

**EIN NEUES AUDIOMETER FÜR FREQUENZEN VON 8 - 40 kHz**

J. Herbertz, J. Heinrich, K.-W. Hirsch

Ultraschalltechnik, Universität -GH- Duisburg

Nachdem berichtet wurde /1/, daß der Mensch noch Töne von 31,5 kHz hören kann, wurde die Entwicklung eines audiometrischen Meßplatzes zur Bestimmung der Hörschwellenkurve und der Kurven gleicher Lautstärke bei Ultraschallfrequenzen erforderlich.

**1. Anforderungen**

Das neue Audiometer für den Frequenzbereich von 8 bis 40 kHz schließt an den üblichen Frequenzbereich konventioneller Geräte an. Abb. 1 zeigt die von dem Audiometer zu erfüllenden Anforderungen an die Schalldruckpegel-Dynamik für die in Terzabständen gewählten Testfrequenzen. Bis zu 16 kHz ist ein Pegelbereich von -10 dB bis 95 dB erforderlich, um die Hörschwelle und die Kurven gleicher Lautstärke bis zu 80 phon ermitteln zu können. Für die höheren Frequenzen müssen Pegel bis 150 dB in einem kleineren Pegelbereich angeboten werden können.

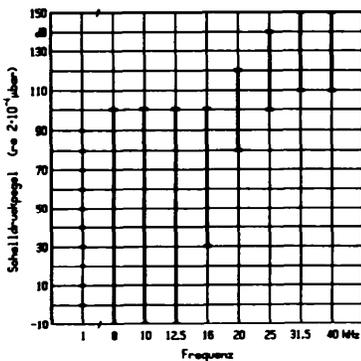


Abb. 1 Pegelbereich der Testtöne

Die Anforderungen an die spektrale Reinheit und die Pegelanforderungen können bis zu 16 kHz von elektrodynamischen Systemen erfüllt werden. Ab 20 kHz werden Festkörperresonatoren eingesetzt, die die Auslegung des Audiometers als Freifeld-Reinton-Audiometer bedingen.

Die Anforderungen an die spektrale Reinheit und die Pegelanforderungen können bis zu 16 kHz von elektrodynamischen Systemen erfüllt werden. Ab 20 kHz werden Festkörperresonatoren eingesetzt, die die Auslegung des Audiometers als Freifeld-Reinton-Audiometer bedingen.

**2. Festkörperresonatoren als kalibrierte Schallquellen**

**2.1 Aufbau**

Abb. 2 zeigt das Schnittbild eines Festkörperresonators. Ein scheibenförmiges piezoelektrisches Element bildet zusammen mit einem akustischen Transformator aus Aluminium ein Resonanzsystem. Die Konturierung erhöht die Ergiebigkeit bei der longitudinalen Grundresonanz, die zur Erzeugung des Testtones benutzt wird, durch innere Schnelleübersetzung.

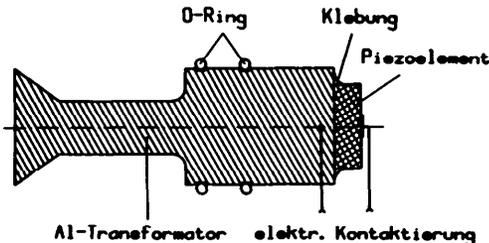


Abb. 2 Längsschnitt eines Festkörperresonators

Die Längen der einzelnen Aluminiumkörper wurden so gewählt, daß die longitudinalen Grundresonanzen bei den vier Testfrequenzen 20 kHz, 25 kHz, 31,5 kHz und 40 kHz liegen. Die Durchmesser sind jeweils identisch; lediglich beim 40 kHz-Resonator ist der Enddurchmesser des konischen Kopfstückes reduziert, um eine zu starke Richtwirkung zu vermeiden.

### 2.2 Ersatzschaltbild und Kenngrößen

Ausgehend von der elektromechanischen Analogie erster Art läßt sich für die Festkörperresonatoren im Bereich ihrer longitudinalen Grundresonanz ein Ersatzschaltbild angeben, das im eingerahmten Teil der Abb. 3 dargestellt ist. Die Kraft am Piezoelement ist der Spannung  $\underline{U}_W$  proportional. Die gleiche Proportionalität besteht zwischen dem Strom  $\underline{I}_W$  und der Dehngeschwindigkeit des Piezoelementes. Da die Dehngeschwindigkeit des Piezoelementes mit der Dehngeschwindigkeit des gesamten Resonators bei Resonanz hoher Güte eng verknüpft ist, besteht ein fester Zusammenhang zwischen dem Strom  $\underline{I}_W$  und der akustischen Ergiebigkeit.

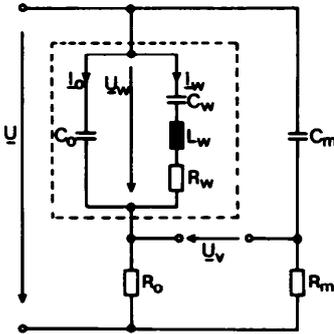


Abb. 3 Resonator-Brückenschaltung

Das Großsignalverhalten der Resonatoren führt dazu, daß diese Schallquellen nicht mit einem Generator fester Frequenz angesteuert werden können. Die eindeutige Zuordnung zwischen angelegter Spannung und abgestrahltem Schalldruckpegel wird bei fester Frequenz einerseits durch eine amplitudenabhängige Güte der Resonatoren und andererseits durch eine Temperaturdrift der Eigenresonanz gestört. Da bei der Resonanzfrequenz die Spannung  $\underline{U}_W$  und der Strom  $\underline{I}_W$  gleichphasig sind, kann die für den Resonanzbetrieb erforderliche Spannung  $\underline{U}_W$  durch phasentreue Verstärkung des Stromsignals  $\underline{I}_W$  erzeugt werden.

als Maß für die Dehngeschwindigkeit abgeleitet. Dieses Signal wird sowohl für die Kontrolle des Pegels als auch für die Erzeugung der Spannung  $\underline{U}$  benutzt. Die Wirkung der Meßschaltung besteht darin, daß in einem Brückenweig der Anteil  $\underline{I}_0$  des vom Piezoelement aufgenommenen Stromes kompensiert wird, der der Bürdekapazität  $C_0$  zuzuschreiben ist. Die Differenzspannung  $\underline{U}_v$  der

Mit Hilfe der in Abb. 3 gezeigten Brückenschaltung wird die Spannung  $\underline{U}_v$  als Maß für die Dehngeschwindigkeit abgeleitet. Dieses Signal wird sowohl für die Kontrolle des Pegels als auch für die Erzeugung der Spannung  $\underline{U}$  benutzt. Die Wirkung der Meßschaltung besteht darin, daß in einem Brückenweig der Anteil  $\underline{I}_0$  des vom Piezoelement aufgenommenen Stromes kompensiert wird, der der Bürdekapazität  $C_0$  zuzuschreiben ist. Die Differenzspannung  $\underline{U}_v$  der an den Meßwiderständen  $R_0$  und  $R_m$  abfallenden Spannungen ist dem Strom  $\underline{I}_W$  und damit der Dehngeschwindigkeit im Piezoelement in Betrag und Phase proportional, wenn die Brücke die Beziehung  $R_0 C_0 = R_m C_m$  erfüllt.

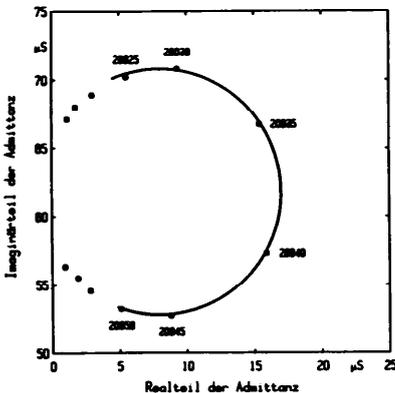


Abb. 4 Ortskurve der Admittanz  
Parameter: Frequenz in Hz

Aus der in Abb. 4 dargestellten Ortskurve der Admittanz für den Resonator der Testfrequenz 20 kHz lassen sich typische Werte für die Kenngrößen der Festkörperresonatoren im Ersatzschaltbild entnehmen:

Bei einer Güte von 1110 ergibt sich eine Bürdekapazität  $C_0$  von 490 pF, eine Ersatzkapazität  $C_w$  von 122 fF für die mechanische Nachgiebigkeit, eine Ersatzinduktivität  $L_w$  von 520 H für die schwingende Masse und ein Ersatzwiderstand  $R_w$  von 58,5 k $\Omega$ m für die Summe von akustischem Strahlungswiderstand und inneren Verlustwiderständen.

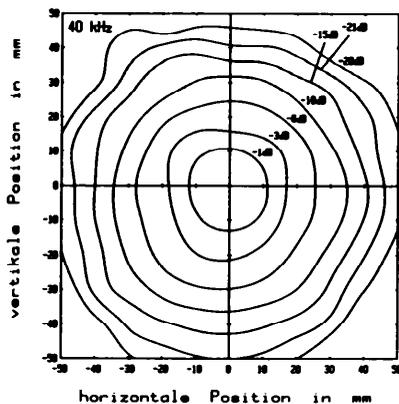


Abb. 5 Linien konstanten Schalldruckpegels

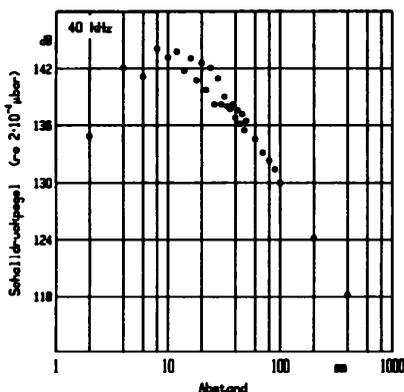


Abb. 6 Axiale Ortsabhängigkeit des Schalldruckpegels

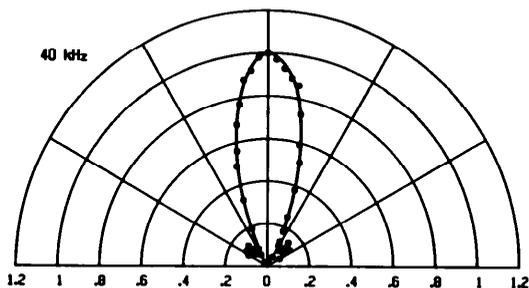


Abb. 7 Richtdiagramm im Fernfeld

### 2.3 Spektrum

Der Nachweis, daß im abgestrahlten Spektrum der Festkörperresonatoren keine Anteile unterhalb der Testfrequenz vorhanden sind, erfordert die Messung von Tönen, deren Pegel ca. 130 dB unterhalb des Pegels des Testtones liegen.

Für die entscheidende Frequenz von 25 kHz wurde diese Untersuchung durchgeführt. Hierbei wurden weder subharmonische noch anharmonische Töne bei Pegeln gefunden, die die audiometrische Messung stören können. Harmonische der Resonanzfrequenz sind wegen der Nichtlinearität der Luft unvermeidbar. Ihr Auftreten stört die audiometrischen Messungen nicht.

### 3. Schallfeldgeometrie

Die Schallquellen für die Testtöne und den Standardton liegen in der Mitte einer Wand einer Schallschutzkabine mit den Abmessungen 1m x 1m x 2,5m. Die Wellenlänge der Testtöne ist im Frequenzbereich des Audiometers schon so klein im Vergleich zu den Kopfabmessungen, daß eine normgerechte binaurale Freifeld-Audiometrie nicht sinnvoll ist. Daher werden Einzelmessungen an beiden Ohren mit seitlichem Schalleinfall vorgenommen. Für die Positionierung des Ohres ist ein Abstand von 10 cm von der Schallquelle vorgesehen, weil für jede Testfrequenz die Nahfeldlänge kleiner als dieser Abstand ist.

Messungen der Schalldruckverteilung ergaben bei allen Testtönen und beim 1 kHz-Standardton, daß auf einer Abhörfläche von 4 cm<sup>2</sup> in 10 cm Abstand vor der Schallquelle Schwankungen von nicht mehr als 1 dB auftreten.

Die Abb. 5 bis 7 zeigen Linien konstanten Schalldruckpegels in 10 cm Abstand von der Schallquelle, die Abstandsabhängigkeit des Schalldruckpegels und das Richtdiagramm für den 40 kHz Testton.

**4. Betriebsarten des Audiometers**

Das Audiometer wird im ANGLEICHVERFAHREN mit veränderlichem Testton als Objektschall betrieben. Die Versuchsperson stellt den Pegel des Testtones so ein, daß sie den Testton und den Standardton gleich laut wahrnimmt.

Testton und Standardton können gleichzeitig oder abwechselnd angeboten werden. Auch bei der Hörschwellenmessung ist kontinuierlicher oder gepulster Betrieb möglich. Puls- und Pausendauer sowie Anstiegs- und Abfallzeiten entsprechen DIN 45620.

Das Audiometer ermöglicht zwei Arten der stufenlosen Angleichung des Testtones im kontinuierlichen oder gepulsten Betrieb:

Beim HERSTELLUNGSVERFAHREN stellt die Versuchsperson den Pegel des Testtones mit einem Potentiometer hoher Auflösung ein. Sie bestimmt selbst die Einstellgeschwindigkeit und erreicht schließlich eine Angleichung.

Beim GRENZVERFAHREN wird der Pegel des Testtones kontinuierlich verändert, während die Versuchsperson nur die Richtung der Veränderung vorgibt; durch Drücken bzw. Loslassen eines Tasters läßt sie die Lautstärke an- bzw. abschwellen.

Der Testton wird in allen Betriebsarten und für alle Frequenzen 15 s lang angeboten, ehe eine automatische Aufzeichnung für einen Zeitraum von 30 s einsetzt.

Abb. 8 zeigt ein im GRENZVERFAHREN mit gepulstem Betrieb aufgenommenes Audiogramm zur Bestimmung der Hörschwelle.

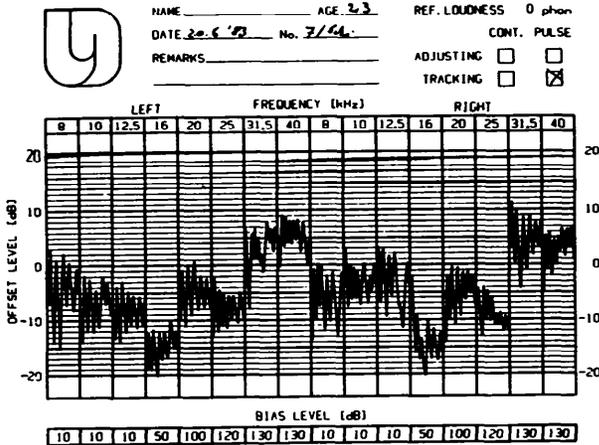


Abb. 8 Audiogramm einer Hörschwellenmessung

**5. Literatur**

/1/ J. Herbertz, K. Grünter: Untersuchungen zur hörkurvenmäßigen Bewertung von Ultraschall in Luft. Fortschritte der Akustik - DAGA'81, VDE-Verlag, Berlin 1981, S. 509-512

Diese Untersuchungen wurden vom Minister für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.