

"Alte" und neue Daten zur binauralen Lautheit

T. ZWICKER und E. ZWICKER

(Institut für Elektroakustik, TU-München)

Einleitung

Die subjektive Empfindung der Lautheit und der Lästigkeit entsteht aus Schallanteilen, die uns von beiden Ohren zugeführt werden. Oft können diese Anteile wegen geringer Unterschiede als praktisch gleich angesehen werden, was einer diotischen Darbietung entspricht. Viele Meßdaten zur Lautstärkeempfindung wurden unter diotischen Bedingungen gewonnen und sind in die Entwicklung von Lautheitsmessern eingegangen. Im Allgemeinen muß jedoch damit gerechnet werden, daß sowohl die Phasenlage als auch der Pegel des den beiden Ohren zugeführten Schalls unterschiedlich sind. Man spricht dann von dichotischen Verhältnissen. Auch dafür sind aus der Literatur⁽¹⁾ subjektive Lautstärkemessungen bekannt, die darauf hinweisen, daß das Gehör eine partielle Summation der auf jedem Ohr entstehenden Lautheiten zur Gesamtlautheit durchführt. Da sowohl bei der Messung des A-bewerteten Schallpegels als auch bei der objektiven Lautheitsmessung nur mit einem Mikrofon gemessen wird, entsteht die Frage, wie groß in praktischen Fällen Abweichungen sein können, die daraus entstehen, daß nicht diotische, sondern dichotische Schalle die Lautstärkeempfindungen bzw. die Lästigkeit hervorrufen.

Daten aus der Literatur

Schon vor 30 Jahren wurden von Reynolds und Stevens Messungen zur binauralen Addition der Lautheit durchgeführt. Algom et al., Marks, Scharf sowie Scharf und Fishken verwendeten vor allem Versuchsbedingungen, die auf beiden Ohren gleiche Pegel hervorriefen. Ausführliche Literaturangaben finden sich bei Algom et al.⁽¹⁾ Lediglich Irwin⁽²⁾ beschäftigte sich mit der binauralen Summation von Breitbandrauschen auch unter der Bedingung ungleicher Pegel.

Im ganzen können die Literaturdaten wie folgt zusammengefasst werden: Alle Autoren geben eine deutliche Vergrößerung der Lautheit bei diotischer Darbietung im Vergleich zur monauralen Lautheit an. Diese Lautheitssummation wird bei gleichem Pegel in beiden Ohren mit Werten unter, zum Teil aber auch recht exakt mit dem Faktor 2 (d.h. vollständige binaurale Summation) angegeben.

Eine binaurale Lautheitsaddition wurde auch für Töne unterschiedlicher interauraler Phase gefunden⁽³⁾. Irwin⁽²⁾ liefert (für breitbandiges Weisses Rauschen) Daten auch für den Fall, daß einem Ohr weniger Schallpegel zugeführt wird als dem anderen, d.h. hier wird dem Fall Rechnung getragen, daß der Kopf eine Schallabschattung von einem Ohr zum anderen verursacht. In nachfolgend beschriebener Untersuchung wurden zusätzliche Messungen mit schmalbandigen und auch mit verschieden gefärbtem, breitbandigem Rauschen durchgeführt.

Eigene Messungen

Die eigenen Messungen wurden mit der Methode der Größenschätzung durchgeführt unter Benutzung zweier Anker (monaurale und diotische Schalldarbietung). Innerhalb eines Versuchsdurchgangs wurde die Pegeldifferenz zwischen linkem und rechtem Ohr variiert; die jedem Ohr dargebotenen Schalle hatten die gleiche spektrale Zusammensetzung und Phasenlage. Die interauralen Pegeldifferenzen betragen 0, 4, 10, 20 und ∞ dB. Dabei entspricht 0 dB Pegeldifferenz der diotischen Darbietung, ∞ dB der monauralen Darbietung. Die Schallpaare (je 500 ms Dauer, 100 ms Pause) wurden zweimal wiederholt und waren durch je 1 s Pause getrennt. In der nach den Wiederholungen folgenden Pause von 3 s trug die Versuchsperson ihren Schätzwert in ein Formular ein gemäß der Fragestellung: "Beurteilen Sie die Lautheit des jeweils zweiten Schalls im Vergleich zum ersten. Die Lautheit des ersten Schalls entspricht dem Wert 100." Während einer Meßreihe wurde jede der fünf Darbietungen mit beiden Ankern achtmal in statistischer Reihenfolge wiederholt. Folgende Parameter wurden unter Verwendung des freifeldentzerrten Kopfhörers Beyer DT 48⁽⁶⁾ untersucht: Als schmalbandige Schalle mit Pegeln von 70 dB fanden terzbreite Rauschen bei 250, 710 und 2000 Hz Mittenfrequenz Verwendung. Für 710 Hz Mittenfrequenz kamen ausserdem Pegel von 50 und 90 dB zur Anwendung. Als breitbandige Schalle dienten ein Rotes Rauschen mit einem Abfall von ca. 30 dB pro Frequenzdekade, ein Rosa Rauschen mit 10 dB Abfall sowie ein Blaues Rauschen mit einem Anstieg von 10 dB pro Dekade. Die zugehörigen Schalldruckpegel betragen 65, 60 bzw. 62 dB.

Die Untersuchungen sollen von zwölf Versuchspersonen durchgeführt werden. Bis jetzt liegen die Daten von sechs normalhörenden Versuchspersonen (im Alter zwischen 21 und 35 Jahren) vor, es handelt sich hier also um vorläufige Ergebnisse, die jedoch als repräsentativ angesehen werden können. Endgültige Daten werden demnächst veröffentlicht⁽⁴⁾

Fig. 1 zeigt für Terzrauschen bei 710 Hz Mittenfrequenz die Abhängigkeit der geschätzten Lautheit von der interauralen Pegeldifferenz ΔL (aus jeweils 48 Größenschätzungen gebildete Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen).

Die mit den offenen Symbolen dargestellten Daten verdeutlichen, daß bei einer interauralen Pegeldifferenz $\Delta L=0$ dB, was einer diotischen Darbietung entspricht, ein Lautheitszuwachs gegenüber der monauralen Darbietung von ca. 50% entsteht. Demnach ist die Lautheitsaddition zwischen den beiden Ohren nicht vollständig, sondern geringer. Die Werte liegen bei einem ΔL von 4 dB noch fast gleich hoch wie bei 0 dB, bei 10 dB nehmen sie deutlich ab. Für 20 dB Pegeldifferenz wird nur noch eine geringe Lautheitserhöhung von ca. 10% über den Bezugswert 100 gefunden. Bei $\Delta L=\infty$ wird zweimal ein identischer Schall dargeboten und auch entsprechend der Ankervorgabe mit dem Wert 100 geschätzt.

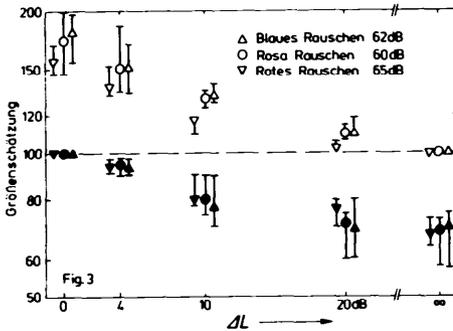
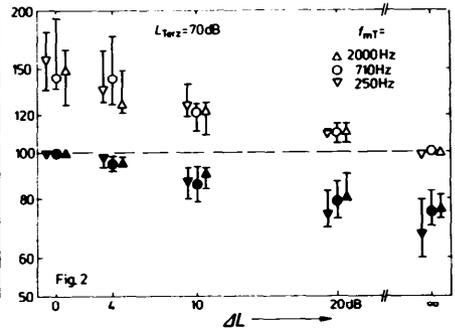
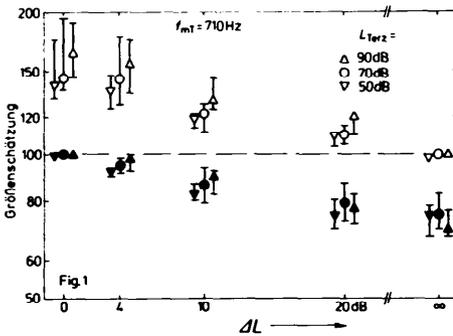


Fig. 1: Zentralwerte und Wahrsch. Schwankungen der Größenschätzung (Anker=100, monaural: offene Symbole, diotisch: geschloss. Symbole) in Abhängigkeit von der binauralen Pegeldifferenz ΔL . Testschall: Terzrauschen bei 710 Hz Mittenfrequenz und angegebennem Pegel.

Fig. 2 und Fig. 3: Wie Fig. 1, jedoch für die angegebenen Mittenfrequenzen bzw. Breitbandrauschen

Die Meßwerte für den diotischen Ankerschall (geschloss. Symbole) beginnen bei 100, weil hier für 0 dB Pegeldifferenz Anker und Testschall identisch sind. Mit wachsender Pegeldifferenz von 4 und 10 dB beginnen die Angaben der Versuchspersonen unter 100 zu sinken. Sie führen bei $\Delta L=20$ dB und noch deutlicher bei rein monauralem Testschall ($\Delta L=\infty$) etwa zur Schätzung 70. Dies entspricht (in umgekehrter Richtung) dem Wert, der bei monauralem Anker für $\Delta L=0$ dB gemessen wurde. Die Zentralwerte für die benutzten Pegelwerte 50, 70 und 90 dB [entsprechend Lautheiten von 2, 8 und 32 sone] liegen dicht beieinander, die Wahrscheinlichen Schwankungen überlappen sich deutlich. Eine Abhängigkeit vom Pegel konnte also nicht festgestellt werden.

In Fig. 2 sind die Meßergebnisse bei den Mittenfrequenzen von 250 bzw. 2000 Hz zum Vergleich mit den Werten bei 710 Hz zusammengefasst. Im Frequenzbereich zwischen 250 und 2000 Hz, in dem die wesentlichen im Alltag störenden Schalle liegen, tritt keine Frequenzabhängigkeit auf.

Fig. 3 zeigt die Ergebnisse für breitbandiges Rotes Rauschen (-30 dB/Dek.), Rosa Rauschen (-10 dB/Dek.) und Blaues Rauschen (+10 dB/Dek.). Die zugehörigen Pegel betragen 65, 60 bzw. 62 dB. Im Vergleich mit Fig. 1 und Fig. 2 ist der Effekt der beidohrigen Lautheitssummutation etwas ausgeprägter als bei schmalbandigen Schallen. Diese Tendenzen stimmen mit den Angaben von Irwin⁽²⁾ weitgehend überein.

Diskussion

Die objektive Lautheitsmessung wird mit nur einem Mikrofon durchgeführt, basiert also auf einem Mittelwert des Schallpegels, der im Bereich des Kopfes und der beiden Ohren vorkommen würde. Das Lautheitsberechnungsverfahren ist auf dem diotischen Darbietungsfall aufgebaut, bei dem der gleiche Schall linkem und rechtem Ohr dargeboten wird. Die infolge der Abschattung am Kopf auftretenden Pegeldifferenzen sind im Bereich bis zu 2 kHz nicht größer als 8 dB. Für solche Pegeldifferenzen treten maximal Abweichungen der binauralen Lautheit von 20% (bezogen auf die Lautheit im diotischen Fall) auf. Erst bei noch höheren Frequenzen, bei denen Abschattungseffekte bis zu 20 dB auftreten, kann es zu einer Reduzierung der Lautheit gegenüber dem diotischen Fall um bis zu ca. 50% kommen. Allerdings findet infolge des Druckstaus eine Schallpegelerhöhung an dem der Schallquelle zugewandten Ohr statt, wodurch die Lautheitsreduktion in guter Näherung wieder kompensiert wird! Werden die vorliegenden, vorläufigen Daten in ihrer Tendenz weiter bestätigt, so läßt sich schließen, daß die durch den Kopf hervorgerufenen Schallfeldverzerrungen zu Lautheitsempfindungen führen, die in praktischen Fälle mit dem Lautheitsmesser mit guter Genauigkeit angezeigt werden. Selbst bei hohen Frequenzen kann also auf den Einsatz eines Kunstkopfes mit entsprechender zweikanaliger Auswertung verzichtet werden.

Wir danken Herrn Dr.-Ing. habil. Hugo Fastl für wertvolle Diskussionsbeiträge und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung dieser Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 204 "Gehör", München.

-
- [1] D. Algom, B. Ben-Aharon & L. Cohen-Raz, *Perception & Psychophysics*, Vol. 46, No. 6 (1989) p. 567, *Dichotic, Diotic and Monaural Summation of Loudness: A Comprehensive Analysis of Composition and Psychophysical Functions*
 - [2] R. J. Irwin, *Amer. Journ. Psychol.*, Vol. 78 (1965) p.57, *Binaural Summation of Thermal Noises of Equal and Unequal Power in each Ear*
 - [3] E. Zwicker & G. B. Henning, *Hearing Research* (1990), in press, *On the Effect of Interaural Phase Differences on Loudness*
 - [4] E. Zwicker & U. T. Zwicker, *J. Acoust. Soc. Amer.* (1990), submitted, *Dependency of Binaural Loudness Summation on Interaural Level Differences, Spectral Distribution and Temporal Distribution*
 - [5] E. Zwicker & R. Feldtkeller, *Hirzel Verlag, Stuttgart* (1967), p.40, *Das Ohr als Nachrichtenempfänger (2. erw. Auflage)*