

Zur Beurteilung der Lautheit anhand von Reaktionszeitmessungen

Hugo Fastl¹, Stefan Kerber², Daniel Menzel, Wolfgang Staudacher

¹ AG Technische Akustik, MMK, TU München, 80333 München, E-Mail: fastl@mmk.ei.tum.de

² nun bei: Müller-BBM Active Sound Technology GmbH., 82152 Planegg, E-Mail: Stefan.Kerber@mabbm.com

Einleitung

Die Lautheit von Schallen wird meistens durch psychoakustische Meßmethoden wie Lautheitsvergleich oder Größenschätzung erfasst. Allerdings wurde bereits in den 1940er Jahren von Chocholle vorgeschlagen, die Reaktionszeit als ein Maß für die Lautheit einzusetzen (Chocholle 1940, 1944 [3,4]). Inzwischen liegen zahlreiche Untersuchungsergebnisse zu dieser Meßmethode vor (z.B. Humes und Ahlstrom 1984 [8], Leibold und Werner 2002 [10], Schlittenlacher 2015 [12]), die durchwegs den folgenden Ansatz postulieren: Mit zunehmender Lautheit nimmt die Reaktionszeit ab und kann als (alternatives) direktes Maß für die Lautheitsbeurteilung verwendet werden.

Im vorliegenden Beitrag wird die Tragweite dieses Ansatzes beispielhaft für zwei speziellere Anwendungsfälle überprüft: (1) Kann auch die gedrosselte Lautheit (Zwicker 1963 [13]) mittels der Reaktionszeit erfasst werden? (2) Lassen sich audio-visuelle Interaktionen (z.B. Schall plus rot lauter als derselbe Schall plus grün) anhand der Reaktionszeit beschreiben?

Legt man im ersten Anwendungsfall die Ergebnisse aus Lautheitsvergleichen zugrunde, so sollte mit steigendem Pegel des Testtones seine Drosselung geringer werden und damit seine Lautheit ansteigen. Dies sollte sich in kürzeren Reaktionszeiten widerspiegeln.

Bei den audio-visuellen Interaktionen (z.B. Fastl 2004 [6], Menzel 2011 [11]) sollte die größere Lautheit für „Schall plus rot“ zu einer kürzeren Reaktionszeit führen.

Experimente

Versuchspersonen

An den Experimenten nahmen 19 normalhörende Versuchspersonen (4 weiblich, 15 männlich) im Alter von 23 bis 39 Jahren (Median 24 Jahre) teil.

Schalldarbietung

Die Testschalle wurden in einer schallgedämmten Messkabine diotisch über elektrodynamische Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Fastl und Zwicker (2007 [7], S. 7) dargeboten. Sämtliche Schalle wurden in unterschiedlicher Reihenfolge jeder Versuchsperson jeweils viermal präsentiert; dementsprechend basieren die als Mediane mit Interquartilen dargestellten Ergebnisse auf jeweils 76 Meßwerten.

Reaktionszeitmessung

Die Versuchspersonen hatten während der Experimente einen Druckknopf in der Hand. Sie sollten diesen sobald sie einen Ton hören so schnell wie möglich betätigen. Der

Druckknopf war direkt mit einem USB-Device (Kerber 2008 [9]) verbunden, das mit dem Ertönen des Testtons einen Timer startete. Wenn die Versuchsperson den Druckknopf betätigte, wurde die Zeitmessung wieder gestoppt. Der dadurch ermittelte Zeitwert wurde via USB an einen Rechner weitergeleitet und dort abgespeichert.

Gedrosselte Lautheit

Die Untersuchungen zur gedrosselten Lautheit wurden in Anlehnung an Experimente von Deuter (1988) [5] durchgeführt. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abb.1 illustriert.

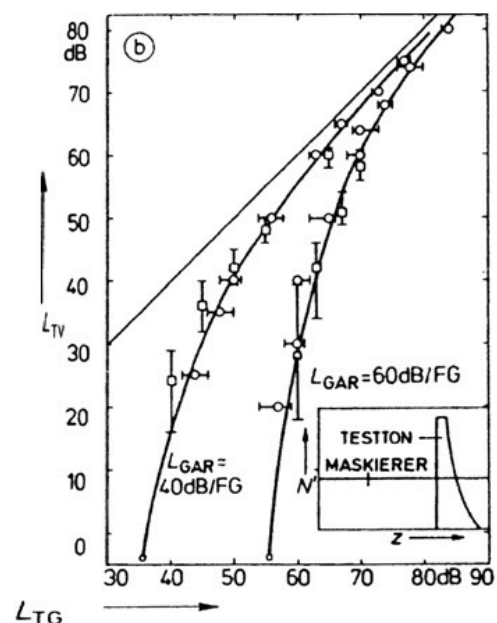


Abbildung 1: Drosselung der Lautheit von 4 kHz-Tönen durch Gleichmäßig Anregendes Rauschen (GAR) mit 40 dB bzw. 60 dB je Frequenzgruppe, bestimmt mit der Methode des Lautheitsvergleichs. Pegel des Vergleichstons L_{TV} als Funktion des Pegels des gedrosselten Tons L_{TG} . Schematische Darstellung der Lautheits-Tonheits-Muster von Maskierer und Testton (nach Deuter 1988 [5]).

In Tabelle 1 sind sowohl die Pegel der gedrosselten Töne als auch der Vergleichstöne aufgelistet.

Um beispielsweise gleich laut wie ein 4 kHz-Ton mit 20 dB zu erscheinen, muss ein gedrosselter 4 kHz-Ton 41 dB für $L_{GAR} = 40 \text{ dB/FG}$ bzw. 58 dB für $L_{GAR} = 60 \text{ dB/FG}$ aufweisen. Die Drosselung durch GAR „verschlingt“ demnach immerhin 21 dB bzw. 38 dB. Für 4 kHz-Töne von 60 dB beträgt der Effekt der Drosselung jedoch nur mehr 4 dB bzw. 10 dB.

Für 4 kHz-Töne mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Pegeln wurden Reaktionszeiten sowohl ohne Drosselung (kein

GAR) als auch bei Drosselung durch GAR mit Pegeln von 40 dB/FG bzw. 60 dB/FG gemessen.

für 20 dB Pegel 253 ms und für 60 dB Pegel 209 ms. Ein Pegelanstieg von 40 dB bewirkte demnach eine Reduktion der Reaktionszeit um 44 ms.

Diese Werte decken sich gut mit aus der Literatur bekannten Ergebnissen zu Reaktionszeiten auf Sinustöne, siehe z.B. Arieh und Marks (2003) [1].

Die gedrosselten Lautheiten der 4 kHz-Töne zeigten nur eine geringe Abnahme der Reaktionszeit mit steigendem äquivalentem Pegel. Für $L_{GAR} = 40$ dB/FG nahm für eine Zunahme des äquivalenten Pegels von 20 dB auf 60 dB die Reaktionszeit lediglich um etwa 13 ms ab, bei $L_{GAR} = 60$ dB/FG ergaben sich knapp 15 ms. Dies bedeutet, dass die Reduktion der Reaktionszeit bei ungedrosselten 4 kHz-Tönen etwa um den Faktor drei größer war als bei gedrosselten Tönen.

Da die in Abbildung 2 dargestellten Daten große Streuungen aufweisen, wurde ein Signifikanztest nach Wilcoxon (Bortz 1993 [2]) durchgeführt, dessen Ergebnisse in Tabelle 2 aufgelistet sind.

Pegel L_{TV} der als gleich laut empfundenen Vergleichstöne („äquivalenter Pegel“)	Pegel L_{TG} der durch Rauschen mit $L_{GAR}=40$ dB/FG gedrosselten Töne	Pegel L_{TG} der durch Rauschen mit $L_{GAR}=60$ dB/FG gedrosselten Töne
20 dB	41 dB	58 dB
30 dB	45 dB	60.5 dB
40 dB	49.5 dB	63 dB
50 dB	56 dB	65 dB
60 dB	64 dB	70 dB

Tabelle 1: Pegel L_{TV} von 4 kHz-Tönen, die als gleich laut wahrgenommen werden wie 4 kHz-Töne mit Pegeln L_{TG} bei Drosselung durch Gleichmäßig Anregendes Rauschen mit 40 dB bzw. 60 dB je Frequenzgruppe

Audio-visuelle Interaktionen

Bei den Experimenten zu audio-visuellen Interaktionen wurden den Versuchspersonen zusätzlich zu 700 ms langen 4 kHz-Tönen über eine Videobrille (Sony Glasstron PLM-S700E) rote, grüne und schwarze Farbflächen dargeboten.

Ergebnisse

Gedrosselte Lautheit

Abbildung 2 zeigt die Reaktionszeiten auf 700 ms lange 4 kHz-Töne als Funktion der äquivalenten Pegel.

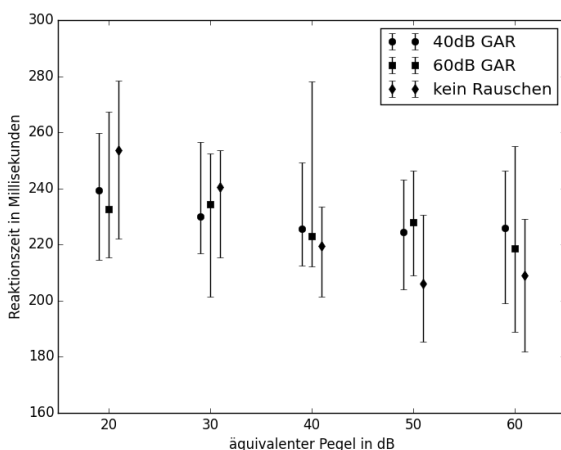


Abbildung 2: Reaktionszeit auf 700 ms lange 4 kHz-Töne als Funktion von deren (äquivalenten) Pegeln. Dargestellt sind Mediane und Interquartilbereiche der mediangemittelten Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen. Rauten: ohne GAR, Kreise: $L_{GAR} = 40$ dB/FG, Quadrate: $L_{GAR} = 60$ dB/FG.

Die in Abb. 2 als Rauten dargestellten Daten zeigen, dass - wie erwartet - die Reaktionszeit auf 4 kHz-Töne mit deren Pegel abnahm. Im Mittel (Median) betrug die Reaktionszeit

Versuchsreihe	kein Rauschen	40dB/FG Rauschen	60dB/FG Rauschen
20dB & 30dB	0,1286	0,985	0,8271
20dB & 40dB	0,0012	0,2343	0,7809
20dB & 50dB	1.66e-005	0,1964	0,2303
20dB & 60dB	5.35e-008	0,0406	0,0313
30dB & 40dB	0,036	0,2244	0,9565
30dB & 50dB	0,0011	0,1441	0,4216
30dB & 60dB	1,45e-02	0,0325	0,0468
40dB & 50dB	0,133	0,8178	0,4345
40dB & 60dB	0,0139	0,4559	0,0416
50dB & 60dB	0,3752	0,5101	0,1711

Tabelle 2: Wilcoxon Signifikanztest zur Abhängigkeit der Reaktionszeit vom äquivalenten Pegel im Versuch zur gedrosselten Lautheit.

Für die ungedrosselten 4 kHz-Töne zeigten sich gemäß Tabelle 2 meist hochsignifikante Ergebnisse während bei den gedrosselten Tönen nur manchmal ein 5% Signifikanz-Niveau, jedoch niemals ein 1% Niveau erreicht wurde.

Dieses Ergebnis kann so gedeutet werden, dass es für die Versuchspersonen extrem schwierig ist, nur auf den 4 kHz-Ton zu reagieren und das Gleichmäßig Anregende Rauschen zu ignorieren. Vermutlich reagiert die Versuchsperson spontan auf die Lautheit des Gesamtgeräusches aus 4 kHz-Ton plus GAR. Demnach erscheinen Reaktionszeitmessungen zur Erfassung der gedrosselten Lautheit wenig geeignet, obwohl sie sich für die Beschreibung der (ungedrosselten) Lautheit bewährt haben.

Audio-visuelle Interaktionen

Abbildung 3 zeigt die Reaktionszeiten auf 700 ms lange 4 kHz-Töne als Funktion von deren Pegeln, wenn gleichzeitig

Farbflächen in grün, rot oder schwarz mittels Videobrille dargeboten wurden.

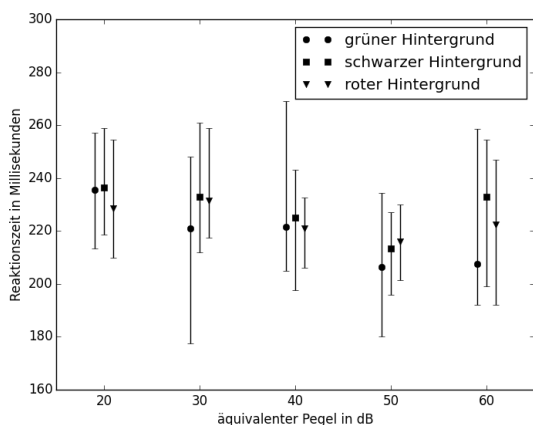


Abbildung 3: Reaktionszeit auf 700 ms lange 4 kHz-Töne als Funktion von deren Pegeln, wenn gleichzeitig folgende Farbflächen dargeboten werden: Kreise grün, Quadrate schwarz, Dreiecke rot. Dargestellt sind Mediane und Interquartilbereiche der mediangemittelten Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen.

Die in Abb.3 dargestellten Daten zeigen keine so systematische Pegelabhängigkeit wie die Daten in Abb. 2. für die ungedrosselten 4 kHz-Töne. Lediglich für die Farbfläche grün (Kreise) nahm die Reaktionszeit mit steigendem Pegel der 4 kHz-Töne merklich ab, nämlich von 236 ms für 20 dB auf 208 ms für 60 dB, also um 28 ms. Bei roter Farbfläche (Dreiecke) betrug der Pegel einfluss nur 9 ms (229ms -> 223ms), bei schwarzer Farbfläche (Quadrate) nur 4 ms (237ms -> 233ms). Die zusätzliche Darbietung von Farbflächen verringerte demnach die Reduktion der Reaktionszeit auf 4 kHz-Töne als Funktion des Pegels.

Wie eingangs erwähnt, sollte die in Lautheitsvergleichen gezeigte größere Lautheit für „Schall plus rot“ zu einer kürzeren Reaktionszeit als für „Schall plus grün“ führen. Dies bedeutet, dass in Abb. 3 die Dreiecke jeweils unterhalb der Kreise liegen sollten. Das ist nur bei 20 dB der Fall; bei allen anderen Pegeln ist es genau umgekehrt. Allerdings dürfen bei diesen Betrachtungen die großen Interquartile in Abb. 3 nicht außer Acht gelassen werden. Deshalb zeigt Tabelle 3 die Ergebnisse eines zugehörigen Signifikanztests nach Wilcoxon.

Äquivalente Pegel	20dB	30dB	40dB	50dB	60dB
Grün & Rot	0.7366	0.0241	0.4922	0.5853	0.1827
Grün & Schwarz	0.1642	0.0617	0.5165	0.0830	0.7212
Rot & Schwarz	0.0701	0.5864	0.9305	0.0701	0.4379

Tabelle 3: Wilcoxon Signifikanztest zur Abhängigkeit der Reaktionszeit vom äquivalenten Pegel im Versuch zu den audio-visuellen Interaktionen.

Die in Tabelle 3 aufgelisteten Ergebnisse zeigen, dass die durch verschiedene Farbflächen hervorgerufenen Einflüsse auf die Reaktionszeit nur einmal bei 30 dB für grün versus rot ein Signifikanzniveau von 5% erreichten. Allerdings liegt in Abb. 3 bei 30 dB der Kreis (grün) unterhalb des Dreiecks (rot). Entgegen der Erwartung wurden demnach 4 kHz-Töne mit 30 dB plus grüner Farbfläche etwas lauter wahrgenommen als Töne plus roter Farbfläche.

Insgesamt zeigen die hier beschriebenen Ergebnisse, dass die zusätzliche Darbietung von Farbflächen möglicherweise die Reaktionszeit auf 4 kHz-Töne beeinflussen kann. Allerdings sollten angesichts der großen Streuungen keine zu weitreichenden Schlüsse gezogen werden. Die auch in der Literatur gut dokumentierte Abhängigkeit „höherer Pegel führt zu kürzerer Reaktionszeit“ ist offenbar bei audio-visuellen Interaktionen kaum anwendbar.

Fazit

Die Beurteilung der Lautheit anhand von Messungen der Reaktionszeit hat sich als alternative Methode zu Vergleichsmessungen oder Größenschätzungen etabliert (vgl. Schlittenlacher 2015 [12]). Allerdings scheinen Reaktionszeitmessungen für „Spezialfälle“ von Lautheitsbeurteilungen wie gedrosselte Lautheit oder audio-visuelle Interaktionen weniger geeignet.

Literatur

[1] Arieh, Y., Marks, L. E.: Recalibrating the Auditory System: A Speed-Accuracy Analysis of Intensity Perception. *J. Exp. Psychol. Human* 29 (2003), 523-536

[2] Bortz, J.: Statistik für Sozialwissenschaftler, 4. Auflage. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993

[3] Chocholle, R.: Variation des temps de réaction auditifs en fonction de l'intensité à diverses fréquences (Auditory reaction time as a function of intensity at various frequencies). *L'année psychologique* 41-42 (1940), 65-124. doi: 10.3406/psy.1940.5877

[4] Chocholle, R.: Etude de la psychophysiologie de l'audition par la méthode des temps de réaction (Studies about the psychophysiology of hearing by the method of reaction times). *L'année psychologique* 45 (1944), 90-131. doi: 10.3406/psy.1944.8157

[5] Deuter, K.: Gedrosselte Lautheit bei tiefen, mittleren und hohen Frequenzen. *Fortschritte der Akustik DAGA '88* (1988), 577- 580

[6] Fastl, H.: Audio-visual interactions in loudness evaluation. *Proc. Int. Congress on Acoustics ICA* (2004), 18

[7] Fastl, H.; Zwicker, E.: *Psychoacoustics, Facts and Models*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (3. Aufl.), 2007

[8] Humes, L., Ahlstrom J.: Relation between Reaction Time and Loudness. *Journal of Speech and Hearing Research* 27 (1984), 306-310

[9] Kerber, S.: Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußen-geräuschen in Hintergrundgeräuschen: Psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen. Verlag Dr. Hut, München, 2008

[10] Leibold, L., Werner L.: Relationship between Intensity and Reaction Time in Normal-Hearing Infants and Adults. *Ear and Hearing* 23 (2002), 92-97

[11] Menzel, D.: Zum Einfluss von Farben auf das Lautheitsurteil. Verlag Dr. Hut, München, 2011

[12] Schlittenlacher, J.: Effects of auditory processing on loudness and reaction time, Shaker Verlag, Aachen, 2015

[13] Zwicker, E.: Über die Lautheit von ungedrosselten und gedrosselten Schallen. *Acustica* 13 (1963), 194-211