

Entwicklung eines Kavitationssensors für NE-Metallschmelzen

Ulf Bauerschäfer¹, Lars Ledig¹, Stefan Gai¹

¹ Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien e.V., E-Mail: bauerschaefer@gmbu.de

Einleitung

NE-Metallschmelzen und insbesondere Aluminium-Schmelzen werden vorrangig durch Druckguss zu geometrisch komplexen Teilen geformt. Ein Problem stellen Defekteinschlüsse dar (Abbildung 1). Diese Einschlüsse besitzen eine hohe Härte und können bei einer Nachbearbeitung der Gussteile zu Werkzeugschäden führen.



Abbildung 1: Dies ist ein Aluminiumdruckgussteil mit einem Defekt-Einschluss (dunkel).

Kavitation durch Leistungsumschall wird aus diesem Grund als Prozesstechnologie für NE-Metallschmelzen eingesetzt. Die Schmelzen können durch diesen Prozessschritt gereinigt werden, es kann eine Kornfeinung der erhärteten Schmelze erfolgen, sowie eine Dichte-Erhöhung durch die Verringerung des Gasanteils ist möglich [1], [2].

Die Messung der Kavitations-Intensität ist auf Grund der hohen Prozesstemperaturen (Aluminium-Schmelzen ca. 700°C) und dem nicht transparenten Medium schwierig. Eine Lösung sind externe Cavitometer [3], [4]. Der Nachteil dieser Cavitometer besteht in der Störung des akustischen Feldes durch einen externen Wellenleiter. Eine andere Lösung durch die Nutzung der Sonotrode als Wellenleiter wurde in [5] vorgeschlagen. Dies ermöglicht eine interne Messung und liefert Aussagen zum Kavitationsfeld direkt an der Sonotrode. Ein Problem ist die Sensorbefestigung an einer Sonotrode die mit maximaler Auslenkung (resonant) angeregt wird.

Entwicklung eines internen Kavitationssensors

Die Aufgabe ist, einen Kavitationssensor für eine interne Messung mit der Sonotrode als Wellenleiter und für Fluide mit hohen Prozesstemperaturen zu entwerfen. Für die Entwicklung und die Untersuchung der Eigenschaften wurde ein Ultraschall-System der dr. hielscher GmbH genutzt. Es besteht aus einer Ultraschallprozessor-Einheit UIP 1000 mit separater elektronischer Ansteuerung,

Titansonotrode, Keramiksonotrode und Kühlsystem (Abbildung 2).



Abbildung 2: Leistungsumschall-System mit Ultraschall-Processor UIP 1000 und Titansonotrode mit Keramiksonotrode und Kühlluftmantel. Die Höhe beträgt ca. 1.2 m.

Der optimale Ort des Kavitationssensors für die Erfassung des hochfrequenten akustischen Rauschens aus dem Kavitationsfeld und des dadurch erzeugten hochfrequenten elastischen Wellenfeldes im Sonotrodensystem der Ultraschallanlage ist ein Ort mit einer minimale Amplitude des Verschiebungsfeldes der Grundmode (Arbeitsmode). Dadurch ist das schwache Rausch-Signal gut bei einem starken Signal der Grundmode detektierbar (gutes Signal-Rausch-Verhältnis). Der Ort für den Kavitationssensor wurde durch die Lösung der Bewegungsgleichung für das mechanische Vektorfeld der Verschiebung gefunden [7], [8]. Dazu wurde der Gradient des Spannungstensors gleich der Beschleunigung des Verschiebungsfeldes multipliziert mit der Massendichte als Impulsbilanz genutzt. Der Spannungstensor wurde aus dem Tensorprodukt des Steifigkeitstensors und dem Deformationstensor berechnet. Dieser Deformationstensor ist wiederum eine Funktion des Verschiebungsfeldes. Zusammen mit den Materialparametern für Titan, dem Young-Modul, dem Poisson-Verhältnis und der Dichte kann der Steifigkeitstensor bestimmt werden.

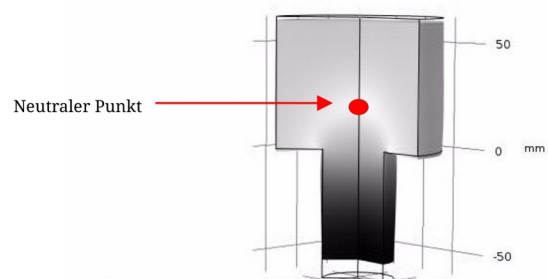


Abbildung 3: FEM Modellierung der Dynamik der Grundmode der Titansonotrode (Horn) von dem Neutralen Punkt

Ultraschallprozessor (oben) zur Keramiksonotrode (unten) 18.1 kHz . Die Grauwerte kodieren die Amplitude des Gesamtverschiebungsfeldes (schwarz - maximal). Im neutralen Punkt ist die Auslenkung des Verschiebungsfeldes für die Grundmode minimal.

Die Lösung des Gleichungssystems ergibt das Verschiebungsfeld (Abbildung 3). Auf der Symmetrie-Achse befindet sich ein neutraler Punkt in dem die Amplitude der Grundmode Minimal (Null) ist. Dieser Punkt wurde als Ort für den Sensor gewählt. Der Zugang erfolgte durch eine Bohrung entlang kleiner Auslenkungen des Verschiebungsfeldes.

Der Ort wurde außerdem auf Grund der hohen Temperaturen der Aluminiumschmelze gewählt. Er befindet sich oberhalb des Kühlluftsystems und wird nicht heißer als 80°C, da diese Temperatur auch nicht für den Ultraschall-Prozessor überschritten werden darf. Dadurch kann eine empfindliche Sensorlösung (Acoustic Emission Sensor, AE) auf Piezo-Basis genutzt werden.

Der Test wurde mit einem AE-Sensor S9225 von Physical Acoustics durchgeführt. Wichtig ist die lokale akustische Kopplung im neutralen Punkt und die möglichst geringe akustische Kopplung an den Zuführungen der Signalleitungen.

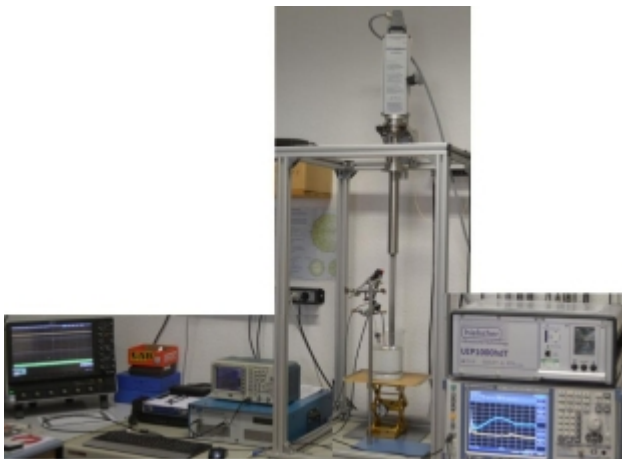


Abbildung 4: Versuchsaufbau mit Ultraschall-System, Modellfluid Wasser mit externen Hydrophon RP, elektronischer Ansteuerung, R&S Signal-Analyzer, Leistungsverstärker E&I, Tektronix Funktionsgenerator und LeCroy Oszilloskop

Der Kavitationssensor wurde an einem Versuchsstand mit folgenden Geräten und Sensoren getestet (Abbildung 4):

- Leistungsumschallsystem hielscher UIP1000dT mit Keramiksonotrode und Kühlrohr sowie elektronischer Ansteuerung.
- Funktionsgenerator Tektronix AFG3022
- Breitband-Leistungsverstärker E&I Power Amplifier

- Oszilloskop LeCroy WavePro 725Zi
- Empfänger 1: Hydrophon RP 37 RP.ACOUSTICS
- Empfänger 2: AE-Sensor S9225 Physical Acoustics
- Quelle 1: Breitband-Transducer 10 kHz- 10 MHz Sonotec
- Quelle 2: PVDF-Folie beschichtet und als Spirale geformt.
- Quelle 3: Hielscher UP200s

Test des Kavitationssensors

Der Kavitationssensor wurde im ersten Schritt in dem Modellfluid Wasser getestet. Auf Grund der ähnlichen kinematischen Viskosität von Wasser bei 20 °C im Vergleich zur kinematischen Viskosität von Aluminium bei 700°C können die Ergebnisse qualitativ übertragen werden [3], [6].

Die akustischen und elastischen Übertragungseigenschaften der Sonotrode wurden durch mehrere Versuchsaufbauten untersucht. Zuerst erfolgte die Bestimmung der Breitbandeigenschaften von 5 kHz - 6 MHz des Hydrophons und des externen AE-Sensors durch einen Sinus-Sweep mit Hilfe des Transducers als Quelle. Anschließend wurde die Übertragung eines Sinus-Signals 5 kHz - 6 MHz einmal mit dem AE-Sensor im Fluid und einmal mit dem AE-Sensor im neutralen Punkt (Sonotrode als Wellenleiter) bestimmt. Das Sinus-Signal wurde über den Wellenleiter bis ca. 1.8 MHz oberhalb des Grundrauschens aufgenommen.

Anschließend wurde ein synthetisches weißes Rauschen bis 20 MHz erzeugt und durch unterschiedliche Quellen in das Fluid übertragen. Die besten Ergebnisse wurden durch eine beschichtete PVDF Folie in Form einer Spirale zur Vermeidung von elektrischen Einkopplungen erzielt. Das weiße Rauschen konnte bis 6 MHz über den Wellenleiter Sonotrode im neutralen Punkt gemessen werden. Das so erzeugte stochastische Feld ist jedoch nur in der Zeit stochastisch. Das Kavitationsrauschfeld ist in der Zeit und durch die Kavitationsblasen auch im Raum ein stochastisches Feld.

Es wurde deshalb zuerst das Übertragungsverhalten eines passiven Kavitationsrauschfeldes getestet. Dieses Feld wurde durch eine externe Quelle, Hielscher UP200s, erzeugt. Es zeigte sich die Bandbegrenzung bei ca. 1.8 MHz des AE-Sensors. Interessant ist, das die Grundmode bei der externen Messung des AE-Sensors (im Wasser) als maximaler Peak im Spektrum erkennbar ist. Der AE-Sensor im neutralen Punkt zeigt ein Spektrum mit einem kleinen Peak der Grundmode und einem etwas größeren Peak der 5. Oberwelle.

Abschließend wurde das System durch die aktive Erzeugung des Kavitationsrauschens durch die angeregte Keramiksonotrode getestet. Die Eintauchtiefe der Sonotrode entsprach nicht den Hersteller-Empfehlungen und führte deshalb wahrscheinlich zu Verstimmungen des Gesamtsystems. Es konnte dadurch eine Prozessänderung simuliert werden. Zuerst wurde das System mit Hilfe der

elektronischen Steuerung von 20% bis 100% Leistung angeregt. Die Rausch-Spektren wurden durch ein externes Hydrophon aufgezeichnet (Abbildung 5).

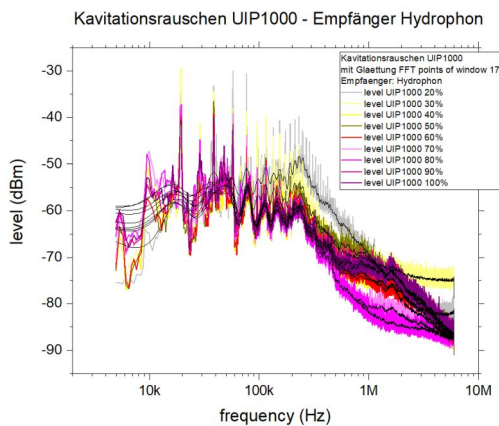


Abbildung 5: Spektren der aktiven Kavitationserzeugung im Fluid Wasser bei unterschiedlichen Leistungen von 20% -100% (Farbe: Grau bis Dunkelrot) und anschließende Glättung der Kurven (Farbe: Schwarz) aufgenommen mit dem Hydrophon extern.

Anschließend wurde die Rauschamplitude (level dBm) der Grundmode über der Leistung aufgetragen (Abbildung 6).

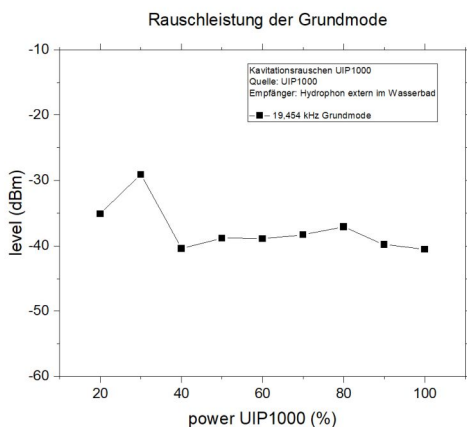


Abbildung 6: Rauschamplitude der Grundmode (19.45 kHz) über der eingestellten Leistung der elektronischen Ansteuerung gemessen am Hydrophon extern.

Erkennbar ist eine nicht lineare Abhängigkeit der Grundmode von der angezeigten Leistung.

Rauschleistung des hochfrequenten Kavitationsrauschens

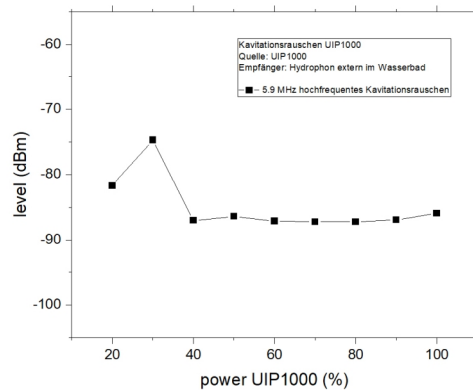


Abbildung 7: Rauschamplitude des hochfrequenten Kavitationsrauschens bei 5.9 MHz über der eingestellten Leistung der elektronischen Ansteuerung gemessen am Hydrophon extern.

Interessant ist der qualitativ ähnliche Verlauf der Rauschleistung des hochfrequenten Kavitationsrauschens bei 5.9 MHz (Abbildung 7). Dadurch ist das hochfrequente Signal als Maß für die Intensität der Kavitationsleistung besonders geeignet. Weitere Untersuchungen müssen diese Annahme erhärten.

Anschließend wurde der Versuch mit dem Kavitationssensor, d. h. dem AE-Sensor im neutralen Punkt wiederholt (Abbildung 8).

Kavitationsrauschen UIP1000 - Empfänger Kavitationssensor

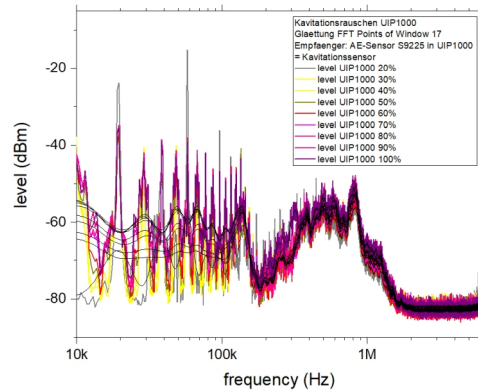


Abbildung 8: Spektren der aktiven Kavitationserzeugung im Fluid Wasser bei unterschiedlichen Leistungen von 20% -100% (Farbe: Grau bis Dunkelrot) und anschließende Glättung der Kurven (Farbe: Schwarz) aufgenommen mit dem Kavitationssensor intern (AE-Sensor im neutralen Punkt).

Die Spektren zeigen einen Abfall bei 1.8 MHz u. a. durch die Bandbegrenzung des AE-Sensors. Aus diesen Spektren wurde die Rauschamplitude der Grundmode ermittelt (Abbildung 9).

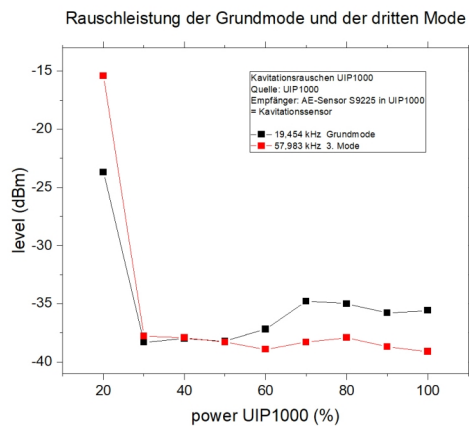


Abbildung 9: Rauschamplitude der Grundmode (19.45 kHz) über der eingestellten Leistung der elektronischen Ansteuerung gemessen am Kavitationssensor.

Der nichtlineare Verlauf resultiert wiederum aus den oben genannten Gründen. Aufgetragen wurde die Grundmode und die 3. Oberwelle.

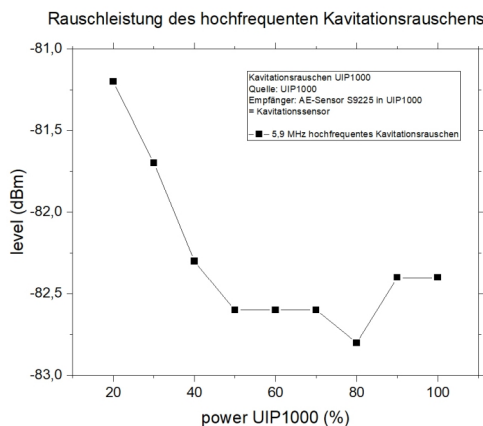


Abbildung 10: Rauschamplitude des hochfrequenten Kavitationsrauschens bei 5.9 MHz.

Aus den gemittelten Spektren wurde das hochfrequente Rauschen aufgetragen (Abbildung 10). Das Ergebnis ist analog zum Versuch mit dem Hydrophon extern. Obwohl die Rauschleistung bei 5.9 MHz qualitativ ähnlich aussieht wie die Grundmode bei 19.45 kHz sind die Werte durch die Bandbegrenzung des AE-Sensors zu ungenau um sie in dieser Form in der Industriepraxis nutzen zu können.

Zusammenfassung und Ausblick

Erste Ergebnisse des neu entwickelten Kavitationssensors zeigen die Möglichkeiten der Messung des Kavitationsrauschens als Maß zur Bestimmung der Kavitationsintensität in dem Modell-Fluid Wasser. Als nächste Aufgabe wird das System in einer Aluminium-Schmelze getestet. Die Erhöhung der Bandbreite zur Aufnahme des Kavitationsrauschens im neutralen Punkt wird Aufgabe zukünftiger Arbeiten sein.

Literatur

- [1] Eskin, G.I.: Broad prospect for commercial application for the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. *Ultrasonic Sonochemistry* 8 (2001), 319-325
- [2] Puga, H., Barbosa, J., Machado, J. M., Vilranho: Ultrasonic grain refinement of die cast copper alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 263 (2018), 336-342
- [3] Tzanakis, I., Hodnett, M. Lebon, G. S. B., Dezhkunov, N., Eskin, D. G.: Calibration and performance assessment of an innovative high-temperature cavitometer. *Sensors and Actuators: A Physical* A240 (2016), 57-69
- [4] Tzanakis, I., Lebon, N., Eskin, D. G., Pericleous, K. A.: Characterisation of the ultrasonic acoustic spectrum and pressure field in aluminium melt with an advanced cavitometer. *Journal of Materials Processing Technology* 229 (2016), 582-586
- [5] Patent Kavitationssensor GMBU, DE 10 2010 043 316 B4
- [6] Dinsdale, A. T., Queded, P. N.: The viscosity of aluminium and its alloys – A review of data and models. *Journal of Materials Science* 39 (2004), 7221-7228
- [7] COMSOL Multiphysics cyclopedia, URL: <https://www.comsol.com/multiphysics/stress-and-equations-of-motion?parent=structural-mechanics-0182-202>
- [8] Royer, D., Dieulesaint, E. *Elastic Waves in Solids*. Springer, Berlin Heidelberg, 2000