3-D-Vermessung von Luftschallfeldern

Sonja Walther[1], Christoph Kling[1]

[1] *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, AG 1.63 Geräuschmesstechnik ,*
E-Mail: Sonja.Walther@ptb.de, Christoph.Kling@ptb.de

Einleitung

In der akustischen Messtechnik werden Schallfelder in der Regel nur punktweise vermessen. Die systematische Abtastung wie zum Beispiel mit modernen Mikrofonarrays ist aufwendig und teuer. Hochaufgelöste flächige oder räumliche Darstellungen von Schallfeldern liefern nur Simulationen auf der Grundage vordefinierter physikalischer Rechenmodelle.

Oft kann ein experimentelles Problem an einem reproduzierbarem Schallfeld studiert werden. An der PTB wurde ein großer Portalscanner in Betrieb genommen, mit dem in einem Volumen von 2 m x 2 m x 2 m Schallfelder unter Freifeldbedingungen in beliebigen Punkten, Linien, Flächen und Volumina automatisiert abgetastet werden können. Durch eine Positioniergenauigkeit von unter 50 µm können auch Wellenlängen im fernen Ultraschallbereich räumlich aufgelöst werden. Störende Reflexionen an Stativen oder Gehäusekanten von Lautsprechern werden wie gemessen visualisiert und die an Prüffelder gestellten Bedingungen wie ebene Wellenfront und freies Feld werden direkt fass- und prüfbar.

Aufbau und Messtechnik

Bei dem Portalscanner handelt es sich um eine Sonderanfertigung von isel Germany: ein 3-Achsen-Scanner mit 3 Schrittmotoren und 2 Meter Verfahrweg pro Achse.

Um Freifeldbedingungen zu schaffen, wurde eine hölzerne Messkammer errichtet, die mit 50 mm starken Basotect-Dämmplatten ausgekleidet ist, welche nach eigenen Mesungen in einem skalierten Modellhallraum von ca. 3 kHz bis ca. 40 kHz eine Absorbtion von über 90 % aufweisen.

Abbildung 1: 3-Achsen-Scanner mit Absorberkammer

Die Messtechnik ist prinzipiell austauschbar. Derzeit wird das ¼-Zoll-Messmikrofon GRAS 40BF eingesetzt, das - zusammen mit dem Vorverstärker GRAS 26AC und dem Speisemodul GRAS 12AA - auch bis 100 kHz einen relativ glatten Frequenzgang aufweist.

Mit einem FFT-Analysator OnoSokki CF-5220Z werden Sweep-Signale von 5 kHz bis 100 kHz erzeugt und die Übertragungsfunktionen aufgenommen. Die Daten werden im PC gespeichert und später in ME'scope und Matlab grafisch und rechnerisch ausgewertet.

Die Klimadaten für jeden Messpunkt werden protokolliert.

Webcams in der Messkammer und eine Remote-Steuerung des Rechners ermöglichen die Kontrolle des Scanvorgangs, ohne den Raum zu betreten und das Schallfeld zu stören.

Vermessung einer 2-Wege-Bassreflexbox

Um die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Scanners zu demonstrieren wird eine bekannte Schallquelle, die Aktiv-Lautsprecherbox „EMES“ (Abbildung 2), vermessen.

Dabei wird ein Volumen von 40 x 40 x 28 cm mit 4 cm Punktabstand abgescannt. Im Gegensatz zu den späteren Anwendungen wird in diesem Fall ein Sweep Signal bis 500 Hz angewendet. Betrag und Phase der erzeugten Übertragungsfunktionen werden anschließend in ME'scope eingelesen und mit dem Modalanalysetool in verschiedener Weise dargestellt.

Abbildung 3 zeigt auf mehreren Messebenen über dem Lautsprecher die Linien gleicher Phase bei 437 Hz. Die Ausbreitung der kugelförmigen Wellenfronten über der Hauptöffnung ist erkennbar. In Abbildung 4 ist die Messung bei 40 Hz dargestellt, hier nur in einer Ebene über dem Lautsprecher. Die Isophasen verlaufen nicht als Kreis mit Zentrum über der Lautsprechermembran, sondern es ist ein deutlicher Beitrag durch die Bassreflexöffnung zu erkennen [1].

Abbildung 2: 2-Wege-Bassreflexbox im Portalscanner

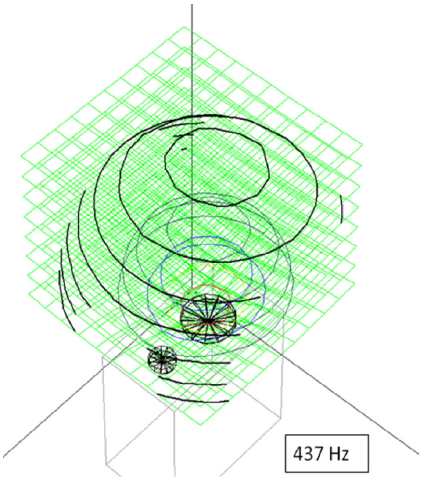

Abbildung 3: Linien gleicher Phase über der Bassreflexbox: Bei 437 Hz sieht man kugelförmige Wellenfronten über der Lautsprechermembran.

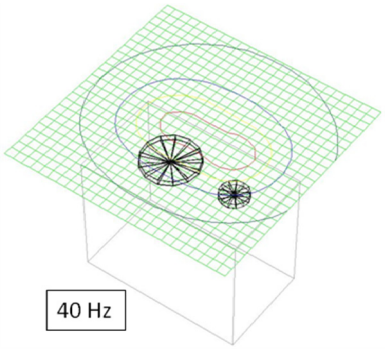

Abbildung 4: Linien gleicher Phase über der Bassreflexbox: Bei 40 Hz sieht man den Einfluss der Bassreflexöffnung.

Vermessung eines Bändchenhochtöners

Der Bändchenhochtöner MHT12 von VISATON soll in Hinblick auf seine Eignung als stabile Schallqelle für die Substitutionskalibrierung im Ultraschallbereich bis 100 kHz untersucht werden (Abbildung 5).

Abbildung 5: Bändchenhochtöner

In groben Flächenscans (30 x 30 cm mit 1 cm Punktabstand, Abbildung 6) zeigt sich bei Betrachtung des Betrages (Abbildung 7) ein elliptisch ausgeprägtes Hauptmaximum, das auf der mechanischen Symmetrieachse des Lautsprechers liegt, sowie schräg versetzt liegende Nebenmaxima. Die Linien gleicher Phase (Abbildung 8) verlaufen ebenfalls elliptisch, aber unter einem anderen Winkel als das Hauptmaximum des Betrages, da sie auch von den Nebenmaxima beeinflusst werden. Soweit dies bei der groben Auflösung beurteilbar ist, zeigen sich Betrag und Phase ungestört von Reflektionen.

Abbildung 6: Schema-Darstellung Flächenscan

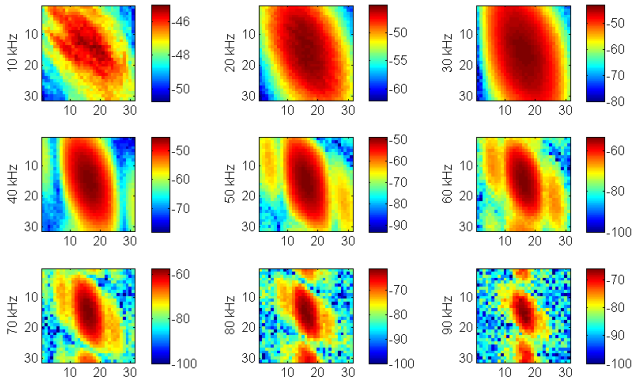

Abbildung 7: Pegel Bändchenhochtöner. Fläche 30 cm x 30 cm. Abstand 0,5 m. x und y in cm. Farbcodiert ist der relative Pegel in dB bei 10 kHz bis 90 kHz.

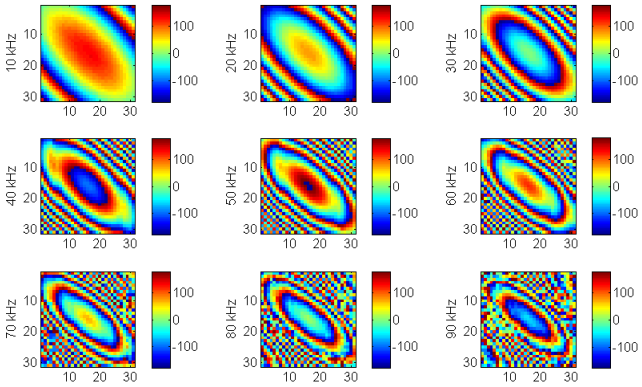

Abbildung 8: Phase Bändchenhochtöner. Fläche 30 cm x 30 cm. Abstand 0,5 m. x und y in cm. Farbcodiert ist die Phase in ° bei 10 kHz bis 90 kHz.

Wie gleichmäßig das Feld im Zentrum tatsächlich ist, sollen feinere Scans mit einem Punktabstand von 300 µm bis 500 µm zeigen. Hierzu wurde wiederum eine Fläche gescannt, außerdem Linien entlang der Symmetrieachse des Bändchenhochtöners in verschiedenen Abständen zu diesem.

Die Auswertung der Amplitude der Linienscans bestätigt zum einen das 1/r-Gesetz, zum anderen lassen sich aber auch Reflexionen erkennen, die je nach Ausrichtung, Messabstand und Frequenz unterschiedlich stark ausgeprägt sind. So sieht man bei einer Worst-Case-Ausrichtung – der Lautsprecher liegt mittig in der Messkammer mit Abstrahlung senkrecht nach oben – im Abstand von 0,2 m Reflexionen bei nahezu allen Frequenzen und bei 1 m Abstand noch bis 25 kHz (Abb. 10). Bei einer Ausrichtung schräg in den Raum hinein

sieht man hingegen im Messabstand 1 m die Störungen nur bis 15 kHz (Abb. 11).

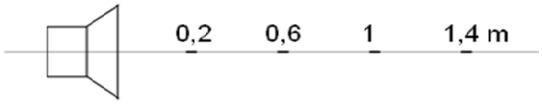

Abbildung 9: Schema-Darstellung Linienscan

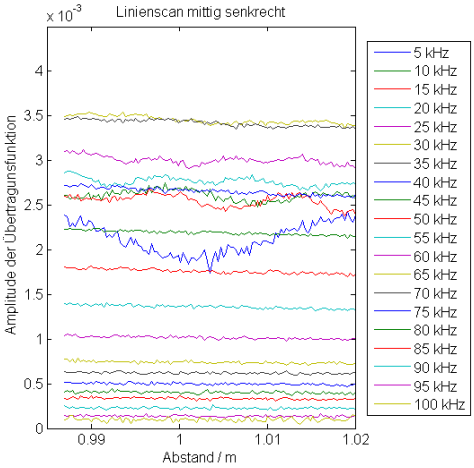

Abbildung 10: Amplitude der Übertragungsfunktion beim Scan entlang der Lautsprechersymmetrieachse (Abstand 1 m). „Worst-Case-Ausrichtung“

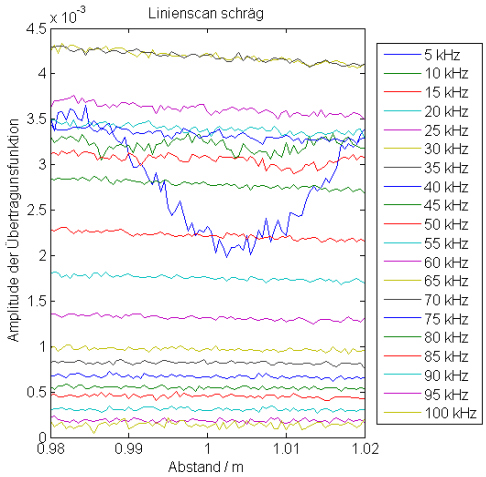

Abbildung 11: Amplitude der Übertragungsfunktion beim Scan entlang der Lautsprechersymmetrieachse (Abstand 1 m). Bessere Ausrichtung

Trägt man für die Linie in 1 m Abstand farbcodiert den Pegel über der Frequenz auf der x-Achse und dem Messabstand auf der y-Achse auf (Abb. 12), so erkennt man zunächst den Frequenzgang mit Maximum bei 30 kHz bis 35 kHz und deutlichem Abfall zu höheren Frequenzen. Weiterhin erkennt man einen geringfügig verringerten Pegel bei größerem Abstand, was sich durch das 1/r-Gesetz und die Luftdämpfung begründet.

Bereinigt man den Pegel um Frequenzgang, 1/r-Gesetz und Luftdämpfung, erhält man die Abweichung des gemessenen Pegels vom erwarteten Pegel (Abbildung 13). Bis etwa 15 kHz wird das Bild von den Reflexionen dominiert. Außerdem zeigen sich Störungen der Messkette bei etwa 39 kHz und 78 kHz. Weiterhin ist ein Anstieg des Rauschens ab 65 kHz zu erkennen, der dann bei 90 kHz nochmals zunimmt.

Zwischen diesen Störungen liegt ein weiter Frequenzbereich, in dem die Abweichungen vom Sollpegel kleiner als ±0,2 dB sind und in dem diese Quelle somit für Kalibrierungen geeignet ist. Eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei höheren Frequenzen wird durch die Anwendung eines hochfrequenzgeeigneten Leistungsverstärkers erwartet.

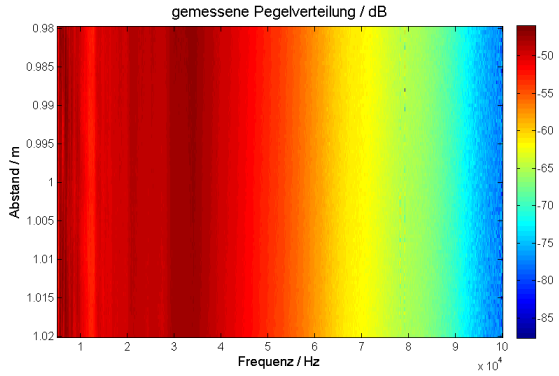

Abbildung 12: Relativer Pegel (dB) beim Scan entlang der Lautsprechersymmetrieachse im Abstand von 1 m

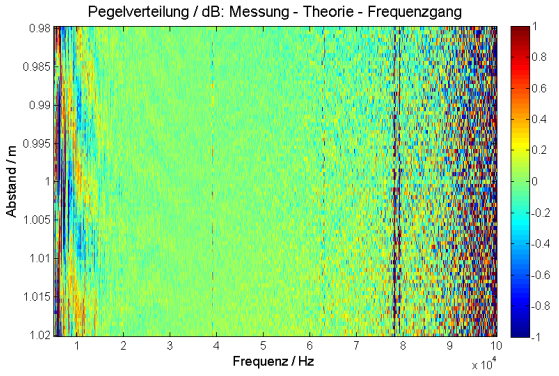

Abbildung 13: Relativer Pegel (dB) beim Scan entlang der Lautsprechersymmetrieachse im Abstand von 1 m – bereinigt um Frequenzgang, 1/r-Abhängigkeit und Luftdämpfung

Messungen an einem Kunstkopf

Als Vorabuntersuchung zum Arbeitsschutz im Ultraschallbereich wurden Messungen an einem „ITA“-Kunstkopf durchgeführt (Abbildung 14). Hierzu wurde eine Fläche neben dem Kopf in dessen Anwesenheit und Abwesenheit gescannt (Abbildung 15). Zusätzlich erfolgte auch eine Messung im Ohr des Kunstkopfes. Schallquelle war der oben vorgestellte Bändchenhochtöner.

Wie zu erwarten wird das Schallfeld durch den Kunstkopf massiv gestört. In Abbildung 16 ist beispielhaft die Phase bei 10 kHz dargestellt. Die rechte Abbildung (Messung mit Kopf) zeigt durch Reflexion bedingte Interferenzstreifen, die

in der Freifeldsituation (links) fehlen. Für die Darstellung der Phase bei höheren Frequenzen fehlt bei dieser Messung die räumliche Auflösung. Allerdings belegen die ausgewerteten Spektren für die einzelnen Messorte auch im Ultraschallbereich deutliche Abweichungen zwischen Freifeld und Messung mit Kunstkopf.

Die ersten Ergebnisse zeigen den komplexen Einfluss des Kunstkopfes auf das Schallfeld. Zur Darstellung der Interferenzen bei hohen Frequenzen müssen aufgrund der kleinen Wellenlängen feinere Ortsauflösungen gefahren werden. Mit einer möglichen Ortsauflösung des Scanners von unter 50 µm können selbst bei 100 kHz noch ca. 70 Abtastpunkte pro Wellenlänge gemessen werden.

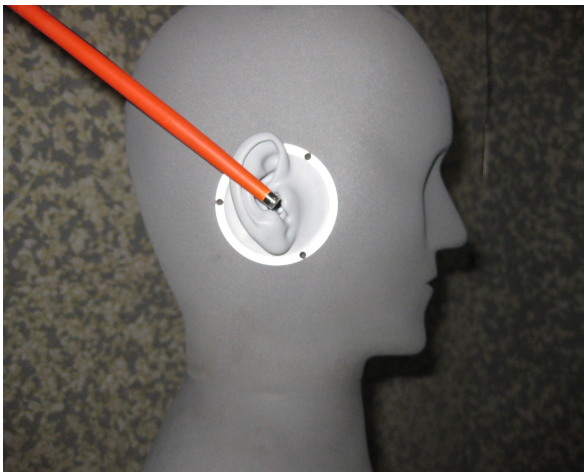

Abbildung 14: Kunstkopf „ITA“

Abbildung 15: Schema-Darstellung Scan neben Kunstkopf

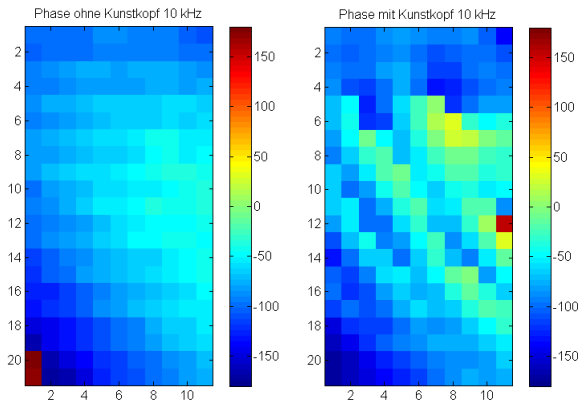

Abbildung 16: Störung der Phase durch den Kunstkopf: Farbcodiert dargestellt ist die Phase in ° mit x und y in cm. Das linke Bild zeigt die Freifeld-Messung, das rechte den Scan mit Kunstkopf (platziert mittig rechts von dieser Fläche). Die Frequenz ist 10 kHz.

Zusammenfassung

Mit dem Portalscanner ist es möglich Schallfelder messtechnisch so detailliert zu charakterisieren und visualisieren, wie es üblicherweise nur mit numerischen Simulationen möglich ist. Besonders im Luftultraschallbereich bietet die direkte experimentelle Untersuchung Vorteile, da bereits kleine Änderungen an Quelle oder Untersuchungsobjekt große Änderungen der Interferenzfelder erwarten lassen. Benötigt werden diese Messmöglichkeiten zum Beispiel im Rahmen des Arbeitsschutzes an Arbeitsplätzen mit Ultraschallgeräten (wie z.B. Ultraschallreinigungswannen), die typischerweise sehr gerichtet und frequenzselektiv abstrahlen und somit zu starken Interferenzfeldern neigen.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Scannersystems liegen dort, wo eine systematische Feinabtastung des realen Schallfeldes gefragt ist, zum Beispiel zur Untersuchung von Abschirmungseffekten. Der praktisch anwendbare Frequenzbereich erstreckt sich dabei über den Hörbereich bis in den fernen Ultraschallbereich und ist letztlich nur durch die Einhaltung ausreichender Freifeldeigenschaften beschränkt. Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen zeigte sich die Absorberkammer unter dem Scanner als weitgehend reflexionsfrei. Zur Zeit fehlen jedoch noch geeignete (genormte) Methoden, um die Reflexionsfreiheit einer solchen Kammer hinreichend zu beurteilen. Hier besteht Forschungsbedarf.

Literatur

[1] Kröning, Benedikt.: Entwicklung der Ansteuerung für einen 3-Achsen-Scanner zur Abtastung von Schallfeldern. Studienarbeit, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2014.