

# Erweiterung des Primärnormals für den Ultraschallwechseldruck und Verminderung der Kalibrierunsicherheiten

Martin Weber, Volker Wilkens

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: Martin.Weber@ptb.de

## 1. Einleitung

Um die Größe „Ultraschallwechseldruck in Wasser“ darzustellen und weiterzugeben wird ein Primärnormal benötigt. Dieses führt die physikalische Einheit des Wechseldrucks, das Pascal, auf die Basiseinheiten des SI-Systems zurück. Mit diesem Normal werden Hydrophone kalibriert, indem ihre Übertragungsfunktionen bestimmt werden. Bei der Messung wird der Schalldruck eines Ultraschallwandlers interferometrisch bestimmt und anschließend mit dem elektrischen Signal des zu kalibrierenden Hydrophons verglichen.

Derzeitig betreibt die PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) ein Normal, welches routinemäßig für Kalibrierungen bis zu 40 MHz eingesetzt wird [1]. In dieser Arbeit wird ein alternativer Messplatz unter Verwendung eines Vibrometers vorgestellt. Mit diesem lassen sich erstmals sowohl Tonbursts als auch breitbandige Impulse als Anregungssignale einsetzen. Für beide Anregungsarten wurden Unsicherheitsbudgets erstellt. Diese werden am Beispiel der Messung eines Membranhydrophons präsentiert.

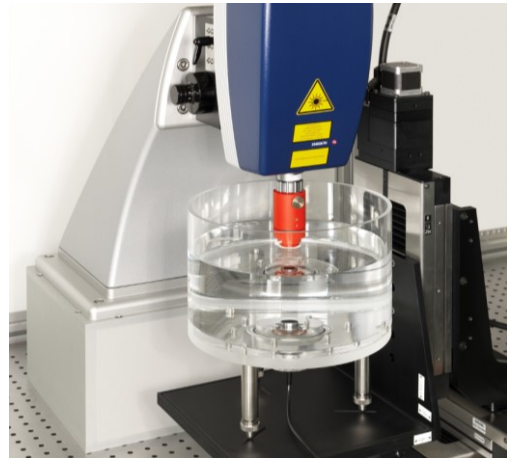
Zukünftig soll dieser Messplatz die bestehenden Messmöglichkeiten ergänzen und eine Kalibrierung auch bei höheren Frequenzen ermöglichen. Eine Verminderung der Kalibrierunsicherheiten wird ebenfalls angestrebt.

## 2. Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau wurde bereits in [2] vorgestellt und ist an das Messprinzip des bisherigen Primärnormals [1] angelehnt. In Abbildung 1 ist die neue Anordnung gezeigt.

In einem mit entionisiertem und entgastem Wasser gefüllten Gefäß (Durchmesser 250 mm) befindet sich am Boden ein Ultraschallsendewandler. Dieser emittiert Ultraschall in Richtung Wasseroberfläche. Auf der Wasseroberfläche liegt eine 0,9  $\mu\text{m}$  dünne Folie aus Polyethylenterephthalat (PET) auf. Diese Folie ist auf der Luft zugewandten Seite mit 50 nm Aluminium beschichtet, um eine hohe optische Reflektivität zu erhalten. Der einfallende Ultraschall führt zu einer Auslenkung der Wasseroberfläche und damit auch der Folie. Diese Auslenkung wird mit dem Vibrometer (Polytec UHF-120) durch optische Interferometrie bestimmt. Aus der Auslenkung wird der Schalldruck berechnet und damit das Schallfeld an dem Ort der Messung charakterisiert.

In einem zweiten Schritt wird das zu charakterisierende Hydrophon an demselben Ort des Schallfeldes positioniert und das Schallfeld reproduziert. Der zeitliche Verlauf der Hydrophonspannung wird mit einem Oszilloskop (Le Croy Wavepro 725Zi-A) gemessen. Die anschließende Auswertung einschließlich der Berechnung notwendiger Korrekturen findet im Computer statt. Als Ergebnis wird die fre-



**Abbildung 1:** Messstand zur Hydrophonkalibrierung. In der oberen Bildhälfte ist der Messkopf des Vibrometers zu sehen. Dieser ist auf die Folie ausgerichtet, die sich am unteren Ende der roten Halterung befindet und auf der Wasseroberfläche aufliegt. In der Bildmitte ist der Wasserbehälter mit dem Ultraschallwandler am Behälterboden zu sehen. Zur Positionierung dienen 3 motorisierte Verschiebeeinheiten, die auf der rechten Seite zu sehen sind.

quenzabhängige Hydrophonempfindlichkeit als Verhältnis der Hydrophonausgangsspannung zu dem interferometrisch gemessenen Schalldruck bestimmt.

Die Erzeugung des Ultraschallsignals erfolgt dabei auf zwei unterschiedlichen Arten.

Bei der ersten Art wird ein Tonburst verwendet. Dabei werden mit einem Funktionsgenerator (Tektronix AFG3101) Sinussignale mit 30 Perioden generiert. Diese werden über einen Leistungsverstärker (ENI 350L) und nach einer Impedanzanpassung (PTB-Eigenentwicklung) an einen Sendewandler (Karl Deutsch STS 6WB 4-20) weitergegeben. Nacheinander werden die verschiedenen Messfrequenzen zur Anregung verwendet. Von den empfangenen Signalen werden 20 Perioden des eingeschwungenen Zustandes ausgewertet. Dabei kommt ein Flat-Top-Window zum Einsatz.

Die zweite Signalart ist die Anregung durch einen breitbandigen Impuls. Dazu wird mit einem Pulsgenerator (PTB-Eigenentwicklung) ein geladener Kondensator über den Sendewandler (Karl Deutsch TS 12 PB 3-12 P 50) entladen. Der Impuls besitzt ein breites Frequenzspektrum und ermöglicht dadurch die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Hydrophons über einen weiten Frequenzbereich. Diese Anregungsmethode wird bereits für sekundäre Kalibrierungen [3] eingesetzt, jedoch noch nicht für Primärkalibrierungen, da die Amplitude den linearen Messbereich des derzeitigen Normals übersteigt.

### 3. Unsicherheitsbeiträge

Bei der Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit treten eine Reihe von Einflussgrößen auf, die einen Beitrag zur Messunsicherheit liefern. Diese sind im Folgenden beschrieben.

#### Frequenzgang des Vibrometers

Bei der Messung mit dem Vibrometer spielt sowohl der Frequenzgang der Fotodioden als auch der des Oszilloskops eine Rolle. Der Frequenzgang des Oszilloskops wird bereits in der Vibrometer-Software durch die Werte einer Werkskalibrierung kompensiert. Es verbleibt jedoch der Frequenzgang der Fotodioden, woraus sich eine Unsicherheit bezüglich der Messung der Schwingungsamplitude ergibt.

Die Literaturwerte [4] sowie eigene Messungen unter Verwendung eines Femtosekunden-Lasers liefern eine Abschätzung für diese Unsicherheit von  $\pm 1,0\%$  der Amplitude für Schwingungsfrequenzen bis 200 MHz. Die Unsicherheit wird dabei als rechteckverteilt angenommen.

#### Laserwellenlänge

In den Spezifikationen des Vibrometers [5] ist die Laserwellenlänge mit  $(532\pm 1)$  nm angegeben, wobei eine Rechteckverteilung der Unsicherheit angenommen wird.

#### Numerische Demodulation

Das modulierte Signal des Vibrometers wird unmittelbar von dem Oszilloskop digitalisiert und an den Computer übertragen. Die Vibrometer Software übernimmt anschließend die Demodulation in das Wegsignal. Dies erfolgt numerisch mit endlicher Genauigkeit. In der Literatur [8] wird eine Unsicherheit von besser als  $\pm 0,1\%$  genannt. Es wird hierfür eine Rechteckverteilung angenommen.

#### Amplitudenbestimmung mittels Fourier-Transformation

Bei Verwendung der Burstanregung muss sowohl für die Vibrometermessung als auch die Hydrophonmessung eine Fensterfunktion verwendet werden, damit bei der Fourier-Transformation ein quasiperiodisches Signal vorliegt. Dies vermindert Leckeffekte, die ansonsten eine große Abweichung in der gemessenen Amplitude bewirken.

Der maximale Unsicherheitsbeitrag für das verwendete Flat-Top-Window kann der Literatur [9] entnommen werden. Dieser wird mit  $\pm 0,18\%$  abgeschätzt, wobei von einer Rechteckverteilung ausgegangen wird.

#### Signalrauschen

Das Signalrauschen wird jeweils für die Vibrometer- und die Hydrophonmessungen bestimmt. Dazu wird ein Datensatz mit abgeschaltetem Nutzsignal aber ansonsten gleichen Einstellungen für Mittelungsanzahl und Samplerate aufgezeichnet. Bei Verwendung der Burstanregung wird dieses Signal auch auf dieselbe Weise wie eine Messung mit Nutzsignal weiterverarbeitet. Dazu wird es auf die gleiche Anzahl an Datenpunkte gebracht und mit der gleichen Fensterfunktion gewichtet. Die Rauschamplitude wird anschließend aus dem RMS-Wert im Spektralbereich berechnet. Die Frequenzbandbreite wird so gewählt, dass alle bei der Auswertung betrachteten Frequenzen eingeschlossen sind. Der RMS-

Wert wird als der normalverteilte Unsicherheitsbeitrag verwendet.

### 4. Korrekturgrößen

Für die Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit sind folgende Korrekturgrößen zu berücksichtigen. Diese werden anhand von Modellgleichungen und Messwerten bestimmt und liefern jeweils auch einen Unsicherheitsbeitrag.

#### Folienkorrektur

Die Folienkorrektur beschreibt die akustischen Eigenschaften der PET-Folie und die damit einhergehende geringere Auslenkung der Folie im Vergleich zu einer freien Wasseroberfläche. Ihre Herleitung findet sich in [10]. Die Berechnung erfolgt mithilfe separat bestimmter Werte für die jeweiligen Folieneigenschaften.

Für die gemessene Dicke, Dichte und Schallgeschwindigkeit sowohl der Folie als auch der Aluminiumbeschichtung wird eine Unsicherheit von 10% angenommen [1]. Die Bestimmung der Messunsicherheit für die Folienkorrektur erfolgt numerisch anhand der Modellgleichung durch eine Min-Max-Abschätzung.

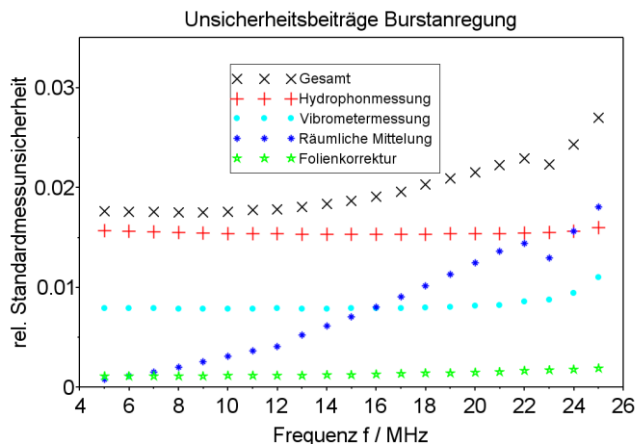
#### Räumliche Mittelung bei Burstanregung

Der Lichtfleck des Vibrometer besitzt im Fokus einen typischen Durchmesser von 12  $\mu\text{m}$ . Damit kann das Vibrometer als Punktsensor betrachtet werden. Hydrophone sind auf den über ihre sensitive Fläche gemittelten Schalldruck empfindlich. Ihr typischer Durchmesser liegt zwischen 0,2 und 1 mm. Um diesen Effekt zu korrigieren wird für die Burstanregung das Schallfeld des Wandlers berechnet [11, 12] und numerisch über die Hydrophonfläche integriert. Die Berechnung erfolgt mit zuvor bestimmten effektiven Werten für die Geometrie von Hydrophon und Wandler. Die Berechnung der Unsicherheit für die räumliche Mittelung erfolgt durch eine Min-Max-Abschätzung.

#### Räumliche Mittelung bei Impulsanregung

Die Berechnung der räumlichen Mittelung bei der Impulsanregung erfolgt wie in [3]. Das Schallfeld wird radial mit dem Vibrometer in kleinen Schritten abgetastet, so dass ortsaufgelöst Schalldruckprofile im Zeitsignal bestimmt werden. Aus diesen wird an jeder Position das Frequenzspektrum berechnet. Durch numerische Integration über die Hydrophonfläche wird dann die Korrektur für jede Frequenz bestimmt.

Die Unsicherheiten werden durch Berechnung des Korrekturfaktors unter Variation des Hydrophonradius, der Position des Hydrophons im Schallfeld sowie der Position des Vibrometers im Schallfeld bestimmt. Der Korrekturwert sowie seine Unsicherheit laufen mit steigender Frequenz gegen einen Grenzwert.



**Abbildung 2:** Messunsicherheiten bei Burstanregung. Es sind die einzelnen relative Unsicherheitsbeiträge (mit  $k = 1$ ) und die Gesamtunsicherheit dargestellt.

### Frequenzgang des Oszilloskops bei Hydrophonmessung

Für die Messung der Hydrophonspannung wird das Oszilloskop verwendet. Das Oszilloskop besitzt einen zuvor bestimmten Frequenzgang, um den die Hydrophonspannung korrigiert wird. Die Unsicherheit mit der der Frequenzgang bestimmt wurde wird rechteckverteilt mit  $\pm 2\%$  angenommen. Für die verbleibende Unsicherheit in der Spannungsmessung wird eine Rechteckverteilung mit  $\pm 2\%$  angenommen.

## 5. Bestimmung der Empfindlichkeit eines Membranhydrophons

Beispielhafte Messungen wurden an einem Membranhydrophon durchgeführt. Dieses Hydrophon besitzt eine  $9 \mu\text{m}$  dünne Polyvinylidenfluorid (PVDF) Membran. Der nominale Durchmesser der sensitiven Fläche beträgt  $0,2 \text{ mm}$ . Es verfügt über einen eingebauten Verstärker mit einem  $50 \Omega$  Ausgang und wird unter Verwendung eines  $50 \Omega$  Abschlusswiderstandes an das Oszilloskop angeschlossen.

### Anwendung der Burstanregung

Für die Burstanregung wurden Messungen von 5 bis 25 MHz in 1 MHz Schritten durchgeführt. Bei jeder Frequenz wurden 200 Burstsignale gemittelt.

Während der Auswertung wurden die zuvor genannten Unsicherheitsbeiträge berechnet. Diese sind als relative Unsicherheitsbeiträge in Abbildung 2 dargestellt. Zusätzlich ist die relative Gesamtunsicherheit als pythagoreische Summe gezeigt. Die Ergebnisse der Burstanregung für die Hydrophonempfindlichkeit einschließlich ihrer Unsicherheit finden sich in Abbildung 4.

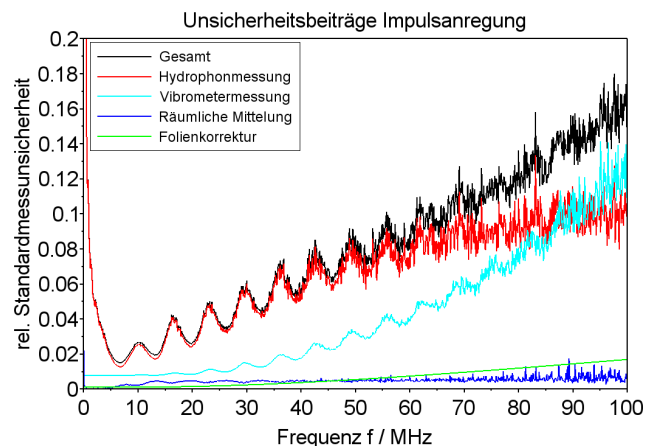
### Anwendung der Impulsanregung

Für die Impulsanregung wurde am Pulsgenerator eine Spannung von  $236 \text{ V}$  vorgegeben. Es wurde jeweils über 100 Pulse gemittelt. Bei der Auswertung wurden die relativen Unsicherheitsbeiträge sowie die Gesamtunsicherheit berechnet und diese sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Ergebnisse für die Hydrophonempfindlichkeit finden sich zusammen mit den Ergebnissen der Burstanregung in Abbildung 4.

## 6. Diskussion

Es wurden Messungen unter Verwendung von Tonburst- und Impulsanregung durchgeführt und mit den Daten einer älteren Primärkalibrierung verglichen (vgl. Abb. 4). Die Werte der Burst- und Impulsanregung stimmen untereinander im Rahmen ihrer Unsicherheiten gut überein. Verglichen mit den Daten der älteren Kalibrierung fällt aber auf, dass sie im Mittel um  $0,35 \text{ dB}$  niedriger liegen.

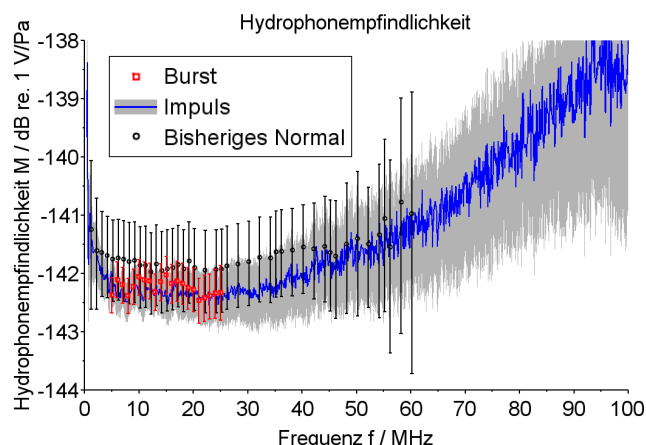
In beiden Anregungsarten wird die kombinierte Unsicherheit durch die Unsicherheit bei der Messung der Hydrophonspannung dominiert (vgl. Abb. 2 und 3). Bei der Ton-Burst-Anregung erkennt man ab  $20 \text{ MHz}$  sowohl einen Anstieg der Unsicherheit der Spannungsmessung als auch bei der Vibrometermessung. Dies ist dadurch begründet, dass die Druckamplitude des Sendewandlers in diesem Bereich abnimmt und dadurch auch das SNR abnimmt. Durch Verwendung weiterer Sendewandler lässt sich der Frequenzbereiche mit Gutem SNR erweitern. Dadurch steigt aber der experimentelle Aufwand und die Messwerte im Überlappungsbereich sind geeignet zu verknüpfen.



**Abbildung 3:** Messunsicherheit bei Impulsanregung. Es sind die einzelnen relative Unsicherheitsbeiträge (mit  $k = 1$ ) und die Gesamtunsicherheit dargestellt. Es zeigt sich, dass die Hydrophonmessung den dominierenden Unsicherheitsbeitrag liefert. Bei Frequenzen unterhalb der Eigenresonanzfrequenz des Wandlers von  $7 \text{ MHz}$  steigt der Unsicherheitsbeitrag der Hydrophonmessung, bedingt durch einen geringen Schalldruck, an. In die Berechnung der relativen Unsicherheiten der Hydrophon- und Vibrometermessung gehen die jeweils gemessene Werte als Divisor ein, wodurch das Rauschen mit dargestellt wird.

Der Unsicherheitsbeitrag der Vibrometermessung liegt in beiden Fällen bis  $20 \text{ MHz}$  bei unter  $1\%$  und steigt erst für höhere Frequenzen an. Dieser Anstieg ist besonders bei der Impulsanregung in Abbildung 3 zu sehen und durch das geringere Signal und damit einhergehend sinkende SNR begründet. Würde ein Schallfeld mit größerem Signalanteil bei den hohen Frequenzen verwendet werden, ließe sich dadurch das SNR verbessern. Die Unsicherheitsbeiträge der Folienkorrektur wie auch der räumlichen Mittelung bei der Impulsanregung liefern selbst bei sehr hohen Frequenzen oberhalb  $40 \text{ MHz}$  nur einen kleinen Beitrag zur Unsicherheit.

Für das bisherige Primärnormal wird die systematische Unsicherheit bei 4 MHz mit 5,8% ( $k = 1$ ) angegeben [1], wobei der größte Einzelbeitrag, die Frequenzantwort der Fotodioden, 4,7% beträgt. Spätere Untersuchungen ergaben Unsicherheit für die Frequenzantwort 2,4% ( $k = 1$ ) [13]. Durch die Verwendung des Vibrometers kann die Gesamtunsicherheit auf unter 2,0% ( $k = 1$ ) verringert werden.



**Abbildung 4:** Hydrophonempfindlichkeit unter Verwendung der Tonbursts als auch der Impulsanregung. Zum Vergleich sind Daten der Primärkalibrierung des Hydrophon mit dem bisherigen Normal aus dem Jahre 2011 dargestellt. Die Darstellung der Unsicherheiten erfolgt mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$ . Die grau hinterlegte Fläche beschreibt die Unsicherheit bei der Impulsanregung.

Das Vibrometer ermöglicht unter Verwendung der Impulsanregung Messungen bis 100 MHz. Die Bandbreite des Vibrometers ließ sogar einen Betrieb bis zu 200 MHz zu. Die Impulsanregung ermöglicht einen zügigen Messvorgang, da nur wenige Messreihen notwendig sind. Allerdings führt die Pulsanregung bei Frequenzen unterhalb der Eigenresonanzfrequenz des Wandlers von 7 MHz zu großen Unsicherheiten. Daher ist es in diesem Fall angebracht auf die Burst-anregung zurückzugreifen.

Es sei angemerkt, dass die einzelnen Unsicherheitsbeiträge und die Gesamtunsicherheit individuell von dem kalibrierten Hydrophon abhängen.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde die Bestimmung der Übertragungsfunktion einschließlich der Unsicherheitsbudgets für ein Membranhydrophon unter Verwendung eines neuen Messplatzes für die Primärkalibrierung dargestellt.

Zwei unterschiedliche Anregungsarten führten zu übereinstimmenden Ergebnissen. Die Kalibrierunsicherheit wurde bei beiden Anregungsarten durch das SNR der Hydrophonmessung dominiert. Im Vergleich zu [1] konnte mittels Impulsanregung eine geringere Unsicherheit erreicht werden. Im Fall der Burstanregung muss das SNR noch weiter verbessert werden um dies zu erreichen.

In der Zukunft ist geplant, die Impulsanregung zu optimieren und dabei auch die Phaseninformation des Pulses zur Primärkalibrierung in Betrag und Phase zu nutzen, wobei dann

auch die Unsicherheit der Phasenmessung betrachtet werden muss.

## Literatur

- [1] Koch, C. & Molkenstruck W.: Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 46 (1999), 1303-1314
- [2] Weber, M. & Wilkens, V.: Towards an extension of primary hydrophone calibration using a laser vibrometer. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Congress on Sound and Vibration, 2015
- [3] Wilkens, V. & Koch, C.: Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone. The Journal of the Acoustical Society of America 115 (2004), 2892-2903
- [4] Winter, M.; Füser, H.; Bieler, M.; Siegmund, G. & Rembe, C.: The problem of calibrating Laser-Doppler Vibrometers at high frequencies. AIP Conference Proceedings 1457 (2012), 165-175
- [5] Handbuch Ultra High Frequency Vibrometer UHF-120, Polytec GmbH, Waldbronn, 2013
- [6] Rembe, C. & Dräbenstedt, A.: Additional error sources for microscopic laser Doppler measurements. Proc. SPIE 5503 (2004), 446-457
- [7] Rembe, C. & Dräbenstedt, A.: Laser-scanning confocal vibrometer microscope: Theory and experiments. Review of Scientific Instruments 77 (2006), 083702
- [8] Siegmund, G.: Sources of measurement error in laser Doppler vibrometers and proposal for unified specifications. Proc. SPIE 7098 (2008), 70980Y-70980Y-13
- [9] Heinzel, G.; Rüdiger, A. & Schilling, R.: Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-top windows. URL: <http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0013-5579-7>
- [10] Koch, C.; Ludwig, G. & Molkenstruck, W.: Calibration of a fiber tip ultrasonic sensor up to 50 MHz and the application to shock wave measurement. Ultrasonics 36 (1998), 721-725
- [11] O'Neil, H. T.: Theory of focusing radiators. The Journal of the Acoustical Society of America 21 (1949), 516-526
- [12] Schoch, A.: Betrachtung über das Schallfeld einer Kolbenmembran. Akustische Zeitschrift 6 (1941), 318-326
- [13] Koch, C.: Measuring the photodetector frequency response for ultrasonic applications by a heterodyne system with difference-frequency servo control. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 57 (2010), 1169-1174