

# Nutzung der Hörbarmachung von Ultraschallsignalen zur (werkstofflichen) Zustandsbewertung von Maschinen- und Bauteilen

Nicki Bader<sup>1</sup>, Peter Holstein<sup>1</sup>, Andreas Tharandt<sup>1</sup>, Sebastian Uziel<sup>2</sup>, Tino Hutschenreuther<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, 06112 Halle

E-Mail: peter.holstein@sonotec.de

<sup>2</sup> IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstr. 27, 98693 Ilmenau

## Motiv

In der Instandhaltung wird Ultraschall genutzt, um bestimmte Produktionsprozesse zu überwachen, bei welchen durch entsprechende physikalische Vorgänge akustische Quellen im hochfrequenten Bereich entstehen. Typische Ultraschallquellen sind z. B. turbulente Strömungsvorgänge (an Leckagen und Ventilen, in Pumpen und Turbinen), Reibungsprozesse (als Kriterium der Schmierungsqualität oder zur Bewertung von Schmierungsprozessen), oder transiente Ereignisse (bei elektrischen Entladungen oder Mikrobrüche in Werkstoffen). Diese spezifischen Signale können in vielen Fällen als Grundlage für ein effektives Condition Monitoring genutzt werden. Maschinen und Anlagen, bzw. die Werkstoffe und Materialien, erzeugen unter dynamischer Belastung Ultraschallemissionen, die für eine signalbasierte Zustandsbewertung genutzt werden können. Die im Beitrag vorgestellten Systeme und Verfahren erzeugen neben der rein datentechnischen Aufbereitung des Ultraschalls während der Messung (in Echtzeit) ein hörbares Audiosignal, welches gewisse Charakteristika des originalen HF-Signals wiedergibt und so für die Korrelation der datentechnischen und subjektiven Interpretationen genutzt werden kann. Dafür gibt es verschiedene Verfahren und industrielle Anwendungsszenarien. Im Beitrag wird neben der datentechnischen Aussagekraft der Audioausgabe von Ultraschallprüfgeräten der Nutzen für den Prüfer bewertet und analysiert.

## Grundlagen und Einordnung

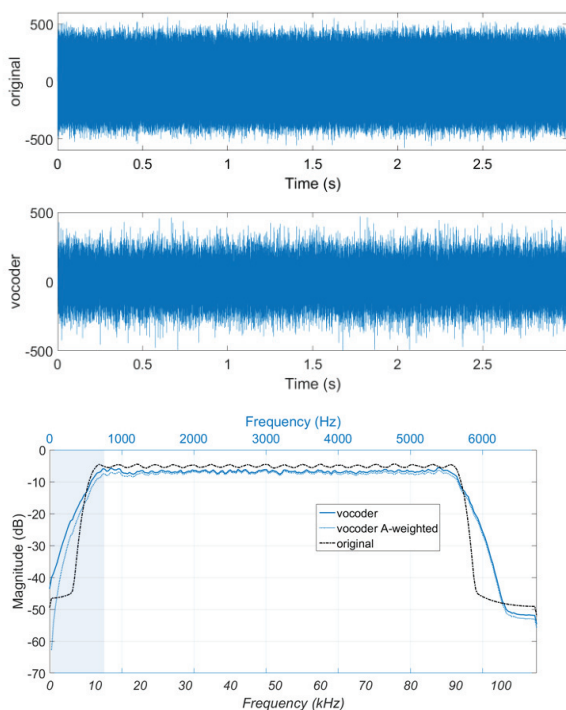
In vielen Bereichen der Industrie – vor allem in der Instandhaltung – ordnen sich Ultraschallprüfungen als unverzichtbare Methode ein, um Maschinen, Anlagen und Bauteile unter verschiedenen Gesichtspunkten zu prüfen. In der zerstörungsfreien Materialprüfung spielt die Ultraschallprüftechnologie ebenfalls eine zentrale Rolle. Die meisten Verfahren beruhen dabei auf Impuls-Echo-Techniken. Die Frequenzen liegen meist im MHz-Bereich. Eine Hörbarmachung erfolgt in der Praxis nicht. Im medizinischen Bereich, wo die Dopplerverschiebung von Durchflussmessungen in streuenden Medien in der Regel mit Transducern von 2 bis 10 MHz ausgewertet wird, liegt Dopplerfrequenz oft im audiblen Bereich. Neben dem aktiv angeregten Ultraschall wird aber auch bei vielen technischen Prozessen oder bei der Belastung von Materialien Schall bei höheren Frequenzen erzeugt. Die Bezeichnung *Akustische Emission* trägt diesem Sachverhalt Rechnung. Aufgrund der

hohen Frequenzen (bis MHz) unterscheiden sich sowohl Messtechnik als auch Auswerteverfahren von den Methoden der Technischen Akustik. Zunehmend kommen auch hier datenintensive signalbasierte Verfahren zum Einsatz.

Die Motivation für eine Neubetrachtung der Hörbarmachung von Ultraschallverfahren [1] im Bereich der Instandhaltung hat sich aus der Einführung breitbandiger Messverfahren ergeben. Im industriellen Bereich geht dabei um Frequenzen bis ca. 100 kHz Bandbreite. Die qualitative Bewertung des Ultraschallsignals ist bei den Prüfgeräten für die Suche nach Druckluftleckagen, für die Bewertung von Lager- oder Schmierungsfehlern oder auch elektrischer Entladungen für das Handling der Prüfgeräte unverzichtbar. Diese Verfahren ließen sich bereits zeitig (60er Jahre) relativ einfach analog umsetzen. Die Bewertung erfolgt dabei „permanent“ – ähnlich wie bei der Messung von pegelbasierten Lärmgrößen in der technischen Akustik. Das schmalbandige (um 40 kHz) akustische Signal wird dabei mit einem Frequenzmischverfahren (Heterodyn) in den Hörbereich verschoben. Die zeitliche Modulation (beispielsweise die Rotation von Maschinenteilen widerspiegelnde Akustik) wird dabei real wiedergegeben. Allerdings kann dieses Verfahren nur einen Intensitätswert (in der Regel angegeben als Pegel) für das durch das Heterodynverfahren festgelegte Frequenzband bestimmen. Die Verwendung von schmalbandigen Sensoren und das Heterodynverfahren schränken allerdings auch die Aussagekraft des hörbaren Signals ein, da nur ein willkürlich ausgewählter Frequenzausschnitt für die Bewertung genutzt werden kann. Wenn man an einem tieferen physikalischen Verständnis von Vorgängen interessiert ist, spielen bei vielen physikalischen Prozessen jedoch auch frequenzverteilte bzw. tonale Effekte [2] eine wichtige Rolle. Dies wird durch die Verwendung breitbandiger Sensoren (Luftschall und Körperschall) in Verbindung mit Messsystemen, die über schnelle A/D-Wandler und Rechenleistung für permanente Aufzeichnung und Bewertung geeignet sind, ermöglicht. Damit eröffnet sich die Option auf komplexere und aussagefähigere Bewertungen von Ultraschallsignalen. Die Messung und Hörbarmachung von Fledermauslauten ist dafür ein aussagekräftiges Beispiel [1]. Sowohl die zeitliche Abfolge als auch die damit einhergehende Frequenzvariation ist typisch für die jeweilige Art und manchmal sogar bezüglich der Individuen. Damit unterscheidet sich die Situation nicht von Fragestellungen im Bereich Fehler- oder Zustandserkennung, bzw. Klassifikation der technischen Diagnose.

Die Neubewertung der Hörbarmachung von Ultraschallsignalen entstand im Zusammenhang mit der Entwicklung einer neuen Generation breitbandiger Ultraschallschalltechnik für die Instandhaltung. Die physikalischen Prozesse, die unter dem Gesichtspunkt der verbesserten Datenerfassung hinterfragt wurden, betrafen viele technische Phänomene (Druckluftleckagen, Kavitation, Entladungen, Trockenreibung, Schmierung, Resonanzen kleiner Strukturen u.a.) und damit die Entwicklung neuer verbesserter Auswerteverfahren.

Die Einbeziehung eines breiten Frequenzbereichs erfordert neben den entsprechenden Signalabtastungen auch Sensoren, die über den zu betrachtenden Frequenzbereich möglichst linear sind [3]. Mit einer Vocoder-Technologie werden die Ultraschalldaten in Echtzeit auf einen um den Faktor 32 komprimierten Bereich übertragen. Original- und Bildspektrum müssen sich ausreichend ähneln. Die Transformation des Signals in den Hörbereich berücksichtigt zunächst keine hörphysiologischen Aspekte. Die Wirkung der A-Bewertung hängt vom Bereich ab, in den das Signal verschoben wurde.



**Abbildung 1,** Vergleich von Ultraschallspektren mit komprimierten Spektren, die in den hörbaren Bereich transformiert worden. Das Signal ist ein weißes Rauschen. Es ist offensichtlich, dass die Vocoderdaten den ursprünglichen Frequenzverlauf gut abbilden können. Die Auswirkung der A-Bewertung wäre erst bei tiefen Frequenzen spürbar. Diese Frequenzen sind allerdings in der Hardware durch die Analogfilter ausgeblendet. Beim Hören sind die Frequenzen unterhalb von ursprünglich 20 kHz ausgefiltert.

Die zeitliche Dynamik bleibt dabei, wie auch beim Heterodynverfahren erhalten. Für Signale mit gewissen tonalen Komponenten sind die Vorteile offensichtlich und im Klangbild im Vergleich zu den Heterodynverfahren eindrucksvoll. Die klanglichen Gewohnheiten aus dem Alltag der Prüfer können genutzt werden. Hinzu kommt,

dass die Datenauswertungen mit den Höreindrücken koinzidieren. Das Heterodynverfahren kann jedoch weiterhin genutzt werden. Die digitale Realisierung stellt auch hier neue Möglichkeiten bereit. Beispielsweise kann die Trägerfrequenz beliebig eingestellt werden.

Von entscheidender Bedeutung für die Nutzbarmachung der Audiodaten ist die Qualität der Datenreduktion. Für das Vocoderverfahren wird für die Beispiele im Artikel eine Kompressionsrate von 1:32 genutzt. Da die akustischen Daten im hochfrequenten Bereich trotz spektraler Wichtung in der Regel breitbandige und stochastische Charakteristika aufweisen, wird davon ausgegangen, dass die Frequenz- und Zeitverläufe des Originalsignals auch im hörbarem Signal „fast ohne“ Informationsverlust rekonstruierbar sind [4]. Das bedeutet, dass damit auch Langzeitaufzeichnungen von Zeitsignalen möglich sind, die mit relativ geringer Speicherkapazität auskommen sollen. Dieser Aspekt ist insbesondere für Trendanalysen (Prognose von Testnutzungsdauern) von in der Instandhaltung von Bedeutung [4]. Es ist offensichtlich, dass eine solche Vorgehensweise dann wertvoll ist, wenn Auswertalgorithmen am Beginn der Aufzeichnung noch nicht entsprechend optimiert sind. Dies ist insbesondere für Engineering-Lösungen von Bedeutung.

Eine weitere Möglichkeit, um einen akustischen Eindruck von Ultraschallsignalen zu erhalten, ist es repräsentative Ausschnitte aus Zeitsignalen zeitgedehnt abzuspielen. Hier spielen natürlich die physiologischen Effekte der frequenzabhängigen Empfindlichkeit eine Rolle, die vom Faktor der Zeitdehnung abhängt. Dieses Verfahren verändert im Gegensatz zu den beiden vorher genannten das Signal numerisch nicht. In der industriellen Instandhaltung spielt diese Methode jedoch keine Rolle. Die Nutzung ist besonders bei transienten Ereignissen interessant, wenn elementare Ereignisse differenziert bewertet bzw. „angehört“ werden sollen. Ein mikroskopischer Faserriss klingt (etwas) anders als ein Matrixbruch. Ein metallisches ungehärtetes Kleinteil (mit Eigenfrequenzen im Ultraschall) klingt anders als ein ungehärtetes.

Eine noch stärkere Datenreduktion ist möglich, wenn man für qualitative Bewertungen eine Synthese des breitbandigen Höreindrucks aus Rauschbändern (z. B.) in 1/n-Oktaven generiert. Die Amplituden in den jeweiligen Bändern entsprechen den Pegeln im jeweiligen Band. Die Synthese des Gesamtsignals erfolgt durch Überlagerung der Bänder. Damit ist zumindest ein qualitativ dem Originalsignal nahekommender Höreindruck generierbar.

## Nutzung der Daten durch Prüfer

Für den sinnvollen Einsatz erfordern die prüferbezogenen (in der Regel qualitativen) Bewertungen entsprechende Erfahrungen sowie ein gewisses Verständnis und Training. Es treten dabei Fragestellungen auf, wie sie bei der Entwicklung von psychoakustischen Bewertungen aufgeworfen wurden. Da das Frequenzintervall des hörbaren Signals von den Verschiebungsparametern abhängt, kann dies auch direkt den Höreindruck beeinflussen (A-Kurve). Eine Korrektur wäre möglich. Der Einfluss auf das quantitative Empfinden ist bei den gewählten Parametern

allerdings gering. Für die qualitative Bewertung während des Prüfungsvorgangs spielt dies keine Rolle, da die Beeinflussung immer gleich ist und durch Erfahrung leicht wettgemacht wird. Das Problem entfällt ebenfalls, wenn die Daten des Hörkanals „nur“ für zusätzliche Bewertungen (z.B. bei der Langzeitaufzeichnung von akustischen Signalen für Trendbewertungen) verwendet werden. Beim Heterodynverfahren spielt dies ebenfalls keine Rolle, da das Signal keinen spezifischen Frequenzinhalt aufweist.

Die Nutzung von Breitbandsignalen für Bewertungen im Bereich der Instandhaltung ist relativ neu. Hier wurden bereits erste positive Erfahrungen bezüglich der Akzeptanz gesammelt. Mit den traditionellen Daten gibt es nur die Möglichkeit die Vorgänge über die Fluktuation der Lautstärke zu bewerten. Ein häufiges Einsatzgebiet dieser Technologie ist die Lecksuche. Bereits hier zeigte sich, dass mit der Nutzung und Konvertierung des gesamten Ultraschallbereichs ein Zugriff auf physikalische Auswirkungen von Druckluftleckagen wesentlich mehr Informationen liefert [2]. Die Zusammenhänge sind allerdings komplex, sodass der Höreindruck vor allem für das Auffinden und eine Optimierung der Prüfhandlung genutzt werden kann.

Bei der „Übersetzung“ von Körperschallphänomenen in den Hörbereich kann ähnliches formuliert werden. Hier kann vom Prüfer „unbewusst“ auf die Vielfalt von Geräuschen und Klängen von Maschinen, Komponenten oder auch Werkstoffen Bezug genommen werden. Spektrale Features sind mit dem Breitbandverfahren unterscheidbar, wenn beispielsweise Eigenfrequenzen im Ultraschallbereich auftreten. Dies tritt bei kleinen Strukturen (z. B. bei Kugellagern) auf. In vielen Fällen gibt es Überlagerungen von Strömungs- und strukturinduzierten Geräuschen (Kondensatableiter, Ventile, Pumpen u.a.). Da Expertenwissen nicht in jedem Fall über die Software von Prüfgeräten vorgehalten oder automatisiert werden kann, ist die zusätzliche Audiobewertung oft ein wichtiges Hilfsmittel für Entscheidungen, die Instandhaltungsmaßnahmen betreffen. Wie erwähnt ist es prinzipiell möglich, die Mischerfrequenz zu verändern und somit ebenfalls spektrale Unterschiede zu hören. Dies ist aber während der Prüfung nicht in jedem Fall praktikabel und an den stationären Charakter der Geräusche und Klangereignisse gebunden.

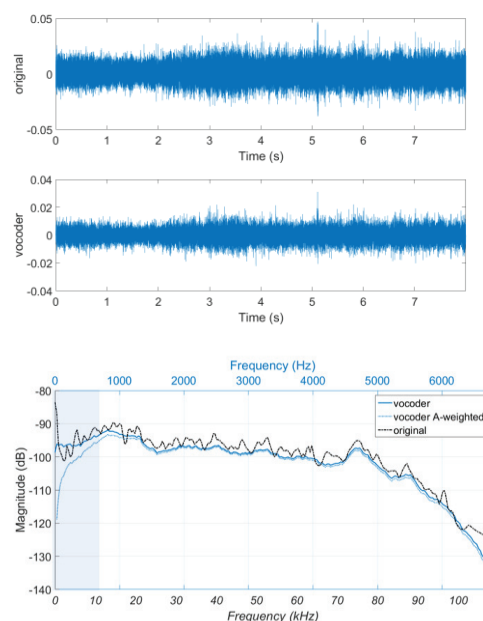
## Beispiele

Die Wirkung der Verfahren soll an typischen Einsatzfällen diskutiert werden. In den meisten Fällen sind die untersuchten Geräusche breitbandig und stochastischer Natur. Die spektralen Eigenschaften können mit relativ geringer Frequenzauflösungen (praktikabel ist eine Auflösung in portabler Technik von etwa 1 kHz). Damit kann das Frequenzverhalten in ausreichender Auflösung dargestellt werden.

### Beispiel 1: „permanentes“ stochastisches Geräusch

Bei der Lagerdiagnose treten breit verteilte Signale auf. Weiterhin gibt es charakteristische Frequenzen, die sich aus unterschiedlichen Anregungen und Reaktionen darauf synthetisieren. Die Abbildung 1 u. 2 zeigen jeweils den

Vergleich der nicht komprimierten „originalen“ Signale mit den „komprimierten“ Signalen.



**Abbildung 2,** Zeitsignal und Spektrum eines kleinen mechanischen Motors. Die Charakteristik sowohl des Zeitsignals als auch des Spektrums bleiben in ausreichender Qualität erhalten. Die Auswirkung der A-Bewertung wäre erst bei tiefen Frequenzen spürbar. Diese Frequenzen sind allerdings in der Hardware durch die Analogfilter ausgeblendet.

Die Frequenzachsen sind entsprechend ihres Komprimierungsfaktors übereinander gezeichnet. Für die Darstellung wurde bei Abb. 2 ein Kompressionsfaktor von 16 gewählt. In der Hardware wird eine Faktor 32 verwendet. Erkennbar ist, dass die Spektren ähnlich genug sind, um einen adäquaten Höreindruck zu vermitteln, der nahe genug „an der Physik“ des Originals ist. Dies ist für die erwähnte quantitative Nutzung der hörbaren Signale von Bedeutung. Die zeitliche Variation des Gesamtsignals ist per Höreindruck nicht von der des Originals zu unterscheiden. Dies spiegelt sich auch in den Pegelverläufen wieder.

### Beispiel 2: transiente Schallereignisse

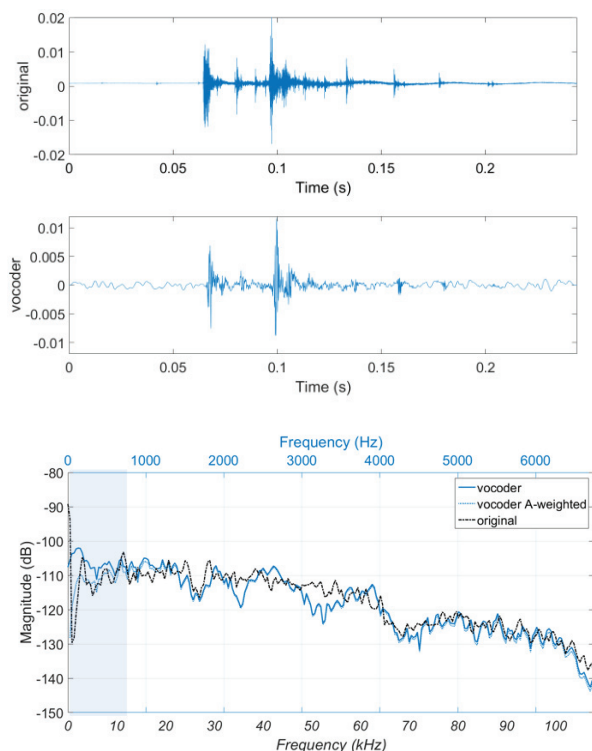
Bei der Belastung von Materialien und Werkstoffen treten unterschiedliche Schallereignisse auf, die ebenfalls über einen breiten Frequenzbereich verteilt sind. Verursacht werden diese unter Last durch Reibung, Mikroreibung- und Bruchvorgänge bis hin zum makroskopischen Versagen (Riss, Bruch). Eine andere Klasse (hier nicht diskutiert) von transienten akustischen Vorgängen sind elektrische Entladungen. Die transienten Vorgänge treten in Abhängigkeit vom Belastungsszenario und den Materialeigenschaften zeitlich verteilt auf. Die Mikro Vorgänge „addieren“ sich in charakteristischer Art und Weise zu Geräuschmustern (Knistern, Knacken u. ä.), die typisch für die jeweiligen Materialien und Bauteile [5] sind. Die Belastungsgeräusche sind oft reale Nutzungsgeräusche, die dem Nutzer den etwas über den Zustand signalisieren oder über den Gebrauch vermitteln. Das zeitliche Verhalten bei höheren Frequenzen ist identisch mit dem im hörbaren Bereich, wenn diese gemeinsam angeregt werden. Die



Möglichkeit der Hörbarmachung wurde auf Materialien unter Last angewandt, um gebrauchsbestimmende akustische Eigenschaften zu bewerten. Da Ultraschall bereits bei kleineren Belastungsamplituden generiert wird, kann auf diese Weise bereits die Vorschädigung „gehört“ werden.

Bei der Transformation in den Hörbereich kommt es im Gegensatz zu den „dauerhaften“ Geräuschen eher auf die korrekte Wiedergabe der zeitlichen Struktur der Antwort auf Belastungen an. Es wird erwartet, dass Materialien auf impulsförmige Anregung neben der breitbandigen spektralen Reaktion auch mit einem spektral gefärbten Antwortmuster reagieren.

Die Höreindrücke korrelieren mit werkstofflichen Parametern und der unter Belastung akustischen Wirksamkeit der Mikrostruktur.



**Abbildung 3,** Zeitsignal und Spektrum eines Bruchvorgangs an einem Testkörper aus Bambus

Die Verschiebung der Daten in den Hörbereich ist von diversen Einstellparametern abhängig. Beim Heterodynverfahren spielen spektrale Komponenten keine Rolle. Beim Vocoder-Verfahren ist die Lage im hörbaren Frequenzbereich vom Reduktionsfaktor abhängig. Es ist also für den Höreindruck durchaus von Bedeutung, ob ein Faktor von 32 oder 16 verwendet wird. Das hörbar gemachte Spektrum liegt dann in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Damit ist das Spektrum auch unterschiedlich bezüglich der Hörempfindung sensitiv. Wenn man den Einfluss der A-Kurve berücksichtigt, lässt sich diese Beeinflussung abschätzen. Für Ereignisse mit ausgeprägten tonalen Komponenten wäre ein Einfluss u.U. vom Prüfer spürbar. Für breitbandige Geräusche, wie sie im Bereich der Instandhaltung üblich sind, dürften die relativ geringen Varianzen nicht bemerkbar sein.

Abhängig vom Kompressionsfaktor wird die zeitliche Auflösbarkeit sehr schneller Vorgänge limitiert. Dies ist beispielsweise bei Entladungsvorgängen bemerkbar, die aber keine spektrale Spezifik zeigen, so dass auch hier eine qualitative Anwendung möglich ist.

## Zusammenfassung

Die Hörbarmachung von Ultraschallsignalen ist für viele Aufgaben im Bereich der industriellen Prüfung notwendig und hilfreich. Es konnte gezeigt werden, dass durch spektrale Erweiterung der Verfahren der Einsatzbereich und die Aussagekraft der in den Audibereich konvertierten Daten erhöht werden können. Bei breitbandigen Verfahren kann zudem der Signalinhalt erhalten werden, sodass der Informationsverlust gering genug ist, um belastbare bzw. aussagekräftige technische Bewertungen durchführen zu können. Die Methoden sind sowohl für die traditionellen Anwendungen in der Instandhaltung als auch für Material und Bauteilanwendungen interessant. Weiterführende Betrachtungen zeigen, dass die hörbarmachten Ultraschalldaten auch für Bewertungen geeignet sind. Nicht zuletzt erschließt sich mit den Verfahren dem Anwender ein technisch interessanter Bereich dem Höreindruck und der psychologischen Bewertung.

## Literatur

- [1] P. Holstein, N. Bader, A. Tharandt, R. John, S. Uziel, D. Januszko, T. Hutschenreuther, Hörbarmachung von Ultraschallsignalen, Fortschritte der Akustik : DAGA 2016, Aachen : 14.-17. 03 2016 : 42. Jahrestagung für Akustik ISBN: 978-3-939296-10-2
- [2] P. Holstein, M., Barth, C. Probst, Acoustic methods for leak detection and tightness testing, Proceedings 19. World Conference of Nondestructive Testing, 13.-17.06.2016, München
- [3] P. Holstein, C. Probst, A. Tharandt, P. Begoff , H. Schulze, Kalibrierung von Körperschallsensoren, 44. Jahrestagung für Akustik, 06.-09.03,2018, München
- [4] P. Holstein, S. Seitz, A. Tharandt, C. Probst, R. Tetzlaff, Adaptive Data Compression of Ultrasound Data for Long Term Data Acquisition and Trend Evaluation, Proceedings 12th ECNDT, Göteborg ISBN 978-91-639-6217-2
- [5] N. Bader, P. Holstein, A. Tharandt, J. Häberle J. Schulz, C. Probst, The Effect of Physical Material Properties of the Attractiveness of Objects AIA-DAGA 2013, International Conference on Acoustics, Meran; 18.03.2013 - 21.03.2013; in: "AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics Program and Abstracts Proceedings", Deutsche Gesellsch. f. Akustik, Berlin, (2013), ISBN: 978-3-939296-05-8