

Akustische Impedanzmessungen in der Hörerätetechnik

Alfred Stirnemann*, Hansrudolf Graf**, Hilmar Meier*

*Phonak AG, CH-8712 Stäfa; Email: alfred.stirнемann@phonak.ch

**Sulzer Innotec AG, CH-8401 Winterthur; Email: hansrudolf.graf@sulzer.com

Einleitung

Bei der Entwicklung elektroakustischer Systeme, beispielsweise Hörgeräten, ist die Kenntnis der akustischen Impedanz einzelner Komponenten oder ganzer Teilsysteme von grossem Nutzen. Auf dem Markt existieren keine käuflichen Messgeräte welche zu diesem Zwecke eingesetzt werden könnten. Zwar gibt es verschiedene Apparaturen aus dem Audiologiebereich und der medizinischen Diagnostik, welche impedanzähnliche Grössen liefern, aber bezüglich Frequenzbereich und Genauigkeit der gemessenen komplexen Impedanzen die Anforderungen an ein zeitgemässes Messsystem nicht erfüllen.

Aus diesem Grunde wurde ein Real - Time - Messverfahren entwickelt und auf einem PC in MATLAB realisiert. Ausgehend vom Thévenin - Ansatz wurde zuerst ein äquivalenter Transfer - Matrix - Ansatz hergeleitet, welcher eine Hörer - Mikrophon - Konfiguration beschreibt. Um auch die Übertragungseigenschaften eines in der Praxis erforderlichen Ankopplungsvolumens zu modellieren, wurde dieser Ansatz zu einem verallgemeinerten Modell erweitert. Die Parameter dieses Modells können mittels bekannter Kalibrierimpedanzen durch auflösen eines überbestimmten Gleichungssystems bestimmt werden.

Traditionelle Sonde

Für die Bestimmung der akustischen Impedanz im Ohr in Funktion des statischen Drucks zu diagnostischen Zwecken wird seit langer Zeit eine Probe mit drei Anschlüssen für statischen Druck, Hörer und Mikrophon verwendet. Eine typische Anordnung zeigt Abb.1 [1].

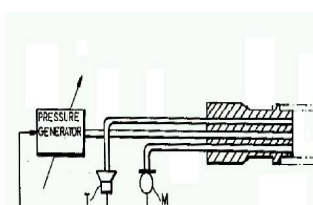


Abbildung 1: Traditionelle Sonde

Für die Kalibrierung dieser Anordnung werden heute typischerweise Sets von theoretisch beschreibbaren Röhren verwendet und die Auswertungen im Frequenzbereich durchgeführt.

Zur Charakterisierung des Systems wird dabei das Prinzip von Thévenin angewendet. Die aktuellste und umfangreichste Darstellung dieser Theorie ist von Keefe² dargelegt.

Das Prinzip von Thévenin

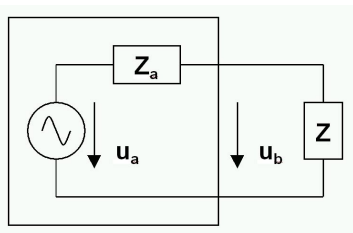


Abbildung 2: Prinzip von Thévenin

Bei der Thévenindarstellung wird die Blackbox, enthaltend Anregung und Übertragung bis zur Lastimpedanz Z in Form einer Spannungsquelle u_a und einer Serieimpedanz Z_a beschrieben. Die messbare Spannung

u_b steht dann mit einer beliebigen Impedanz Z in einem eindeutigen Zusammenhang. Alle Grössen u_a , u_b , Z_a und Z sind komplexe Funktionen der Frequenz.

Bei der Anwendung dieses Prinzips zur Messung unbekannter Impedanzen muss das System zuerst kalibriert werden, d.h. die Parameter u_a und Z_a werden aus Messungen mit mindestens zwei bekannten Impedanzen Z_1 und Z_2 berechnet.

Sind die Parameter der Blackbox bekannt, so kann eine unbekannte Impedanz Z aus der Messung der Klemmenspannung u_b bestimmt werden:

$$Z = \frac{u_b Z_a}{u_a - u_b} \quad \text{eq. 1}$$

Transfer - Matrix - Model

Beim Transfer - Matrix - Ansatz wird in einem ersten Schritt das Thévenin Prinzip, welches die Impedanzmessung mit einem Mikrophon beschreibt, durch eine transfer matrix Formulierung ersetzt: „single transfer matrix model“. In einem zweiten Schritt wird dieser Formalismus erweitert, um einen frei zu gestaltenden Adapter für die Messung beliebiger Impedanzen zu beschreiben: „modified transfer matrix model“.

Single Transfer Matrix Model

Beim „Single Transfer Matrix Model“ werden die Grenzen der Blackbox anders gezogen als beim Théveninprinzip: Die Anregung u_a (normalerweise die Generatorspannung) wird als beobachtbar, d.h. messbar angenommen. Die eigentliche Blackbox umfasst die Übertragung vom Generator mit der Spannung u_a zur Lastimpedanz

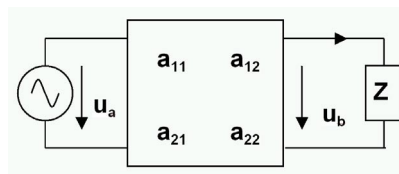


Abbildung 3: Single Transfer Matrix Model

Z mit der darüberliegenden Spannung u_b . Ein solches System wird normalerweise als Zweitor mit der zugehörigen Kettenübertragungsmatrix $A = [a_{11}, a_{12}; a_{21}, a_{22}]$ beschrieben.

Das Spannungsverhältnis Eingang u_a zu Ausgang u_b dieses Zweitorts wird durch die dimensionslose Übertragungsfunktion $U_{ab} = u_a / u_b$ beschrieben, wobei der Strom auf der Lastseite durch u_b / Z substituiert wurde:

$$U_{ab} = \frac{u_a}{u_b} = a_{11} + a_{12} / Z \quad \text{eq. 2}$$

Die Blackbox wird also bezüglich der Spannungsübertragung durch die beiden Koeffizienten a_{11} und a_{12} vollständig beschrieben. Wie beim Théveninprinzip wird auch hier in einem ersten Schritt das System kalibriert. Die Methode für zwei bekannte Impedanzen wurde z.B. von Egolf³ beschrieben. Hier soll jedoch von einem Set

von n bekannten Impedanzen Z_1, Z_2, \dots, Z_n ausgegangen werden. Es ergibt sich das folgende überbestimmte lineare Gleichungssystem:

$$\begin{bmatrix} U_{ab1} \\ U_{ab2} \\ \vdots \\ U_{abn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/Z_1 \\ 1 & 1/Z_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 1/Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix} \quad \text{eq. 3}$$

Die zugehörigen Übertragungsfunktionen $U_{ab1}, U_{ab2}, \dots, U_{abn}$ werden mit Vorteil aus dem gemessenen Autopowerspectrum $U_a U_a^*$ und dem gemittelten Crosspowerspectrum $U_b U_a^*$ berechnet:

$$U_{ab} = \frac{U_a U_a^*}{U_b U_a^*} \quad \text{eq. 4}$$

Mit dieser Mittelungstechnik werden Störungen der Messgröße u_b , d.h. des Mikrofonsignals unterdrückt.

Die Auflösung des Gleichungssystems im Sinne der kleinsten Quadrate liefert die Systemparameter a_{11} und a_{12} .

Nachdem die Parameter a_{11} und a_{12} der Blackbox bekannt sind, kann eine unbekannte Impedanz Z aus der Messung der Übertragungsfunktion $U_{ab} = u_a / u_b$ bestimmt werden:

$$Z = \frac{a_{12}}{U_{ab} - a_{11}} \quad \text{eq. 5}$$

Modified Transfer Matrix Model

Das in Abb.4 dargestellte System weist nach dem Mikrofon einen durch die Transfer Matrix B beschriebenen Adapter auf, welcher die Ankopplung akustischer Elemente verschiedenster Geometrien erlaubt. Es kann gezeigt werden, dass die 8 Matrixelemente von A und B auf drei grundsätzliche Basisparameter d_1, d_2, d_3 reduziert werden können, um die Impedanz Z zu beschreiben:

$$Z = \frac{d_2}{\frac{u_a}{u_b} - d_1} - d_3 \quad \text{eq. 6}$$

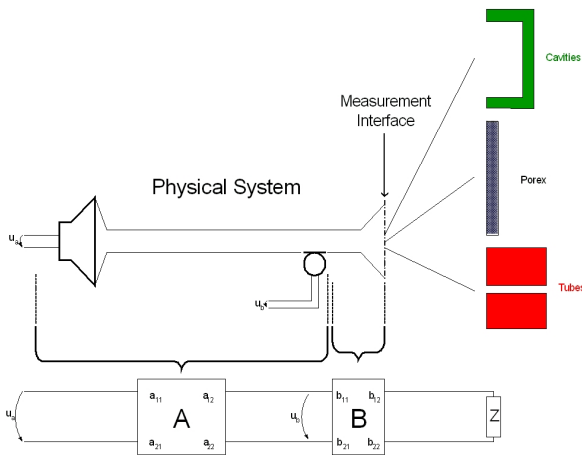


Abbildung 4: Modified Transfer Matrix Model

Die Parameter d_1, d_2, d_3 sind komplexe Funktionen der Frequenz und werden mittels einer Kalibrierungsprozedur mit drei bekannten Eichimpedanzen bestimmt.

Analog zum Ansatz beim „single transfer matrix model“ kann auch für dieses Problem ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem formuliert werden, welches Lösungen für d_1, d_2, d_3 im Sinne der kleinsten Quadrate für mehr als drei Eichimpedanzen liefert. Wichtig dabei ist die Möglichkeit einer frequenz- und impedanzspezifischen Gewichtung der Gleichungen, damit bei einer bestimmten Anwendung eine optimale Messgenauigkeit erreicht wird.

Fehlerbetrachtungen haben ergeben, dass das Anbringen eines akustischen Widerstandes im Pfad Hörer-Mikrofon die Genauigkeit der Messanordnung verbessert. Der Widerstand kann dabei für einen bestimmten Impedanzmessbereich bezüglich der Sensitivität auf Mikrofonfehler optimiert werden.

Schlussfolgerungen

Die erreichten Daten des realisierten Gerätes sind: Frequenzbereich: 100 - 6k Hz, absolute Genauigkeit ca. ± 3 dB, Wiederholbarkeit ± 1 dB, Dynamikbereich bei 1kHz: ca. 60 dB (Volumen von 0.01 - 10 cm), Kalibrierung mit 3 Volumen- und 3 Röhrenelementen.

Die Anwendungen sind vielfältig: Messung des akustischen Widerstandes von porösen Materialien, Eigenschaften akustischer Grundelemente wie Schläuche und Volumen und deren Kombination, akustisches Verhalten von Membranen, Ausgangsimpedanz von elektroakustischen Wandlern.

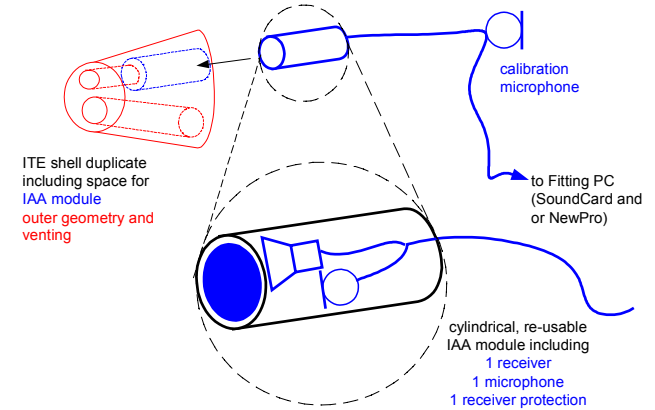


Abbildung 5: Integriertes akustisches Anpasssystem für Hörgeräte

Neben diesem allgemeinen Einsatz der Impedanzmesstechnik im R&D Bereich sowie in der Qualitätskontrolle sind auch Anwendungen bezüglich zukünftiger Entwicklungen in Richtung individuell angepasster und optimierter Hörgeräte mit der Möglichkeit technisch duplizierbarer Ohrschalen denkbar. Abb.5 zeigt schematisch ein integriertes akustisches Anpasssystem für Hörgeräte, in welchem die oben beschriebene Impedanzmesstechnik umgesetzt ist.

¹ Canavesio et al., „Method of and Apparatus for Audiometrically Determining the Acoustic Impedance of a Human Ear“. US Pat 4289143, 1981
² Keefe, D. H., „Method to measure acoustic impedance and reflection coefficient“, JASA 91(1), January 1992
³ Egolf, D. P., „Experimental scheme for analyzing the dynamic behavior of electroacoustic transducers“, JASA 62(4), October 1977