

Untersuchungen zu Normalbereich und Reproduzierbarkeit psychoakustischer Tuningkurven

Robert Linke^{1, 2}, Heinrich Georg Demus²,
Reinhard Matschke, Ernst-Jürgen Haberland²

Zusammenfassung Ein normales Hörvermögen setzt voraus, daß neben der Hörschwelle auch verschiedene psychoakustische Größen, wie beispielsweise das Frequenzselektionsvermögen (FSV), unbeeinträchtigt sind. Unter FSV versteht man die Fähigkeit des Gehörs, mehrere unterschiedlich hohe Töne gleichzeitig getrennt wahrzunehmen. Eine Methode zur Bestimmung des FSV ist die Aufzeichnung psychoakustischer Tuningkurven (pTK). Die Ergebnisse der Normwertbestimmung anderer Autoren differieren leicht und erfordern deshalb eine weitere Untersuchung. Die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse wurde bisher nicht eingehender untersucht.

Es wurden bei 20 normalhörenden jugendlichen Erwachsenen im Alter von 18 bis 25 Jahren je 2 pTK aufgezeichnet. Bei 10 Probanden wurde die Messung 4mal wiederholt, um eine Aussage zur Reproduzierbarkeit der Messung zu erhalten. Der Einfluß der inter- und intraindividuellen Abweichungen auf die Selektivitätsgröße C nach Demus (1987, 1992) wird untersucht. Es zeigt sich, daß die Normalwerte ohrgesunder jugendlicher Erwachsener interindividuell in relativ weiten Grenzen schwanken. Die Reproduzierbarkeit der Messung bei einer einzelnen Versuchsperson dagegen ist als gut einzuschätzen. Die hohe Reproduzierbarkeit läßt die Methode zur Verlaufskontrolle bei bestimmten Erkrankungen des Innenohres, bei Applikation ototoxischer Medikamente oder auch im Rahmen eines Glyceroltests als sehr gut geeignet erscheinen.

Schlüsselwörter: Frequenzselektionsvermögen;
psychoakustische Tuningkurven;
Psychoakustik;
audiologisches Monitoring;
Audiometrie

¹ Hals-Nasen-Ohren-Klinik, Klinikum Schwerin (Chefarzt: Dr. med. H. Wiegels)

² Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten, Gesichts- und Halschirurgie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Direktor: Prof. Dr. med. A. Berghaus)

Normal range and reproducibility of psychoacoustic tuning curves

Summary *Normal hearing includes not only a normal hearing threshold but also normal psychoacoustic parameters, e.g. frequency selectivity. Frequency selectivity is the ability to separate one pure tone from another when these are presented to the listener at the same time. Frequency selectivity can be examined by different methods. A very common method of analysing frequency selectivity is to measure the psychoacoustic tuning curves (PTC) that are used in this study. In order to evaluate PTC, a very soft test tone at a constant frequency is concealed by masker tones at increasing levels of 6 different frequencies one after another. PTC were measured at test tone frequencies of 500 and 4000 Hz. There are distinct differences in the results of normal PTC analysis by other authors. Further evaluation is therefore obviously needed. The reproducibility of the measurement has still to be examined in detail.*

PTC were measured twice in 20 normal hearing young adults, aged between 18 and 25 years (10 male, 10 female). In 10 of them, the measurement was repeated 4 times in order to obtain information on the reproducibility of the measurement. The PTC were also characterised by the coefficient C by Demus (1987, 1992). Results showed a wide range of normal PTC. However, the reproducibility of the measurement in an individual proved very good. Because of the good reproducibility, the measurement of PTC could be very useful in the audiological monitoring of different diseases of the inner ear, as well as during the application of ototoxic drugs, or also as a new criterion in the glycerol test.

Key words: *frequency selectivity
psychoacoustic tuning curves
psychoacoustics
audiological monitoring
audiometry*

Einleitung

Unter Frequenzselektionsvermögen (FSV) versteht man die Fähigkeit des Gehörs, mehrere unterschiedlich hohe Töne gleichzeitig getrennt wahrzunehmen (Florentine et al., 1980). Bereits in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts wurden die ersten Maskierungsexperimente durchgeführt (Wegel und Lane, 1924). Damit wurde dem Faktor Rechnung getragen, daß von einem normalen Hörvermögen nur dann gesprochen werden kann, wenn neben der Hörschwelle auch verschiedene psychoakustische Größen, wie beispielsweise das FSV, unbeeinträchtigt sind.

Das FSV ist deutlich zu unterscheiden von der Frequenzunterschiedsschwelle. Diese ist die minimale Frequenzänderung aufeinanderfolgender Reize, die notwendig ist, um diese Änderung wahrzunehmen (Böhme und Welz-Müller, 1984). Für die Beurteilung des sozialen Hörvermögens ist das FSV von großer Bedeutung, da es die Fähigkeit beschreibt, aus der Vielzahl der umgebenden Geräusche ein Nutzsignal herauszuhören. Ein gestörtes FSV führt über eine schlechtere Formantenerkennung zu einem gestörten Sprachverständnis (Demus, 1987). In der Literatur wird nach übereinstimmender Ansicht verschiedener Autoren angenommen, daß das FSV vor allem an die Tätigkeit der äußeren Haarzellen gekoppelt ist (Bonding, 1976; Klinke, 1987; Schorn et al., 1977; Schorn und Zwicker, 1990; Zenner, 1986; Zwicker, 1974, 1982).

Das FSV kann mittels physiologischer und mittels psychoakustischer Methoden untersucht werden: z. B. mit Ableitungen aus verschiedenen Abschnitten der Hörbahn (Dallos und Santos-Sacchi, 1982; Kiang und Moxon, 1974; Kiang et al., 1967, 1970; Russell und Sellick, 1978; Sellick und Russell, 1980; Zenner, 1986) und mit Verdeckungs-Experimenten (Demus, 1987; Florentine et al., 1980; Zwicker, 1954, 1982; Zwicker und Feldtkeller, 1955, 1967).

Eine Methode ist die auf Zwicker (1974) zurückgehende Aufzeichnung psychoakustischer Tuningkurven (pTK). Eine pTK erhält man, indem ein leiser und frequenzkonstanter Testton nacheinander durch verschiedene pegelveränderliche Maskierertöne anderer Frequenzen verdeckt wird. Ein gutes FSV besteht, wenn hohe Maskierertonpegel zur Verdeckung des Testtones benötigt werden.

Material und Methode

Apparatur und Meßverfahren

Die Untersuchungen wurden mit einem vorschriftsgemäß geeichten Gerät Sipat (0-Serie der Firma Siemens) in einer schallisolierten Audiometrikabine durchgeführt. Das Gerät basiert auf den Erkenntnissen von Zwicker (1974).

Das Gerät (Abb. 1) liefert über seinen Kanal 1 den Testton. Der Testton ist ein periodischer Tonburst von jeweils 0,5 Sekunden Dauer im Wechsel mit einer Pause von ebenfalls 0,5 Sekunden.

Er ist in 5 dB-Schritten zwischen 0 und 115 dB einstellbar. Der Meßplatz ermöglicht die Aufzeichnung von pTK bei den Testtonfrequenzen 500 und 4 000 Hz.

Über Kanal 2 wird der Maskiererton zugeleitet. Dieser ist ein Dauerton und zwischen 0 und 115 dB in 5 dB-Schritten einstellbar. Für einen Testton von 500 Hz wird er bei 215, 390, 460, 540, 615 und 740 Hz, für einen Testton von 4 000 Hz bei 1 720, 3 120, 3 680, 4 320, 4 920 und 5 920 Hz generiert.

Beide Reize werden simultan über den gleichen Kopfhörer abgegeben. Über den zweiten Kopfhörer ist die Einspielung eines Vertäubungsgeräuschs möglich.

Der Meßvorgang im einzelnen:

- Beginn an der Testtonfrequenz 500 Hz.
- Nach Bestimmung der Hörschwelle wird der Testton mit einer Lautstärke von 10 dB SL und gepulst über Kopfhörer angeboten.
- Danach wird zusätzlich zum Testton ein leiser Maskiererton eingespielt, der in seinem Pegel in 5 dB-Schritten so lange erhöht wird, bis die Versuchsperson angibt, daß der Testton gerade unhörbar wird.
- Die Messung wird an jeder Testtonfrequenz mit dem jeweils



Abb. 1: Gerät »Sipat« von Siemens zur Aufzeichnung von pTK

Fig. 1: Siemens »Sipat« for PTC measurement

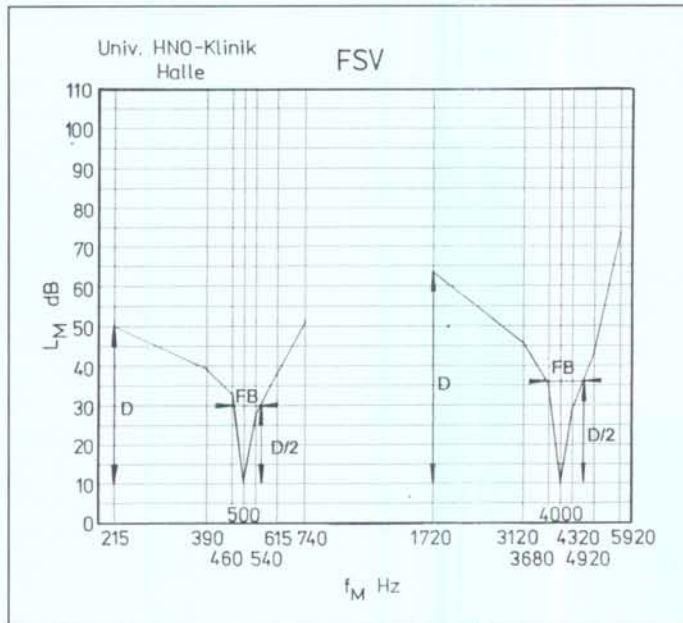


Abb. 2: Meßblatt der Universitäts-HNO-Klinik Halle mit Normkurven und den zur C-Wert-Bestimmung erforderlichen Größen ($L_T = 10 \text{ dB HL}$; verkleinerte Meßblattdarstellung)

Fig. 2: Form used by the University Department of Otorhinolaryngology of Halle, showing normal PTC and the parameters which are essential for the evaluation of C (test tone level = 10 dB HL; reduced scale)

tiefsten Maskiererton begonnen und mit dem jeweils folgenden höherfrequenten fortgesetzt.

Der Meßvorgang dauert für beide Ohren insgesamt etwa 30 min. Trägt man die zur Verdeckung des Testtones erforderlichen Maskierpegel L_M (in dB HL) als Funktion der Maskierfrequenz f_M in einem doppelt logarithmischen x-y-Diagramm auf, erhält man v-förmige Kurven (Abb. 2). Bei gutem FSV werden hohe Maskierpegel zur Verdeckung des Testtones benötigt, die erhaltene Kurve ist spitz und besitzt steile Flanken. Bei schlechtem FSV ist sie flach.

Eine in der täglichen Routine durchzuführende Untersuchung darf weder zu zeitaufwendig sein noch zu große Anforderungen an den Patienten stellen. Deshalb werden die Untersuchungen nach nur kurzer Übungsfrist für den Patienten durchgeführt. Auf generelles Eingabeln wird aus Gründen der Praxistauglichkeit ebenfalls verzichtet.

Wichtig ist, daß sich der Proband bzw. Patient einzig auf den gepulst dargebotenen Testton konzentriert. Das erhaltene Meßergebnis wird von Mitarbeit und Motivation des Probanden beeinflusst und erfordert eine hohe Qualifikation der Audiometristin.

Probanden

Als Probanden stellten sich jeweils 10 junge Frauen und Männer im Alter von 18 bis 25 Jahren (Durchschnittsalter der Männer 21,4, der Frauen 21,2 Jahre) zur Verfügung. Alle Probanden waren anamnestisch ohrgesund und familiär nicht mit hereditären Schwerhörigkeiten belastet, frei von systemischen Erkrankungen, weder im Beruf noch in der Freizeit Lärm ausgesetzt und wiesen bei regelrechtem Spiegelbefund ein normales Tonschwellenaudiogramm auf.

Auswertung der Messungen

Bei den männlichen Probanden wurden jeweils zweimal pTK an beiden Testtonfrequenzen aufgezeichnet. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen bei individuell variierendem Testtonpegel (Meßergebnis in dB HL) zu erreichen, wird für jede Messung und jede Maskierfrequenz die Differenz von erforderlichem Maskierer- und individuellem Testtonpegel errechnet (Differenzpegel ΔL_M). Anschließend werden aus ΔL_M die individuellen Mittelwerte $\Delta_i L_M$ jedes Probanden und aus diesen die in der Gesamtprobandengruppe erforderlichen mittleren Differenzpegel $\Delta_g L_M$ mit der zugehörigen Standardabweichung $SD\Delta_g L_M$ für jede Maskierfrequenz ermittelt. $SD\Delta_g L_M$ gibt Auskunft über die interindividuelle Schwankungsbreite von ΔL_M an den einzelnen Maskierfrequenzen und damit über die Formvarianten der pTK bei Normalhörenden.

Bei den weiblichen Probanden wurde die gleiche Methode mit jeweils 4 Messungen angewandt, um zusätzlich eine Aussage zur Reproduzierbarkeit der Messung zu erhalten. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der mittleren individuellen Standardabweichung $SD\Delta_i L_M$ vom Differenzpegel $\Delta_i L_M$ an jeder Maskierfrequenz. Dieses $SD\Delta_i L_M$ stellt ein Maß für die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse dar.

Anhand der Meßergebnisse des Probandenkollektivs wird der Normbereich der pTK-Werte für 18- bis 25jährige in der Gesamtbevölkerung statistisch geschätzt und es werden die 95%-Konfidenzintervalle für die Mittelwerte der Differenzpegel ΔL_M und der $SD\Delta_i L_M$ in der normalhörenden Bevölkerung zwischen 18 und 25 Jahren errechnet (Adam, 1992).

Der Einfluß von $SD\Delta_g L_M$ und $SD\Delta_i L_M$ auf das Verhalten der Selektivitätsgröße C nach Demus (1987, 1992; Demus et al., 1995; Linke et al., 1998) wird bestimmt. Die Einwertangabe C zur Charakterisierung der pTK errechnet sich als Quotient aus:

- D, dem höchsten Maskierpegel, der sowohl auf dem hoch- als auch auf dem tieffrequentem Ast benötigt wurde, und
- FB, der Frequenzbreite der pTK in halber Höhe von D (als Oktavangabe).

$$C = D \text{ (dB)} / \text{FB (Okt)} = D \text{ (dB)} / \log_2 (f_o / f_u)_2 \text{ (Okt)}$$

f_o – Frequenz des Meßpunktes des höherfrequenten Schenkels der pTK in der Höhe D/2

f_u – Frequenz des Meßpunktes des tieferfrequenten Schenkels der pTK in der Höhe D/2 (Abb.2)

C ist bei gutem FSV hoch, bei schlechtem niedrig. Vereinfachend kann C ohne Dimension angegeben werden, wie auch von Demus (1987, 1989) teilweise praktiziert. Die Auswertung der Kurven erfolgt ausnahmslos mit Hilfe eines Kleinrechners EMG 666³.

Nach dem Ende der Messung wurden alle Probanden zum subjektiven Erleben des Testablaufs befragt. Die Zeit zwischen den einzelnen Messungen eines jeden Probanden betrug ungefähr eine Woche, um Trainingseffekte zu reduzieren.

Ergebnisse

Normalwerte

In Abb. 3 sind $\Delta_g L_M$ und die mit Hilfe von $SD\Delta_g L_M$ errechneten Grenzen des Normalbereichs der Maskiererwerte bei einem Testtonpegel von 10 dB HL dargestellt. Die Abb. verdeutlicht die prinzipiell gleiche Form der pTK bei den Testtonfrequenzen 500 und 4 000 Hz. Es ergeben sich folgende Auffälligkeiten:

1. Die Absolutwerte der ΔL_M sind bei der 4 000 Hz-Testtonfrequenz deutlich höher.

³ Eine inzwischen vorhandene Software auf Windows®-Basis konnte in dieser Arbeit noch nicht genutzt werden.

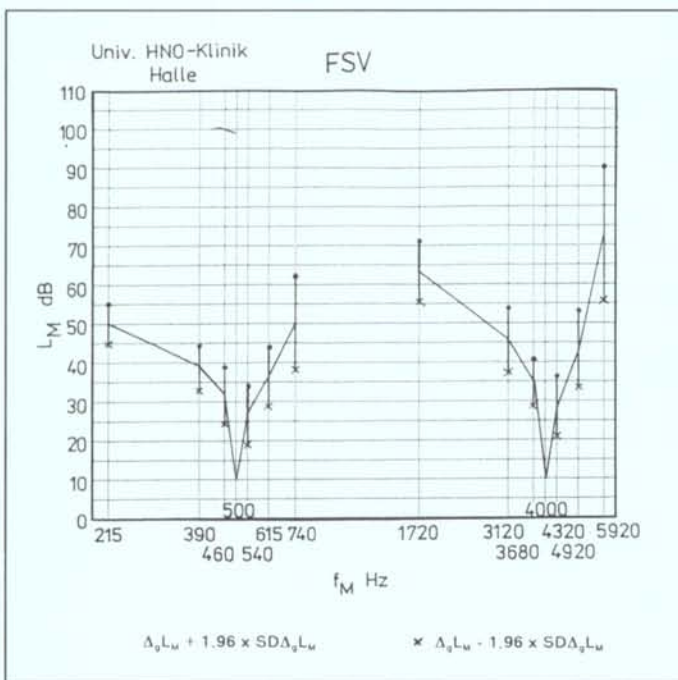


Abb. 3: Normalbereich der pTK, ermittelt aus $\Delta_g L_M$ und dem Intervall, in dem sich 95 % der Ergebnisse befinden ($L_T = 10$ dB HL; verkleinerte Meßblattarstellung)

Fig. 3: Normal range of PTC, determined from $\Delta_g L_M$ and the range of 95 % of the results (test tone level=10 dB HL; reduced scale)

2. Bei 5 920 Hz ist ein um 10 dB höherer Maskiererpegel als bei 1 720 Hz notwendig.

3. Vergleicht man die ΔL_M an den Maskierfrequenzen mit der 0,92- und 1,08fachen Testtonfrequenz, so sind für den Maskiererton mit dem 1,08fachen der Testtonfrequenz sowohl bei 500 als auch bei 4 000 Hz deutlich geringere Pegel notwendig.

4. Mit Ausnahme von Punkt 3 sind die beiden Schenkel der pTK bei der 500 Hz-Testtonfrequenz zu einer Senkrechte durch die Testtonfrequenz nahezu symmetrisch, der in Punkt 2 beschriebene Unterschied läßt die Schenkel der pTK bei der 4 000 Hz-Testtonfrequenz dagegen etwas asymmetrisch erscheinen. Diese Aussage trägt rein qualitativen Charakter. Ein absoluter Vergleich der Anstiege der niederfrequenten Schenkel der pTK wäre bei einer Ersetzung der logarithmisch geteilten Frequenzskala der Abszisse durch eine Tonheitsskala gegeben.

5. Auffällig ist weiterhin der stete Anstieg von $SD\Delta_g L_M$ mit steigender Maskierfrequenz bei der 500 Hz-Testtonfrequenz und der vergleichbar größere Anstieg dieses Wertes bei 740 und 5 920 Hz.

Die empirische Untersuchung der Häufigkeitsverteilung legt für die Stichprobe und auch für die Gesamtbevölkerung die Annahme einer Normalverteilung nahe. Unter dieser Annahme befinden sich 95 % der Meßwerte der Stichprobe von 40 Ohren in folgendem Intervall:

$$\Delta_g L_M - 1,96 \times SD\Delta_g L_M \text{ bis } \Delta_g L_M + 1,96 \times SD\Delta_g L_M$$

Beste Punktschätzung des Mittelwertes in der normalhörenden Gesamtbevölkerung im Alter zwischen 18 und 25 Jahren ist der Mittelwert der Stichprobe, beste Punktschätzung der Standardabweichung der Gesamtbevölkerung ist die Standardabweichung der Stichprobe (Tab. 1) (Adam, 1992).

Berechnet man unter Annahme einer Normalverteilung und eines ausreichenden Stichprobenumfangs den 95%-Vertrauensbereich für die Mittelwerte der ΔL_M in der Gesamtpopulation der 18- bis 25jährigen Normalhörenden, so liegen die ΔL_M in der Gesamtpopulation in einem Intervall von ± 2 dB um $\Delta_g L_M$ der Stichprobe.

Der Normalbereich von C errechnet sich aus den pTK, die sich aus

$$\Delta_g L_M - 1,96 \times SD\Delta_g L_M \text{ und } \Delta_g L_M + 1,96 \times SD\Delta_g L_M$$

ergeben (Tab. 2).

Bei der 500 Hz-Testtonfrequenz liegt dieser zwischen 99 und 241 dB/oct, bei der 4 000 Hz Testtonfrequenz zwischen 103 und 238 dB/oct.

Die aus $\Delta_g L_M$ erhaltenen C-Werte sind trotz der oben beschriebenen höheren ΔL_M bei der 4 000 Hz-Testtonfrequenz bei beiden Testtonfrequenzen nahezu gleich. Es lassen sich keine

Tab. 1: $\Delta_g L_M$ und $SD\Delta_g L_M$. Normalhörende. Grenzen des Intervalls, in dem sich 95 % der Ergebnisse für $\Delta_g L_M$ der untersuchten Stichprobe befinden

Testtonfrequenz 500 Hz / test tone frequency of 500 Hz						
Wert/ f_M	215 Hz	390 Hz	460 Hz	540 Hz	615 Hz	740 Hz
$\Delta_g L_M$ (dB)	40,1	28,9	21,9	17	26,5	40,3
$SD\Delta_g L_M$ (dB)	2,5	2,8	3,7	3,8	3,7	6,1
$\Delta_g L_M - 1,96 \times SD\Delta_g L_M$ (dB)	35,2	23,3	14,5	9,6	19,2	28,4
$\Delta_g L_M + 1,96 \times SD\Delta_g L_M$ (dB)	44,9	34,5	29,2	24,4	33,8	52,2

Table 1: $\Delta_g L_M$ and $SD\Delta_g L_M$. Normal hearing people. Range of 95 % of the results of the tested people

Testtonfrequenz 4000 Hz / test tone frequency of 4000 Hz						
Wert/ f_M	1720 Hz	3120 Hz	3680 Hz	4320 Hz	4920 Hz	5920 Hz
$\Delta_g L_M$ (dB)	53,2	35,6	24,8	18,3	33,3	63,0
$SD\Delta_g L_M$ (dB)	3,9	4,2	3,0	3,9	5,0	8,6
$\Delta_g L_M - 1,96 \times SD\Delta_g L_M$ (dB)	45,5	27,5	18,9	10,7	23,6	46,2
$\Delta_g L_M + 1,96 \times SD\Delta_g L_M$ (dB)	60,8	43,7	30,7	25,9	43,0	79,9

Tab. 2: C in Abhängigkeit vom zugrundeliegenden Maskierpegel (Normalbereich)

f_T / C	C für pTK aus $\Delta_g L_M$ (dB/oct)	C für pTK aus $\Delta_g L_M - 1,96 \times SD\Delta_g L_M$ (= untere Grenze des Normbereichs; dB/oct)	C für pTK aus $\Delta_g L_M + 1,96 \times SD\Delta_g L_M$ (= obere Grenze des Normbereichs; dB/oct)
500 Hz	163	99	241
4000 Hz	162	103	238

Table 2: C depending on masker level (normal range)

Tab. 3.1: $\Delta_g L_M$ und $SD\Delta_g L_M$ (dB). Normalhörende, weiblich

Testtonfrequenz 500 Hz / test tone frequency of 500 Hz						
Parameter/ f_T	215 Hz	390 Hz	460 Hz	540 Hz	615 Hz	740 Hz
$\Delta_g L_M$ (dB)	40,7	29,2	21,4	16,6	28,4	41,6
$SD\Delta_g L_M$ (dB)	1,74	2,48	3,54	3,81	2,73	6,06

Table 3.1: $\Delta_g L_M$ und $SD\Delta_g L_M$ (dB). Normal hearing people, female

Testtonfrequenz 4000 Hz / test tone frequency of 4000 Hz						
Parameter/ f_T	1720 Hz	3120 Hz	3680 Hz	4320 Hz	4920 Hz	5920 Hz
$\Delta_g L_M$ (dB)	52,5	34	24,6	18,6	34,2	62,1
$SD\Delta_g L_M$ (dB)	3,78	3,61	3,04	4,11	5,97	9,98

Tab. 3.2: $\Delta_g L_M$ und $SD\Delta_g L_M$ (dB). Normalhörende, männlich

Testtonfrequenz 500 Hz / test tone frequency of 500 Hz						
Parameter/ f_T	215 Hz	390 Hz	460 Hz	540 Hz	615 Hz	740 Hz
$\Delta_g L_M$ (dB)	39,5	28,6	22,3	17,4	24,5	39
$SD\Delta_g L_M$ (dB)	2,92	3,17	3,87	3,75	3,54	5,83

Table 3.2: $\Delta_g L_M$ und $SD\Delta_g L_M$ (dB). Normal hearing people, male

Testtonfrequenz 4000 Hz / test tone frequency of 4000 Hz						
Parameter/ f_T	1720 Hz	3120 Hz	3680 Hz	4320 Hz	4920 Hz	5920 Hz
$\Delta_g L_M$ (dB)	53,8	37,2	25	18	32,5	64
$SD\Delta_g L_M$ (dB)	3,92	4,02	2,96	3,59	3,45	6,82

nennenswerten Unterschiede der Form der pTK in Abhängigkeit vom Geschlecht der Probanden feststellen (Tab.3.1 und 3.2).

Reproduzierbarkeit

Die Tab. 4 enthält die intraindividuelle Standardabweichung $SD\Delta_i L_M$ für die verschiedenen Maskierfrequenzen. Die Abb. 4 zeigt die mittleren Maskiererpegel der weiblichen Probanden mit den dazugehörigen mittleren intraindividuellen Schwankungen. Die obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls für die zu erwartenden intraindividuellen Schwankungsbreiten an den einzelnen Frequenzen in der Gesamtbevölkerung liegt mit Ausnahme der Maskierfrequenzen 4 920 und 5 920 Hz etwa 1 dB über $SD\Delta_i L_M$.

Damit ist sowohl $SD\Delta_i L_M$ in der Stichprobe als auch die obere Grenze des 95%-Vertrauensbereiches für $SD\Delta_i L_M$ in der Gesamtbevölkerung mit Ausnahme der 4 920 Hz- und der 5 920 Hz-Maskierfrequenz mit ungefähr 2 bis 3 dB etwa halb so groß wie die Einstellmöglichkeit des Maskierertonpegels am Meßgerät. Auffällig ist der stete Anstieg von $SD\Delta_i L_M$ von Maskierer- zu Maskierfrequenz bei jeder der beiden Testtonfrequenzen mit einer exzessiven Erhöhung bei 5 920 Hz. Die Auswirkung der intraindividuellen Schwankungsbreite auf C ist von besonderem Interesse. Es zeigt sich bei fast unveränderten Maskiererpegeln eine deutliche Streuung von C (Tab. 5). Die intraindividuelle Streuung von C ist jedoch geringer als die interindividuelle.

Ein Zusammenhang zwischen angegebenem subjektiven Erleben und objektivem Testergebnis des einzelnen Probanden bestand nicht.

Tab. 4: $SD\Delta_i L_M$ an den einzelnen Maskierfrequenzen

Table 4: $SD\Delta_i L_M$ at the different masker frequencies

Testtonfrequenz 500 Hz / test tone frequency of 500 Hz						
f_M	215	390	460	540	615	740
	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
$SD\Delta_i L_M$ (dB)	1,4	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3

Testtonfrequenz 4000 Hz / test tone frequency of 4000 Hz						
f_M	1720	3120	3680	4320	4920	5920
	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
$SD\Delta_i L_M$ (dB)	2,2	2,9	2,2	2,9	3,7	6,3

Tab. 5: C in Abhängigkeit vom zugrundeliegenden Maskiererpegel (Reproduzierbarkeit)

Table 5: C depending on masker level (reproducibility)

T	C-Wert für pTK aus $\Delta_0 L_M$ (Frauen) (dB/oct)	C-Wert für pTK aus $\Delta_0 L_M$ (Frauen) - $SD\Delta_i L_M$ (= untere Grenze; dB/oct)	C-Wert für pTK aus $\Delta_0 L_M$ (Frauen) + $SD\Delta_i L_M$ (= obere Grenze; dB/oct)
500 Hz	158	130	187
4000 Hz	167	139	196

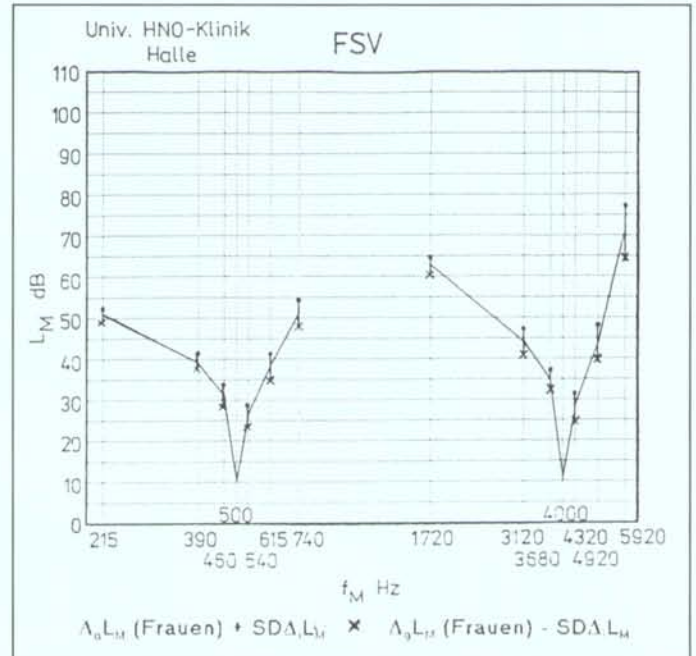


Abb. 4: Reproduzierbarkeit der pTK, dargestellt anhand $\Delta_0 L_M(F)$ und $SD\Delta_i L_M$ ($L_T = 10$ dB HL; verkleinerte Meßblattendarstellung)

Fig. 4: PTC reproducibility described by $\Delta_0 L_M(F)$ and $SD\Delta_i L_M$ (test tone level=10 dB HL; reduced scale)

Diskussion

Neben den pTK existieren noch diverse andere Versuchsanordnungen zur Bestimmung des FSV. Ein Vergleich der 4 psy-

Tab. 6: Vergleichende Übersicht der Ergebnisse von Schorn et al. (1977), Matschke (1987) und eigenen Werten, differierende Werte kursiv

Testtonfrequenz 500 Hz / test tone frequency of 500 Hz						
ΔL_M (in dB) / f_M	215 Hz	390 Hz	460 Hz	540 Hz	615 Hz	740 Hz
Schorn et al.	40	30	19	17	28	49
Matschke	38,8	28	17	14,2	26,8	48,8
eigene Ergebnisse	40,1	28,9	21,9	17	26,5	40,3

Table 6: Comparison and survey of the results of Schorn et al. (1977), Matschke (1987) and our own findings, different results italics

Testtonfrequenz 4000 Hz / test tone frequency of 4000 Hz						
ΔL_M (in dB) / f_M	1720 Hz	3120 Hz	3680 Hz	4320 Hz	4920 Hz	5920 Hz
Schorn et al.	50	39	17	13	33	60
Matschke	47,6	28,8	18,2	14,5	35,4	59
eigene Ergebnisse	53,2	35,6	24,8	18,3	33,3	63,0

choakustischen Methoden Lautstärkensummation, Schmalbandmaskierung, Zweittonverdeckung und pTK bei 500 und 4 000 Hz in verschiedenen Probandenkollektiven zeigt eine Korrelation zwischen allen 4 Methoden. Die pTK und die Schmalbandmaskierung sind jedoch besser geeignet, eine reduzierte Frequenzselektivität aufzudecken (Florentine et al., 1980).

Bei jedem verdeckungsaudiometrischen Verfahren treten unterschiedlich starke Wechselwirkungen zwischen Test- und Maskiererton auf. Zu diesen gehören nichtlineare Interaktionen zwischen Test- und Maskiererton. Solche Interaktionen sind das Auftreten von Kombinationstönen, Schwebungen und die Wirkung der lateralen Suppression. Sie sind bei Simultanverdeckung besonders stark.

Kombinationstöne treten insbesondere bei Hörverlusten von mehr als 55 dB, vor allem bei lärminduzierten hohen Hörverlusten bei 4 000 Hz und fast unbeeinträchtigtem Hörvermögen bei 500 Hz auf. Sie lassen sich durch das Hinzufügen eines low-pass-Schmalbandrauschens maskieren (Florentine et al., 1980), spielen aber bei Normalhörenden keine Rolle.

Schwebungen treten bei Annäherung der Maskierer- an die Testtonfrequenz bei Patienten mit hohen Hörverlusten auf. Durch eine phasenbezogene Technik sind sie jedoch weitgehend vermeidbar (Vogten, 1974).

Laterale Suppression bedeutet, daß die vom Testton evozierte Erregung unterdrückt wird, ohne daß der Maskiererton selbst einen Erregungseffekt hervorruft, da die starke Erregung einer Frequenz die schwächere Erregung einer Nachbarfrequenz verdeckt (Moore, 1978).

Diese Interaktionen führen zu einer scheinbar effektiveren Maskierwirkung (Wightman et al., 1977).

Daneben gibt es den sogenannten »Off-Frequency-Listening-Effekt« (OFL-Effekt). Bei Simultanverdeckung ist dieser im Vergleich zur Vorwärtsmaskierung geringer. Unter OFL-Effekt

versteht man die Optimierung des Signal-Maskierer-Abstandes durch Verschiebung des Hörfilters mit Hilfe der Fähigkeit zum bewußten Hinhören auf die Testtonfrequenz. Durch den OFL-Effekt wird die Wirkung des Maskierertons vermindert. Der OFL-Effekt wird bei Simultanmaskierung durch die Suppression des Testtones verringert (Festen und Plomp, 1983; Moore, 1978, 1985; Wightman et al., 1977).

Die nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen Test- und Maskiererton werden in dieser Untersuchung durch die Wahl geeigneter Testparameter minimiert. Bei den hier benutzten Maskierfrequenzen treten keine Schwebungen auf. Der OFL-Effekt ist durch den niedrigen Testtonpegel gering.

Die höheren Absolutwerte der $\Delta_0 L_M$ an der 4 000 Hz-Testtonfrequenz sprechen für einen besseren peripheren Filter bei 4 000 Hz. Die Tab. 6 zeigt eine vergleichende Übersicht der von Schorn et al. (1977) und Matschke (1987) angegebenen Normwerte sowie der eigenen Ergebnisse. Die erhaltenen Normkurven für 18- bis 25jährige Personen stimmen nahezu mit den von Matschke (1987) an 25 20- bis 30jährigen normalhörenden Personen und den von Schorn et al. (1977) an 15 Probanden ermittelten Normkurven überein. Dennoch bestehen zwei wichtige Unterschiede. Der gravierendste zeigt sich bei der Maskierfrequenz von 740 Hz. Hier bestimmten beide Autoren einen um jeweils 9 dB höheren Maskiererpegel. Weitere Unterschiede gibt es auf dem tieffrequenten Schenkel der pTK bei der 4 000 Hz-Testtonfrequenz. Hier werden bei Matschke (1987) konstant um etwa 5 dB geringere Maskiererpegel benötigt, die Werte von Schorn et al. (1977) streuen mit etwa 5 dB um die hier gemessenen.

Die von Schorn et al. (1977) und Matschke (1987) ermittelten höheren Maskiererpegel bei 740 Hz lassen die beiden Schenkel der pTK nicht nur bei 4 000 Hz, sondern auch bei 500 Hz zu einer Senkrechte durch die Testtonfrequenz asymmetrisch erscheinen. Beide Arbeitsgruppen sehen in dieser Asymmetrie neben der prinzipiellen Ähnlichkeit einen weiteren Hinweis auf die Übereinstimmung der pTK mit den elektrophysiologisch gemessenen.

senen Tuningkurven (Kiang und Moxon, 1974; Kiang et al., 1967, 1970). Nach Demus (1987) ist die Asymmetrie bei 500 Hz diskreter. Die Asymmetrie ist mit Hilfe eines Erregungsmustermodells erklärbar, welches von Interaktionen zwischen Test- und Maskiererton auf der Basilarmembran ausgeht. Nach diesem Modell führt ein Sinuston zu einer Erregung in Form eines Dreiecks, dessen tieffrequenter Schenkel steiler abfällt und in seiner Form der Mithörschwelle für Sinustöne entspricht. Die Überlagerung von Maskierer- und Testton ergibt eine sogenannte residuale Erregung über einen relativ großen Frequenzbereich in Abhängigkeit von Lautstärke und Frequenz der dargebotenen Töne. Liegt die Maskierfrequenz unterhalb der Testtonfrequenz, kommt es zu einer relativ breiten und flachen Frequenzverteilung. Liegt sie oberhalb, ist die Frequenzverteilung schmaler und höher. Nach diesem Modell verdecken tiefe Töne höhere Töne stärker als umgekehrt und der hochfrequente Ast der pTK verläuft deshalb steiler als der tieffrequente Ast (Johnson-Davies und Patterson, 1979).

Bei den der Testtonfrequenz f_T benachbarten Maskierfrequenzen ($0,92$ und $1,08 \times f_T$) ist die pTK ebenfalls asymmetrisch, allerdings verdecken hier die höheren Töne die tieferen stärker als umgekehrt. Diese Asymmetrie der Kurve findet sich auch bei Matschke (1987) und Schorn et al. (1977), wird aber von diesen nicht diskutiert. Offenbar hat hier der Maskiererton mit der $1,08$ fachen Testtonfrequenz, d. h. der höhere, eine stärkere verdeckende Wirkung als der mit der $0,92$ fachen.

Die teilweise unterschiedlichen Ergebnisse schon der Normwertbestimmung einzelner Studien erscheinen überraschend. Folgende Ursachen sind denkbar:

- unterschiedliche persönliche Arbeitsweise des Untersuchers (Einlegen von Pausen, Wiederholung von Messungen mit zweifelhaftem Ergebnis),
- unterschiedlich strenge Auslegung des Begriffs der Normalhörigkeit bei der Auswahl der Probanden, sowie
- unterschiedliche Meßgerätegenauigkeit und Eichung.

Auffällig ist der Anstieg von $SD_{\Delta_i L_M}$ und $SD_{\Delta_g L_M}$ mit steigender Maskierfrequenz bei der 500 Hz-Testtonfrequenz und der exzessive Anstieg dieser Werte bei 740 und 5 920 Hz.

Der Sprung von $SD_{\Delta_i L_M}$ zwischen 215 und 390 Hz läßt sich in erster Linie durch das Phänomen der Adaptation erklären. Diese ist in der ersten Minute nach Präsentation des Reizes am größten, steigt bis zur dritten Minute allmählich weiter an und bleibt dann konstant. Die Adaptation ist von der Größe des Reizpegels direkt abhängig und an der Belastungsfrequenz (= Testtonfrequenz) am größten (Boehme und Wölzl-Müller, 1984). Der hier verwendete Reiz (= Testtonpegel) ist zwar von außerordentlich geringer Intensität, trotzdem ist die Adaptation deutlich erkennbar.

Der stete Anstieg von $SD_{\Delta_i L_M}$ von Maskierer- zu Maskierfrequenz bei jeder der beiden Testtonfrequenzen mit exzessivem Anstieg bei 5 920 Hz läßt sich dagegen am ehesten auf ein

Nachlassen der Konzentrationsfähigkeit der Versuchspersonen zurückführen, eventuell auch auf ein von einigen Probanden beschriebenes Unbehaglichkeitsgefühl bei der Messung bei 5 920 Hz. Die Erklärungen der Veränderungen von $SD_{\Delta_i L_M}$ begründen gleichgerichtete Veränderungen von $SD_{\Delta_g L_M}$.

Bei teilweise recht geringfügigen Unterschieden der L_M erbringt die Berechnung der Selektivitätsgröße C relativ große Unterschiede. Das zeigt, daß insbesondere im interindividuellen Vergleich erst verhältnismäßig große C -Wert-Differenzen Bedeutung erlangen.

Wie bei jeder psychoakustischen Testmethode spielen Ermüdungs- und Trainingseffekte eine wichtige Rolle. Trainingseffekte lassen sich bei einem Abstand von ungefähr einer Woche zwischen den einzelnen Wiederholungsmessungen nicht nachweisen. Ermüdungseffekte sollten bei Bedarf durch das Einlegen von Pausen verringert werden.

Die Messungen zur Reproduzierbarkeit der Methode erfolgten parallel zur Normwertbestimmung an ohrgesunden Testpersonen. Von Interesse wären ebenso Untersuchungen an Schwerhörigen sowie zum Einfluß von Ohrgeräuschen, insbesondere bei wechselnder Intensität.

Die Differenzpegel ΔL_M und die sich aus den pTK ergebenden C -Werte weisen bei nach konventionellen Kriterien normalhörenden Probanden eine erhebliche Streubreite auf. Ein enger Normalbereich analog der Hörschwelle läßt sich deshalb nicht angeben. Ob diese Streubreite auf bereits stattgehabte schädigende Einflüsse, auf genetische Variationen oder ein unterschiedlich trainiertes Gehör zurückzuführen ist, läßt sich anhand dieser Untersuchung nicht eruieren. Die Reproduzierbarkeit der Methode dagegen ist als außerordentlich gut einzuschätzen.

Schlußfolgerung

In den letzten Jahren hat sich die audiologicalhe Forschung verstärkt den objektiven elektrophysiologischen Verfahren zugewandt. Deren Vorteile bestehen in erster Linie in der Freiheit vom Unsicherheitsfaktor subjektiver Patientenangaben und der relativ guten Reproduzierbarkeit. Man darf jedoch nicht vergessen, daß der apparative, zeitliche und personelle Aufwand dieser Methoden relativ groß ist und die Interpretation der Ergebnisse große Erfahrung erfordert. Die Aufzeichnung von pTK ist eine technisch relativ einfache, kostengünstige und leicht anzuwendende Methode.

Die gute Sensitivität für geringe, in der konventionellen Tonschwellenaudiometrie nicht erfaßbare Unterschiede im Hörvermögen, verbunden mit der sehr guten Reproduzierbarkeit, scheinen die Bestimmung des FSV zur Verlaufskontrolle, z. B. während der Therapie von Hörstürzen, beim Glyceroltest bei M. Ménière oder bei der Applikation ototoxischer Medikamente zu prädestinieren.

Literatur/References

- Adam J (1992) Einführung in die Medizinische Biometrie. Gustav Fischer, Jena.
- Boehme G, Welzl-Müller K (1984) Audiometrie: Hörprüfungen im Erwachsenen- und Kindesalter; ein Lehrbuch. Hans Huber, Bern, S 11–137
- Bonding P (1976) Critical bandwidth in persons with hearing loss due to salicylate. Proc. XI. Internat. Cong. Audiology, Florenz, 142–143
- Dallos P, Santos-Sacchi JS (1982) Intracellular recordings from cochlear outer hair cells. *Science* 218, 582–584
- Demus HG (1987) Messung psychoakustischer Tuningkurven zur Erfassung des Frequenzselektionsvermögens des Gehörs. *HNO-Prax* 12, 203–211
- Demus HG (1989) Das Frequenzselektionsvermögen in der audiologischen Diagnostik. *HNO-Prax* 14, 111–119
- Demus HG (1992) Zur Bewertung des Frequenzselektionsvermögens des Gehörs aus psychoakustischen Tuningkurven. *HNO* 40, 484–488
- Demus HG, Schneider R, Schreiber U, Schröder C (1995) Quantitative Bewertung von psychoakustischen Tuningkurven. Vortrag 4. Jahrestagung der Nordostdeutschen Gesellschaft für ORL und zervikofaziale Chirurgie. Greifswald
- Festen JM, Plomp R (1983) Relations between auditory functions in impaired hearing. *J Acoust Soc Am* 73, 652–662
- Florentine M, Buus S, Scharf B, Zwicker E (1980) Frequency selectivity in normally hearing and hearing impaired observers. *J Speech Hear Res* 23, 646–669
- Johnson-Davies D, Patterson RD (1979) Psychophysical tuning curves: Restricting the listening band to the signal region. *J Acoust Soc Am* 65, 765–770
- Kiang NYS, Moxon EC (1974) Tails of Tuning curves of auditory-nerve fibers. *J Acoust Soc Am* 55, 620–630
- Kiang NYS, Moxon EC, Levine RA (1970) Auditory nerve activity in Cats with normal and abnormal Cochleas. In: Wolsteholm GEW, Knight J (eds) *Sensorineural Hearing Loss*. J. and A. Churchill, London, S 241–273
- Kiang NYS, Sachs MB, Peake WT (1967) Shapes of Tuning curves for Single Auditory-Nerve Fibers. *J Acoust Soc Am* 42, 1341–1342
- Klinke R (1987) Die Verarbeitung von Schallreizen im Innenohr – eine Übersicht über neuere Forschungsergebnisse. *HNO* 35, 139–148
- Linke R, Demus HG, Haberland E-J (1998) Auswertung psychoakustischer Tuningkurven – Vergleich verschiedener Methoden. *Z Audiol* 37, im Druck
- Matschke RG (1987) Frequenzselektionsvermögen und psychoakustische Tuningkurven im Alter. *Audiol Akust* 5, 134–142
- Moore BCJ (1978) Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking. *J Acoust Soc Am* 63, 524–532
- Moore BCJ (1985) Frequency selectivity and temporal resolution in normal and hearing-impaired listeners. *Br J Audiol* 19, 189–201
- Russell IJ, Sellick PM (1978) Intracellular studies of hair cells in the mammalian cochlea. *J Phys* 284, 261–290
- Schorn K, Wurzer H, Zollner M, Zwicker E (1977) Die Bestimmung des Frequenzselektionsvermögens des Gehörs mit Hilfe psychoakustischer Tuningkurven. *Laryngol Rhinol Otol* 56, 121–127
- Schorn K, Zwicker E (1990) Frequency Selectivity and Temporal Resolution in Patients with Various Inner Ear Disorders. *Audiology* 29, 8–20
- Sellick PM, Russell IJ (1980) The response of inner hair cells to basilar membrane velocity during low frequency auditory stimulation in the guinea pig cochlea. *Hear Res* 2, 439–445
- Vogten LM (1974) Pure tone masking: a new result from a new method. In: Zwicker E, Terhardt E (eds) *Facts and models in Hearing*. Springer, Berlin, S 142–155
- Wegel RL, Lane CE (1924) The auditory masking of one pure tone by another and its probable relation of the dynamics of the inner ear. *Phys Rev* 23, 266
- Wightman FL, McGhee T, Kramer M (1977) Factors influencing frequency selectivity in normal and hearing impaired listeners. In: Evans EF, Wilson JP (eds) *Psychophysics and Physiology of Hearing*. Academic Press, London, S 295–3063
- Zenner HP (1986) Aktive Bewegung von Haarzellen: Ein neuer Mechanismus beim Hörvorgang. *HNO* 34, 133–138
- Zwicker E (1954) Die Verdeckung von Schmalbandgeräuschen durch Sinustöne. *Acustica* 4, 415–420
- Zwicker E (1974) On a psychoacoustical equivalent of tuning curves. In: Zwicker E, Terhardt E (Hrsg) *Facts and models in Hearing*. Springer, Berlin, S 132–141
- Zwicker E (1982) *Psychoakustik*. Springer, Berlin
- Zwicker E, Feldtkeller R (1955) Über die Lautstärke von gleichmäßigen Geräuschen. *Acustica* 5, 303–316
- Zwicker E, Feldtkeller R (1967) *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*; 2., neubearb. Aufl. Hirzel, Stuttgart, S 66–225