

Kalibrierung von Messmikrofonen

Matthias Brennwald, www.hifibau.ch

September 2015

1. ÜBERSICHT

Zur messtechnischen Untersuchung eines akustischen Systems ist ein Messmikrofon mit bekanntem Übertragungsfunktion erforderlich. Damit die Messergebnisse korrekt kalibriert werden zu können, muss der Frequenzgang und die Empfindlichkeit des Messmikrofons bekannt sein. Insbesondere bei kostengünstigen Messmikrofonen ist die Übertragungsfunktion jedoch oft unbekannt oder nur unzulänglich spezifiziert. Deshalb wurde eine Messprozedur zur Bestimmung des Frequenzgangs und der Empfindlichkeit von Messmikrofonen entwickelt. Die ermittelte Übertragungsfunktion wird in einer ASCII-Datei abgespeichert, die mit den meisten gebräuchlichen Messsystemen für die Kalibrierung der Messdaten verwendet werden kann, die mit dem betreffenden Messmikrofon aufgenommen wurden. Die Präzision des gemessenen Amplitudenfrequenzgangs beträgt über den Frequenzbereich von 10 Hz bis 20 kHz ungefähr 0.1 bis 0.2 dB.

2. MESSMETHODE

Das unbekannte Übertragungsverhalten eines Mikrofons ("device under test", DUT) wird durch einen Vergleich mit einem Referenzmikrofon (REF) mit bekanntem Übertragungsverhalten bestimmt. Dabei wird der Frequenzgang und der Schallpegel eines breitbandigen Lautsprechers mit beiden Mikrofonen gemessen, und aus der Differenz der DUT- und REF-Messwerte die unbekannte DUT-Übertragungsfunktion ermittelt. Die DUT- und REF-Mikrofone werden dabei abwechselnd in einer Entfernung von 1 m vor dem Lautsprecher platziert. Die Mikrofone können dabei entweder axial oder senkrecht zum Schalleinfall vom Lautsprecher positioniert werden, um Abweichungen der Kugelcharakteristik der Mikrofone zu berücksichtigen.

Im Frequenzbereich unterhalb von ca. 100 Hz wird das Signal/Rausch-Verhältnis der beschriebenen Freifeldmessung jedoch gross, weshalb die Unsicherheit der Messergebnisse im tieffrequenten Bereich gross wird. Deshalb wird die Übertragungsfunktion durch eine Messung in einer Druckkammer ergänzt, welche im Frequenzbereich unterhalb von ca. 400 Hz eine präzise Messung ermöglicht.

2.1. Material

- REF Mikrofon: Beyerdynamic MM1 (S/N 14308) mit externer Kalibration durch ein unabhängiges Messlabor (siehe Abschnitt 3.2).
- Lautsprecher für Freifeldmessungen: "Cheap Trick 154", entwickelt von Bernd Timmermanns
- Druckkammer für tieffrequente Messungen (siehe Abschnitt 2.3)
- Digitales Messsystem: Mat's Audio Analyzer (MATAA, <http://audioroot.net/mataa>)

2.2. Freifeld-Messung

Der Ablauf der Messprozedur gestaltet sich wie folgt:

1. Das REF Mikrofon wird vor dem Lautsprecher positioniert.
2. Der Frequenzgang des Lautsprechers wird mit dem REF-Mikrofon gemessen und mit der Übertragungsfunktion des REF-Mikrofons kalibriert.
3. Das REF-Mikrofon wird abgebaut und das DUT-Mikrofon vor dem Lautsprecher positioniert.
4. Der Frequenzgang des Lautsprechers wird mit dem DUT-Mikrofon gemessen (ohne Kalibrierung).
5. Es wird die Differenz des unkalibrierten DUT-Frequenzgangs und dem kalibrierten REF-Frequenzgang berechnet. Das Ergebnis entspricht dem Frequenzgang des DUT-Mikrofons.
6. Aus dem Verhältnis des unkalibrierten DUT-Schallpegels und dem kalibrierten REF-Schallpegel wird die Empfindlichkeit des DUT-Mikrofons bei 1 kHz ermittelt.
7. Die Messergebnisse werden graphisch dargestellt und in einer ASCII-Datei als Tabelle abgespeichert.

Die Sequenz der Schritte 1–4 kann zur Verbesserung der Datenqualität mehrfach wiederholt werden (siehe Abschnitt 3.1).

Das Übertragungsverhalten von Messmikrofonen weist meist nur eine geringe Abhängigkeit der Schalleinfallrichtung auf (Kugelcharakteristik). Insbesondere bei hohen Frequenzen können aber systematische Abweichungen der Kugelcharakteristik auftreten. Um die Abhängigkeit der

Schalleinfallrichtung korrekt zu erfassen, wird der Frequenzgang des Lautsprechers mit einem digitalen Mess-System aus der Impulsantwort bestimmt, welche durch die Anwendung eines Zeitfensters von Raumechos befreit wird (Schritte 2 und 4). So wird sichergestellt, dass nur der Direktschall aus der Richtung des Lautsprecher berücksichtigt wird und seitlich einfallender Schall (Raumechos, Raummoden) keinen Einfluss auf das Ergebnis haben (siehe auch Abschnitt 2.2.1).

Die Zeitfenster-Methode liefert jedoch keine Daten zum Frequenzgang bei tiefen Frequenzen. Die Länge der reflexionsfreien Impulsantwort ist durch den Zeitversatz zwischen dem Eintreffen von Direktschall und dem ersten Raumecho limitiert. Deshalb werden durch die Anwendung des Zeitfensters alle tieffrequenten Signalanteile ausgefiltert, deren Perioden länger als der Zeitversatz zwischen Direktschall und dem ersten Raumecho sind.

Die untere Grenzfrequenz des reflexionsfreien Frequenzgangs liegt ungefähr bei 300 Hz. Schallwellen mit Frequenzen unterhalb von 300 Hz weisen Wellenlängen von mehr als 1 m auf, was die Dimensionen der Mikrophonkapsel bei weitem übersteigt. Die Übertragungsfunktion von Messmikrofonen ist deshalb bei tiefen Frequenzen unabhängig vom Einfallswinkel des Schalls. Für die Messung der Übertragungsfunktion des Messmikrofons ist es bei tiefen Frequenzen somit nicht nötig, die seitlich einfallenden Raumechos auszufiltern. Deshalb wird in den Schritten 2 und 4 der reflexionsfreie Frequenzgang anhand der vollständigen Impulsantwort mitsamt den Raumechos zu tiefen Frequenzen hin ergänzt.

2.2.1. Positionierung der Mikrofone. Der Schallpegel in der Umgebung des Mikrofons kann aufgrund der Richtwirkung des Lautsprechers und wegen Raummoden je nach Frequenz des Signals eine grosse räumliche Variation aufweisen. Wenn die Membranen der DUT- und REF-Mikrofone nicht exakt an der gleichen Stelle positioniert werden, sind die beiden Mikrofone deshalb leicht unterschiedlichen Schallfeldern ausgesetzt. Die daraus resultierenden Messunsicherheiten sind allerdings gering (Zeitfenster-Methode, grosse Wellenlängen unterhalb von 300 Hz). Dennoch wird darauf geachtet, dass die Membranen der DUT- und REF-Mikrofone möglichst an der gleichen Stelle positioniert werden.

2.2.2. Signal/Rauschverhältnis. Hintergrundgeräusche können die Messungen verfälschen, was die Messpräzision insbesondere bei tiefen Frequenzen beeinträchtigen kann. Die entsprechenden Messunsicherheiten werden durch folgende Massnahmen gering gehalten:

- Hintergrundgeräusche werden minimiert, indem Lärmquellen ausgeschaltet oder vermieden werden. Laute Maschinen oder Geräte werden nach Möglichkeit ausgeschaltet. Zudem werden die Messungen möglichst abends oder nachts durchgeführt, um Hin-

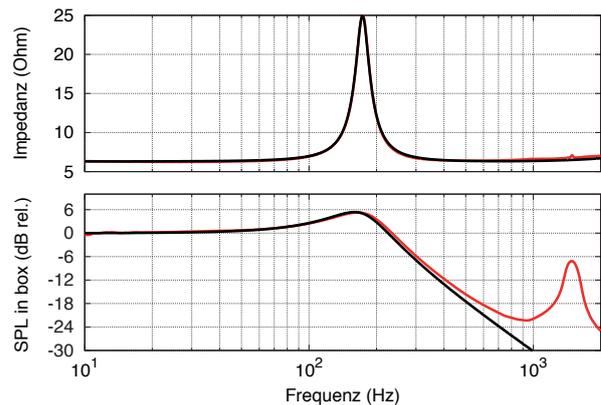


Abbildung 1: Impedanz- und Schalldruckfrequenzgang in der verwendeten Druckkammer (Nachbau der "ARTA-Druckkammer", siehe Text; Resonanzfrequenz $f_0 = 173$ Hz, Resonanzgüte $Q_t = 1.79$). Schwarz: theoretisch berechnete Kurven, rot: gemessene Kurven (der Schalldruckpegel wurde mit dem kalibrierten REF-Mikrofon gemessen).

tergrundgeräusche von Verkehr, Singvögeln, und ähnlichen Geräuschquellen zu vermeiden.

- Als Messsignal wird ein spezieller Gleitsinus verwendet, welcher die meiste Zeit im tieffrequenten Bereich verweilt (länger als die weit verbreiteten logarithmischen Gleitsinus-Signale).
- Das Signal/Rauschverhältnis wird durch die Mittelwertbildung von wiederholten Messungen (siehe Abschnitt 2.2.1) sowie eine ausreichend lange Dauer des Testsignals optimiert.

2.3. Druckkammer-Messung

Die hier verwendete Druckkammer-Messung folgt dem in "ARTA Application Note No 5" (<http://www.artalabs.hr/support.htm>) beschriebenen Aufbau. Figur 1 zeigt das elektroakustische Verhalten der verwendeten Druckkammer. Die Messungen zeigen, dass sich in der Druckkammer eine stehende Welle mit einer Frequenz von ca. 1.4 kHz ausbildet. Bei tieferen Frequenzen stimmen die Messungen von Impedanz- und Schalldruckfrequenzgang jedoch sehr gut mit dem theoretisch berechneten Verhalten überein. Die Druckkammer-Messung liefert also zuverlässige Ergebnisse, womit die Freifeldmessung der DUT-Übertragungsfunktion unterhalb von ca. 400 Hz ergänzt werden kann.

3. MESSUNSICHERHEIT

Zur Validierung der vorgestellten Messmethode wurde die Übertragungsfunktion des REF-Mikrofons mit der beschriebenen Methode gemessen und das Ergebnis mit den Kalibrationsdaten des REF-Mikrofons verglichen (Abb. 2-A). Die gute Übereinstimmung der Messung mit der externen Kalibration bestätigt, dass die Messprozedur das korrekte Ergebnis liefert.

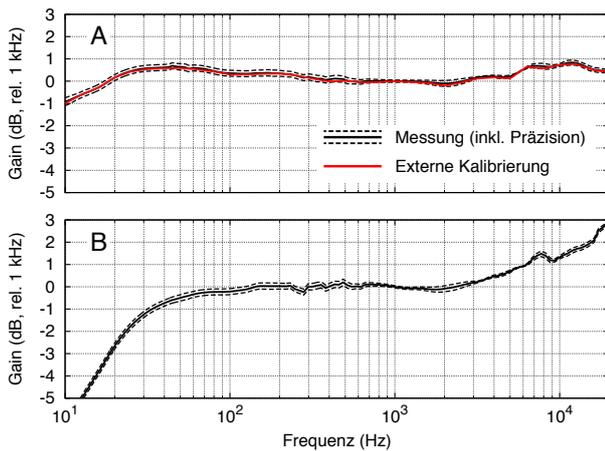


Abbildung 2: Ergebnis der Kombination von Freifeld- und Druckkammer-Messung. A: Vergleich der gemessenen Transferfunktion des REF-Mikrofon mit der externen Kalibration (zur Validierung der Messmethode). B: Beispiel einer Messung der unbekanntenen Transferfunktion eines Behringer ECM-8000 Mikrofon. Die Präzision der Messungen beträgt 0.14 dB (RMS-Wert über den Frequenzbereich von 10 Hz bis 20 kHz).

3.1. Präzision der Messergebnisse

Die Präzision beschreibt, wie gut wiederholte Messungen der DUT-Übertragungsfunktion miteinander übereinstimmen. Mit der beschriebenen Messprozedur wird die Präzision anhand der Standardabweichung der mehrfach durchgeführten REF- und DUT-Einzelmessungen sowohl bei der Freifeld- als auch bei der Druckkammer-Messung quantifiziert. Zudem wird durch die Mittelwertbildung aus den Mehrfachmessungen die Datenqualität verbessert. Die Beispiele in Abb. 2 (A und B) zeigen, dass die Standardabweichung der Einzelmessungen ungefähr 0.1 bis 0.2 dB beträgt. Dies entspricht bei $N = 5$ Einzelmessungen einer Unsicherheit des Mittelwerts von ungefähr 0.05 bis 0.1 dB (Faktor $1/\sqrt{N-1}$).

3.2. Genauigkeit der Messergebnisse

Die Genauigkeit beschreibt, wie nahe die gemessene Übertragungsfunktion an der tatsächlichen ("richtigen") Übertragungsfunktion liegt. Bei der hier beschriebenen Messmethode ist die Genauigkeit letztlich dadurch bestimmt, wie gut die externe Kalibration des REF-Mikrofon mit der tatsächlichen REF-Übertragungsfunktion übereinstimmt.

Für das hier verwendete REF-Mikrofon wurden Kalibrationsdaten vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Weiter wurden von einem unabhängigen Messlabor durch eine Vergleichsmessung mit einem hochwertigen, geeichten Messmikrofon (ACO Pacific 7052E) Kalibrationsdaten für das hier verwendete REF-Mikrofon aufgenommen. Zudem wurde eine Vergleichsmessung des REF-Mikrofon mit einem hochwertigen Messmikrofon durchgeführt (geeichte Brüel+Kjær 1/2"-Kapsel vom Typ 4189 mit Norsonic Im-

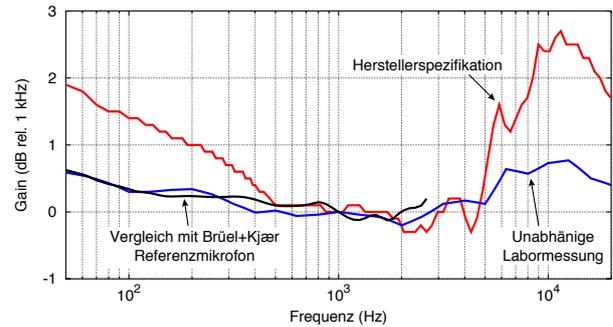


Abbildung 3: Vergleich verschiedener Kalibrationsdaten des verwendeten REF-Mikrofon (rot: Herstellerangaben; blau: Messung aus unabhängigen Messlabor; schwarz: Vergleichsmessung mit Brüel+Kjær Mikrofon, siehe Text).

pedanzwandler vom Typ 1201).¹ Dabei wurden das REF- und das Brüel+Kjær-Mikrofon nebeneinander positioniert. Dann wurde mit beiden Mikrofonen gleichzeitig während ca. 10 s Sekunden ein Testsignal (rosa Rauschen) aufgenommen. Aus der Differenz der beiden Aufnahmen wurde der Frequenzgang des REF-Mikrofon bestimmt. Bei hohen Frequenzen haben sich die beiden Mikrofone allerdings gegenseitig beeinflusst. Zudem wies der verwendete Lautsprecher bei hohen Frequenzen kein homogenes Rundstrahlverhalten auf. Beides führte oberhalb von 2.5 kHz zu einer starken Welligkeit des REF-Frequenzgangs. Die Vergleichsmessung wird hier deshalb nur im Bereich unterhalb dieser Frequenz berücksichtigt.

Ein Vergleich der verschiedenen Kalibrationsdaten des REF-Mikrofon (Abb. 3) zeigt, dass die Herstellerspezifikation unterhalb 400 Hz und oberhalb 5 kHz nicht mit den Kalibrationsdaten des unabhängigen Messlabors übereinstimmt. Die Vergleichsmessung mit dem Brüel+Kjær-Mikrofon stimmt hingegen über den verfügbaren Frequenzbereich sehr gut mit den Messdaten des unabhängigen Messlabors überein (0.1 dB RMS-Abweichung zwischen 50 Hz und 2.5 kHz). Weiter stimmt die Druckkammer-Messung, welche mit den Kalibrationsdaten des unabhängigen Messlabors kalibriert wurde, sehr gut mit dem unterhalb 500 Hz theoretisch erwarteten Frequenzgang überein (Abb. 1). Deshalb wird die Kalibration des unabhängigen Messlabors verwendet, um die DUT-Messungen zu kalibrieren.

Es ist nicht auszuschliessen, dass sich die REF-Übertragungsfunktion aufgrund der Alterung des Mikrofon über die Zeit verändert. Um solche Veränderungen zu erkennen, wird regelmässig die Übertragungsfunktion eines zweiten Mikrofon gemessen, das als Standard dient. Falls Änderungen an den Messergebnissen dieses Standardmikrofon erkennbar werden, muss das REF-Mikrofon überprüft werden.

¹Ich danke Kurt Heutschi (Abteilung Akustik, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf) für die unkomplizierte Unterstützung bei dieser Messung.

DOKUMENTVERSIONEN

- September 2015: erste Version