

SCHALLPEGEL IM GEHÖRGANG FÜR GLEICHLAUTE SCHALLE AUS KOPFHÖRERN ODER LAUTSPRECHERN

H. Fastl, W. Schmid, G. Theile*, E. Zwicker

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

1. Einführung

Die Hörempfindung Lautheit wird wesentlich vom Schallpegel bestimmt, obwohl auch die Bandbreite, die Frequenzlage und die Dauer von Schallen deren Lautheit beeinflussen. Alle genannten physikalischen Größen können aus der Schalldruckzeitfunktion gewonnen werden und daher werden üblicherweise die Schallsignale an den Trommelfellen als die wesentlichsten akustischen Eingangsgrößen betrachtet, die zu Hörempfindungen bei Versuchspersonen führen (z.B. Zwicker und Feldtkeller 1967, Blauert 1974). Einige Autoren (Jahn 1958, Robinson, Whittle und Bowsher 1961) postulieren sogar, daß die Lautheit von Schallen nur vom Schalldruck an den Ohren der Versuchsperson abhängt. Im Gegensatz dazu stellten Weingartner (1971) und Theile (1984) fest, daß trotz gleichem Schallpegel im Gehörgang, Töne aus Lautsprecher bzw. Kopfhörer unterschiedlich laut wahrgenommen werden können.

In dieser Arbeit werden neue Maßdaten in die kontroverse Diskussion eingebracht. Mit kleinen Elektretmikrofonen wurde der Schallpegel im Gehörgang von Versuchspersonen für den Fall gemessen, daß ihnen Schalle aus einem Lautsprecher bzw. aus Kopfhörern als *gleich laut* erschienen. Es wurden Einflüsse sowohl der Bandbreite der Schalle als auch der verwendeten Kopfhörertypen untersucht.

2. Messungen

Im Reflexionsarmen Raum wurde die Lautheit von Schallen, die über Lautsprecher bzw. über Doppelkopfhörer diotisch dargeboten wurden, verglichen. Im wesentlichen wurde die Versuchsanordnung so gewählt, wie dies in DIN 45619 für die Bestimmung des Freifeldübertragungsmaßes von Kopfhörern vorgeschrieben ist. Zusätzlich wurde mit kleinen Elektretmikrofonen (Knowles EA 1843) der Schallpegel im Gehörgang des rechten Ohres der Versuchsperson gemessen. Die Mikrofone wurden an einem knapp 2 cm langen Federstahldraht mit 0,3 mm Durchmesser befestigt, der seinerseits an einem "Ohrbügel" aus Federstahldraht (Durchmesser 1 mm) angebracht war. Der Ohrbügel wurde der "Furche" zwischen der Ohrmuschel und dem Schädel einer jeden Versuchsperson *individuell* angepaßt. Dadurch ergab sich ein sehr gut reproduzierbarer Maßort des Elektretmikrofons sowie eine relativ geringe Störung des Schallfeldes im Gehörgang. Sämtliche Lautheitsvergleiche wurden bei Schallpegeln um 70 dB von acht normalhörenden Versuchspersonen durchgeführt, die jeweils in 3,5 m Entfernung vom Lautsprecher saßen. Für die Messungen wurden zwei extrem unterschiedliche Kopfhörertypen verwendet: Zum einen ein geschlossener elektrodynamischer Hörer, zum anderen ein elektrostatischer Hörer, der wie ein Helm getragen wird, nicht auf den Ohren aufliegt und dadurch optimal "offen" ist. Während das Freifeldübertragungsmaß des elektrostatischen Hörers nur wenig von der Frequenz abhängt, zeigt das Freifeldübertragungsmaß des elektrodynamischen Hörers eine ausgeprägte Bandpaßcharakteristik (Fastl und Fleischer 1978). Deshalb wurde für die Darbietung breitbandiger Schalle diesem Hörer ein Freifeldentzerrer nach Zwicker und Feldtkeller (1967, S. 40) vorgeschaltet.

* Institut für Rundfunktechnik München

3. Ergebnisse

In der ersten Meßreihe wurden den Versuchspersonen Sinustöne als Testschalle dargeboten. Der Schallpegel im Gehörgang der Versuchspersonen wurde bei *gleicher* Lautheit der Töne sowohl bei Lautsprecherdarbietung (LGLS) als auch bei Kopfhörer-darbietung (LGKH) gemessen. Folgende Pegeldifferenz wird definiert:

$$\Delta L = L_{GKH} - L_{GSL}$$

Für positives ΔL bedeutet dies, daß für *gleiche* Lautheit des Sinustones der Kopfhörer einen *größeren* Schalldruck im Gehörgang erzeugen muß als der Lautsprecher. In Fig. 1 sind die Pegeldifferenzen ΔL als Funktion der Testtonfrequenz f_T dargestellt. Ausgefüllte Kreise repräsentieren Werte für den geschlossenen elektrodynamischen Kopfhörer, Quadrate Daten für den offenen elektrostatischen Hörer. Für beide Hörertypen zeigt sich ein recht ähnliches Verhalten: Bei tiefen und mittleren Frequenzen ($f_T = 0,125 \dots 1,7$ kHz) sowie bei hohen Frequenzen ($f_T > 7$ kHz) ergibt sich eine positive Pegeldifferenz von etwa $\Delta L = 4$ dB, während bei Frequenzen um $f_T = 3$ kHz praktisch keine Pegeldifferenz auftritt. Für Sinustöne um 3 kHz ergeben sich bei gleicher Lautheit auch gleiche Schallpegel im Gehörgang. Bei tieferen und höheren Frequenzen muß der Kopfhörer im Gehörgang allerdings einen um 4 dB höheren Schallpegel erzeugen als der Lautsprecher, damit die Töne aus den unterschiedlichen Wandlern als gleich laut wahrgenommen werden. Dieses Ergebnis stützt die Angaben von Weingartner (1971) und Theile (1984).

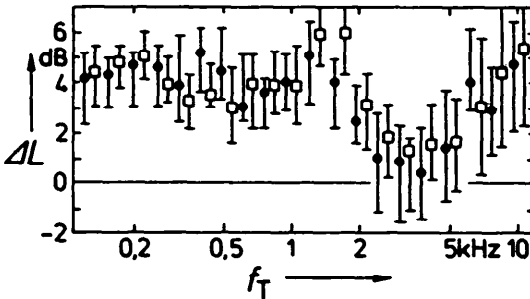


Fig. 1: Lautheitsvergleich von Sinustönen, die im Reflektionsarmen Raum aus Kopfhörern bzw. Lautsprechern dargeboten werden. Pegeldifferenz $\Delta L = L_{GKH} - L_{GSL}$ der bei gleicher Lautheit im Gehörgang gemessenen Schallpegel für Kopfhörerbeschallung (L_{GKH}) bzw. Lautsprecherbeschallung (L_{GSL}) als Funktion der Testtonfrequenz f_T . Zentralwerte mit wahrscheinlichen Schwankungen für acht Versuchspersonen. Ausgefüllte Kreise: Geschlossener, elektrodynamischer Hörer, Quadrate: Offener, elektrostatischer Hörer.

Es stellt sich nun die Frage, ob bei breitbandigen Schallen ebenfalls unterschiedliche Schallpegel im Gehörgang von Versuchspersonen auftreten, wenn diese Schalle bei Lautsprecher- bzw. Kopfhörer-darbietung von den Personen als gleich laut empfunden werden. Die Lautheitsvergleiche wurden mit einem geschlossenen elektrodynamischen Hörer mit Freifeldentzerrer durchgeführt. Fig. 2 zeigt die Pegeldifferenzen ΔL für verschiedene Versuchspersonen (A bis G). Ausgefüllte Kreise repräsentieren Daten für einen 1 kHz-Ton, Dreiecke gelten für Weißes Rauschen und Quadrate für Rosa Rauschen. Wie zu erwarten, ist für den 1 kHz-Ton die Pegeldifferenz bei *allen* Versuchspersonen positiv und beträgt im Mittel $\Delta L = 4,6$ dB. Für breitbandige Schalle ergeben sich sowohl positive als auch negative Werte von ΔL . Bei den Versuchspersonen B, F und G müssen breitbandige Schalle bei Kopfhörer-darbietung im Gehörgang einen *niedrigeren* Schallpegel erzeugen als bei Lautsprecher-

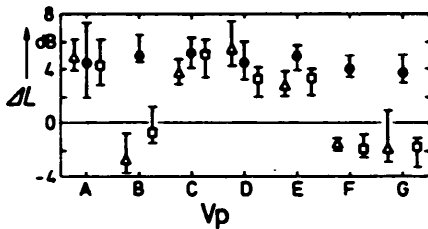


Fig. 2: Lautheitsvergleich von breitbandigen Schallen aus Kopfhörern bzw. Lautsprecher. Pegeldifferenz ΔL der Schallpegel im Gehörgang für gleich-laute Schalle bei den Versuchspersonen A bis G. Zentralwerte mit wahrscheinlichen Schwankungen aus je sechs Daten pro Versuchsperson und Reiz. Geschlossener, elektrodynamischer Hörer mit Freifeldentzerrer. Ausgefüllte Kreise: 1 kHz-Ton, Dreiecke: Weißes Rauschen, Quadrate: Rosa Rauschen.

darbietung, obwohl die Schalle aus den verschiedenen Wandlern den Personen als gleich laut erschienen. Dieses Ergebnis ist völlig unerwartet, da bei schmalbandigen Schallen auch für die Personen B, F und G positive Werte von ΔL auftreten (vgl. ausgefüllte Kreise in Fig. 2). Für die Personen A, C, D und E zeigen sich sowohl für schmalbandige als auch für breitbandige Schalle positive Werte von ΔL . Das entgegengesetzte Verhalten von Versuchspersonengruppen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen der Lautheit schmalbandiger bzw. breitbandiger Schalle und dem Schallpegel im Gehörgang bedarf der weiteren Klärung.

Da für breitbandige Schalle zum Teil entgegengesetzte Pegeldifferenzen im Vergleich zu schmalbandigen Schallen auftreten (Fig. 2), wurde überprüft, ob auch für breitbandige Schalle die Pegeldifferenz

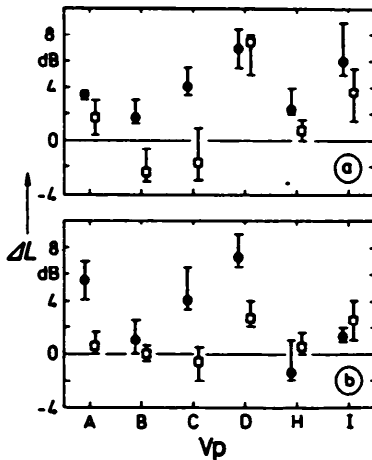


Fig. 3: Lautheitsvergleich für Sprache (a) und sprachsimulierendes Rauschen (b) aus Kopfhörern bzw. Lautsprecher. Daten wie Fig. 2, jedoch verschiedene Hörertypen. Ausgefüllte Kreise: Geschlossener, elektrodynamischer Hörer mit Freifeldentzerrer, Quadrate: Elektrostatischer Hörer.

nahezu unabhängig ist, wie dies für schmalbandige Schalle (Fig. 1) gemessen wurde. Als praxisrelevante Schalle wurden sprachsimulierendes Rauschen (CCITT Rec G 227) und fließende Sprache gewählt (englischer Rundfunksprecher: "The realism of this group of figures, depicting Christ's burial, suggests the stylistic influence of the Parlers"). Die Schalle wurden einerseits über Lautsprecher, andererseits sowohl über den geschlossenen, dynamischen Kopfhörer mit Freifeldentzerrer, als auch über den offenen elektrostatischen Hörer dargeboten. Fig. 3 zeigt für verschiedene Versuchspersonen die Pegeldifferenzen ΔL . In Fig. 3a sind die Daten für fließende Sprache, in Fig. 3b die Daten für sprachsimulierendes Rauschen dargestellt. Ausgefüllte Kreise repräsentieren Werte für den elektrodynamischen Hörer, Quadrate Werte für den elektrostatischen Hörer. Es ergeben sich sowohl positive als auch einige negative Werte von ΔL . Bei sprachsimulierendem Rauschen (Fig. 3b) hängt ΔL für die Versuchspersonen A, C und D deutlich vom verwendeten Kopfhörer ab, für fließende Sprache (Fig. 3a) zeigt nur die Versuchsperson D für beide Kopfhörertypen etwa gleiches Verhalten. Dies bedeutet, daß bei natürlichen Schallen wie Sprache je nach verwendetem Kopfhörertyp, für ein und die-

selbe Versuchsperson positive oder negative Werte von AL auftreten können. Bei den Personen B und C muß ein geschlossener, elektrodynamischer Kopfhörer im Gehörgang einen *größeren*, ein offener elektrostatischer Hörer aber einen *geringeren* Schallpegel erzeugen als ein Lautsprecher, damit Sprache aus den unterschiedlichen Wandlern als *gleich* laut wahrgenommen wird. Bei den anderen Personen (A, D, H und I) muß der Kopfhörer für gleiche Lautheit immer einen größeren Schallpegel im Gehörgang erzeugen als der Lautsprecher.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Bei Beschallung von Versuchspersonen im Reflexionsarmen Raum durch Lautsprecher bzw. Kopfhörer erzeugen Sinustöne in der Oktave um 3 kHz für gleichen Schallpegel im Gehörgang auch nahezu die gleiche Lautheitsempfindung. Bei tieferen und höheren Sinustönen muß der Kopfhörer einen um 4 dB größeren Schallpegel im Gehörgang erzeugen als der Lautsprecher, damit die Töne aus den verschiedenen Wandlern als gleich laut empfunden werden. Dies gilt sowohl für einen geschlossenen elektrodynamischen Kopfhörer als auch für einen offenen elektrostatischen Hörer. Bei breitbandigen Schallen können für gleichen Lautheitseindruck je nach Versuchsperson sowohl positive als auch negative Pegeldifferenzen des Schalldrucks im Gehörgang auftreten. Bei fließender Sprache hängen die Größe und das Vorzeichen der Pegeldifferenz auch noch von der Art des verwendeten Kopfhörertyps ab.

Während sich für Sinustöne recht einheitliche Ergebnisse ergeben, die im Einklang mit Daten von Weingartner (1971) und Theile (1984) stehen, zeigen sich für praxisrelevante Schalle wie fließende Sprache deutliche Einflüsse des Kopfhörertyps sowie der individuellen Versuchsperson. Besonders störend ist dabei, daß sich aus den Daten der Messung mit Sinustönen die Ergebnisse für breitbandige, praxisrelevante Schalle *nicht* vorhersagen lassen. Hier sind weitere, umfangreiche Messreihen erforderlich, um eine Klärung der anstehenden Fragen herbeizuführen und Mittelwerte über eine größere Anzahl von Versuchspersonen zu erarbeiten. Wir hoffen jedoch, durch diese Arbeit den Anstoß dazu geben zu können, daß sich möglichst viele Labors im Rahmen eines "Round Robin Tests" mit diesen Fragen beschäftigen.

Literatur

- Blauert, J.(1974). Räumliches Hören, Hirzel-Verlag Stuttgart.
- DIN 45619, Teil 1, Kopfhörer. Bestimmung des Freifeld-Übertragungsmaßes durch Lautstärkevergleich mit einer fortschreitenden Schallwelle.
- Fastl, H. und Fleischer, H.(1978). Freifeldübertragungsmaße verschiedener elektrodynamischer und elektrostatischer Kopfhörer, *Acustica* 39, 182-187.
- Jahn, G.(1958). Über die Beziehung zwischen der Lautstärke und dem Schalldruck am Trommelfell, Hochfrequenz und Elektroakustik 67, 69-72.
- Robinson, D.W., Whittle, L.S. and Bowsher, J.M.(1961). The loudness of diffuse sound fields, *Acustica* 11, 397-404.
- Theile, G.(1984). Sind "Klangfarbe" und "Lautstärke" vollständig determiniert durch das Schalldruckpegel-Spektrum am Trommelfell ? *DAGA'84*, 747-752.
- Weingartner, B.(1971). Neuere Vergleichsmessungen an Kopfhörern, AES Köln.
- Zwicker, E. und Feldtkeller, R.(1967). Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. erw. Auflage, Hirzel-Verlag, Stuttgart.