

# Zeitlich-spektrale Effekte bei der Lautheitswahrnehmung

JESKO L. VERHEY, BIRGER KOLLMEIER

Arbeitsgruppe Medizinische Physik, Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg  
E-mail: jlv23@cam.asc.uk

## I. Einleitung

Die Lautheit hängt nicht nur vom seinem Pegel sondern auch von der Dauer und dem spektralen Gehalt des Signals ab. Lautheitsmodelle zur Beschreibung dieser zeitlichen und spektralen Effekte gehen im Allgemeinen von einer instantanen nichtlinearen spektralen Integration aus, während die Dauerabhängigkeit durch eine nachgeschaltete einfache Integrationsstufe beschrieben wird. Die spektrale und zeitliche Integration wird als unabhängig angenommen. Die auf der DAGA 98 (Verhey and Kollmeier, 1998) vorgestellte Messungen zeigen jedoch, dass die spektrale Lautheitssummiation von der Signaldauer abhängt. Es werden die Lautheitsvergleichsmessungen mit Referenzstimuli gleicher Leistung (und gleichem spektralen Gehalt) für verschiedene Signaldauern durchgeführt. In diesem Beitrag werden neue Messergebnisse vorgestellt, bei denen die spektrale Lautheitssummiation für kurze und lange Signale sowohl bei gleichem Pegel als auch bei gleicher Lautheit verglichen wird.

## II. Methode

Die Pegel gleicher Lautheit zwischen Test- und Referenzsignal werden mit einem adaptiven 2-Intervall 1-Schritt Verfahren gemessen. Während eines Messdurchgangs werden gleichzeitig die Pegel gleicher Lautheit für alle Testsignale bei festem Referenzsignalpegel bestimmt ("interleaved procedure"). Die Details dieses Verfahrens sind ausführlich in Verhey and Kollmeier (1998) beschrieben.

Als Test- und Referenzsignale wird ein um 2 kHz geometrisch zentriertes Bandpassrauschen mit im Durchlassbereich flachen Spektrum verwendet. Das Signal ist ein einfach iteriertes "low-noise noise" (Kohlrausch et al., 1997). Die Dauer von Test- und Referenzsignal ist entweder 10 ms, 100 ms oder 1000 ms. Als Testsignalbandbreite wurde 200, 400, 800, 1600 und 6400 Hz gewählt. Das Referenzsignal hatte eine Bandbreite von 3200 Hz. In Verhey and Kollmeier (1998) war der Referenzpegel 45 dB SPL. In diesem Beitrag werden zwei höhere Referenzpegel verwendet: 55 dB SPL und 65 dB SPL. Die Signale werden mit 2,5 ms langen Hanningflanken weich ein- und ausgeschaltet. Neun normalhörende Versuchspersonen nahmen an den Messungen teil.

## III. Ergebnisse

In Abbildung 1 sind die über die 9 Versuchspersonen gemittelten Pegel gleicher Lautheit (mit dem entsprechenden Standardfehler) für die Referenzpegel 55 dB SPL (Mitte) und 65 dB SPL (oben) dargestellt. Die Daten für 45 dB SPL (Abb. 1, unten) sind dem Beitrag der Autoren zur DAGA 98 (Verhey and Kollmeier, 1998) entnommen, wobei hier zur Vergleichbarkeit nur über die an der jetzigen Studie teilgenommenen 9 Versuchspersonen (anstatt 10) gemittelt wurde. Für alle Referenzpegel und Signaldauern zeigt sich ein mit

zunehmender Bandbreite abfallender Pegel bei gleich empfunder Lautheit. Der Pegelunterschied zwischen dem Referenzsignal und dem gleich lauten schmalbandigsten Testsignal nimmt für 1000 ms langen Signalen von etwa 9 dB bei einem Referenzpegel von 45 dB SPL auf 6 dB bei 65 dB SPL ab. Für alle Referenzpegel hängt die Steigung der Kurve gleicher Lautheit als Funktion der Bandbreite von der Dauer der Signal ab: Kurze Signale zeigen einen steileren Verlauf als lange Signale. Der Effekt der Dauer ist im betrachteten mittleren Pegelbereich unabhängig vom Referenzpegel.

Eine Varianzanalyse (SPSS, Version 9.0.1) der Pegeldifferenzen zwischen Test- und Referenzsignal zeigt, dass alle Signalparameter einen signifikanten Einfluss auf den Pegel gleicher Lautheit haben. Der Einfluss der Bandbreite und der Dauer allein sowie des Paares Bandbreite $\leftrightarrow$ Dauer sind hoch signifikant ( $p < 0.0001$ ). Der Einfluss des Referenzpegel und des Paares Pegel $\leftrightarrow$ Bandbreite sind signifikant ( $p < 0.01$ ), was auf eine Abhängigkeit der Steigung Kurve vom Referenzpegel schließen lässt. Allerdings hat der Referenzpegel keinen Einfluss auf die Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitssummiation (Dauer $\leftrightarrow$ Referenzpegel und Dauer $\leftrightarrow$ Bandbreite $\leftrightarrow$ Referenzpegel sind nicht signifikant ( $p > 0.1$ )).

## IV. Diskussion

Die Messungen zeigen, dass der Effekt der Signaldauer auf die spektrale Lautheitssummiation für den betrachteten (mittleren) Pegelbereich pegelunabhängig ist, sofern man die Daten bei gleicher Leistung des Referenzsignals vergleicht.

### A. Vergleich zu Literaturdaten

Die in der Literatur beschriebene Messungen zur Dauerabhängigkeit der spektralen Lautheitssummiation wurden im Allgemeinen bei gleicher Lautheit der kurzen und langen Signale erhoben (z.B. Port, 1963; Zwicker, 1965). Daher ist ein direkter Vergleich mit diesen Daten problematisch. Da der Pegelunterschied zwischen gleich lauten 10 ms und 1000 ms langen Signalen im mittleren Pegelbereich etwa 10 dB beträgt (Poulsen, 1981), ist es allerdings möglich, zumindest für die kleinste und größte Dauer die spektrale Lautheitssummiation bei gleicher Lautheit zu vergleichen. Die Pegeldifferenz zwischen dem schmalbandigsten Testsignal und dem gleichlauten Referenzsignal für 10 ms lange Signale bei einem Referenzpegel von 55 dB SPL ist etwa 6 dB größer als die bei dem in etwa gleichlauten 1000 ms langen Signalen (Referenzpegel 45 dB SPL). Bei einem Referenzpegel des kurzen Signals von 65 dB SPL ist der Unterschied bei gleicher Lautheit zwischen kurzen und langen Signalen 4 dB. Das bedeutet, dass sowohl beim Vergleich beim gleichen Referenzpegel als auch bei gleicher Lautheit sich eine höhere spektrale Lautheitssummiation bei kurzen gegenüber langen Signalen findet. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu

den Daten von Port (1963) und Zwicker (1965), die auf eine dauerunabhängigen Lautheitssummutation (bei gleicher Lautheit) hindeuten. Eine entsprechend dem Ergebnis dieser Studie höhere Lautheitssummutation für kurze gegenüber langen Signalen findet sich jedoch bei Boone (1973). Neuere Daten zu zeitlichspektralen Lautheitswahrnehmung weisen ebenfalls auf eine erhöhte spektrale Lautheitssummutation bei kurzen Signalen hin. Garnier et al. (1999) bestimmte durch Vergleich der mit einem kategorialen Lautheitsmessverfahren erhaltenen Lautheitsfunktion für lange (300 ms) und kurze (16,5 ms) Signale die zeitliche Lautheitsintegration für Breitbandrauschen, sowie durch Vergleich mit den kategorialen Lautheitsdaten für einen 300 ms langen 1,6 kHz Sinuston die spektrale Lautheitssummutation für lange Signale. Da sie jedoch die Lautheitsfunktion für eine kurzen Sinuston nicht bestimmt haben ist eine direkte Aussage auf Basis ihrer Daten nicht möglich. Werden ihre Daten jedoch mit den Daten von Buus et al. (1997) kombiniert, so erhält man eine 3 bis 10 dB größere Lautheitssummutation für kurze Signale gegenüber langen Signalen für sehr leise bis mittel-laut Signale. Auch die Kombination der Daten von Florentine et al. (1996) zur zeitlichen Integration von Sinustönen und Breitbandrauschen mit den zur Lautheitssummutation von langen Signalen von Zwicker et al. (1957) führt zu einer größeren Lautheitssummutation für kurze Signale im mittleren Pegelbereich (siehe Verhey, 1999). Der Effekt der Dauer nimmt bei diesen indirekt bestimmten Daten zur spektralen Lautheitssummutation in Übereinstimmung mit den Messungen in dieser Studie mit zunehmender Lautheit ab.

## B. Vergleich zu Modellvorhersagen

Florentine et al. (1996) und Buus et al. (1997) bestimmen aus den Pegelunterschieden zwischen gleich lauten Signalen (mit gleichem Spektrum) ihre Lautheitsfunktionen. Sie gehen dabei davon aus, dass das Lautheitsverhältnis zwischen kurzen und langen Signalen mit gleichem Spektrum bei gleichem Pegel unabhängig vom Pegel ist ("Equal-loudness ratio model"). Für Breitbandsignale und Sinustöne nehmen sie das gleiche Lautheitsverhältnis an. Diese Annahme ist auch in den meisten dynamischen Lautheitsmodelle enthalten (siehe Einleitung). Die in Abbildung 5 in Buus et al. (1997) dargestellten Lautheitsfunktion für kurze und lange Sinustöne und Breitbandrauschen verdeutlichen, dass eine unterschiedliche spektrale Lautheitssummutation für kurze und lange Signale bei gleicher Lautheit auch im Rahmen eines solchen Modells vorhergesagt wird, sofern breitbandige und schmalbandige Signale eine unterschiedliche Steigung der Lautheitsfunktion aufweisen. Bei gleichem Pegel der Referenz sagt das Modell jedoch – entgegen den Daten in diesem Beitrag – auf Grund der Annahme des für Breitbandrauschen und Sinuston gleichen Lautheitsverhältnisses zwischen kurzen und langen Signalen eine von der Dauer unabhängige Lautheitssummutation vorher. Um den hier gefundenen Effekt vorherzusagen, muss entweder ein vom spektralen Gehalt abhängiges Lautheitsverhältnis oder wie auf der DAGA 98 vorgeschlagen eine unterschiedliche Kompression für kurze und lange Signale bei gleichem Pegel angenommen werden.

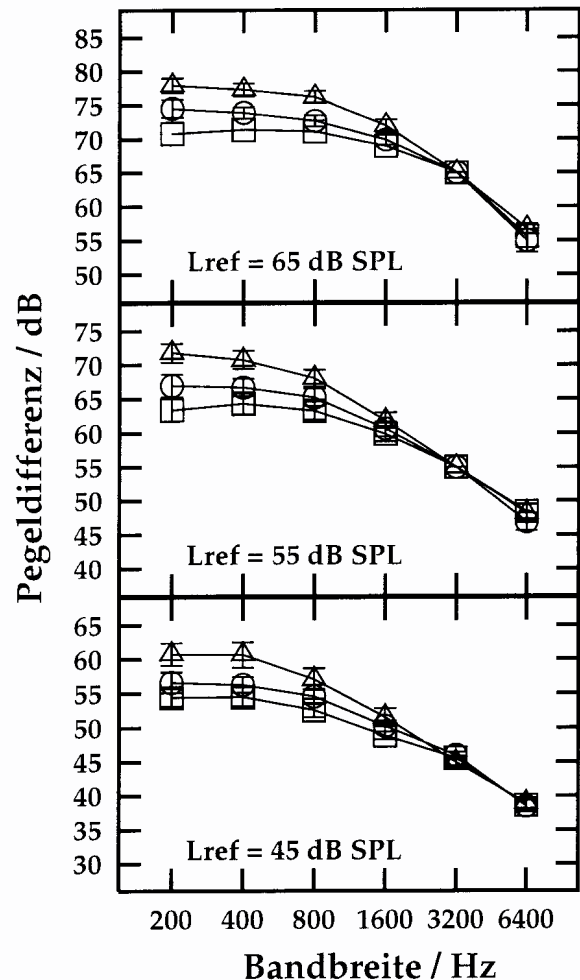


Abbildung 1: Pegeldifferenz zwischen Test- und Referenzsignalen bei gleichempfundner Lautheit für einen Referenzpegel von 65 dB SPL (oben), 55 dB SPL (Mitte) und 45 dB SPL (unten). Signaldauer: 1000 ms (□), 100 ms (○) und 10 ms (△). Näheres siehe Text

## Literatur

- Boone, M., (1973). *Acustica* **29**, 198–204.
- Buus, S., Florentine, M. and Poulsen, T., (1997). *JASA* **101**, 669–680.
- Florentine, M., Buus, S. and Poulsen, T., (1996). *JASA* **99**, 1633–1644.
- Garnier, S., Micheyl, C., Berger-Vachon, C. and Collet, L., (1999). *Acta Otolaryngol.* **119**, 154–157.
- Kohlrausch, A., Fassel, R., van der Heyden, M., Kortekaas, R., van de Par, S., Oxenham, A. and Püschel, D., (1997). *acta acustica* **83**, 659–669.
- Port, E., (1963). *Acustica* **13**, 212–223.
- Poulsen, T., (1981). *JASA* **69**, 1786–1790.
- Verhey, J. L. and Kollmeier, B., (1998). In *Fortschritte der Akustik - DAGA '98*, 308–309, Oldenburg. DEGA e. V.
- Verhey, J. L., (1999). PhD thesis, Universität Oldenburg, BIS-Verlag Oldenburg. ISBN 3-8142-0662-2.
- Zwicker, E., Flottorp, G. and Stevens, S., (1957). *JASA* **29**, 548–557.
- Zwicker, E., (1965). *JASA* **38**, 132–141.