

Adaptation, Nachverdeckung und Zeitauflösungsvermögen

Teil 1

Hugo Fastl

Zusammenfassung Adaptationseffekte können in mindestens zwei Gruppen unterteilt werden: zum einen Adaptationseffekte, die während der Darbietung von Schallen auftreten und zum anderen Adaptationseffekte, die nach dem Abschalten von Schallen auftreten. Zur letztgenannten Gruppe gehört ein Effekt, der als Nachverdeckung bezeichnet wird: Nach der Stimulation mit Schallen von einigen hundert Millisekunden Dauer benötigt das Gehör etwa 200 ms, um seine volle Empfindlichkeit wieder zu erlangen. Die Nachverdeckung spielt eine wichtige Rolle bei der Sprachwahrnehmung, da die Dauern der Reize der Dauer von Vokalen, Konsonanten oder Pausen entsprechen. Bei hörbehinderten Personen zeigt sich ein verändertes Verhalten der Nachverdeckung, so daß das zeitliche Auflösungsvermögen reduziert wird. Als Beispiele werden in dieser Arbeit amplitudenmodulierte Rauschen und Sprachschalle behandelt.

Einleitung

Zeitliche Veränderungen in der Empfindlichkeit des Gehörs werden in der Literatur als Adaptation, Ermüdung, Habituation usw. bezeichnet (vgl. Hirsch 1952, Ward 1973, Davis und Silverman 1978, Lehnhardt 1978). All diesen Ausdrücken ist gemeinsam, daß sie zur Beschreibung von Effekten reduzierter Gehörempfindlichkeit verwendet werden. Zwei wesentliche Phänomene können unterschieden werden:

- a) reduzierte Empfindlichkeit des Gehörs während der Stimulation und
- b) reduzierte Empfindlichkeit des Gehörs nach dem Ende der Stimulation.

Zur Gruppe a) gehören die Effekte des Schwellenschwundes und der Lautheitsadaptation, während die Gruppe b) Effekte wie Nachverdeckung und zeitliche Schwellenverschiebung (TTS) umfaßt. Nachverdeckung und zeitliche Schwellenverschiebung haben gemeinsam, daß die Hörschwelle nach dem Abschalten eines (ermüdenden) Schalles angehoben ist. Die Expositionszeit und die Zeit, die notwendig ist, um zum normalen Wert zurückzukehren, beträgt bei der Nachverdeckung nur etwa 200 ms, bei der zeitlichen Schwellenverschiebung jedoch Minuten bis zu Stunden.

In dieser Arbeit wird die Abhängigkeit der Nachverdeckung von wesentlichen Reizparametern beschrieben. Die Nachverdeckungseffekte werden für einzelne maskierende Impulse dargestellt, die aus Breitbandrauschen, Schmalbandrauschen oder Sinustönen ausgeschnitten sind. Unter Hinzunahme von Daten für die Vorverdeckung werden Mithörschwellenmuster für maskierende Pulse abgeleitet. Die resultierenden Mithörschwellen-Zeitmuster oder Mithörschwellen-Periodenmuster (Zwicker 1976) können als Maß für das zeitliche Auflösungsvermögen des Gehörs betrachtet werden. Es werden Beispiele für die Zeitauflösung amplitudenmodulierter Rauschen bei Normalhörenden und bei Hörbehinderten angegeben; darüber hinaus wird

Introduction

Temporary changes in auditory sensitivity have been given different names like adaptation, fatigue, habituation etc. (e. g. Hirsch 1952, Ward 1973, Davis and Silverman 1978, Lehnhardt 1978). All these terms have in common, that they are used for effects of reduced auditory sensitivity. Two main phenomena can be distinguished:

- (a) reduced auditory sensitivity during stimulation and
- (b) reduced auditory sensitivity after stimulation.

To group (a) belong the effects of tone decay and loudness adaptation while group (b) encompasses the effects of post-masking (forward masking) and temporary threshold shift (TTS). Post-masking and temporary threshold shift have in common that after termination of a (fatiguing) sound, the hearing threshold is increased. However, the exposure time and the time interval necessary for recovery, is only some 200 ms in post-masking, but minutes to hours in temporary threshold shift.

This paper describes the dependence of post-masking on important stimulus parameters. Post-masking effects are given for single masker impulses cut out of broadband noise, narrow band noise and pure tones. Including the data for pre-masking (backward masking) masking patterns for masker bursts are derived. The resulting temporal masking patterns or masking-period patterns (Zwicker, 1976) can be regarded as a measure of the ear's temporal resolution. Examples for temporal resolution of amplitude-modulated noise in normal and impaired ears are given and temporal resolution is simulated in electrical circuits. The effects of reduced temporal resolution are illustrated by means of the level-time pattern of a single word and a short sentence.

Post-Masking Effects

This section represents an overview about the depen-

Auditory Adaptation, Post-Masking and Temporal Resolution

Part 1

Summary Phenomena of auditory adaptation can be divided into at least two groups: adaptation effects during the presentation of sounds and adaptation effects after the termination of sounds. To the latter group belongs an effect called post-masking or forward masking: after stimulation with sounds of some hundred milliseconds duration the ear needs about 200 ms to regain its full sensitivity. Post-masking plays an important part for speech perception since the durations involved compare well with the durations of vowels, consonants and silent periods. In hearing impaired patients, post-masking frequently is degraded in such a way that temporal resolution is reduced. Examples are given for amplitude-modulated noise and speech sounds.

die Zeitauflösung in elektrischen Netzwerken simuliert. Die Auswirkungen des reduzierten Zeitauflösungsvermögens werden am Beispiel des Pegel-Zeitmusters für ein Einzelwort und für einen kurzen Satz illustriert.

Nachverdeckung

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Abhängigkeit der Nachverdeckung von der Verzögerungszeit zwischen dem Ende des Maskierers und dem Ende des Testtones, von der Testtondauer, von der Testtonfrequenz, vom Maskiererpegel und von der Maskiererdauer gegeben. Die Effekte werden für Breitbandrauschen, Schmalbandrauschen und Sinustöne beschrieben. Leser, die an Details und Literaturhinweisen interessiert sind, werden auf folgende drei Arbeiten verwiesen (Fastl 1976, 1977, 1979), in denen die zeitliche Maskierung für jede Maskiererbandbreite separat behandelt wird.

Abb. 1 illustriert das Abklingen der psychoakustischen Erregung. Der Pegel L_T^* des Testtonimpulses ist als Funktion der Verzögerungszeit t_v dargestellt. Abb. 1a zeigt die Nachverdeckung eines 8 kHz-Impulses durch einen breitbandigen Maskierer (Gleichmäßig Verdeckendes Rauschen, Zwicker und Feldtkeller 1967, S. 58). In Abb. 1b ist die Nachverdeckung von Testtonimpulsen bei 6,5, 8,5 und 11 kHz durch einen frequenzgruppenbreiten Maskierer bei 8,5 kHz dargestellt. Abb. 1c zeigt die Nachverdeckung von Testtonimpulsen bei 3,5, 4 und 5,5 kHz durch einen maskierenden Sinuston bei 4 kHz.

Die in Abb. 1 dargestellten Ergebnisse machen deutlich, daß die Nachhörschwelle bei einer Verzögerungszeit von etwa 200 ms die Ruhehörschwelle erreicht. Dies bedeutet, daß die Reduzierung der Empfindlichkeit des Gehörs, die durch einen Maskierer von etwa 500 ms Dauer und 60 bis 70 dB Schallpegel hervorgerufen wird, etwa 200 ms lang andauert. Die Steigung der Abklingkurve ist mehr oder weniger die gleiche für Testtöne, die durch Breitbandrauschen verdeckt werden oder in der Mitte eines verdeckenden Schmalband-

dence of post-masking on the delay time between masker offset and test tone offset, test tone duration, test tone frequency, masker level and masker duration. Effects are given for broadband noise, narrow band noise and pure tone maskers. Readers interested in details and references are referred to the following three papers (Fastl, 1976, 1977, 1979) where temporal masking is treated separately for each masker bandwidth.

Fig. 1 illustrates the decay of psychoacoustic excitation. The level L_T^* of the test tone impulse is plotted as a function of the delay time t_v . Fig. 1a shows post-masking of 8-kHz test-tone impulses by a broadband masker (uniform masking noise, Zwicker and Feldtkeller, 1967, p. 58). In Fig. 1b post-masking of test tone impulses at 6.5, 8.5 and 11 kHz by a critical band wide masker at 8.5 kHz is displayed. Fig. 1c shows post-masking of test tone impulses at 3.5, 4 and 5.5 kHz by a pure tone masker at 4 kHz.

From the results plotted in Fig. 1 it becomes clear that masked threshold reaches threshold in quiet at a delay time of about 200 ms. In other words, the reduction in auditory sensitivity caused by a preceding masker of some 500 ms duration and 60 to 70 dB SPL lasts about 200 ms. The slope of the decay curve is more or less the same for test tones in broadband noise and in the center of narrow band noise. However, for pure tone masker and at the slopes of the narrow band noise masker, flatter decay curves show up. The shape of the decay curves is crucially influenced by the level difference between masked threshold immediately after termination of the masker (say $t_v = 2$ ms) and the threshold in quiet. In addition, for pure tone masker, the decay at masker frequency (4 kHz, triangles) is faster than the decay at the upper slope of the simultaneous masking pattern (squares in Fig. 1c).

Fig. 2 shows the dependence of post-masking on test tone duration for the three maskers specified above. The meaning of the symbols is the same as in Fig. 1. The filled circles in Fig. 2a illustrate temporal integration of test tone energy; i. e. hearing thresholds for test

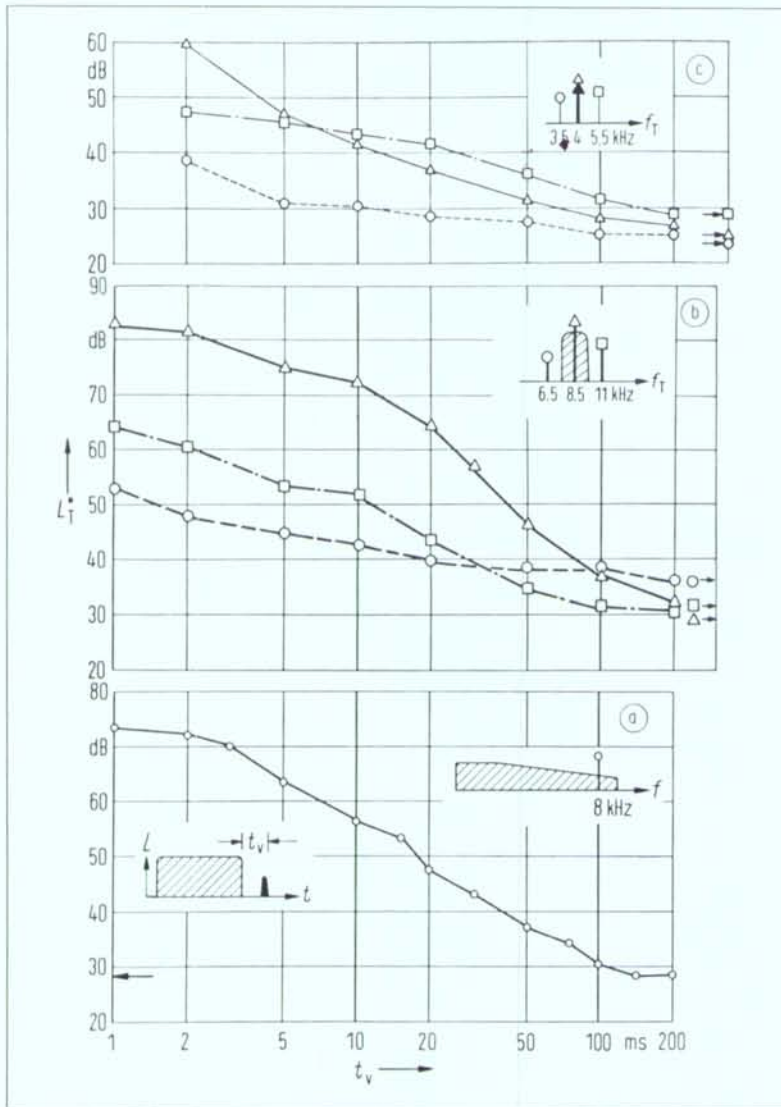


Abb.1 Nachverdeckung von Testtonimpulsen als Funktion der Verzögerungszeit.

(a) Breitbandrauschen als Maskierer.

Maskiererpegel $L_M^* = 60$ dB, Bandbreite des Maskierers $\Delta f_M = 16$ kHz, Maskiererdauer $T_M = 600$ ms, Testtondauer $T_T = 1$ ms, gaußförmige Übergangszeit $T_{TG} = 0,5$ ms, Testtonfrequenz $f_T = 8$ kHz (nach Fastl 1976).

(b) Schmalbandrauschen als Maskierer. Maskierfrequenz $f_M = 8,5$ kHz $\Delta f_M = 1800$ Hz, $L_M^* = 70$ dB, $T_M = 500$ ms, $T_T = 1$ ms, $T_{TG} = 0,5$ ms, $f_T = 6,5$ kHz (Kreise), 8,5 kHz (Dreiecke) und 11 kHz (Quadrate) (nach Fastl 1977).

(c) Sinuston als Maskierer. $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz, $T_M = 300$ ms, $T_T = 2$ ms, $T_{TG} = 1$ ms, $f_T = 3,5$ kHz (Kreise), 4 kHz (Dreiecke) und 5,5 kHz (Quadrate), nach Fastl 1979). Pfeile: Ruheshörschwellen der Testtonimpulse.

Fig.1 Post-masking of test tone impulses as a function of delay time.

(a) Broad band noise masker.

Masker level $L_M^* = 60$ dB, bandwidth of masker $\Delta f_M = 16$ kHz, masker duration $T_M = 600$ ms, test tone duration $T_T = 1$ ms, rise/fall time of Gaussian shaped gating signal $T_{TG} = 0,5$ ms, test tone frequency $f_T = 8$ kHz.

(b) Narrow band noise masker. Masker frequency $f_M = 8,5$ kHz $\Delta f_M = 1800$ Hz, $L_M^* = 70$ dB, $T_M = 500$ ms, $T_T = 1$ ms, $T_{TG} = 0,5$ ms $f_T = 6,5$ kHz (circles), 8,5 kHz (triangles) and 11 kHz (squares)

(c) Pure tone masker.

$L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz, $T_M = 300$ ms, $T_T = 2$ ms, $T_{TG} = 1$ ms, $f_T = 3,5$ kHz (circles), 4 kHz (triangles) and 5,5 kHz (squares). Arrows: thresholds in quiet of test tone impulses.

rauschens liegen. Im Vergleich dazu zeigen sich für maskierende Sinustöne und an den Flanken maskierender Schmalbandrauschen flachere Abklingkurven.

Die Form der Abklingkurve wird wesentlich beeinflusst von der Pegeldifferenz zwischen der Nachhörschwelle kurz nach dem Ende des Maskierers (z. B. bei $t_v = 2$ ms) und der Ruheshwelle. Darüber hinaus fällt beim maskierenden Sinuston auf, daß das Abklingen bei der Maskierfrequenz (4 kHz, Dreiecke) schneller

tones of different duration were determined *without* masker.

As a rule, masked thresholds in Fig. 2 increase with decreasing test tone duration in a similar manner as thresholds measured without masker (dots in Fig. 2a), indicating almost normal temporal integration. However, for pure tone masker, the increase is smaller at the slopes and a *decrease* in masked threshold with decreasing test tone duration is found at masker frequency

vonstatten geht als das Abklingen an der oberen Flanke des simultanen Mithörschwellenmusters (Quadrate in Abb. 1c).

Abb. 2 zeigt die Abhängigkeit der Nachverdeckung von der Testtondauer für die drei oben erwähnten Maskierertypen. Die Bedeutung der Symbole ist die gleiche wie bei Abb. 1. Die ausgefüllten Kreise in Abb. 2a illustrieren die zeitliche Integration der Testtonenergie, d. h. die Hörschwelle für Testtöne unterschiedlicher Dauer wurde *ohne* Maskierer bestimmt.

In der Regel steigen die Nachhörschwellen in Abb. 2 mit abnehmender Testtondauer in ähnlicher Art und Weise an wie die Hörschwellen, die *ohne* Maskierer gemessen wurden (Punkte in Abb. 2a). Dieses Verhalten deutet eine nahezu normale zeitliche Integration an. Dem gegenüber ist für maskierende Sinustöne der Anstieg an den Flanken geringer und bei der Maskierfrequenz (Dreiecke in Abb. 2c) tritt sogar eine Abnahme der Nachhörschwelle mit abnehmender Testtondauer auf. Dieser Effekt stellt ganz offensichtlich einen Artefakt dar, da für $T_T = 10$ ms keine zeitliche Lücke zwischen dem Ende des Maskierers und dem Beginn des Testtones auftritt und daher der Testton nicht mehr als ein separates Ereignis wahrgenommen wird (Zwicker und Feldtkeller 1967, S. 208. Moore 1980, Fastl 1980).

Abb. 3 zeigt die Spektralverteilung der psychoakustischen Erregung während des Abklingvorgangs. Der Pegel L_T^* der Testtonimpulse ist als Funktion sowohl

Abb. 2 Nachverdeckung von Testtonimpulsen als Funktion ihrer Dauer.

(a) Breitbandrauschen als Maskierer. Verzögerungszeit $t_V = 20$ ms, $L_M^* = 60$ dB, $\Delta f_M = 16$ kHz, $T_M = 500$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $f_T = 8$ kHz.

Ausgefüllte Kreise: Ruhehörschwellen von Testtonimpulsen der Dauer T_T .

(b) Schmalbandrauschen als Maskierer, $L_M^* = 70$ dB $f_M = 8,5$ kHz, $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_M = 500$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $t_V = 10$ ms, $f_T = 6,5, 8,5$ und 11 kHz,

(c) Sinustone als Maskierer. $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz, $T_M = 300$ ms, $T_{RG} = 1$ ms, $t_V = 12$ ms, $f_T = 3,5, 4$ und $5,5$ kHz. Symbole und Literaturzitate wie bei Abb. 1

Fig. 2 Post-masking of test tone impulses as a function of their duration.

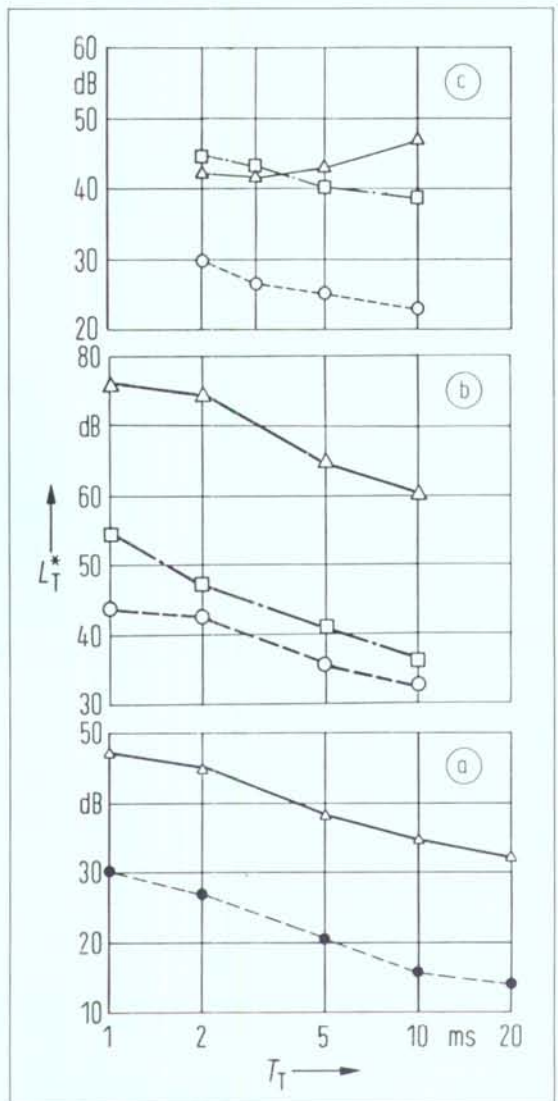
(a) Broad band noise masker. delay time $t_V = 20$ ms, $L_M^* = 60$ dB, $\Delta f_M = 16$ kHz, $T_M = 500$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $f_T = 8$ kHz. Filled circles: thresholds in quiet of test tone impulses of duration T_T .

(b) Narrow band noise masker. $L_M^* = 70$ dB $f_M = 8,5$ kHz, $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_M = 500$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $t_V = 10$ ms, $f_T = 6,5, 8,5$ und 11 kHz,

(c) Pure tone masker. $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz, $T_M = 300$ ms, $T_{RG} = 1$ ms, $t_V = 12$ ms, $f_T = 3,5, 4$ und $5,5$ kHz. Symbols same as in Fig. 1

(triangles in Fig. 2c). This latter effect obviously represents an artifact since for $T_T = 10$ ms there is no temporal gap between the end of the masker and the start of the test tone and the test tone is no longer perceived as a separate event (Zwicker and Feldtkeller, 1967, p. 208, Moore, 1980, Fastl, 1980).

Fig. 3 shows the spectral distribution of psychoacoustic excitation during its decay. The level L_T^* of the test



der Tonheit z als auch der Testtonfrequenz f_T dargestellt.

Die Dreiecke in Abb. 3a beziehen sich auf die Simultanverdeckung, Kreise auf die Nachverdeckung und die Quadrate repräsentieren die Ruhehörschwelle. Wie bereits oben erwähnt, hängt die Nachverdeckung wieder wesentlich von der Pegeldifferenz zwischen der Si-

tone impulses is plotted as a function of both critical band rate z and test tone frequency f_T .

The triangles in Fig. 3a refer to simultaneous masking, the circles to post-masking and the squares represent the threshold in quiet. Again, post-masking depends crucially on the level difference between simultaneous masking and threshold in quiet: the larger this level dif-

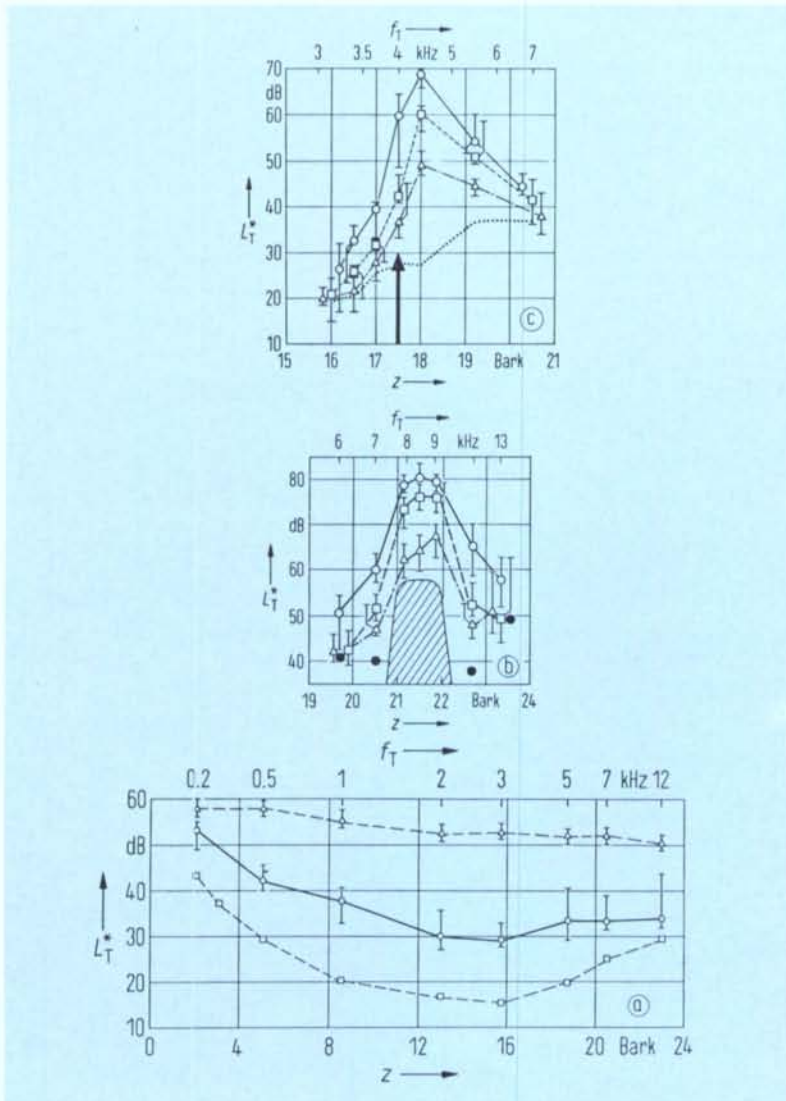


Abb. 3 Nachverdeckung von Testtonimpulsen als Funktion ihrer Frequenz.

Fig. 3 Post-masking of test tone impulses as a function of their frequency.

(a) Breitbandrauschen als Maskierer,
 $L_M^* = 60$ dB, $\Delta f_M = 16$ kHz,
 $T_M = 500$ ms, $T_T = 10$ ms,
 $T_{rG} = 2$ ms, $t_V = 12$ ms (Kreise).
 Dreiecke: Simultanverdeckung,
 Quadrate: Ruhehörschwellen der
 Testtonimpulse.

(b) Schmalbandrauschen als Maskierer.
 $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 8,5$ kHz,
 $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_M = 500$ ms,
 $T_T = 1$ ms, $T_{rG} = 0,5$ ms,
 $t_V = 3$ ms (Kreise), 11 ms (Qua-
 drate) und 31 ms (Dreiecke).
 Punkte: Ruhehörschwellen der
 Testtonimpulse
 gestrichelt: Spektralverteilung des
 Maskierers.

(c) Sinuston als Maskierer,
 $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz,
 $T_M = 300$ ms, $T_T = 2$ ms,
 $T_{rG} = 1$ ms, $t_V = 2$ ms (Kreise),
 10 ms (Quadrate) und 30 ms (Drei-
 ecke). Gepunktet: Ruhehörschwel-
 le der Testtonimpulse,
 Pfeil: Position des Maskierers

(a) Broad band noise masker.
 $L_M^* = 60$ dB, $\Delta f_M = 16$ kHz,
 $T_M = 500$ ms, $T_T = 10$ ms,
 $T_{rG} = 2$ ms, $t_V = 12$ ms (circles).
 triangles: simultaneous masking,
 squares: thresholds in quiet of
 test tone impulses.

(b) Narrow band noise masker.
 $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 8,5$ kHz,
 $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_M = 500$ ms,
 $T_T = 1$ ms, $T_{rG} = 0,5$ ms,
 $t_V = 3$ ms (circles) 11 ms (squa-
 res) and 31 ms (triangles).
 dots: threshold in quiet of test to-
 ne impulses,
 hatched: spectral distribution of
 masker.

(c) Pure tone masker.
 $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz,
 $T_M = 300$ ms, $T_T = 2$ ms,
 $T_{rG} = 1$ ms, $t_V = 2$ ms (circles),
 10 ms (squares) and 30 ms (tri-
 angles).
 dotted: threshold in quiet for test
 tone impulses,
 arrow: position of pure tone
 masker

multanverdeckung und der Ruhehörschwelle ab: Je größer diese Pegeldifferenz ist, desto niedriger liegt die Nachhörschwelle. Da alle Nachhörschwellen für die gleiche Verzögerungszeit bestimmt wurden, bedeutet dies, daß mit zunehmender Pegeldifferenz steilere Abklingkurven auftreten. Danach zeigt die Abb. 3b Nachhörschwellen-Tonheitsmuster eines Schmalbandrauschens als Maskierer. Mit zunehmender Verzögerungszeit sinkt das Mithörschwellenmuster nicht nur ab, sondern es wird auch frequenzselektiver und sein Maximum verschiebt sich nach höheren Frequenzen. Der letztgenannte Effekt zeigt sich sogar noch ausgeprägter für maskierende Sinustöne (Abb. 3c). Bei allen untersuchten Verzögerungszeiten liegt das Maximum des Nachhörschwellen-Tonheitsmusters bei 4,4 kHz Testtonfrequenz und nicht bei 4 kHz, der Maskierfrequenz. Ähnliche Effekte wurden von Verschuure et al. (1983) für Pulsationsschwellenmuster berichtet.

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der Nachverdeckung vom Schallpegel des Maskierers. Die Kreuze in Abb. 4a repräsentieren Simultanhörschwellen ($t_v = -98$ ms), d. h., die Testtonimpulse werden während der Dauer des Maskierers dargeboten und nicht nach seinem Ende. Wie zu erwarten, nimmt in diesem Fall die Mithörschwelle jeweils um 10 dB zu, wenn der Pegel des Maskierers um 10 dB ansteigt.

Bei der Nachverdeckung steigt jedoch die Nachhörschwelle um weniger als 10 dB an, wenn der Maskierpegel um 10 dB gesteigert wird. Dieser Effekt wird mit

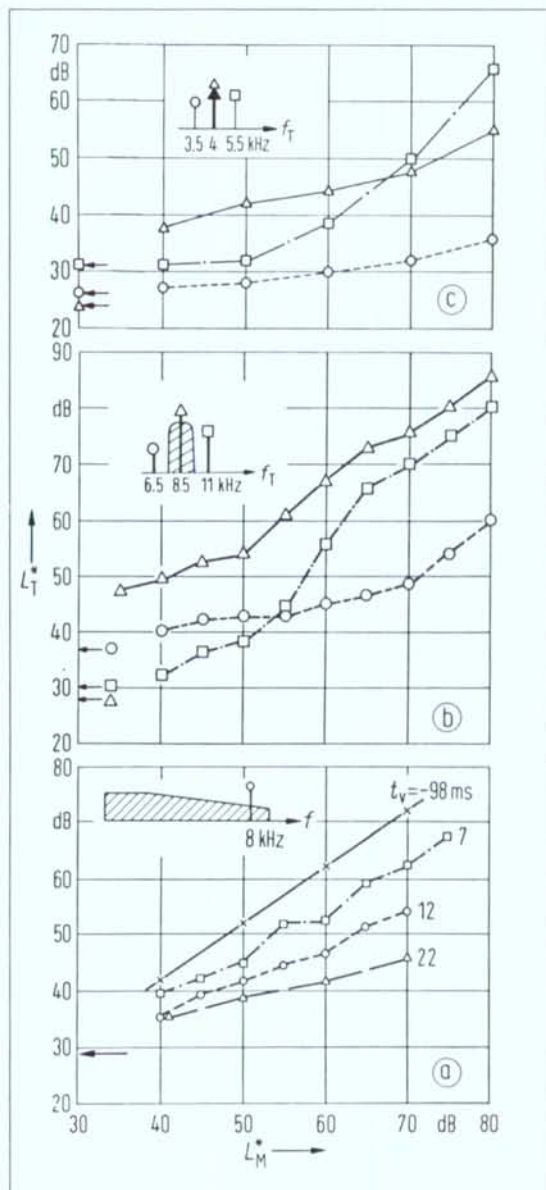
Abb. 4 Nachverdeckung von Testtonimpulsen als Funktion des Maskiererspegels.

(a) Breitbandrauschen als Maskierer, $\Delta f_M = 16$ kHz, $T_M = 500$ ms, $f_T = 8$ kHz, $T_T = 2$ ms, $T_{rG} = 1$ ms, $t_v = -98$ ms (Kreuz), 7 ms (Quadrate), 12 ms (Dreiecke) und 22 ms (Dreiecke).
 (b) Schmalbandrauschen als Maskierer, $f_M = 8,5$ kHz, $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_M = 500$ ms, $T_T = 1$ ms, $T_{rG} = 0,5$ ms, $t_v = 5$ ms, $f_T = 6,5, 8,5$ und 11 kHz.
 (c) Sinuston als Maskierer, $f_M = 4$ kHz, $T_M = 300$ ms, $T_T = 2$ ms, $T_{rG} = 1$ ms, $t_v = 5$ ms, $f_T = 3,5, 4$ und 5,5 kHz, Pfeile: Ruhehörschwellen der Testtonimpulse

Fig. 4 Post-masking of test tone impulses as a function of masker level.

(a) Broad band noise masker.
 $\Delta f_M = 16$ kHz, $T_M = 500$ ms, $f_T = 8$ kHz, $T_T = 2$ ms, $T_{rG} = 1$ ms, $t_v = -98$ ms (crosses) 7 ms (squares), 12 ms (circles) and 22 ms (triangles).
 (b) Narrow band noise masker.
 $f_M = 8,5$ kHz, $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_M = 500$ ms, $T_T = 1$ ms, $T_{rG} = 0,5$ ms, $t_v = 5$ ms, $f_T = 6,5, 8,5$ and 11 kHz.
 (c) Pure tone masker.
 $f_M = 4$ kHz, $T_M = 300$ ms, $T_T = 2$ ms, $T_{rG} = 1$ ms, $t_v = 5$ ms, $f_T = 3,5, 4$ and 5,5 kHz, Arrows: thresholds in quiet of test tone impulses

reference, the lower post-masked threshold. Since all post-masked thresholds were obtained at the same delay time this means that with increasing level difference steeper decay curves are found. Fig. 3b shows post-masking patterns of a narrow band noise masker. With increasing delay time the masking pattern does not on-



zunehmender Verzögerungszeit immer ausgeprägter. Beispielsweise bewirkt bei $t_V = 22$ ms ein Anstieg des Maskiererpegels um 30 dB einen Anstieg der Nachhörschwelle von lediglich 11 dB.

Die Steilheit der Abklingkurve nimmt mit abnehmendem Maskiererpegel ab (Vgl. *Plomp 1964, Stein 1960*). Dies bedeutet, daß die »Zeitkonstante« des Abklingvorgangs im Gehör mit abnehmendem Maskiererpegel zunimmt. In einer vergleichbaren, ebenfalls nichtlinearen Art und Weise hängt die Abklingcharakteristik des Gehörs von der Modulationstiefe des Maskierers ab (*Stein 1960, Fastl 1978, Zwicker 1984*). Im Gegensatz dazu hängt das Abklingverhalten von Schallen in Räumen, das durch die Nachhallzeit charakterisiert wird, weder vom Pegel noch von der Modulationstiefe ab. Deshalb wird in akustisch »trockenen« Räumen mit kurzer Nachhallzeit die »effektive«, für das Gehör relevante Nachhallzeit sowohl vom Pegel als auch von der Modulationstiefe der Schalle abhängen (*Fastl 1978*).

Abb. 4b zeigt, daß die Nachhörschwelle im Kern, bzw. an den Flanken eines schmalbandigen Maskierers in unterschiedlicher Art und Weise ansteigt. Im Kern und an der unteren Flanke des Maskierers steigt die Nachhörschwelle um weniger als 10 dB an, wenn der Maskiererpegel um 10 dB erhöht wird. An der oberen Flanke nimmt jedoch die Nachhörschwelle um bis zu 27 dB zu, wenn der Pegel des Maskierers um 10 dB abgehoben wird. Dieses nichtlineare Verhalten der oberen Flanke des Mithörschwellen-Tonheitsmusters von Schmalbandrauschen ist für die Simultanverdeckung seit langer Zeit bekannt (vgl. *Zwicker und Feldtkeller 1967*).

Abb. 4c zeigt die Abhängigkeit an Nachverdeckung vom Maskiererpegel für einen maskierenden Sinuston. Auch hier kann an der oberen Flanke des Mithörschwellen-Tonheitsmusters (Quadrate) ein steiler Anstieg der Nachhörschwelle mit dem Maskiererpegel beobachtet werden. Darüber hinaus liegen für hohe Maskiererpegel die Nachhörschwellen bei 5,5 kHz oberhalb der Schwellen bei 4 kHz. Dies bedeutet, daß während des Abklingens des Mithörschwellen-Tonheitsmusters eines maskierenden Sinustones sich das Maximum des Musters in die Richtung höherer Frequenzen verschiebt, wie dies für maskierende Schmalbandrauschen oben bereits gezeigt wurde.

Abb. 5 zeigt die Abhängigkeit der Nachverdeckung von der Maskiererdauer. Wenn die Maskiererdauer verkürzt wird, bleibt die Nachhörschwelle bis zu einer Dauer von etwa 50 ms nahezu konstant. Für kürzere Maskierer nimmt die Nachhörschwelle mit abnehmender Maskiererdauer ebenfalls ab. Dieser Effekt findet sich bei allen drei Maskierertypen mit Ausnahme der

ly decay but in addition gets more sharply tuned and its maximum shifts towards higher frequencies. This latter effect is even more pronounced for pure tone masker (Fig. 3c). At all delay times investigated the maxima of the post-masking patterns lie at 4.4 kHz test tone frequency and not at 4 kHz, the masker frequency. Recently, similar effects were reported by *Verschuure et al.* (1983) for pulsation patterns.

Fig. 4 shows the dependence of post-masked threshold on masker level. The crosses in Fig. 4a indicate threshold values found in simultaneous masking ($t_V = -98$ ms), i. e. the test tone impulses occur during the presentation of the masker and *not* after its termination. As expected, in this case masked threshold increases by 10 dB for each increase of 10 dB in masker level. In post-masking, however, masked threshold increases by less than 10 dB for a 10 dB increase in masker level. This effect becomes more prominent with increasing delay time. For example at $t_V = 22$ ms an increase in masker level of 30 dB causes an increase in masked threshold of only 11 dB.

The steepness of the decay curve decreases with decreasing masker level (e. g. *Plomp 1964, Stein 1960*), i. e. the "time constant" of the ear's decay increases with decreasing masker level. In a similar nonlinear manner, the ear's decay depends on the modulation depth of the masker (*Stein 1960, Fastl 1978, Zwicker 1984*). In contrast, the decay of sound in rooms as characterized by the reverberation time does not depend on level and modulation depth. Therefore, in an acoustically "dry" room with small reverberation, the "effective" reverberation time relevant for the ear depends both on the level and the modulation depth of the sound (*Fastl 1978*).

Fig. 4b shows that post-masked threshold increases with masker level in a different manner in the center and at the slopes of a narrow band noise masker. In the center and at the lower slope masked threshold increases by less than 10 dB for 10 dB masker increase. At the upper slope, however, post-masked threshold increases up to 27 dB for 10 dB masker increase. This nonlinear behaviour of the upper slope of the masking pattern of narrow band noise is well known from simultaneous masking (e. g. *Zwicker and Feldtkeller 1967*). Fig. 4c shows the dependence of post-masked threshold on masker level for a pure tone masker. Again, at the upper slope of the masking pattern (squares) a steep increase of masked threshold with masker level can be observed. Moreover, at high masker level, post-masked thresholds at 5.5 kHz lie above thresholds at 4 kHz. This means that during the decay of the masking pattern of a pure tone masker, a shift of its maximum towards higher frequencies shows up

unteren Flanke des maskierenden Schmalbandrauschens und des maskierenden Sinustones, wo die Ruheshwelle fast erreicht wird. Für maskierende Sinustöne (Abb. 5c) ist die Abnahme der Nachhörschwelle mit abnehmender Maskiererdauer weniger ausgeprägt als für maskierende Rauschen. Wenn für kurze Maskierer (z. B. $T_M = 10$ ms) Abklingkurven gezeichnet werden, die den in Abb. 1 gezeigten entsprechen, so zeigen sich für die kurzen Maskierer steilere Abklingkurven (Zwicker und Fastl 1972, Zwicker 1984). Dieses

as was reported above for narrow band noise masker, too.

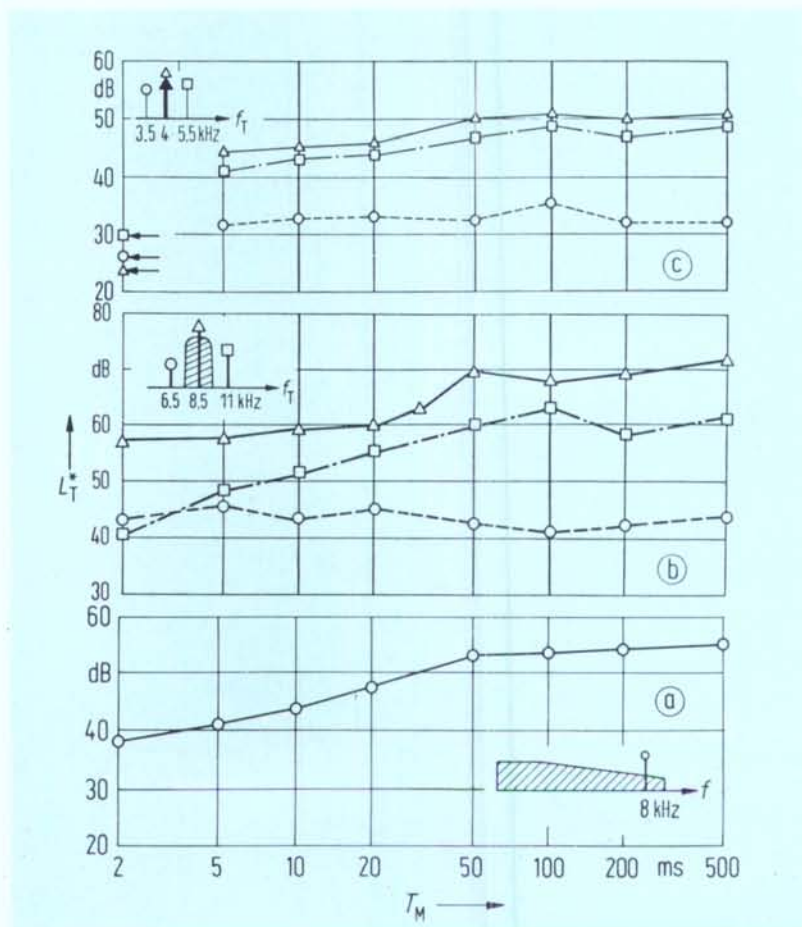
Fig. 5 illustrates the dependence of post-masking on masker duration. When shortening masker duration, post-masked threshold remains unaffected until a masker duration of about 50 ms is reached. For shorter maskers, post-masked threshold decreases with decreasing masker duration. This effect is found for all three types of masker except at the lower slope of narrow

Abb. 5 Nachverdeckung von Testtonimpulsen als Funktion der Dauer des Maskierers.

(a) Breitbandrauschen als Maskierer, $L_M^* = 60$ dB, $\Delta f_M = 16$ kHz, $t_y = 10$ ms, $T_T = 1$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $f_T = 8$ kHz.
 (b) Schmalbandrauschen als Maskierer, $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 8,5$ kHz, $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_T = 1$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $t_v = 5$ ms, $f_T = 6,5, 8$ und 11 kHz.
 (c) Sinuston als Maskierer, $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz, $T_T = 2$ ms, $T_{RG} = 1$ ms, $t_y = 5$ ms, $f_T = 3,5, 4$ und $5,5$ kHz, Pfeile: Ruheshwellen der Testtonimpulse

Fig. 5 Post-masking of test tone impulses as a function of masker duration.

(a) Broad band noise masker. $L_M^* = 60$ dB, $\Delta f_M = 16$ kHz, $t_y = 10$ ms, $T_T = 1$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $f_T = 8$ kHz.
 (b) Narrow band noise masker. $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 8,5$ kHz, $\Delta f_M = 1800$ Hz, $T_T = 1$ ms, $T_{RG} = 0,5$ ms, $t_v = 5$ ms, $f_T = 6,5, 8$ and 11 kHz.
 (c) Pure tone masker. $L_M^* = 70$ dB, $f_M = 4$ kHz, $T_T = 2$ ms, $T_{RG} = 1$ ms, $t_y = 5$ ms, $f_T = 3,5, 4$ and $5,5$ kHz, Arrows: thresholds in quiet of test tone impulses



Verhalten repräsentiert eine weitere Nichtlinearität der Nachverdeckung.

band noise masker and pure tone masker where the threshold in quiet is almost reached. For pure tone masker (Fig. 5 c) the decrease of post-masked threshold with masker duration is less pronounced than for the noise maskers. When plotting decay functions similar to those depicted in Fig. 1 but for short maskers (e. g. $T_M = 10$ ms) steeper decay functions are found (Zwicker and Fastl 1972, Zwicker 1984). This behaviour constitutes another nonlinearity in post-masking.

Literatur/References

- Davis, H.; Silverman, S. R.: Hearing and deafness. 4. Ed. Holt, Rinehart and Winston, New York (1978). DIN 45621 Wörter für Gehörprüfung mit Sprache.
- Elliott, L. L.: Backward and forward masking. *Audiol.* 10: 65- (1971).
- Fastl, H.: Temporal masking effects: I. Broad band noise masker. *Acustica* 35: 287-302 (1976).
- Fastl, H.: Temporal masking effects: II. Critical band noise masker. *Acustica* 36: 317-331 (1977).
- Fastl, H.: Reverberation and post-masking. In: Proc. FASE 78, Vol. III: 37-40 (1978).
- Fastl, H.: Temporal masking effects: III. Pure tone masker. *Acustica* 43: 282-294 (1979).
- Fastl, H.: Comment on detection cues in forward masking. In: Psychophysical, physiological and behavioural studies in hearing, (G. v. d. Brink and F. A. Bilsen, Eds.) Delft University Press (1980).
- Fastl, H.; Schorn, K.: Discrimination of level differences by hearing-impaired patients. *Audiology* 20: 488-502 (1981).
- Florentine, M.; Buus, S.; Scharf, B.; Zwicker, E.: Frequency selectivity in normally hearing and hearing-impaired observers. *J. Speech Hear. Res.* 23: 646-669 (1980).
- Hirsh, I. J.: The measurement of hearing. Mc Graw Hill, New York (1952).
- Lehnhardt, E.: Praktische Audiometrie, 5. Ed. Thieme (1978).
- Moore, B. C. J.: Detection cues in forward masking. In: Psychophysical, physiological and behavioural studies in hearing, (G. v. d. Brink and F. A. Bilsen, Eds.) Delft University Press (1980).
- Niemeyer, W.; Beckmann, G.: Ein sprachaudiometrischer Satztest. *Arch. Ohr.-Nas.- u. Kehlk.-Heilk.* 180: 742 (1962).
- Pickett, J. M.: Backward masking. *J. Acoust. Soc. Am.* 31: 1613- (1959).
- Plomp, R.: Rate of decay of auditory sensation. *J. Acoust. Soc. Am.* 36: 277- (1964).
- Stein, H. J.: Das Absinken der Mithörschwelle nach dem Abschalten von Weißem Rauschen. *Acustica* 10: 116-119 (1960).
- Verschuure, J.; Kroon, J. N.; Brocaar, M. P.: Decay of pulsation threshold patterns. In: Hearing — Physiological Bases and Psychophysics (R. Klinke and R. Hartmann, Eds.), Springer Berlin (1983).
- Ward, W. D.: Adaptation and Fatigue in: Modern Developments in Audiology (J. Jerger, Ed.) Academic Press New York (1973).
- Zwicker, E.: Masking period patterns of harmonic complex tones. *J. Acoust. Soc. Am.* 60: 429-439 (1976).
- Zwicker, E.: A device for measuring the temporal resolution in the ear. *Audiological Acoustics* 19: 94-108 (1980).
- Zwicker, E.: Dependence of post-masking on masker duration and its relation to temporal effects in loudness. *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 219-223 (1984).
- Zwicker, E.; Fastl, H.: Zur Abhängigkeit der Nachverdeckung von der Störimpulsdauer. *Acustica* 26: 78-82 (1972).
- Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. erweiterte Auflage, Hirzel-Verlag Stuttgart (1967).
- Zwicker, E.; Schorn, K.: Psychoacoustical tuning curves in audiology. *Audiology* 17: 120-140 (1978).
- Zwicker, E.; Schorn, K.: Temporal resolution in hard-of-hearing patients. *Audiology* 21: 474-492 (1982).