

Technischer Bericht Nr. 78

Ein zeitsparendes Verfahren zur Absorptionsgradmessung
im Hallraum

von

Dipl.-Ing. H. GUMMLICH

Berlin
1 9 6 5

Technischer Bericht Nr. 78

Ein zweitsparendes Verfahren zur Absorptionsgradmessung im Hallraum

Zusammenfassung:

Die übliche Anordnung zur Absorptionsgradmessung wird erweitert durch den Einsatz von sechs Mikrofonen im Hallraum. Der Pegelschreiber erhält eine Kontakteinrichtung und schaltet damit eine Zeitmeßanordnung, die aus Taktgenerator und elektronischem Zähler besteht. Der Zähler dient gleichzeitig der Mittelwertbildung. Die Zeitersparnis durch die Apparatur wird besprochen und ihre Fehler untersucht.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter:

gez. Gummlich

(Dipl.-Ing.H.Gummlich)

Der Abteilungsleiter

gez. L. Cremer

(Prof.Dr.-Ing.L.Cremer)

Der Institutsdirektor

gez. Rothert

(Prof.Dr.-Ing.G.Rothert)

Berlin-Charlottenburg, den 10. Dezember 1964



Ein zeitsparendes Verfahren zur Absorptionsgradmessung im Hallraum

1. Einleitung

Rationalisierungsfragen sind bei Meßarbeiten in wissenschaftlichen Instituten meist von untergeordneter Bedeutung, weil normalerweise der Zeitaufwand für eine Messung weit unter demjenigen liegt, der für Entwurf und Aufbau der Apparatur benötigt wird. Anders verhält es sich, wenn nach bekannten und durch Normen genau festgelegten Verfahren große Serien von Messungen ausgeführt werden müssen, wie das z.B. beim Hallraumverfahren zur Absorptionsgradmessung während der Aufstellung einer Absorptionsgradtabelle der Fall ist. In der Literatur findet man verschiedene Geräte zur elektronischen Messung der Nachhallzeit (2), (5). Es wird deshalb hier kein neues Nachhallzeitmeßgerät beschrieben sondern nur gezeigt, wie in einem speziellen Falle der Zeitaufwand für eine derartige Meßreihe bedeutend verringert werden konnte durch einige Zusätze zur herkömmlichen Nachhallzeitmeßapparatur. Sie bestehen aus Geräten, die in einem akustischen Laboratorium entweder sowieso vorhanden oder leicht herzustellen sind.

2. Messung mit der vorhandenen Apparatur

Den Schallabsorptionsgrad eines Materials bestimmt man aus der Differenz zwischen der Nachhallzeit im leeren Hallraum und der im Hallraum mit Prüfmaterial. Der Raum wird mit Terzrauschen angeregt. Nach Beendigung des Einschwingvorganges schaltet man die Rauschquelle ab. Die Abnahme des Schalldruckpegels im Raum wird mit einem Pegelschreiber registriert. Unter Nachhallzeit versteht man die Zeit, in der sich der Schalldruckpegel im Raum um 60 dB vermindert hat. Da das Gerät die Amplituden logarithmisch anzeigt, wird der exponentielle Abklingvorgang als Gerade aufgezeichnet. Man bezeichnet sie als Nachhallgerade, oder, da sie immer etwas von einer Geraden abweicht; auch als Nachhallkurve. Ihre Neigung ist ein Maß für die Nachhallzeit.

Die Auswertung der Kurven erfolgt üblicherweise von Hand mit einer Schablone. Wegen der Unterschiede der Ergebnisse an

verschiedenen Meßorten hat normgemäß die Messung an sechs Punkten des Hallraumes zu erfolgen (4). In jeder Mikrofonstellung wird für alle in Frage kommenden Frequenzen je eine Nachhallkurve aufgezeichnet. Das bedeutet aber, daß an den Filtern sechsmal jede Frequenz eingestellt werden muß. Dazu kommt je nach der Absorption im Hallraum in vielen Fällen ein Nachstellen der Empfindlichkeit der Empfangsapparatur. Von den sechs Nachhallzeiten für jede Frequenz werden Mittelwerte gebildet und aus diesen der Absorptionsgrad nach Sabine berechnet:

$$\alpha_S = \frac{0,163}{S} V \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

(V = Hallraumvolumen, S = mit absorb. Material bedeckte Fläche, T = Nachhallzeit im leeren Hallraum).

Zu unseren Absorptionsgradmessungen stand eine Apparatur gemäß DIN 52 212 zur Verfügung. Sie bestand, wie üblich, auf der Sendeseite aus Rauschgenerator, Terzfilter, 25-W-Verstärker und Lautsprecherkombination, auf der Empfangsseite aus Mikrofon, Terzfilteranalysator und Pegelschreiber.

Nimmt man an, daß die Nachhallzeiten des leeren Hallraumes und ihre Reziprokwerte bereits fertig vorliegen, so erfordert die Bestimmung des Absorptionsgrades noch die Arbeitsgänge:

Auswertung der Nachhallkurven, Reziprokwertbildung von T, Subtraktion der Kehrwerte und Multiplikation mit dem Faktor vor der Klammer.

Im vorliegenden Falle umfaßte der Meßbereich die Terzen mit den Mittenfrequenzen 100 Hz bis 8000 Hz, das sind 20 Meßpunkte für jede Meßreihe. Während eigener Messungen hat der Verfasser die ungefähr notwendigen Arbeitszeiten für eine solche Meßreihe einschließlich aller Auswerte- und Rechenarbeit bestimmt. Sie sind in der Spalte I der Tabelle 1 eingetragen.

3. Verwendung mehrerer Mikrofone

Setzt man in einem Hallraum sechs fest eingebaute Mikrofone ein statt eines an sechs verschiedene Orte zu stellen, und sieht am Meßplatz einen Schalter vor, der gestattet, jedes Mikrofon einzeln mit der Empfangsapparatur zu verbinden, so vereinfacht sich der Meßablauf schon merklich.

Auf den ersten Blick ist klar, daß die Zeit für das Umstellen des Mikrofons eingespart wird. Viel mehr fällt aber ins Gewicht, daß im Gegensatz zur Anordnung in Abschnitt 2 jede Filterstellung nicht mehr sechsmal, sondern nur einmal durchlaufen werden muß. Da sich aber oberhalb von ungefähr 300 Hz die Schallpegel im Hallraum an den verschiedenen Mikrofonorten meistens nur noch wenig unterscheiden, fällt ein großer Teil an Einstellarbeit weg. In den meisten Fällen kann man dort bei einer Frequenz die sechs Nachhallkurven der einzelnen Mikrofone ohne Änderung der Einstellung nacheinander registrieren.

Dieser Umstand wirkt sich erheblich verkürzend auf die Meßzeit aus: statt 90 Minuten beim Umstellen eines Mikrophones werden jetzt nur noch 30 Minuten für die Messung benötigt. (Tab. 1, Spalte II). Die Zeiten für Auswertung und Rechnung werden von dieser Maßnahme natürlich nicht verändert.

	I Minuten	II Minuten	III Minuten
1. Messung	90	30	} 35
2. Auswertung	30	30	
3. Mittelwertbildung	15	15	
4. Reziprokwertbildung Subtraktion Multiplikation	25	25	25
5. Gesamter Zeitaufwand	160	100	60

Tabelle 1: Zeitaufwand für Absorptionsgradmessung im Hallraum.
(Erklärung siehe Seite 4)

Messung in Terzschritten 10 Hz bis 8000 Hz
(20 Meßpunkte)

- I. 1 Mikrofon, Schablonenauswertung
- II. 6 Mikrofone umschaltbar, Schablonenauswertung
- III. 6 Mikrofone umschaltbar, elektron. Zeitmessung
und Mittelwertbildung.

Der finanzielle Mehraufwand für die sechs Mikrofone ist geringer, als man zunächst annimmt. Für Nachhallmessungen sind dynamische Mikrofone der mittleren Preisklasse ohne weiteres geeignet; die Kosten für sechs solcher Mikrofone liegen in der Größenordnung derjenigen für ein einziges, hochwertiges Kondensatormikrofon.

4. Zeitmessung und Mittelwertbildung mit elektronischen Zähler.

Brachte der Einsatz mehrerer umschaltbarer Mikrofone an reiner Meßzeit eine Ersparnis, so läßt sich die zeitraubende Schablonenauswertung der Registrierstreifen ganz vermeiden durch elektronische Messung der Nachhallzeit.

Die technisch einfache Methode, die Verweildauer des abfallenden Schalldruckpegels zwischen zwei definierten Schwellenpegeln zu bestimmen, setzt auswertbare Nachhallkurven voraus und bedarf infolgedessen einer Kontrolle der Kurvenform durch den Messenden, damit durchhängende Kurven erkannt und von der Auswertung ausgeschlossen werden können.

Benutzt man zu dieser Kontrolle einen Pegelschreiber, so läßt sich das kräftige Schreibsystem zum Ein- oder Ausschalten des Zählers durch einen einfachen, mechanischen Kontakt verwenden. Man koppelt starr mit dem Schreibstift eine Kontaktfeder, die auf einer passend unterteilten Kontaktbank gleitet. Die Zeitmessung erfolgt dann mit der einfachen Schaltung, deren Blockschema Abb. 1 zeigt:

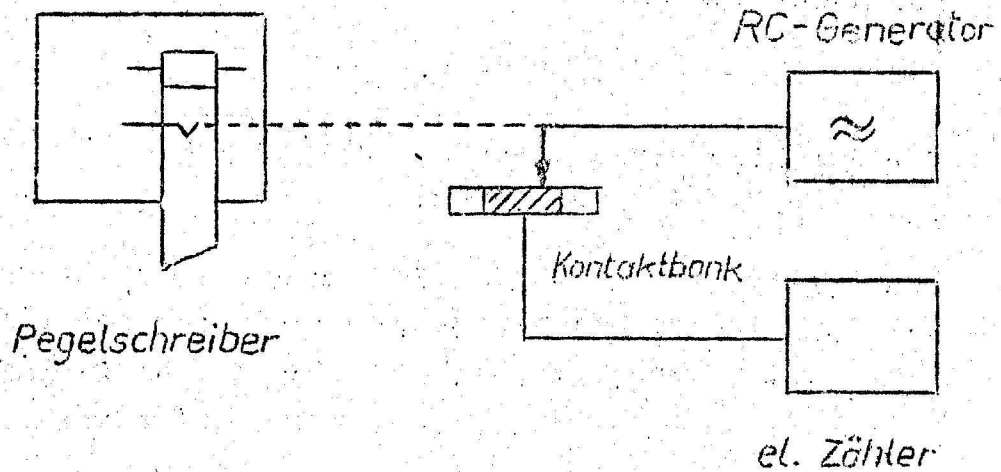


Abb. 1 Zusatz zum Pegelschreiber

Auf systematische Fehler dieser Anordnung soll im nächsten Kapitel eingegangen werden.

In Anlehnung an die Auswertevorschrift in DIN 52 212 wird bei unserer Apparatur der Pegelbereich von -5 bis -35 dB, bezogen auf den Maximalpegel im Hallraum benutzt. Der Maximalpegel muß dazu am Pegelschreiber stets auf den gleichen Wert eingeregelt werden. Die Pegelabnahme um 30 dB ergibt die halbe Nachhallzeit.

Das Ergebnis einer solchen Zeitmessung läßt sich leicht multiplikativ verändern durch passende Wahl der Taktfrequenz. Außerdem kann jeder Zähler nacheinander zugeführte Impulsfolgen additiv zusammenfassen. In der vorliegenden Meßanordnung werden beide Möglichkeiten ausgenutzt, um auf einfache Weise die unmittelbare Anzeige des Mittelwertes über sechs Meßergebnisse zu erreichen.

Zur Zeitmessung in Sekunden und dekadischen Bruchteilen ist eine dekadische Taktfrequenz f_0 (z.B. 100 Hz, 1000 Hz usw.) erforderlich. Steht zur Nachhallmessung nur das halbe Zeitintervall zur Verfügung, so wird die Anzeige wieder richtig mit der Taktfrequenz $f_1 = 2 f_0$. Zur Bildung des Mittelwertes

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_n$$

über n Zeitmessungen $x_1, \dots, x_n$ führt man die entsprechenden Impulsfolgen nacheinander dem Zähler zu, der die $\sum x_n$ bildet. Die noch nötige Division durch n hat man vorher an der Taktfrequenz vorzunehmen. Dazu ist allerdings Bedingung, daß die Anzahl n der Meßwerte von vornherein feststeht. Unter dieser

Voraussetzung wird die Taktfrequenz in unserem Falle

$$f_n = \frac{1}{n} f_1 = \frac{2}{n} f_0$$

Für die hier verwendeten sechs Mikrofone ist also bei $f_0 = 1000 \text{ Hz}$ $f_n = 333,3 \text{ Hz}$.

Die Mittelwerte werden am Zähler angezeigt. Die Kombination des Zählers mit einem Drucker ist ohne weiteres möglich, wurde allerdings bisher nicht benutzt. Einzelne Meßwerte können bei dieser Anordnung nicht abgelesen werden.

Durch den Fortfall der Zeiten für Auswertung und Mittelwertbildung wird jedoch die Arbeitszeit für eine Meßreihe nochmals merklich herabgesetzt, wie Spalte III in Tab. 1 zeigt.

Um die Verbesserung deutlich zu machen, muß man den Zeitverbrauch für die drei Arbeitsgänge Messung, Auswertung und Mittelwertbildung für sich betrachten. Er betrug bei herkömmlicher Messung mit einem Mikrofon 120 Minuten, sank bei Einsatz von sechs Mikrofonen auf 75 Minuten und machte bei Verwendung von sechs Mikrofonen und elektronischer Auswertung und Mittelwertbildung nur noch 35 Minuten, d.h. weniger als 30 % der ursprünglichen Zeit aus. Durch die nachfolgenden Rechengänge, deren Zeit unverändert blieb, ist die prozentuale Abnahme der gesamten Arbeitszeit für eine Meßreihe geringer. Der Zeitaufwand reduziert sich von 160 Minuten ursprünglich auf 60 Minuten, also auf weniger als 40 %.

Wenn die hier aufgeführten Arbeitszeiten auch Ergebnisse einer einzigen Person darstellen mit allen Einschränkungen, die dafür zu gelten haben, so liefern sie doch einen Überblick über den Umfang der Zeitersparnis.

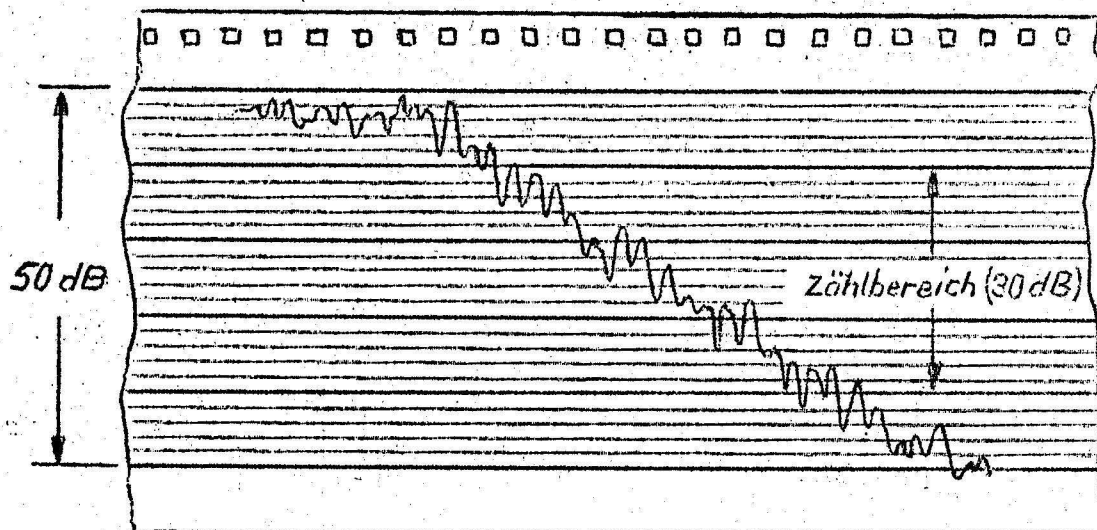
5. Fehler

5.1 Systematische Fehler des Verfahrens.

Das einfache Meßverfahren aus Abschnitt 4 ist naturgemäß mit gewissen Fehlern behaftet, die wenigstens nicht größer sein sollen als die bei Auswertung mit der Schablone von Hand entstehenden.

Wäre der Schalldruck an einem Mikrofonort eine monoton abnehmende Funktion der Zeit, so ließen sich mit der Anordnung leicht genaue Ergebnisse erreichen. Pegelschreiber sind mit präzisen, fein gestuften Potentiometern ausgerüstet, einem bestimmten Weg des Schleifers ist mit großer Genauigkeit eine entsprechende Pegeldifferenz zugeordnet, so daß auf der Kontaktbank durch saubere, mechanische Arbeit das Meßintervall von 30 dB mit guter Genauigkeit festgelegt werden kann.

Tatsächlich schwankt jedoch besonders bei niedrigen Frequenzen die Schalldruckamplitude beim Abklingen ständig um einen mittleren Wert. Der Pegelschreiber zeichnet eine entsprechend gezackte Kurve auf. Für die Schablonenauswertung bedeutet das kein Hindernis, der Auswertende kann die mittlere Neigung des Kurvenzuges normalerweise ohne besondere Mühe durch eine Gerade ersetzen, deren Neigung die Nachhallzeit liefert. Die elektronische Messung wird dadurch erschwert, daß die Kontaktfeder in diesem Falle die obere und untere Grenze des Zählbereiches pendelnd mehrfach überfährt. Die Zeitpunkte von Beginn und Ende der Zählung liegen dadurch nicht genau fest (s. Abb. 2). Etwas günstigere Verhältnisse sind zu erreichen, wenn man nicht mit möglichst großer Schreibgeschwindigkeit arbeitet, sondern die Dämpfung des Schreibsystems der Länge der Nachhallzeit anpaßt. Bei den vorliegenden Versuchen wurde die Dämpfung so bemessen, daß die Einstellungsgeschwindigkeit des Pegelschreibers in dB/s ungefähr drei- bis viermal so groß war wie die mittlere Abnahmegeschwindigkeit des Schalldruckpegels im Hallraum.



Man kann aber annehmen, daß bei genügender Häufigkeit der Schwankungen sich die Fehler ungefähr ausgleichen, also ein zu früher Beginn der Zählung durch ein zu frühes Ende kompensiert wird. Die Schwankungen sind natürlich nach Form und Größe nicht so regelmäßig, daß das im Einzelfall immer zutrifft. Die Wahrscheinlichkeit der Fehlerkompensation wächst vielmehr mit der Anzahl der Messungen und infolgedessen ist zu erwarten, daß der Mittelwert aus einer Anzahl von Einzelergebnissen auch seitens der elektronischen Zeitmessung einen geringeren Fehler aufweist als ein Einzelwert. Die Messungen bestätigen diese Annahme (s. Kap. 5.2). Die hier benutzte Mitteilung über die Werte von sechs Mikrofonen dient also nicht nur der Zeitersparnis, sondern trägt auch dazu bei, die Meßfehler des gewählten, einfachen elektronischen Verfahrens möglichst klein zu halten.

5.2 Vergleich mit der Genauigkeit der Handauswertung.

Allgemein wird bei Nachhallmessungen die Genauigkeit der Auswertung von Hand mit der Schablone als ausreichend empfunden (2), (5). Zur Kontrolle der Elektronik diente eine Nachhallmessung im leeren Hallraum. In den Terzbereichen mit den Mittelfrequenzen 100 Hz bis 8000 Hz wurden jeweils sechs Nachhallkurven registriert. Fünf mit der Auswertung von Nachhallmessungen vertraute Versuchspersonen werteten die Kurven unabhängig voneinander aus. Aus den Endergebnissen der einzelnen Auswerter wurden der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung s (mittlerer quadratischer Fehler) berechnet. Das Verhältnis der Standardabweichungen zum Mittelwert $\frac{s}{\bar{x}}$ bezeichnet man als Variationskoeffizient. In Abb. 3 ist dieser für die verschiedenen Meßfrequenzen der obigen Auswertung aufgetragen.

Das Beispiel vermittelt zunächst einen Eindruck von der Streuung der Ergebnisse verschiedener Auswerter, die man für die relativ gut auswertbaren Nachhallkurven aus Hallraummessungen bei Auswer-

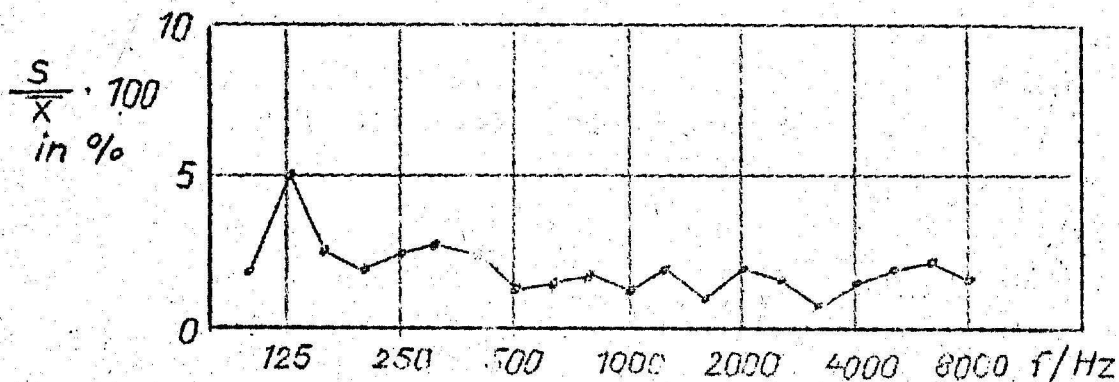


Abb. 3 Auswertung mit Schablone durch 5 Versuchspersonen.

Variationskoeffizient $\frac{S}{\bar{x}}$. Schablone: Nachhallzeit-Rechen-
scheibe SC 2361 (Brüel u. Kjaer)
(Nachhallmessung im leeren Hall-
raum).

tung mit der Schablone zu erwarten hat. Nachhallmessungen in Räumen mit geringerer Diffusität liefern weniger eindeutige Nachhallkurven, und man wird entsprechend auch mit größeren Auswertefehlern zu rechnen haben. Zur richtigen Einschätzung der Zahlen ist zu beachten, daß unter der Voraussetzung einer Normalverteilung im Bereich $\bar{x} \pm s$ die Werte nur mit einer statistischen Sicherheit $P = 68 \%$ zu erwarten sind, mit einer statistischen Sicherheit $P = 95 \%$ dagegen im Bereich $\bar{x} \pm 2 s$. Dabei versteht man unter statistischer Sicherheit von z.B. 68% , daß aus einer großen Anzahl n von Einzelergebnissen 68% innerhalb des betrachteten Bereiches liegen.

Es muß noch einmal betont werden, daß es sich dabei nur um Auswertefehler handelt, die Fehler der Hallraum-messung sind in dieser Betrachtung nicht enthalten. Außerdem ist zu beachten, daß der Auswertefehler des Absorptionsgrades sich aus den Fehlern von zwei Nachhallmessungen zusammensetzt, die nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zusammenzufassen sind.

In Abb. 4 ist der Variationskoeffizient $s / \bar{x}$ aus Abb. 3 und sein doppelter Wert $2s / \bar{x}$ als prozentuale positive und negative Abweichung, bezogen auf den Mittelwert aufgetragen. Gleichzeitig ist die Lage der elektronisch ermittelten Werte eingezeichnet. Die elektronische Auswertung ergibt keinen größeren Fehler als die

Abweichung vom
Mittelwert $\bar{x}$
in %

-- 10 --

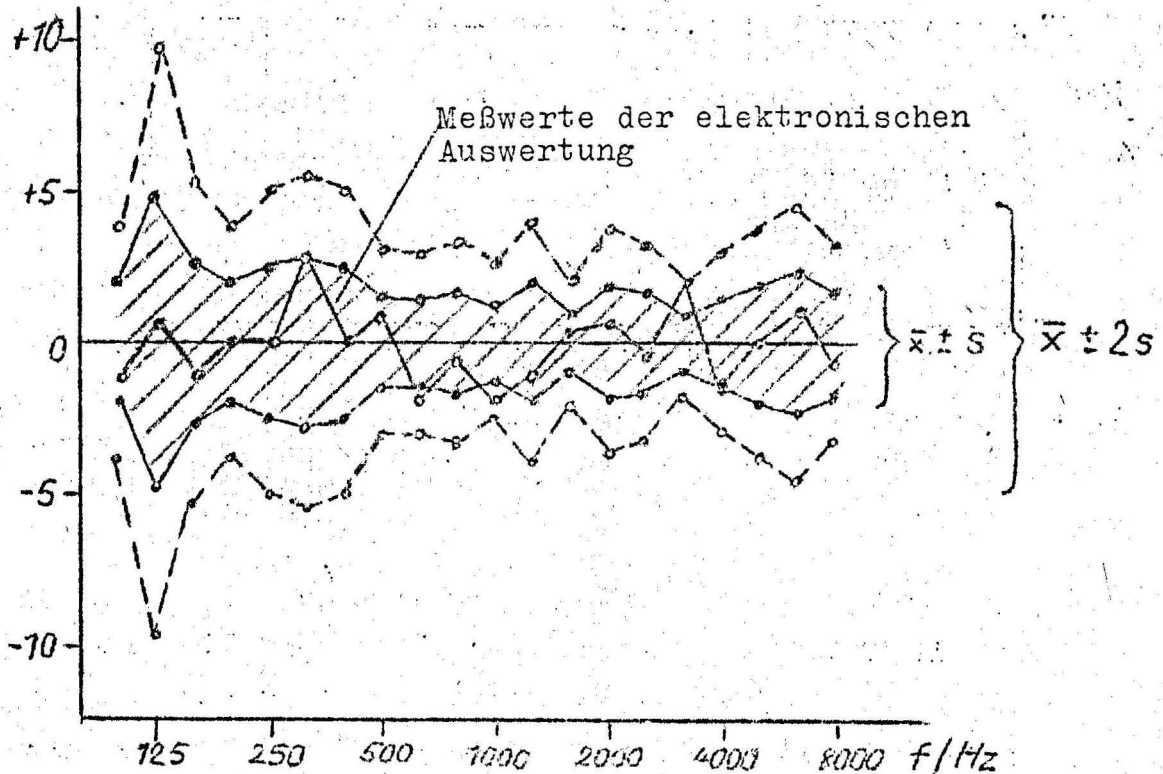


Abb. 4 Vergleich von elektronischer Auswertung und Schablonenauswertung durch 5 Versuchspersonen.

Meßwerte einer elektronischen Messung und Streubereiche $\bar{x} \pm s$ und $\bar{x} \pm 2s$ der Schablonenauswertung.

Schablonenauswertung, wenn die Ergebnisse einer Messung innerhalb des Streubereiches $\bar{x} \pm 2s$ ($P = 95\%$) der Schablonenauswertung liegen. Man sieht, daß diese sogar die Grenzen $\bar{x} \pm s$ kaum überschreiten. Die oben gestellte Forderung ist also mit Sicherheit erfüllt und damit die Brauchbarkeit der elektronisch gewonnenen Ergebnisse nachgewiesen.

Zur Genauigkeit bei den tiefsten Frequenzen des Meßbereiches muß allerdings bemerkt werden, daß bei der Kontrollmessung zufällig auch bei den tiefen Frequenzen alle Kurven auswertbar waren. Das ist jedoch nicht die Regel. Tritt der Fall ein, daß bei einer Frequenz von den Kurven der sechs Mikrofonstellungen auch nur eine nicht auswertbar ist, so wird dadurch das elektronische Ergebnis unbrauchbar. Die restlichen auswertbaren Kurven der Messung müssen dann mit der Schablone ausgewertet werden. Derartige Fehler treten gelegentlich in den tiefsten Terzbereichen auf.

Die Kontrolle durch Auswertung mit der Schablone zeigt jedenfalls, daß unter der Voraussetzung auswertbarer Nachhallkurven die beschriebene Methode der elektronischen Nachhallzeitmessung der Auswertung mit der Schablone an Genauigkeit mit Sicherheit gleichkommt. In Anbetracht der erreichbaren Zeitersparnis ist die Anwendung demnach gerechtfertigt.

Literatur

- (1) Andres, H.G.
u. Brodhun, D.: Zur Genauigkeit von Schall-
absorptionsgradmessungen im
Hallraum.
Acustica 10 (1960) 330
- (2) Cremer, L.: Statistische Raumakustik,
Hirzel Stuttgart
- (3) DIN 1319: Grundbegriffe der Meßtechnik.
- (4) DIN 52 212: Bauakustische Prüfungen, Be-
stimmung des Schallabsorptions-
grades im Hallraum.
- (5) Odin, G.: Ein Gerät zur Messung der Nach-
hallzeiten.
Hochfrequenz u. Elektroakustik
65 (1956) 86.
- (6) Waterhouse, R.V.: Precision of Reverberation
Chamber Measurements of Sound
Absorption Coefficients.
Proc. III. ICA Stuttgart 1959.

