

Messtechnische Bestimmung der Vierpolparameter von elektroakustischen Systemen

Michael Makarski, Gottfried K. Behler
Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen

Einleitung

Das im Beschallungsbereich weit verbreitete Horntrieb-er/Hornsystem ist eine Kombination aus einem elektroakustischen und einem akustischen System. Beide Teilsysteme sind nicht rückwirkungsfrei aneinander gekoppelt, so dass die Übertragungseigenschaften, wie Schalldruckfrequenzgang oder elektrische Eingangsimpedanz, immer am komplett montierten System ermittelt werden müssen.

Die Trennung an der genormten Schnittstelle zwischen gekoppelten Systemen erfordert eine Beschreibung, die Rückwirkungen berücksichtigt. Aus der Vierpoltheorie linearer und zeitinvarianter Netzwerke kann ein geeigneter Formalismus abgeleitet werden.

Diese Arbeit beschreibt eine messtechnische Umsetzung der Extraktion von Vierpolparametern elektroakustischer und akustischer Systeme, mit dem Ziel der Anwendung in Simulationsprogrammen für die Lautsprecherentwicklung.

Die mit diesem Verfahren erzielbare Genauigkeit wird anhand einer statistischen Auswertung der Fehler von berechneten Schalldruckfrequenzgängen untersucht.

Als Anwendungsbeispiel wird die Berechnung des Schalldruckfrequenzganges eines 2^{te}-Horntrieb-er/Hornsystems vorgestellt.

Messtechnische Umsetzung

Horntrieb-er

Die mathematische Beschreibung von linearen, zeitinvarian-ten Vierpolen führt zu einem linearen Gleichungssystem mit vier Unbekannten. Das Gleichungssystem, das den Vierpol vollständig beschreibt, kann durch eine Vierpolmatrix darge-stellt werden.


$$\begin{pmatrix} P \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ I \end{pmatrix}$$

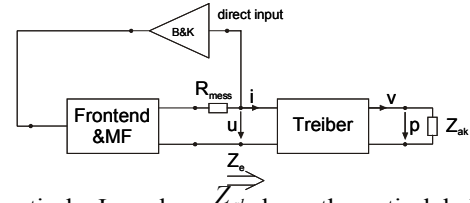
Die Matrixelemente T_{ii} sind die vier unbekannt-ten Größen, die die Klemmengrößen U, I, P und V miteinander verknüpfen. Die messtechnische Aufgabe besteht nun darin, durch Messungen der Klemmengrößen das Gleichungssystem zu lösen und somit eine messtechnische Beschreibung des im inneren Aufbau völlig unbekannt-ten elektroakustischen Systems umzusetzen.

Die Reziprozität solcher Schallwandler kann ausgenutzt werden, um eine Bestimmungsgleichung zur Lösung zu gewinnen. In dem hier beschriebenen Verfahren wurden die Reziprozitätsbeziehungen zur Kontrolle der gemessenen Vierpolparameter verwendet.

Die Lösung des Gleichungssystems erfordert vier unabhän-gige Messungen, aus denen vier linear unabhängige Gleichungen aufgestellt werden können. Des weiteren darf das Gleichungssystem nicht homogen werden, da sonst keine eindeutige Lösung existiert. Welche Messungen schließlich durchgeführt werden ist also prinzipiell nicht von belang, solange diese Bedingungen erfüllt werden. Das im Folgenden vorgestellte Ver-fahren stellt somit nur eine Möglichkeit von vielen dar [1].

Messung1 – elektrische Eingangsimpedanz $Z_e |_{Z_{ak}}$

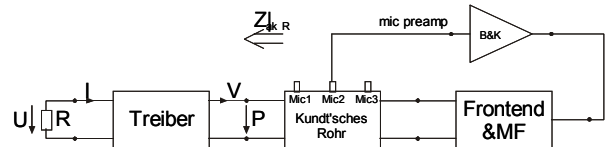
Zur Bestimmung der elektrischen Eingangsimpedanz muss der Vierpol auf der akustischen Seite mit einer genau definierten, bekannten Impedanz abgeschlossen sein.



Die akustische Impedanz Z_{ak} kann theoretisch beliebig sein, für die praktische Durchführung hat sich der Einsatz eines Wellensumpfes (bedämpftes Rohr) bewährt, da so der Horntrieb-er gleichmäßig belastet wird.

Messung 2 und 3 – akustische Quellimpedanzen $Z_{ak} |_{U=0}$ und $Z_{ak} |_{I=0}$

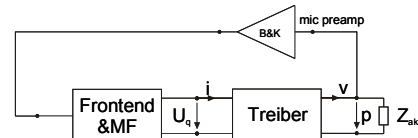
Zwei weitere Messungen werden auf der akustischen Seite durchgeführt, wobei die elektrische Seite mit genau definierten, bekannten Impedanzen abgeschlossen sein muss.



Mit einem Kundt'schen Rohr werden so die akustischen Quellimpedanzen gemessen. Mit dieser Anordnung können zwei einfache Gleichungen gewonnen werden, wenn für den elektrischen Abschluss bei einer Messung ein Kurzschluss ($R = 0$), für eine zweite Messung ein elektrischer Leerlauf ($R = \infty$) gewählt wird.

Messung 4 – Schalldruckübertragungsfunktion $\frac{P}{U} |_{Z_{ak}}$

Die Schalldruckübertragungsfunktion ist der Quotient aus dem am Treibermund messbaren Schalldruck und der elektrischen Eingangsspannung. Der Treibermund muss wieder mit einer bekannten akustischen Impedanz abgeschlossen sein. Hier wird, wie bei Messung 1, für Z_{ak} der Wellensumpf gewählt.



Die Schalldruckmessung wird am Rand des Treibermundes im Übergang vom Horntrieb-er zum Wellensumpf durchgeführt. Die Mikrofonposition am Rand gewährleistet, dass die Wellen-ausbreitung nicht beeinflusst wird.

Treibermatrix

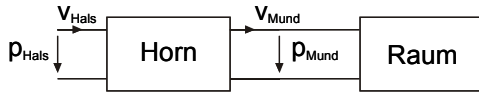
Mit diesen vier Messungen ist es nun möglich, die vier un-bekannt-ten Matrixelemente zu bestimmen und damit die Vier-polmatrix für den Treiber aufzustellen.

$$\mathbf{T} = \frac{P|_{Z_{ak}}}{U_q Z_{ak} |_{U=0} Z_{ak} |_{U=0} - Z_{ak} |_{I=0}} \cdot \begin{pmatrix} -Z_{ak} |_{I=0} (Z_{ak} + Z_{ak} |_{U=0}) & Z_e |_{Z_{ak}} Z_{ak} |_{U=0} (Z_{ak} + Z_{ak} |_{I=0}) \\ Z_{ak} + Z_{ak} |_{U=0} & -Z_e |_{Z_{ak}} (Z_{ak} + Z_{ak} |_{I=0}) \end{pmatrix}$$

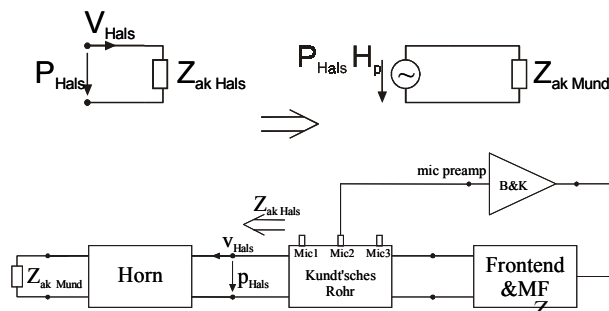
mit Z_{ak} , der gemessenen Impedanz des Wellensumpfes.

Hörner

Hörner für die Schalldruckübertragung sind akustische Vierpole und können so ebenfalls mit Hilfe der Vierpoltheorie beschrieben werden.



Messungen an Lautsprechersystemen werden, um Raumeinflüsse auszuschalten, in reflexionsarmen Räumen durchgeführt. Für einen akustischen Vierpol bedeutet dieser Sachverhalt, dass der Raum eine konstante akustische Last darstellt. Unter diesen Voraussetzungen kann das Horn durch ein vereinfachtes Ersatzschaltbild modelliert werden.



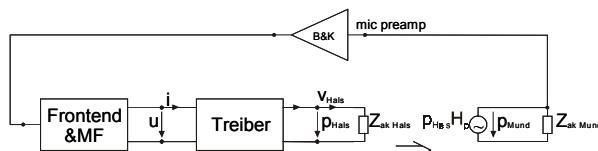
Das Horn wird durch eine Hornhalsimpedanz $Z_{ak,Hals}$ und eine druckgesteuerte Druckquelle beschrieben. Hornhalsimpedanz und Schalldruckübertragungsfunktion sind unmittelbar messbare Größen.

Messung 1 – Hornhalsimpedanz $Z_{ak,Hals}$

Die Messung von $Z_{ak,Hals}$ erfolgt mit dem gleichen Aufbau wie die Messung der akustischen Quellimpedanzen bei Horntreibern. Der definierte Abschluss am Hornmund wird durch die reflexionsarme Messumgebung erreicht.

Messung 2 – Schalldruckübertragungsfunktion H_p

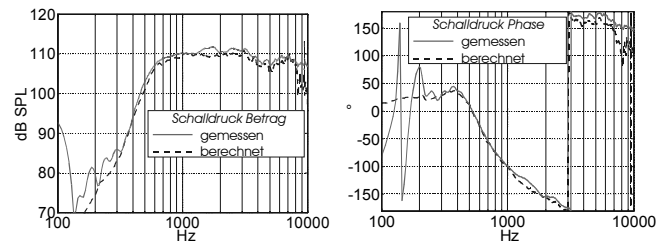
Die Schalldruckübertragungsfunktion ist der Quotient aus Schalldruck an einem Raumpunkt in der reflexionsarmen Umgebung und dem Schalldruck im Hornhals.



Das Mikrofon wird am Rand des Hornhalses platziert, um die Wellenausbreitung im Horntrichter nicht zu stören. Der Schalldruck im Raum wird mit 4m Abstand vom Hornmund bestimmt, um den Messfehler bei ungenauer Positionierung zu verringern.

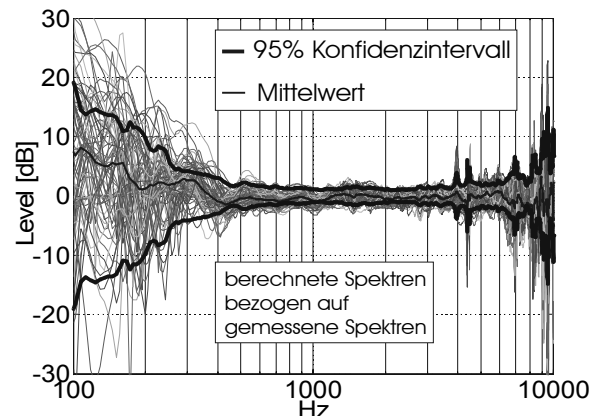
Anwendung: Schalldruckfrequenzgang

Sind die Vierpolmatrix eines Treibers und die Ersatzgrößen eines Horns bekannt, so können für diese Kombination alle Klemmengrößen und daraus zusammengesetzte Größen berechnet werden. Als Beispiel ist hier der Schalldruckfrequenzgang eines 2“-Horntreiber/Hornsystems gezeigt.



Genauigkeit des Verfahrens

Zur statistischen Auswertung wurden 77 Schalldruckfrequenzgänge (7 Horntreiber mit 11 Hörnern) von 2“-Horntreiber/Hornkombinationen gemessen und mit diesem Verfahren berechnet. Der folgende Plot zeigt die bei der Berechnung gemachten Fehler gegenüber den real gemessenen Frequenzgängen.



Die erzielbare Genauigkeit im Frequenzbereich von 400Hz bis 8kHz ist mit ca. 2dB für die Anwendung in Simulationsprogrammen vollkommen ausreichend. Die unterhalb 400Hz stark ansteigende Ungenauigkeit wird durch Messfehler bei der Bestimmung der Schalldruckübertragungsfunktion der Hörner verursacht und kann vollständig durch den Einsatz einer breitbandigen Quelle umgangen werden.

Ausblick

Mit dem hier beschriebenen Verfahren ist die Berechnung beliebiger elektrischer und akustischer Größen von Horntreiber/Hornsystemen möglich. Als Anwendung sei hier die Implementierung von Suchfunktionen auf eine Datenbank mit Parametersätzen von kommerziell vertriebenen Hörnern und Horntreibern vorgeschlagen. So könnte die Datenbank beispielsweise nach einer Kombination mit einem vorgegebenen Frequenzgang oder einem besonders hohem elektroakustischen Wirkungsgrad durchsucht werden.

Literaturverzeichnis

[1] MAKARSKI, MICHAEL: *Messtechnische und theoretische Untersuchung der Schnittstelle Horntreiber/Horn*. Diplomarbeit, RWTH, 1995