

Messung von Schallabsorption und Dämmung mit dem Kundtschen Rohr

J. Sachs, Technische Universität Ilmenau (sac@e-technik.tu-ilmenau.de)
P. Peyerl, MEODAT GmbH Ilmenau (pey@meodat.de)

Einleitung

Das Kundtsche Rohr bzw. Impedanzmeßrohr ist ein klassisches Laborwerkzeug zur Bestimmung der Schallabsorption von Materialien für senkrechten Schalleinfall. Es bildet näherungsweise die Einwirkung einer ebenen Schallwelle auf eine (unendlich ausgedehnte) Wand nach. Hinsichtlich ihres Einflusses auf die Schallausbreitung ist eine Wand durch vier frequenzabhängige Größen gekennzeichnet. Diese werden Streuparameter (S-Parameter) genannt. Zwei dieser Streuparameter stehen für das Reflexionsverhalten und zwei für das Transmissionsverhalten. Aus diesen Parametern lassen sich alle anderen sonst üblichen Kenngrößen ermitteln, wie z. B. die Absorptions- und Dämmwerte. Der große Vorteil besteht aber darin, daß mit der Kenntnis der S-Parameter komplexere Anordnungen berechnet und optimiert werden können.

Entsprechend der klassischen Verfahrensweise ist es nur möglich, mit dem Kundtschen Rohr den Reflexions- bzw. Absorptionsgrad einer Probe vor einer schallharten Wand zu bestimmen. Diese Messung beschreibt das akustische Verhalten der Probe nur unvollständig. Im folgenden sollen erste Überlegungen vorgestellt werden, nach denen es möglich ist, die komplette frequenzabhängige S-Matrix zur vollständigen Beschreibung einer Stoffprobe zu messen.

Ausgehend von einem formalen Fehlermodell erlaubt die Meßmethode auch eine vollständige Kalibrierung des Kundtschen Rohres hinsichtlich systematischer Fehler.

Wellenparameter versus Absorption und Dämmung

Der physikalische Sachverhalt der Beeinflussung eines ebenen Schallfeldes durch eine Wand wird in Bild 1 schematisiert in Form eines Masongraphen wiedergegeben. Die Schallwelle a_1 läuft auf die Wand zu und wird von dieser teilweise reflektiert b_1 . Ein anderer Teil der Welle b_2 kann die Wand durchdringen und sich auf der Gegenseite ausbreiten. Entsprechendes gilt auch für den rechtsseitigen Schalleinfall. Die normierten Wellen a_n und b_m bezeichnen die jeweils auf das Objekt zu- bzw. weglaufenden Schalldruck- bzw. Schallschnellewellen. Die Quotienten der einzelnen Partialwellen zueinander ergeben die sog. Streuparameter \underline{S}_{mm} , die das Wellenverhalten eines Objekts vollständig beschreiben (siehe auch [1]). Es sind frequenzabhängige, komplexe Größen, die von der Geometrie und der Materialzusammensetzung des Testobjektes abhängen. Infolge des Reziprozitätstheorems gilt $\underline{S}_{21} = \underline{S}_{12}$.

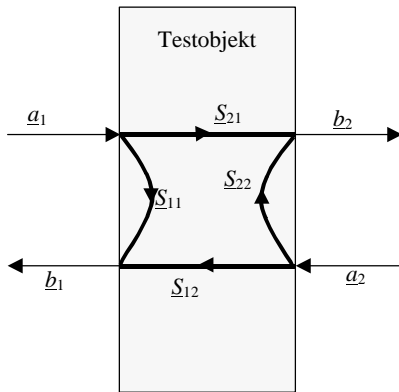


Bild 1 Masongraph für die Partialwellen an einer ebenen Wand

Bild 2 zeigt ein einfaches Modell für eine homogene Wand. Der Reflexionsfaktor r der beiden Grenzflächen hängt von der Schallimpedanz des Wandmaterials und der Transmissionskoeffizient t_r von dessen Schallgeschwindigkeit und Wellendämpfung ab. Frequenzabhängiger Absorptionsgrad und Dämmwert für eine frei stehende Wand ergeben sich aus den S-Parametern zu:

$$\text{Absorption für linksseitigen Schalleinfall: } a_l = 1 - |\underline{S}_{11}|^2$$

$$\text{Absorption für rechtsseitigen Schalleinfall: } a_r = 1 - |\underline{S}_{22}|^2$$

$$\text{Dämmwert: } d = |\underline{S}_{21}|^2 = |\underline{S}_{12}|^2$$

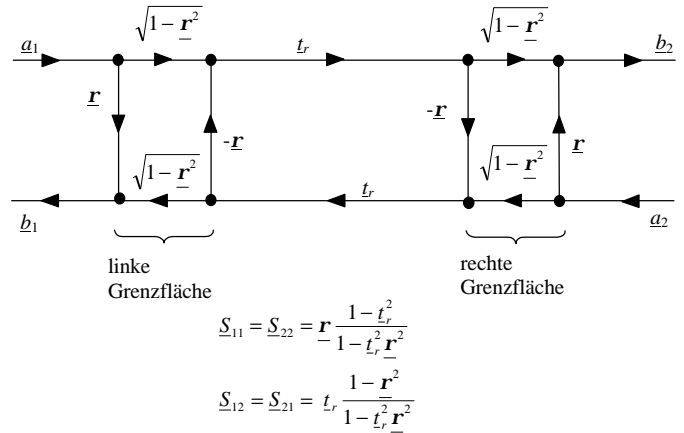


Bild 2 Detaillierter Masongraph eines homogenen Materials

Klassisches Meßverfahren

Die klassische Messung mit dem Kundtschen Rohr beruht darauf, daß sich infolge der schallharten Rohrwände als niedrigste Mode eine ebene Welle ausbildet. Für die Bestimmung der Partialwellen gibt es prinzipiell mehrere Möglichkeiten, wobei jedoch meist nur die Zweimikrophon-Methode benutzt wird. Kommerzielle Rohre verfügen nur über ein Meßsystem, so daß damit nur der totale Reflexionsfaktor \underline{S}_{tot} einer Probe gemessen werden kann. Um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten, ist die Probe mit einem schallharten Abschluß (Kolben) zu versehen. Für linksseitigen Schalleinfall resultieren die im Bild 3 gezeigten Verhältnisse. Die Streuparameter lassen sich anhand der Meßwertes nicht separieren.

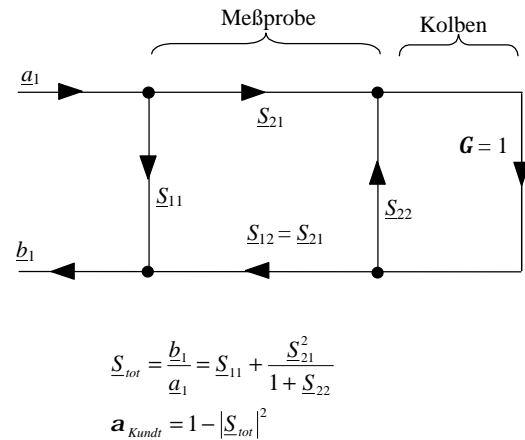


Bild 3 Masongraph für das Kundtsche Rohr mit idealisiertem schallhartem Abschluß

Kundtsches Rohr mit verschiebbarer Kolbenscheibe

Wie oben gezeigt wurde, ist das Meßobjekt durch drei Größen vollständig beschrieben. Um diese bestimmen zu können, benötigt man

mindestens drei linear unabhängige Meßwerte. Das klassische Verfahren liefert aber immer nur einen Wert je Frequenz. Läßt man jedoch ein Luftpolster beliebiger aber bekannter Länge hinter der Probe zu, erhält man die geforderte Mannigfaltigkeit (Bild 4).

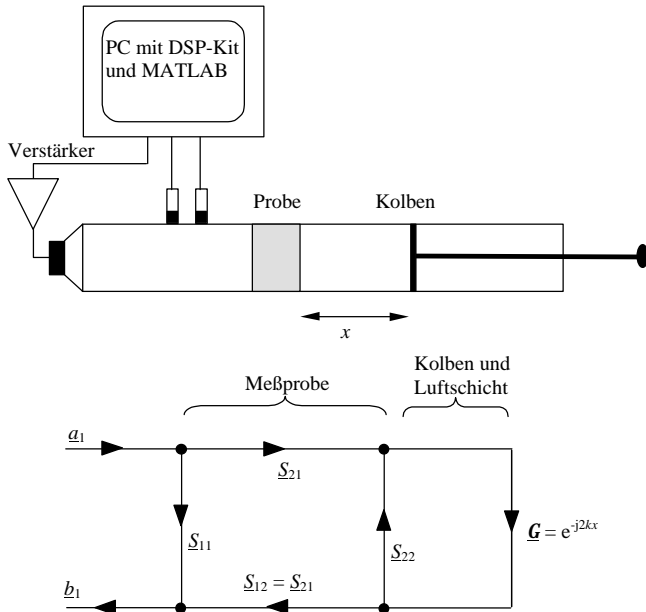


Bild 4 Meßaufbau und Masongraph

Für jede Länge x der Luftschicht ergeben sich neue Werte für die totalen Reflexionsfaktoren $\underline{S}_{tot,n}$, aus denen schließlich die gewünschten Größen bestimmt werden können.

$$\underline{S}_{tot,n} = \underline{S}_{11} + \frac{\underline{S}_{21}^2 \cdot \underline{G}_n}{1 - \underline{S}_{22} \underline{G}_n}$$

Bei einer vorgegebenen Frequenz liegt \underline{S}_{tot} auf einem Kreis in der komplexen Ebene, wenn x kontinuierlich vergrößert wird. Für $\Delta x = \lambda/2$ wird der Kreis einmal durchlaufen. Lage und Durchmesser des Kreises werden von den S-Parametern der Probe bestimmt. Zur Berechnung der Parameter sollte man möglichst weit voneinander entfernte Meßwerte benutzen. Da bei jeder Meßfrequenz dafür aber andere Längen der Luftschicht optimal sind, ist es sehr aufwendig, numerisch stabile Ergebnisse zu erhalten. Es ist daher einfacher, den Kolben in regelmäßigen Abständen zu verschieben und den jeweiligen Reflexionsgrad $\underline{S}_{tot,n}$ für alle Frequenzen zu messen. Damit erhält man ein überbestimmtes Gleichungssystem, welches im Sinne des kleinsten Fehlerquadrates zu lösen ist. Die maximale Kolbenverschiebung sollte mindestens der halben Wellenlänge bei der niedrigsten Meßfrequenz entsprechen. Die Lösung des Gleichungssystems lautet:

$$\underline{R} = \frac{\underline{S}_{tot} \cdot \underline{C}^*}{\underline{C} \cdot \underline{C}^*}, \quad \text{wobei} \quad \underline{R} = \begin{bmatrix} -\det \underline{S} & \underline{S}_{11} & -\underline{S}_{22} \\ \underline{G}_1 & \underline{G}_2 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots \\ -\underline{S}_{tot,1} \underline{G}_1 & -\underline{S}_{tot,2} \underline{G}_2 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}_{tot} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{tot,1} & \underline{S}_{tot,2} & \dots \end{bmatrix}$$

Drei-Term-Fehlerkorrektur

Das Kundtsche Rohr dient der Bestimmung von Reflexionsfaktoren. Dabei treten systematische Fehler auf. Unabhängig von den physikalischen Ursachen dieser Fehler kann man ein reales, fehlerbehaftetes Reflexionsfaktormeßgerät zerlegen in ein fehlerfreies System und einen Vierpol, dem man rein formal alle Fehler zuweist. Da dieser Vierpol passiv sein wird, ist er durch drei Fehler-S-Parameter \underline{E}_n vollständig beschrieben, und alle die Meßwerterfassung betreffenden

systematischen Fehler können bei Kenntnis der Fehlerterme entsprechend korrigiert werden. Das bekannte Vertauschen der Mikrofone (response calibration) berücksichtigt nur einen der drei möglichen Fehler. Störeinflüsse, die den Einbau der Probe betreffen, können natürlich nicht in dieser Form einbezogen werden. Die Bestimmung der Fehlerterme geschieht mit oben beschriebenen Meßverfahren, in dem eine bekannte Probe vermessen wird. Im einfachsten Fall ist das eine (gedachte) unendlich dünne Luftschicht ($\underline{S}_{11} = \underline{S}_{22} = 0$; $\underline{S}_{12} = \underline{S}_{21} = 1$). Messungen am Impedanzmeßrohr Typ 4206 von B&K haben ergeben, daß der sog. Übertragungsfehler dominiert. Die beiden anderen lagen unter 1%. Unter Berücksichtigung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit einem Kundtschen Rohr kann auf eine vollständige Kalibrierung verzichtet werden. Bei anderen Aufbauten muß das aber

Die meßtechnische Umsetzung des Verfahrens basiert auf der Verwendung des DSP-Boardes ELF für die Signalgenerierung und -erfassung. Die Programmierung erfolgte unter MATLAB. Zur Anregung des Lautsprechers sollten breitbandige, periodische Signale verwendet werden. Am besten ist ein Multisinus geeignet, da er auf einfache Weise optimal an das Meßproblem angepaßt werden kann.

Im Beispiel wurde eine 15 cm lange Probe aus Leichtbeton nach dem klassischen Verfahren und der oben beschriebenen Methode vermessen. Bild 5 zeigt den Frequenzverlauf des Betrages aller S-Parameter. Ausgehend von den gemessenen komplexen S-Parametern wurde anschließend berechnet, wie das Reflexionsverhalten der Probe vor einer schallharten Wand sein müßte. Diese Werte wurden in Form des Absorptionsgrades mit den Meßwerten nach der klassischen Methode verglichen (Bild 6).

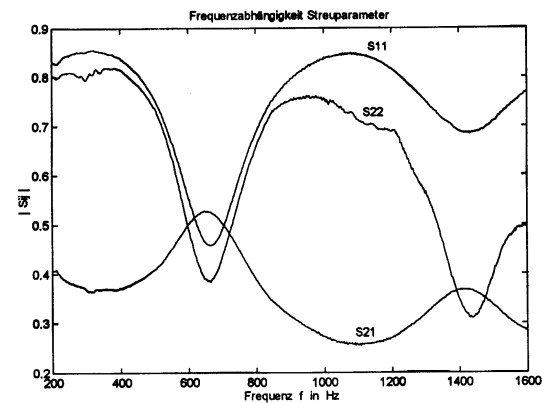


Bild 5 Betrag aller Streuparameter der Probe

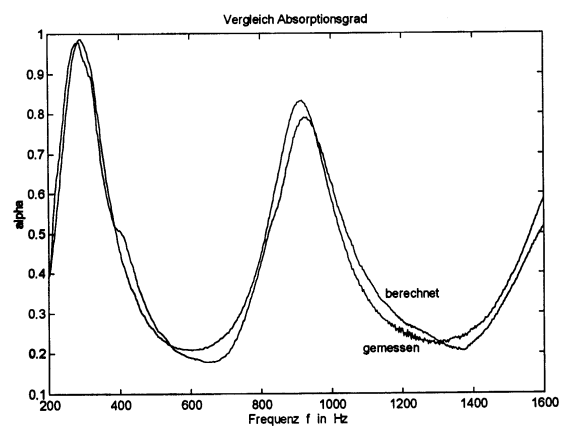


Bild 6 Gegenüberstellung beider Methoden

Für erste Untersuchungen zeigen beide Kurven eine gute Übereinstimmung. Eine nähere Untersuchung der Abweichungen steht noch aus.

[1] M. Kummer: Grundlagen der Mikrowellentechnik. VEB Verrlag Technik Berlin, 1986