Das in Bild 10 gezeigte Körperschallspektrum bis 100 kHz bei einer Schwingungsfrequenz der Sonotrode von 20 kHz bei einem Probenabstand von 3 mm lässt unter Verwendung der Gleichung (2), der Minnaert-Gleichung, vermutlich Rückschlüsse auf die Verteilung der Blasendurchmesser zu. Diese Vermutung wird durch parallel dazu erfolgte High-Speed-Videoaufzeichnungen gestützt.

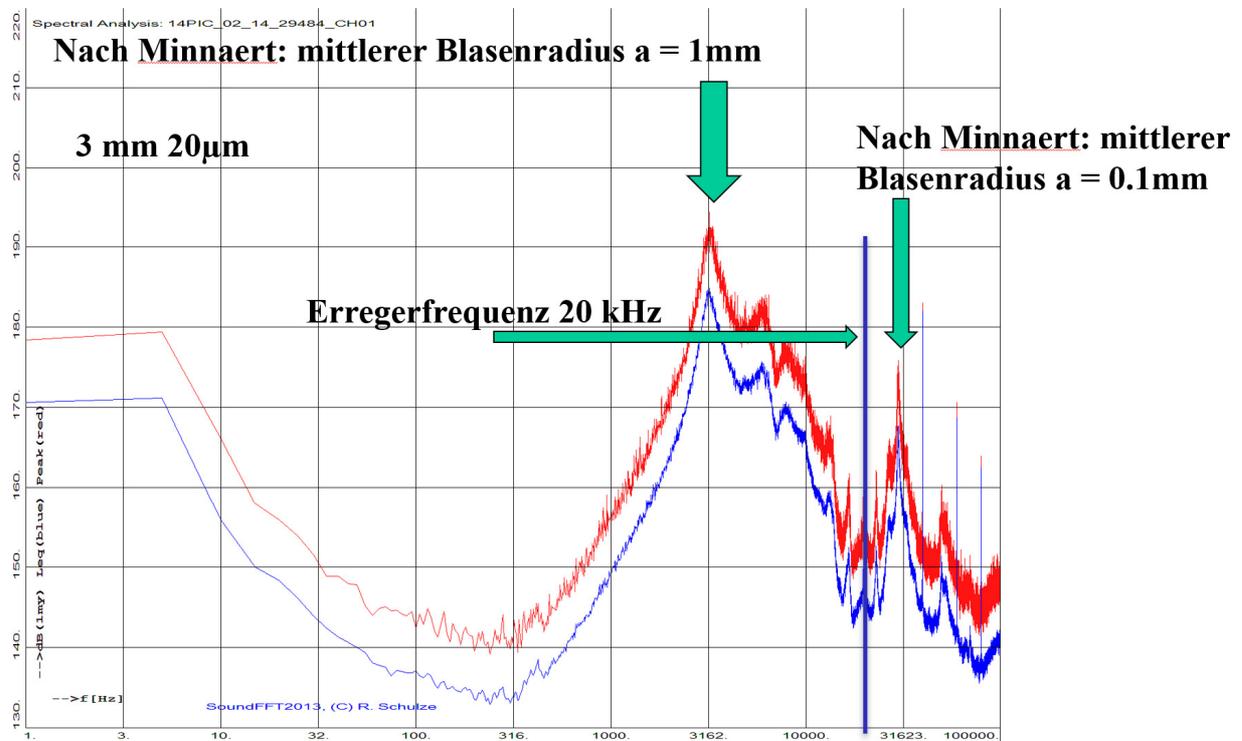


Bild 10: Körperschall-Frequenzspektrum

Da die gemessenen Schalldrücke für die Wasserschallmessungen am Hydrophon sicher die Summe vieler einzelner Blasen sind, besteht eine Schwierigkeit in der Abschätzung der Anzahl der beteiligten Blasen. Eine zweite Schwierigkeit besteht in der Abschätzung der Anzahl der tatsächlich kollabierenden Blasen im freien Wasser, der Anzahl der kollabierenden Blasen auf der Probenoberfläche (die die eigentliche Erosion bewirken) und die Anzahl der „nur pulsierenden“ Blasen. Wird die Blasendynamik bzw. deren akustisches Verhalten als Monopolstrahler (pulsierende Kugel) interpretiert, dann gilt die Gleichung (2). Das Hydrophon hatte einen Abstand von ca. $r_2 = 40$ mm von der Probe. Zur Berechnung des Abstandes r_1 könnte der (mittlere) Radius selbst der schwingenden Blase herangezogen werden. Dieser Radius wird hier nach Gleichung (2) aus den gemessenen Spektren abgeleitet werden:

So ergibt sich z.B. aus der Messung im Bild 11 eine deutliche Pegelanhebung bei 275000 Hz. Dabei wurden die spektralen Anteile, die durch Harmonische der erregenden Frequenz von 20 kHz erzeugt werden, nicht berücksichtigt. Nach Gleichung (2) ergibt sich dann ein mittlerer Blasenradius zu $r_B = 0.00593$ mm (5.93 μ m). Wird r_1 gleichgesetzt mit r_B lässt sich unter Verwendung von (3) folgender mittlerer Druck in diesen Blasen ableiten:

$p_1 = \frac{40}{0.00593} \cdot p_2 = 6745 \cdot p_2$. Mit den gemessenen Pegeln aus Bild 11 ergäbe sich daraus ein Blaseninnendruck von ca. 700 kPa

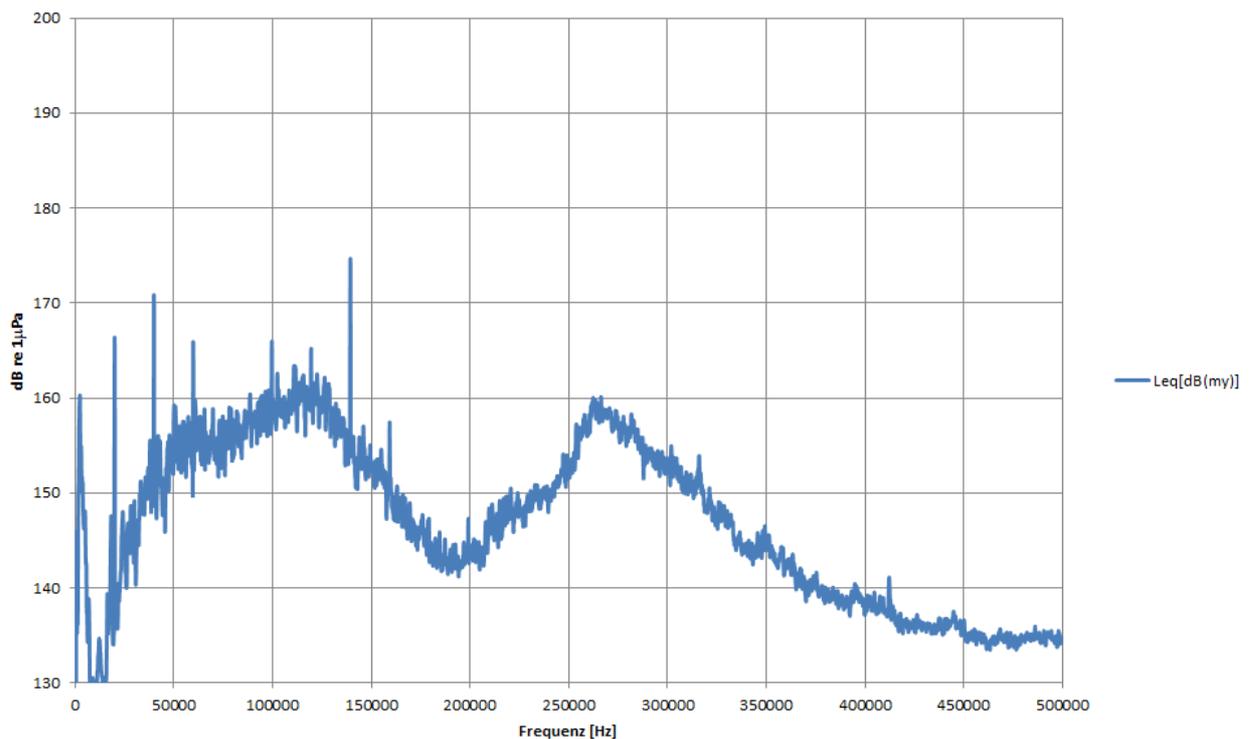


Bild 11: Wasserschallfrequenzspektrum

Für tatsächlich implodierende Blasen – im freien Wasser oder auf der Probenoberfläche – ergibt diese Herleitung allerdings eine singuläre Situation (theoretisch unendlich hohe Drücke). Diese singulären Situationen können nur durch die Herausbildung des Mikro-Jets und seiner Wechselwirkung mit der Probenoberfläche erklärt werden.

4 Modellversuche im Kavitationstunnel

Im Kavitationstunnel der SVA Potsdam wurden u.a. zwei Propeller akustisch untersucht von denen bekannt war, dass der Propeller P1 für einen Geschwindigkeitsbereich zwischen 26 und 29 kn starker erosiver Kavitation unterliegt. Dagegen wies der Propeller P2 für dieselbe Auslegesituation keine erosive Kavitation auf. An den Fenstern des Kavitationstunnels wurden Beschleunigungssensoren angebracht (Bild 12) und die Signale einem schnellen AD-Wandler zugeführt und mit 2 MHz abgetastet.



Bild 12: Körperschallsensoren am Fenster des Kavitationstunnels

Bereits die Darstellung der Standardabweichungen der akustischen Signale über die Schiffsgeschwindigkeit zeigte im Geschwindigkeitsbereich zwischen 26 und 30 kn einen starken Anstieg des Pegels für den Propeller P1 in Bild 13 im Vergleich zu den Ergebnissen von Propeller P2 in Bild 14.

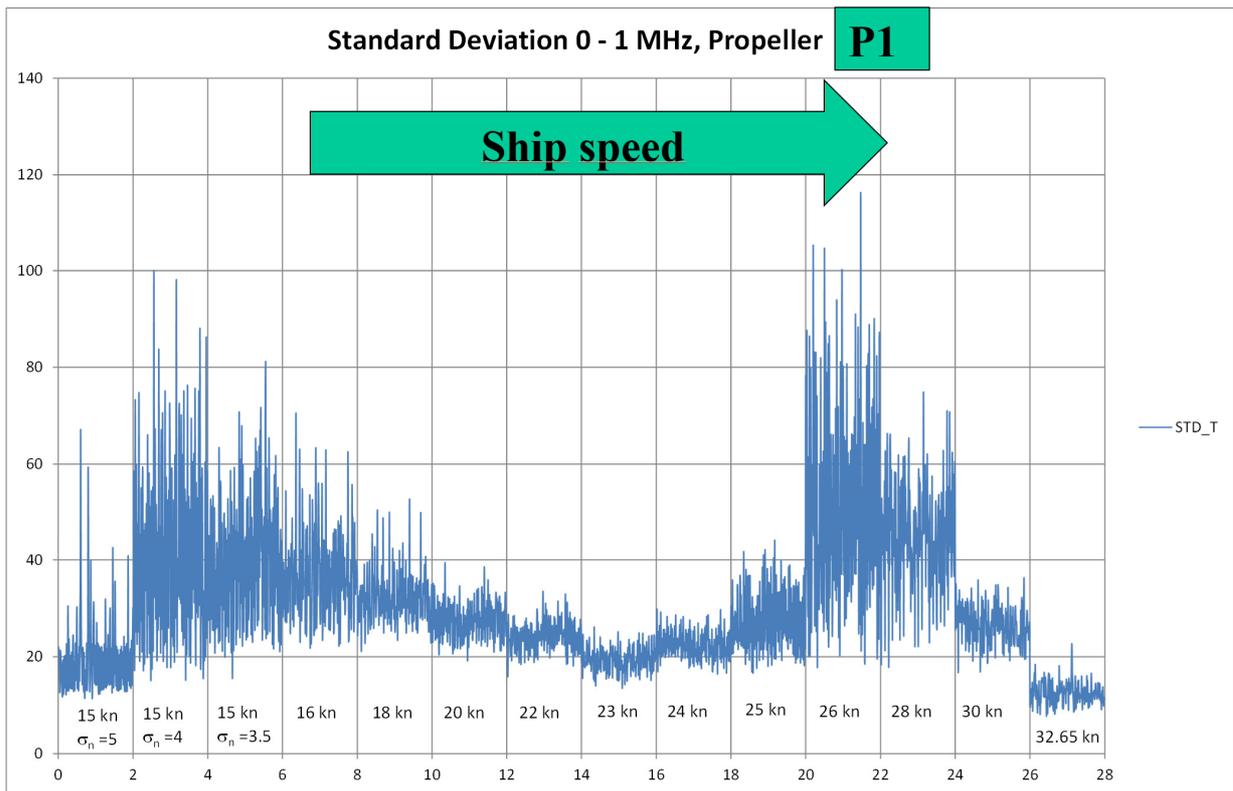


Bild 13: Standardabweichung des Körperschalls über die Geschwindigkeit des bei 26 bis 28 kn erosiv kavitierenden Propellers P1

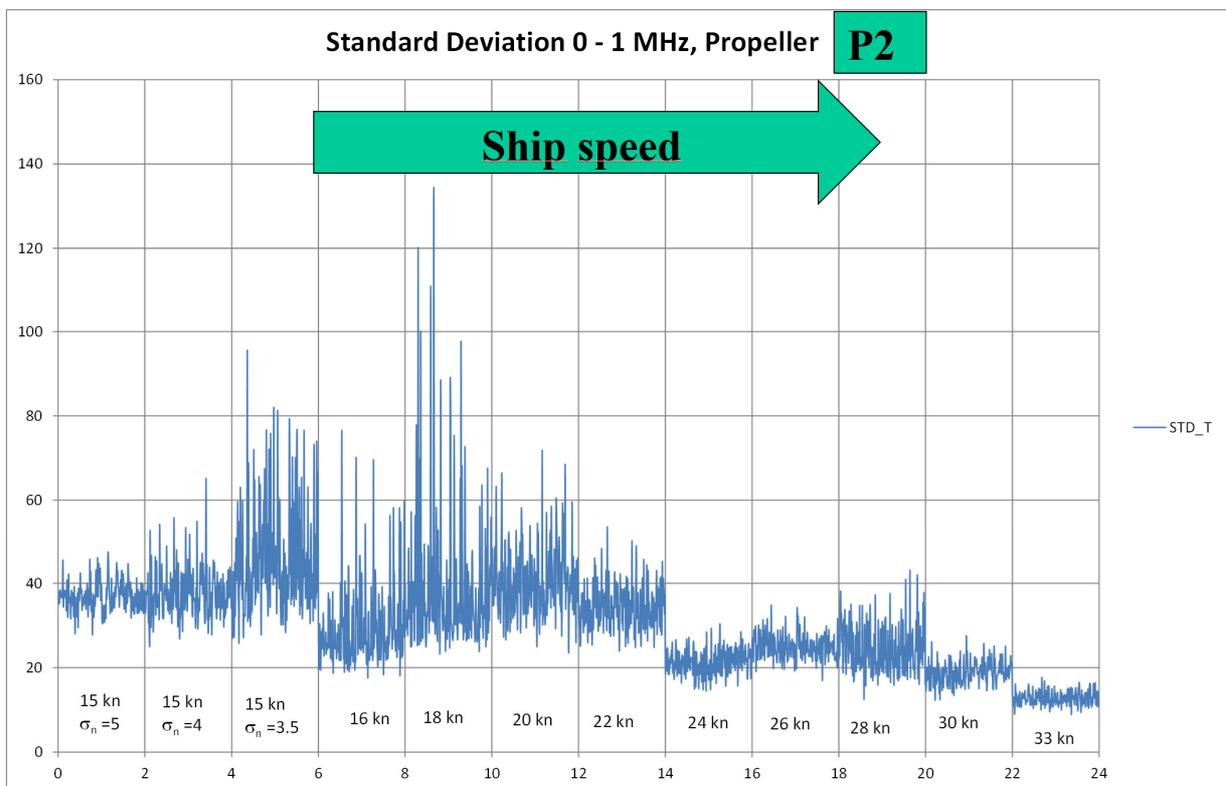


Bild 14: Standardabweichung des Körperschalls über die Geschwindigkeit des bei 26 bis 28 kn nicht kavitierenden Propellers P1

Mit einer zeitlichen Auflösung von 1 ms wurden die Signale von Propeller P1 bis 1 MHz analysiert und in Form eines Campbelldiagramms in Bild 15 dargestellt. Parallel dazu wurden mit einer High-Speed Videokamera die erosiven Blasenimplosionen im Wurzelbereich der Flügel sichtbar gemacht (Bild 16). Insgesamt zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den extrem hochfrequenten (bis 1 MHz) akustischen Erscheinungen und der sichtbaren Blasenimplosion sowie dem Lackabtrag in Bild 16.

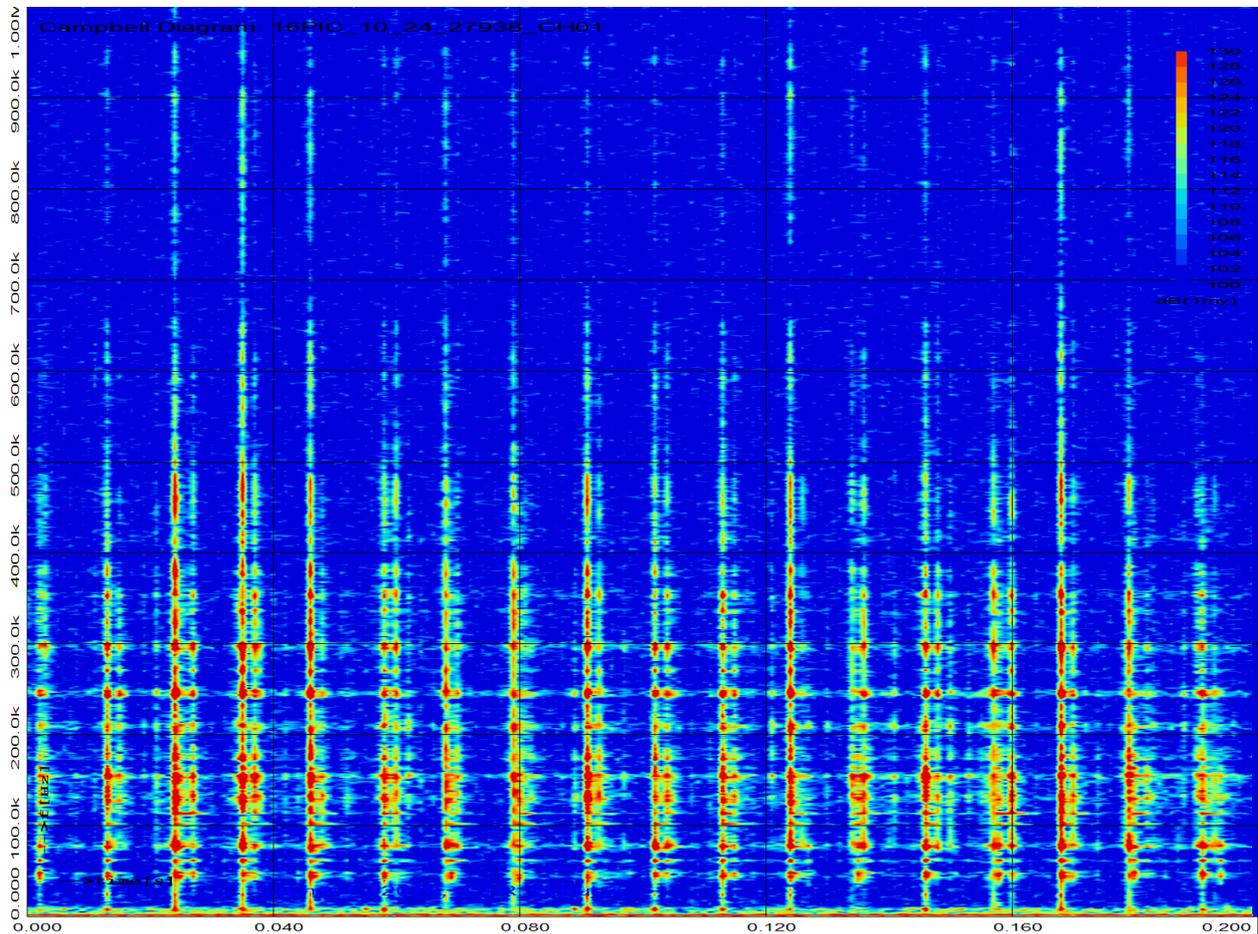


Bild 15: Campbelldiagramm eines des erosiv bei 26 kn kavitierenden dreiflügeligen Propellers P1 (Zeitbereich: 0.2 s, Frequenzbereich 0 – 1 MHz, Drehzahl 30 1/s, Zeitauflösung 1 ms)

Im Bild 15 lässt sich alle 11 ms eine erosive Blasenimplosion erkennen. Dies entspricht exakt drei Implosionen pro Umdrehung, d.h. bei jedem Flügel (-wurzel) tritt einmal pro Umdrehung eine erosive Implosion auf.

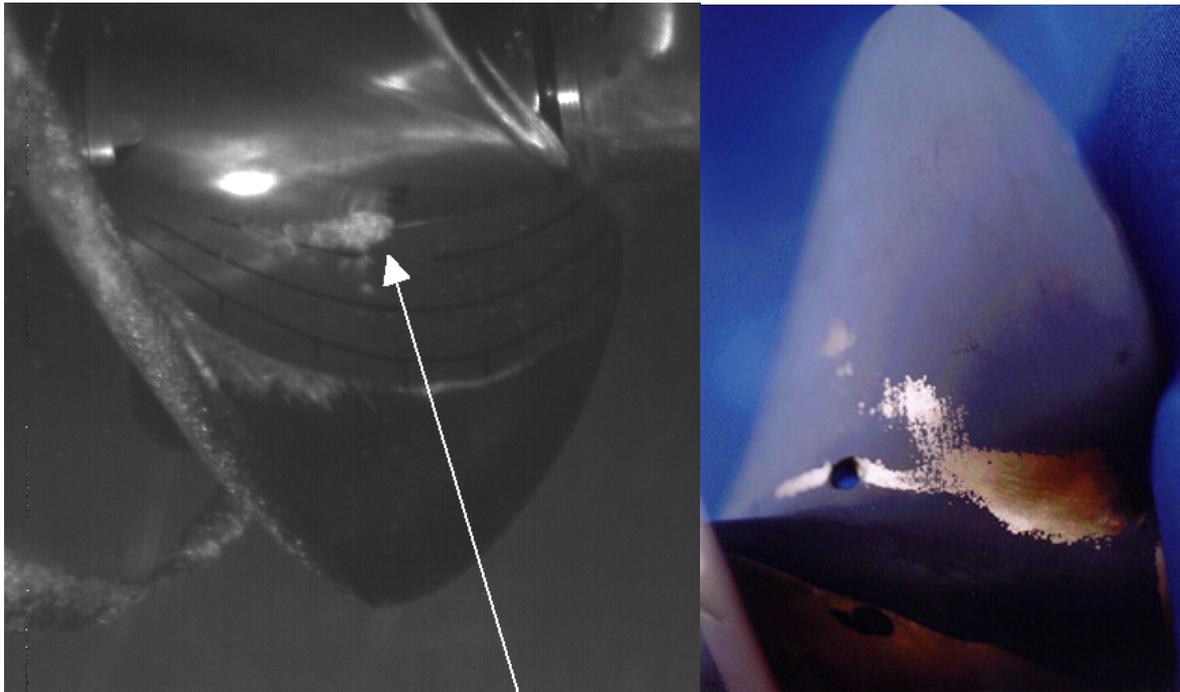


Bild 16: Screenshot der Blasenimplosion im Wurzelbereich von P1 und Lackabtrag beim klassischen Erosionsversuch

5 Wasserschallmessungen im höherfrequenten Bereich in der Großausführung

Auf Grund der starken Schallabsorption in Seewasser für höhere Frequenzen (vgl. Bild 17) lässt sich vermuten, dass Schallmessungen im Bereich bis 1 MHz uninteressant sind.

Sound Absorption in Sea Water

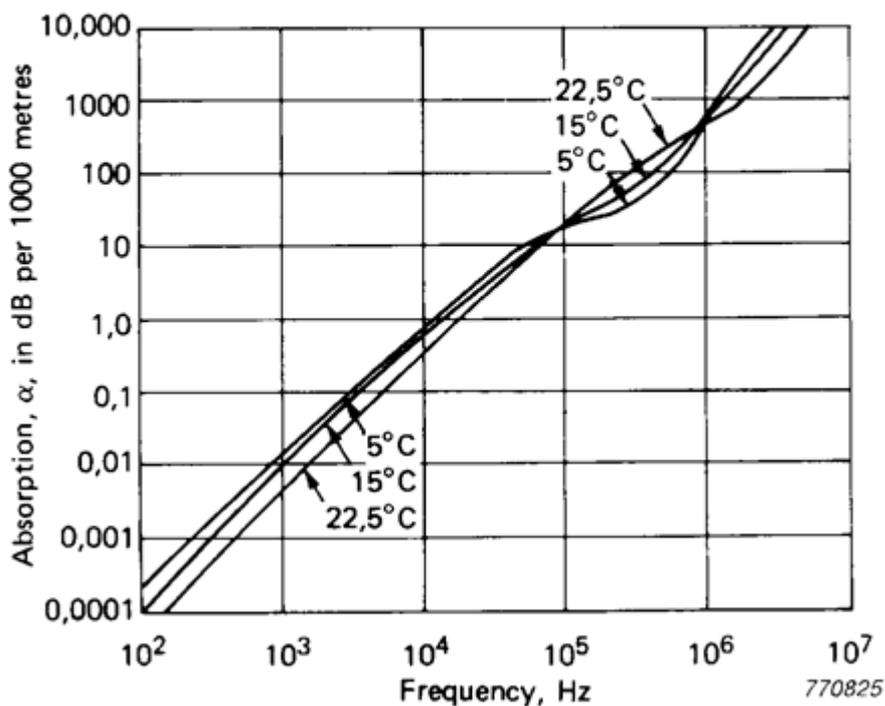


Bild 17: Schallabsorption in Seewasser in Abhängigkeit von der Frequenz

Ein mit einem bei 430 kHz arbeitendem Echolot ausgestatteten Schiff trat die Vermutung auf, dass dieses Echolot von einem möglicherweise kavitierenden Propeller gestört wird. Wasserschallmessungen im Abstand von ca. 30 m mit einem Hydrophon (TC4013) ließen im Spektrum aber sowohl eindeutig die Pings des Echolotes als auch das breitbandige „Rauschen“ des kavitierenden (aber nicht erosiv) Propellers erkennen. Die Situation wird im Campbelldiagramm Bild 18 verdeutlicht. Die Sendepings des Echolotes sind eindeutig zu erkennen. Offenbar beruhten die festgestellten Störungen des Echolotes darauf, dass aber die Echos zu stark von den Propellergeräuschen gestört wurden.

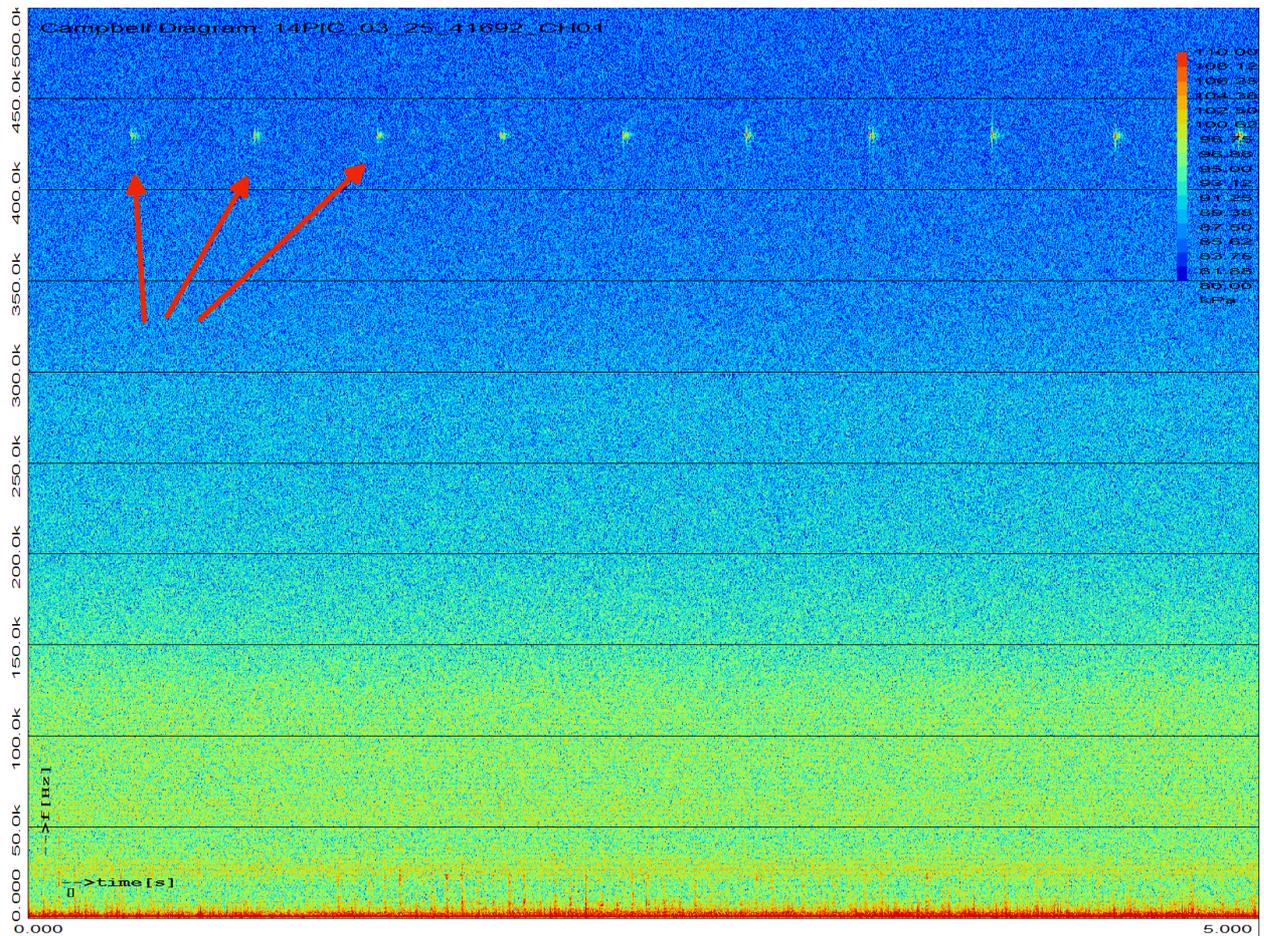


Bild 18: Campbelldiagramm eines bei 430 kHz sendenden Echolotes mit kavitierendem Propeller über 5 s, Frequenzbereich 0 kHz bis 500 kHz (rot: einzelne Pings markiert)

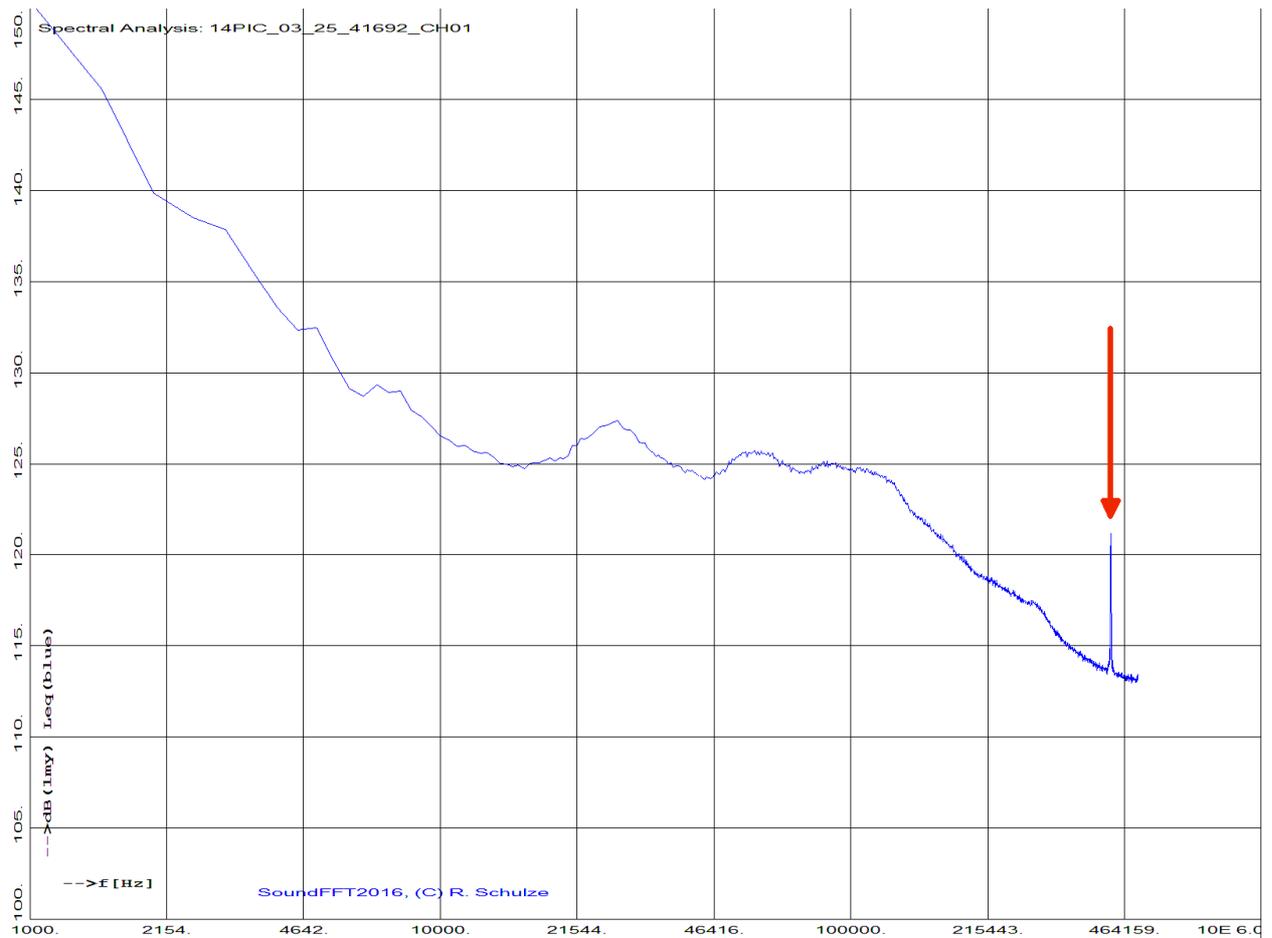


Bild 19: Spektrum eines bei 430 kHz sendenden Echolotes mit kavitierendem Propeller im Frequenzbereich 1 kHz bis 500 kHz (rot markiert die Frequenz des Sendepings)

6 Zusammenfassung

Aus theoretischen Erkenntnissen und praktischen Messungen lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit im hochfrequenten Teil des Wasserschallspektrums bis ca. 1 MHz starke Indizien für den Charakter der Kavitation ableiten. Insbesondere zur Ermittlung des erosiven Charakters von Kavitation an Propellern kann dies zur deutlichen Effektivierung im Versuchswesen führen, wenn a priori erosive Kavitation ausgeschlossen bzw. Hinweise für erosive Kavitation aus wenig aufwändigen akustischen Begleitmessungen während (optischer) Kavitationsversuche erhalten werden. Die hier aufgezeigte Versuchsmethodik sollte dahingehend weiter verbessert werden, dass am rotierenden Propeller der direkte Körperschall bis ca. 1 MHz aufgezeichnet wird um den erosiven Anteil der Blasenimplosionen auf der metallischen Oberfläche direkter erfassen zu können. An Hand von Serienversuchen und einer ausführlichen Korrelationsanalyse von optischen und akustischen Kavitationserscheinungen sollte die Problematik weiter vertieft werden.

7 Referenzen

- [1] Isay, W.H.
Kavitation. 3. Ausgabe, Hamburg: Schiffahrts-Verlag Hansa, 1989.
- [2] Brennen, C.E.:
Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [3] Hilgenfeldt, S. ; Brenner, M. ; Grossmann, S.
Lohse, D.: Analysis of Rayleigh-Plesset dynamics for sonoluminescing bubbles.
Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [4] Hwang, P.A. ; Teague, W.J.
Low-Frequency Resonant Scattering of Bubble Clouds. Journal of Atmospheric and
Oceanic Technology (Vol. 17), 2000.
- [5] Puttermann, S.J. ; Weninger, K.R.
Sonoluminescence: How Bubbles turn Sound into Light.
Los Angeles: University of California, 2000.
- [6] Hwang, P.A. ; Teague, W.J.
Low-Frequency Resonant Scattering of Bubble Clouds. Journal of Atmospheric and
Oceanic Technology (Vol. 17), 2000.
- [7] Heinke, H.-J.
Untersuchung von Schicht-, Blasen- und Wolkenkavitation und der damit verbundenen
Erosionsprobleme Bericht 2730, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Potsdam,
September 2001
- [8] Friesch, J.
New Results Around Propeller and Rudder Cavitation on Large High-
Powered Ships, STG Sprechtag "Kavitation" 30. Januar 2003 in Hamburg
- [9] Junglewitz, A.
"Cavitation Erosion - Damages and Countermeasures from a Classification
Service Providers Point of View ". STG Sprechtag "Kavitation"
30. Januar 2003 in Hamburg
- [10] Schulze, R.
Untersuchung der Korrelation zwischen Spitzenwirbelkavitation
und Druckschwankungen höherer Ordnung Abschlußbericht zum FuE-Vorhaben
Korrelation Spitzenwirbelkavitation, Bundesministerium für Bildung und Forschung,
53170 Bonn, Reg.-Nr.: 18S 0 194, Berichts-Nr. 2923, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam,
Juli 2003
- [11] Schulze, R.
Interfacebeschreibung für hochabgetastete Signale.
SVA Potsdam: Bericht 3421, 2008.