

Spektrale und zeitliche Integration von Rauschsignalen in monauralen und binauralen Maskierungsexperimenten

Armin Kohlrausch^{1,2}, Othmar Schimmel²

¹ Philips Research Laboratories, Prof. Holstlaan 4, NL-5656 AA Eindhoven

² Technische Universiteit Eindhoven, Human Technology Interaction, P.O. Box 513, NL-5600 MB Eindhoven

Einleitung

Dieser Beitrag untersucht den Einfluss von Signaldauer und Signalbandbreite auf die Mithörschwelle eines Testsignals in breitbandigem Rauschen. Aus zahlreichen Maskierungsexperimenten ist bekannt, dass der Schwellenpegel eines Testsignals mit zunehmender Signaldauer abnimmt. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass das Gehör bei der Schwellenbildung Information über das Signal über einen bestimmten Zeitraum (bis ca. 500 ms) akkumulieren kann. Dieser Prozess sollte aber nicht als eine simple Integration von Maskierer- und Testsignalenergie verstanden werden. Hiergegen spricht die Beobachtung von Wakefield und Viemeister [1], dass auch zeitlich getrennte Signalanteile "integriert" werden können, und dass bei Variation der Maskiererdauer die Testsignal-schwellen weitgehend konstant bleiben.

Der Einfluss der Signalbandbreite auf die Schwellenbildung ist komplizierter. Die älteste, auf Gaessler [2] zurückgehende Vorstellung ist, dass nur die Signalenergie innerhalb einer einzigen Frequenzgruppe zur Wahrnehmung des Testsignals beiträgt. Inzwischen ist in zahlreichen Publikationen gezeigt worden, dass Signalanteile in verschiedenen Frequenzgruppen durchaus zur Detektion beitragen. Die Kombination wirkt sich am stärksten aus, wenn die Wahrnehmbarkeit (d') der einzelnen Signalanteile in der jeweiligen Frequenzgruppe gleich ist. In diesem Falle ergibt sich eine statistisch optimale Kombination der Signalanteile in verschiedenen Frequenzgruppen, wodurch sich der Schwellenpegel bei einer Verdopplung der Zahl der angeregten Frequenzgruppen um 1.5 dB erniedrigt (ausgedrückt als Signalpegel pro Frequenzgruppe, z.B. [3]). Die Arbeit von Langhans und Kohlrausch [4] zeigte, dass diese Gesetzmäßigkeit auch in binauralen Maskierungsexperimenten gilt.

Bei gleichzeitiger Variation von Dauer und Bandbreite ergeben sich Überraschungen. Bereits Scholl [5] zeigte, dass die spektrale Integration für kurze und lange Signale unterschiedlich ist. Bei Signalen kurzer Dauer (< 10 ms) wird die Schwelle durch die **Gesamtenergie** des Signals in allen angeregten Frequenzgruppen bestimmt, während bei langen Dauern die Signalanteile in verschiedenen Frequenzgruppen weniger effektiv kombiniert werden (s.o.). Aus dieser Beobachtung folgt zwingend, dass die zeitlichen Integrationskurven für schmal- und breitbandige Signale unterschiedlich steil verlaufen müssen (z.B. [6]). In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit diese Integrationsregeln auch in binauralen Konfigurationen auftreten.

Methode

Als Maskierer wurde Breitbandrauschen (0-22 kHz) mit flachem Leistungsspektrum verwendet. Das Testsignal war ebenfalls Rauschen (statistisch unabhängig vom Maskierer), das entweder breitbandig (dieselbe Bandbreite wie der Maskierer) oder schmalbandig (Bandbreite 79 Hz, zentriert um 500 Hz) angeboten wurde. Die Dauer des Maskieres betrug 500 ms und er wurde rechteckförmig ein- und ausgeschaltet. Das Testsignalrauschen wurde mit effektiven Dauern von 5 bis 320 ms angeboten. Beim breitbandigen Testsignal wurden rechteckförmige Flanken verwendet. Die schmalbandigen Signale wurden mit Hanning Flanken von 6.7 ms ein- und ausgeschaltet, um möglichst viel Signalenergie innerhalb einer Frequenzgruppe zu haben. Die spektrale Filterung wurde nach der zeitlichen Fensterung durchgeführt.

Der Maskierer wurde ohne interaurale Phasendifferenz angeboten, für das Testsignal wurden drei verschiedene binaurale Parameterwerte gewählt: a) diotisch (im folgenden mit N_oS_o bezeichnet, b) interaurale Pegeldifferenz von 18 dB (ILD), oder c) interaurale Zeitdifferenz von 0.66 ms (ITD). Damit ergaben sich insgesamt 42 verschiedene Parameterkombinationen (7 Dauern, 3 interaurale Konfigurationen, 2 Signalbandbreiten), für die von sechs Versuchspersonen Schwellen gemessen wurden. Als Messverfahren wurde ein adaptives 3 IFC Verfahren verwendet, wobei zwischen den drei Maskiererintervallen jeweils 100 ms Pause lag. Für jede Parameterkombination wurden von jeder Versuchsperson vier Schwellenwerte gemessen.

Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden werden zunächst die Schwellenwerte als Funktion der Signaldauer dargestellt. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse für das schmalbandige Testsignal, Abbildung 2 die entsprechenden Daten für das breitbandige Testsignal. Die Symbole charakterisieren die drei binauralen Konfigurationen. Die eingezeichnete Gerade hat eine Steigung von -3 dB/Verdopplung der Dauer. Für beide Signalbandbreiten zeigt sich ein deutlicher binauraler Detektionsvorteil, der für die ILD Situation um einige dB größer ist als für die ITD Situation.

Große Unterschiede zwischen den beiden Abbildungen ergeben sich in Hinblick auf die Steilheit der Kurven. Während die Kurven in Abbildung 1 ähnlich stark abfallen wie die eingezeichnete Gerade, verlaufen sie für das breitbandige Testsignal (Abbildung 2) deutlich flacher.

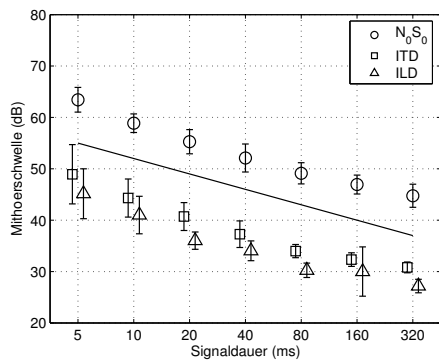


Abbildung 1: Schwellenwerte eines schmalbandigen Testsignals für drei interaurale Konfigurationen als Funktion der Signaldauer. Die eingezeichnete Gerade hat eine Steigung von -3 dB/Verdopplung der Dauer

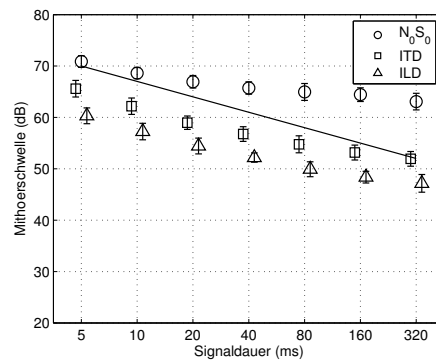


Abbildung 2: Schwellenwerte eines breitbandigen Testsignals für drei interaurale Konfigurationen als Funktion der Signaldauer. Die eingezeichnete Gerade hat eine Steigung von -3 dB/Verdopplung der Dauer

Die Analyse der spektralen Integration wird folgendermaßen durchgeführt. Ausgehend von der Schwelle für das schmalbandige Signal wird für die verschiedenen, oben erwähnten Modellvorstellungen die Schwelle für das breitbandige Signal berechnet und mit den Daten verglichen. 1. Single-band Modell (M1): Detektion hängt nur ab von der Detektierbarkeit in einer einzigen Frequenzgruppe. 2. Multi-band Modell: Detektion beruht auf einer Kombination der Detektierbarkeit in allen angeregten Frequenzgruppen. Variante M2a: Statistische Kombination, ergibt einen Detektionsvorteil von ca. 1.5 dB pro Verdopplung der Zahl der erregten Frequenzgruppen. Variante M2b: Perfekte Energieintegration, ergibt einen Detektionsvorteil von 3 dB pro Verdopplung.

Tabelle 1 zeigt Messungen (sb, bb) und Vorhersagen (M1, M2a, M2b) für das kleinste und größte Signaldauer in der Konfiguration $N_o S_o$. Die am besten mit den Messdaten übereinstimmende Modellvorhersage ist kursiv wiedergegeben. Wie zu erwarten, ergibt das single-band Modell M1 die höchsten Schwellenvorhersagen, und nehmen die berechneten Schwellenpegel mit zunehmend effizienterer spektraler Integration ab. Für das 5-ms Signal ergibt die perfekte Integration über alle ca. 40 erregten Frequenzgruppen (Modell M2b) die beste Übereinstimmung mit den Messungen (bb), für das 320-ms Signal gilt dies für die statistische Kombination, Modell M2a. Tabelle 2 zeigt dieselbe Analyse für die binaurale Situation mit interauraler Pegeldifferenz. Bei den Modellberechnungen ist davon ausgegangen, dass in dieser Situation allein die ca. 8 tieffrequenten Frequenzgruppen zwischen etwa 200 und 750 Hz zur Detektion beitragen, weil in diesem Frequenz-

Tabelle 1: Gemessene Schwellen für schmal- (sb) and breitbandige (bb) Signale in der Konfiguration $N_o S_o$. Die Vorhersagen der drei im Text genannten Modelle sind in den Spalten M1, M2a und M2b angegeben.

Dauer	sb	M1	M2a	M2b	bb
5 ms	63.4	87.9	79.6	<i>71.4</i>	<i>70.9</i>
320 ms	44.8	69.3	<i>61.0</i>	52.8	<i>63.1</i>

bereich der binaurale Detektionsvorteil am größten ist. Mit dieser Anpassung zeigt sich auch in der ILD Situation ein unterschiedliches spektrales Integrationsverhalten für kurze und lange Signale.

Die Messungen lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass die in der Einleitung beschriebenen zeitlichen und spektralen Integrationsregeln in Maskierungsexperimenten in gleicher Weise für monaurale wie auch binaurale Konfigurationen gelten.

Tabelle 2: Wie Tabelle 1 für die binaurale Konfiguration mit interauraler Pegeldifferenz des Testsignals.

Dauer	sb	M1	M2a	M2b	bb
5 ms	45.1	69.6	65.1	<i>60.6</i>	<i>60.3</i>
320 ms	27.2	51.7	<i>47.2</i>	42.7	<i>47.2</i>

Literatur

- [1] Viemeister, N. F. und Wakefield, G. H. Temporal integration and multiple look. *J. Acoust. Soc. Am.* **90** (1991), 858–865.
- [2] Gässler, G. Über die Hörschwelle für Schallereignisse mit verschieden breitem Frequenzspektrum. *Acustica* **4** (1954), 408–414.
- [3] Green, D. M. Detection of multiple component signals in noise. *J. Acoust. Soc. Am.* **30** (1958), 904–911.
- [4] Langhans, A. und Kohlrausch, A. Spectral integration of broadband signals in diotic and dichotic masking experiments. *J. Acoust. Soc. Am.* **91** (1992), 317–326.
- [5] Scholl, H. Über die Bildung der Hörschwellen und Mithörschwellen von Impulsen. *Acustica* **12** (1962), 91–101.
- [6] van den Brink, W. A. C. und Houtgast, T. Spectrotemporal integration in signal detection. *J. Acoust. Soc. Am.* **91** (1992), 267–278.