

**Zur Frequenzselektivität des Gehörs:  
Zusammenhänge zwischen Mithörschwellen  
und Tuningkurven**

Bernhard U. Seeber

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation  
Prof. Dr. rer. nat. M. Lang

Fachgebiet Akustische Kommunikation  
Prof. Dr.-Ing. E. Terhardt

## **Diplomarbeit**

# **Zur Frequenzselektivität des Gehörs: Zusammenhänge zwischen Mithörschwellen und Tuningkurven**

Verfasser :           Bernhard U. Seeber  
                          Mayerbachstraße 6  
                          83024 Rosenheim  
                          Matr.-Nr. 1560572

Betreuer :           Prof. Dr.-Ing. E. Terhardt

Laborzeit :          03.06.1998 bis 02.12.1998

Abgabetermin :     17.02.1999

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Begriffe und Definitionen</b>	<b>5</b>
2.1	Mithörschwellen . . . . .	5
2.2	Tuningkurven . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Ein Programm zur Berechnung von Tuningkurven</b>	<b>9</b>
3.1	Übersicht . . . . .	9
3.2	Ablaufplan . . . . .	10
3.3	Zur Interpolation . . . . .	12
3.4	Interpolation über die Testtonfrequenzen . . . . .	13
3.5	Interpolation über die Maskiererpegel . . . . .	13
3.6	Interpolation über die Maskierererfrequenzen . . . . .	14
3.7	Ausgabe der Interpolationsergebnisse . . . . .	15
3.8	Berechnung von einzelnen Maskierungspunkten . . . . .	16
3.9	Berechnung der Tuningkurven . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Untersuchungen an Tuningkurven aus Mithörschwellen-Prototypen</b>	<b>18</b>
4.1	Verfahren und Programm . . . . .	18
4.2	Tuningkurven aus Prototypen . . . . .	19
4.3	Zur Modellierung der Sättigung in Tuningkurven . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Untersuchungen an Tuningkurven aus gemessenen Mithörschwellen</b>	<b>24</b>
5.1	Untersuchungen mit Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski . . . . .	24
5.2	Untersuchungen mit Mithörschwellen von Sonntag . . . . .	26
5.3	Untersuchungen mit Mithörschwellen von Zwicker & Jaroszewski und Sonntag	27
5.4	Untersuchungen mit Mithörschwellen von Fletcher . . . . .	29
5.5	Untersuchungen mit Mithörschwellen von Schmalbanddrauschen . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Literatur und Diskussion</b>	<b>33</b>
6.1	Psychoakustische Tuningkurven in der Literatur . . . . .	33
6.2	Literaturvergleich und Diskussion . . . . .	35
6.3	Tuningkurven bei Nachverdeckung . . . . .	39
6.4	Physiologische Tuningkurven . . . . .	41

---

<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>42</b>
<b>A Programme</b>	<b>43</b>
A.1 Programm zur Generierung von Mithörschwellen aus Prototypen . . . . .	43
A.2 Frontends zu den verwendeten Funktionen . . . . .	44
<b>B Bedienung und Compilierung des Tuningkurvenprogrammes</b>	<b>45</b>
B.1 Bedienung des Programmes msk . . . . .	45
B.2 Hinweise zur Programmierung und Compilierung des Programmes msk . .	48
<b>C Inhalt der Diskette</b>	<b>49</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>51</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Frage nach der Funktionsweise der Frequenzanalyse des Gehörs steht seit den Anfängen der psychoakustischen Forschung im Mittelpunkt des Interesses. Seit vielen Jahren existiert die Theorie, in der einer bestimmten Frequenz ein Ort auf der Basilarmembran zugewiesen wird. Ohm [17] und Helmholtz [9] begründen die Ortstheorie ausgehend von der Erfahrung, daß der Mensch in der Lage ist, einzelne Teiltöne eines harmonischen komplexen Tones herauszuhören, also eine Zerlegung des Schallsignals in seine Fourier-Komponenten vorzunehmen. Helmholtz modelliert diesen Prozeß durch eine Serie von Resonatoren unterschiedlicher Resonatorfrequenz und hoher Güte auf der Basilarmembran, so daß jede unterscheidbare Frequenz einen bestimmten Resonator anregt. Im Laufe der Zeit wurde, insbesondere auch durch von Békésy, diese Resonanz- und Filtertheorie verfeinert. Erwähnt werden soll auch eine zweite Theorie, welche die Tonhöhenwahrnehmung auf eine zeitliche Periodenanalyse zurückführt und auf Rutherford zurückgeht. Wever gibt in [37] eine Übersicht über die Entwicklung der Theorien zur Frequenzanalyse.

Da die Cochlea eine Spektralanalyse durchführt, liegt es nahe, sie durch eine Filterbank zu modellieren. Terhardt hat in [30] ein lineares Modell einer Gehörfilterbank vorgestellt, welches aus einem Vorfilter zur Modellierung der Gehörgangsresonanzen mit anschließender paralleler Filterbank besteht. Diese Filterbank besteht aus Einzelfiltern, die parametrisiert werden müssen. Dabei ergeben sich folgende Fragen: Wie kann die hohe Frequenzauflösung des Gehörs bei gleichzeitiger kurzer Einschwingzeit insbesondere bei tiefen Frequenzen modelliert werden? Wie müssen der Frequenz- und Phasengang der einzelnen Filter sowie der Filtergrad und die Überlappung der parallelen Filter gewählt werden? Welche Messungen sind geeignet, Daten für diese Parametrisierung zu liefern?

Tuningkurven und Mithörschwellen werden oft zur Beschreibung der Frequenzselektivität des Gehörs verwendet. Psychoakustische Tuningkurven unterscheiden sich von psychoakustischen Mithörschwellen in der Messung durch die Vertauschung von fester und abhängiger Variable. Welche Unterschiede sich daraus ergeben, kann durch die Umrechnung von Mithörschwellen in Tuningkurven untersucht werden.

Diese Arbeit verfolgt daher zwei Ziele: Zum einen sollen Tuningkurven in der Weise diskutiert werden, daß die Grundlagen für die Parametrisierung einer Filterbank auf der Basis von psychoakustischen Tuningkurven gelegt sind. Dazu werden Tuningkurven auf charakteristische Eigenschaften hin untersucht und – soweit möglich – Parameter der Kurve angegeben. Zum anderen werden aus Mithörschwellen berechnete Tuningkurven mit gemessenen verglichen.

---

Zunächst wird, nach einigen grundsätzlichen Erläuterungen zu Mithörschwellen und Tuningkurven, ein Programm zur Berechnung von Tuningkurven aus Mithörschwellen vorgestellt. Die ersten Untersuchungen finden dann an Mithörschwellen aus Prototypen statt, die modifiziert werden, um die Sättigung der unteren Flanke in den daraus berechneten Tuningkurven zu modellieren. Daran schließen sich Untersuchungen an berechneten Tuningkurven aus gemessenen Mithörschwellen an, die im darauf folgenden Kapitel mit gemessenen Tuningkurven verglichen werden. Daraus ergibt sich eine Diskussion über die Ursachen für die gefundenen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Tuningkurven. Anschließend wird ein kurzer Einblick in die Eigenschaften von physiologischen und Nachverdeckungstuningkurven gegeben. Zur Erleichterung weiterer Untersuchungen sind im Anhang Hinweise zu den erstellten Programmen angeführt.

Ich möchte an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Terhardt für die gute Betreuung der Arbeit danken. Mein Dank gilt weiterhin Herrn Dipl.-Ing. C. von Rücker für zahlreiche Hinweise während meiner Arbeit und für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts.

# Kapitel 2

## Begriffe und Definitionen

Zunächst sollen einige Begriffe, Definitionen und grundlegende Eigenschaften im Zusammenhang mit Mithörschwellen und Tuningkurven erklärt werden.

### 2.1 Mithörschwellen

Eine Mithörschwelle, in Abb. 2.1 schematisch dargestellt, entsteht, indem ein Sinuston als Testton im Beisein eines Maskiererschalles dargeboten und so im Pegel verändert wird, daß er gerade hörbar ist. Der Versuch wird für verschiedene Testtonfrequenzen durchgeführt. Anders ausgedrückt beschreibt die Mithörschwelle durch den Testtonpegel die Maskierung, die ein Schall mit fester (Mitten-) Frequenz und konstantem Pegel an verschiedenen Testtonfrequenzen auf den Testton hervorruft, da die Messung an der Schwelle der Hörbarkeit des Testtones geschieht. Es sind zwei Arten der Darstellung der Ergebnisse üblich:

- Der Pegel des Testtones  $L_T$  wird, wie in Abb. 2.1 die durchgezogene Kurve, in Abhängigkeit von seiner Frequenz  $f_T$  mit Maskiererpegel  $L_M$  und -frequenz  $f_M$  als Parameter aufgetragen. Dies ergibt die als Mithörschwellenmuster bezeichnete Darstellung, die in dieser Arbeit verwendet wird. Der Vorteil dieser Darstellung liegt in der leicht ablesbaren Verdeckungseigenschaft des Maskierers. Im Schema hier zusätzlich als Punkt dargestellt ist der Maskierer.
- Der Testtonpegel  $L_T$  wird in Abhängigkeit vom Maskiererpegel  $L_M$  dargestellt. Die Testton- und Maskierfrequenz werden zu Parametern, wobei es üblich ist, Kurven zu verschiedenen Testtonfrequenzen in ein Diagramm mit konstanter Maskierfrequenz zu zeichnen. Besonders günstig ist in dieser Darstellung die Betrachtung des Anstieges der Maskierung ( $L_T$ ) mit dem Maskiererpegel, wobei das nichtlineare Verhalten an der oberen Flanke sichtbar wird.

Eine Mithörschwelle läßt sich nach Allen [1] in die folgenden drei Bereiche unterteilen, die in Abb. 2.1 hervorgehoben sind:

- $f_T < f_M$ , „untere Flanke“: Die Wirkung des Maskierers auf den Testschall ist nur gering und die Maskierung steigt weniger als linear mit dem Maskiererpegel an. Bei Annäherung des Testtones an den Maskierer nimmt die Maskierung stark zu.
- $f_T \approx f_M$ , „Critical-Band-Masking“: Testton und Maskierer sind innerhalb derselben Frequenzgruppe und die Maskierung steigt etwa linear mit dem Maskiererpegel an. Die Messung wird häufig durch Differenztöne und Schwebungen gestört, wenn Sinustöne als Maskierer und Testton verwendet werden.
- $f_T > f_M$ , „obere Flanke“: Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch einen Anstieg der Maskierung relativ zum Maskiererpegel mit einer Steigung größer eins (bis zu 3,5), wenn der Maskiererpegel eine gewisse Schwelle überschritten hat, unterhalb derer praktisch keine Maskierung auftritt. Der Effekt des überproportionalen Anstiegs der Maskierung wird als „Auffächerung der oberen Flanke“ bezeichnet. Differenztöne beeinflussen die Messung mit Sinustönen besonders im Nahbereich oberhalb der Maskierfrequenz und zwischen Vielfachen der Maskierfrequenz. Schwebungen treten auch an den Vielfachen der Maskierfrequenz auf.

Wird der Testton nach dem Abschalten des Maskierers dargeboten, spricht man von Nachverdeckungsmustern. Ein Vorteil dieser Methode liegt darin, daß Differenztöne und Schwebungen nicht auftreten. In allen in dieser Arbeit angesprochenen Mithörschwellen aus der Literatur wurden Sinustöne als Maskierer verwendet. Eine Ausnahme bilden die Untersuchungen in Abschnitt 5.5 mit Daten von Zwicker, in denen frequenzgruppenbreites Schmalbandrauschen als Maskierer diente. Weiterhin werden Maskierungsexperimente auch mit Hoch-, Tiefpaß- und Bandsperrrauschen als Maskierer und verschiedenen Rauscharten als Testschall durchgeführt.

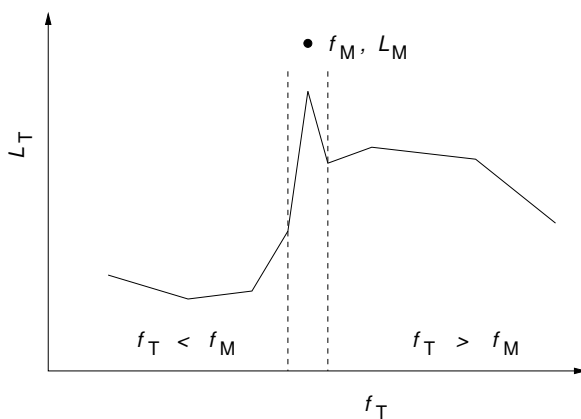


Abb. 2.1: Mithörschwelle, schematisch

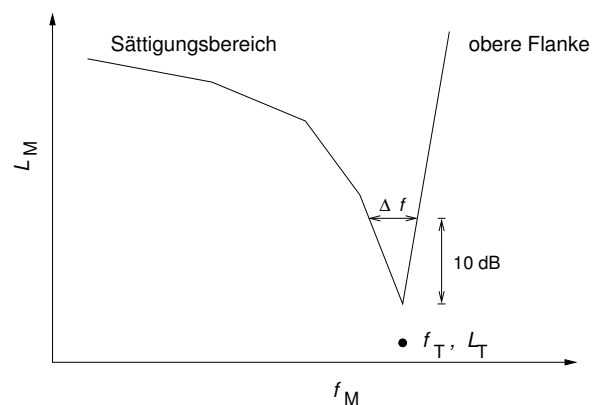


Abb. 2.2: Tuningkurve, schematisch



## 2.2 Tuningkurven

Tuningkurven können physiologisch und psychoakustisch gemessen werden. Physiologische Tuningkurven erhält man, indem eine Faser des Hörnervens abgeleitet und der Pegel von dargebotenen Testtönen derart verändert wird, daß es zu einer konstanten, signifikanten Erhöhung der Spikerate kommt. Der nötige Pegel des Testtones für die Spikeratenerhöhung wird über dessen Frequenz aufgetragen. Man erkennt eine deutliche Filtercharakteristik. Die Frequenz mit dem niedrigsten Testtonpegel, der nötig ist, um die Spikeratenerhöhung zu erzielen, wird als Bestfrequenz bezeichnet. Ein Vorteil dieser auch mit „frequency-threshold-curve“ bezeichneten Tuningkurve liegt in der Konstanz des Ausgangs der Neuronen, so daß sich eventuelle Nichtlinearitäten, die sich im auditorischen Pfad hinter dem Neuron befinden, nicht auf die Messung auswirken.

Führt man eine psychoakustische Verdeckungsmessung derart durch, daß ein Testton mit konstantem niedrigem Pegel und fester Frequenz durch einen Maskierer verdeckt wird und trägt den Maskiererpegel, der gerade dazu nötig ist, über dessen Frequenz auf, erhält man ein Muster, das den physiologischen Tuningkurven sehr ähnlich sieht. Es wird daher als psychoakustische Tuningkurve bezeichnet und ist schematisch in Abb. 2.2 dargestellt. Im Schema ist wiederum der der Testton als Parameter der Kurve eingetragen. Auch die Tuningkurve läßt sich in drei Bereiche einteilen:

- $f_M < f_T$ , Sättigungsbereich: Die Kurve erreicht ein Sättigungsverhalten mit zunehmendem Abstand der beiden Töne voneinander. Meist gibt es einen ausgeprägten Übergang von der Spitze in die Sättigung. Der Pegel der Knickstelle sowie der Sättigung können relativ zum niedrigsten Pegel an der Spitze angegeben werden. Der Sättigungsbereich wird auch als untere Flanke der Tuningkurven bezeichnet und entspricht der oberen Flanke bei Mithörschwellen.
- $f_M \approx f_T$ : Der Bereich um die Bestfrequenz weist eine deutliche Spitze auf. Auch die psychoakustische Tuningkurvenmessung mit Sinustönen wird durch Schwebungen und Differenztöne gestört.
- $f_M > f_T$ , obere Flanke: Die obere Flanke der psychoakustischen Tuningkurven entspricht der unteren Flanke bei Mithörschwellen. Sie ist sehr steil und in doppelt-logarithmischer Darstellung meist als Gerade annäherbar.

In Anlehnung an die Güte von Filterübertragungsfunktionen definiert man den  $Q_{10\text{dB}}$ -Wert für Tuningkurven wie folgt:

$$Q_{10\text{dB}} = \frac{f_{\text{Best}}}{\Delta f_{10\text{dB}}}$$

Aufgrund der größeren Meßungenauigkeiten in psychoakustischen Messungen wird die Breite der Tuningkurve  $\Delta f_{10\text{dB}}$  über der Spitze, wie in Abb. 2.2 dargestellt, bestimmt. Die Bestfrequenz, korrespondierend mit der Resonanzfrequenz eines Filters, bezogen auf die Breite der Tuningkurve, ergibt den  $Q_{10\text{dB}}$ -Wert.

Ein weiterer Parameter von Tuningkurven in Bezug auf Filter ist die Flankensteilheit der oberen Flanke. Sie kann in dB/oct oder in dB/Bark gemessen werden – je nachdem,

wie man die Frequenzen in der zugrunde liegenden Pegel-Frequenz-Darstellung skaliert, in der man die obere Flanke durch eine Gerade annähert. Eine Definition der Steigungsmessung ist in der Literatur von Moore in [15] angegeben, wo die Steigung zwischen den 5 und 25 dB-Punkten über der Spitze bestimmt wird. Die in dieser Arbeit angegebenen Steigungen wurden graphisch ermittelt und stellen die mittlere Steigung über die gesamte obere Flanke dar, die jedoch meistens im selben Pegelbereich wie bei Moore gemessen wurden. Die Berechnung erfolgte nach folgender Formel:

$$m \text{ [dB/oct]} = (L_2 \text{ [dB]} - L_1 \text{ [dB]}) \frac{\log 2}{\log f_2/f_1}$$

Darin gehören die mit dem Index 2 bezeichneten Werte zum oberen Ende der Steigungsgerade. Analog wird mit dem Index 1 der untere Anfangspunkt der Gerade benannt. Ebenso wie bei Mithörschwellen können auch Messungen von Tuningkurven nach dem Abschalten des Maskierers durchgeführt werden. Man spricht dann von Nachverdeckungstuningkurven. Auch ist Schmalbandrauschen als Maskierer oder Testschall üblich, jedoch wurden in allen in dieser Arbeit vorgestellten Tuningkurven aus der Literatur Sinustöne als Maskierer und Testton verwendet.

Was unterscheidet nun ursächlich Mithörschwellen von Tuningkurven? Sind sie nicht jeweils eine andere Darstellungsform für ein und denselben Sachverhalt: Die Maskierung, die ein Maskierer an der Frequenz des Testtones, gemessen an der Schwelle der Hörbarkeit des Testtones, hervorruft? So gesehen sollten beide ineinander umrechenbar sein, ohne daß sich ein Unterschied ergibt. Dennoch gibt es Unterschiede im Vorgehen, in der Messung. Bei Mithörschwellen wird der Maskierer in Pegel und Frequenz festgehalten und der Testton in der Frequenz variiert. Der Testton wird im Pegel so lange verändert, bis die Schwelle der Hörbarkeit festgestellt werden kann. Bei Tuningkurven ist es genau umgekehrt: Es wird nicht nur der Maskierer in der Frequenz verändert, es dient auch die Veränderung seines Pegels der Messung der Mithörschwelle. Der Testton bleibt bei niedrigem Pegel fest – während der Maskierer mit hohem Pegel variiert wird. Bei Mithörschwellen dagegen wird der niedrigpegelige Ton verändert. Insofern unterscheiden sich die Anforderungen an die Versuchsperson bezüglich Versuchsablauf und Schwierigkeitsgrad etwas. Der Versuchsablauf sollte deshalb durch zufällige Darbietung und Auswahl der Maskierer-Testton-Kombinationen so gestaltet werden, daß diese Unterschiede nicht zum Tragen kommen.

Zur Untersuchung des Unterschiedes zwischen Mithörschwellen und Tuningkurven ist zunächst ein Verfahren nötig, das Mithörschwellen in Tuningkurven umrechnet, um sie direkt miteinander vergleichen zu können.

# Kapitel 3

## Ein Programm zur Berechnung von Tuningkurven

Um Mithörschwellen mit Tuningkurven vergleichen zu können, ist eine Umrechnung in eine einheitliche Darstellung nötig. Da in der Literatur mehrfach Scharen von Mithörschwellen veröffentlicht wurden, bietet es sich an, diese in Tuningkurven umzurechnen. Dazu dient ein Programm, welches in diesem Kapitel vorgestellt wird. Besonders eingegangen wird auf den Aufbau und die Möglichkeiten des Programmes, die Eigenschaften der zugrunde liegenden Algorithmen sowie die Überprüfung der Funktion dieser. Eine zusammenfassende Bedienungsanleitung befindet sich im Anhang B.

### 3.1 Übersicht

Warum ist ein so umfangreiches Programm nötig? Möchte man Mithörschwellen in Tuningkurven umrechnen, so vertauscht man die feste mit der abhängigen Variablen. Dazu ist ein geordneter „Datenraum“ zu schaffen, in dem sich die Daten aus den Mithörschwellen befinden. Dieser Raum wird dann nach den Vorgaben für die Tuningkurven durchsucht: Es wird ein Testton in Pegel und Frequenz vorgegeben und für alle Maskierfrequenzen der Maskierpegel bestimmt, der mit diesem Testton korrespondiert. Um eine aussagekräftige Tuningkurve zu erhalten, sind Mithörschwellen von sehr vielen Maskierern nötig, die in der Literatur so aber nicht zu finden sind. Außerdem stimmen die Maskierer-Testtonkombinationen üblicherweise nicht mit den für die Tuningkurve geforderten überein. Deshalb muß mehrfach interpoliert werden. Die erste Interpolation stellt sicher, daß in allen Mithörschwellen dieselben Testtonfrequenzen in ausreichender Anzahl verwendet werden (Interpolation der Maskierung über die Testtonfrequenzen). Im zweiten Interpolationsschritt wird über die Maskierpegel interpoliert, um dann im letzten über die Maskierfrequenzen zu interpolieren. Dies legt die Anzahl der Datenpunkte in der Tuningkurve fest. Die letzte Interpolation erfordert eine Verschiebung des Mithörschwellenmusters, da dieses von der Maskierfrequenz abhängig ist. Die so interpolierten Mithörschwellen werden ausgegeben oder für die Berechnung von Tuningkurven verwendet.

Was sind die Anforderungen an das Programm?

- Es sollen aus beliebigen Mithörschwellen Tuningkurven mit Hilfe von Interpolation errechnet werden.
- Ein Eingriff des Benutzers zur Beeinflussung der Interpolation durch z. B. selektiv-interaktive Datenauswahl ist nicht erwünscht.
- Die Ein- und Ausgangsdatenformate sollen ein einfaches Erstellen der Dateien und eine Lesbarkeit der Daten mit gängigen Visualisierungsprogrammen erlauben.
- Das Programm soll scriptfähig, gut dokumentiert und auf verschiedene Systeme portierbar sein.

Aus diesen Zielsetzungen ergeben sich die nachfolgenden Punkte. Um das Programm portierbar und schnell zu halten, wurde es in ANSI-C programmiert [10]. Die Eingabe der Mithörschwellen erfolgt mit Hilfe von ASCII-Dateien, wobei je Mithörschwelle eine Datei verwendet wird. Die Dateinamen werden auf der Kommandozeile übergeben, was sich durch die Verwendung von Wildcards und entsprechender Benennung der Dateien komfortabel gestalten läßt. Informationen zum Format der Dateien sind im Anhang B enthalten. Die Ausgabe der Ergebnisse kann sowohl nach jedem Interpolationsschritt erfolgen, als auch nach der Berechnung der Tuningkurven oder einzelner Maskierungswerte. Es steht die Ausgabe auf den Bildschirm (stdout) oder in ein oder mehrere ASCII-Dateien zur Auswahl. Es wurden zur Ein- und Ausgabe ASCII-Dateien verwendet, da sie mit einfachen Editoren erstellbar sind und die Daten mit jedem gängigen Darstellungsprogramm visualisiert werden können. Das Programm ist komplett über Kommandozeilenparameter bedienbar, was die Scriptfähigkeit sichert. Zusätzlich sind alle Parameter für die Laufzeit des Programmes über ein Menü mit zusätzlicher Hilfestellung einstellbar. Ein kurzer und ein langer Hilfetext (englisch) kann ausgegeben werden. Der Programmcode ist komplett dokumentiert (englisch).

## 3.2 Ablaufplan

In Abb. 3.1 ist der Ablaufplan des Programmes msk (von Maskierung) zur Berechnung von Tuningkurven dargestellt. Die Kommandozeilenparameter werden eingelesen, die internen Variablen entsprechend gesetzt und falsche Parameter zurückgewiesen. Bei Aufruf ohne Parameter oder mit „-?“ wird ein kurzer bzw. langer Hilfetext ausgegeben und das Programm terminiert. Sind Mithörschwellen angegeben, kann das Konfigurationsmenü mit dem Parameter -c zum Setzen der aktuellen Berechnungs- und Ausgabeparameter aufgerufen werden. Als nächstes werden die Mithörschwellen eingelesen und die Frequenzen in die Tonheit umgerechnet. Dazu wird die Routine `efcrtbdr` aus der Bibliothek `etlib` [28] verwendet. Die zugrunde liegende Formel ist [46]:

$$z(f) [\text{Bark}] = 13 \arctan(0,76 f [\text{kHz}]) + 3,5 \arctan\left(\frac{f [\text{kHz}]}{7,5}\right)^2$$

Die Umrechnung von der Tonheit in die Frequenz in Hz erfolgt durch rekursive Annäherung der mit der gleichen Formel von Hz nach Bark umgerechneten Frequenz an die Frequenz in Bark. Dazu wird die Routine `efinvcbr` verwendet [28]. Einige Untersuchungen

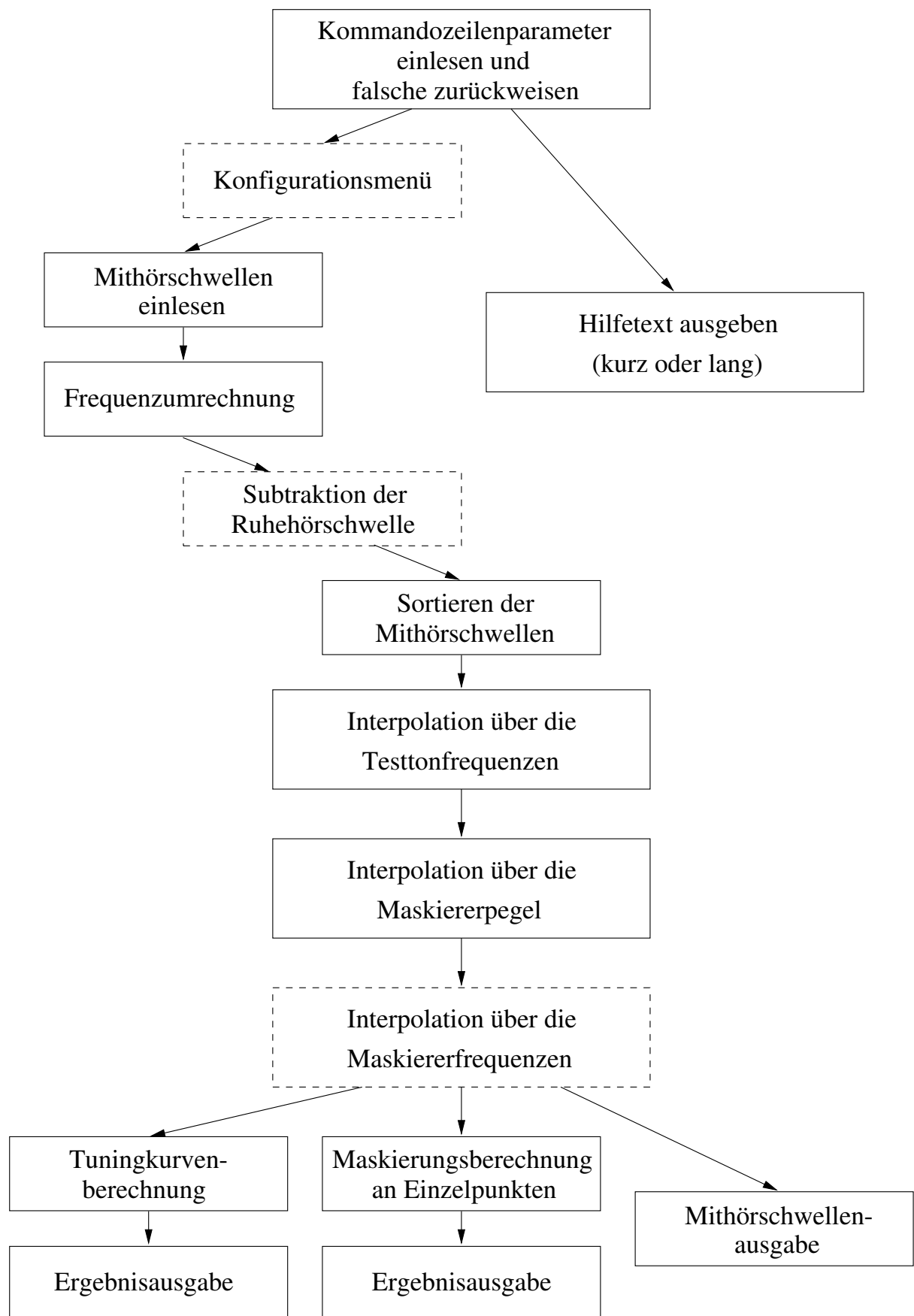


Abb. 3.1: Ablaufplan des Programmes msk.

machten es nötig, die Ruhehörschwelle zu subtrahieren. Die dazu verwendete Routine `efthresh` ist ebenfalls aus der Bibliothek `etlib` und nutzt folgende Formel, die die mittlere Ruhehörschwelle wiedergibt [27]:

$$L_A \text{ [dB]} = 3,64 (f \text{ [kHz]})^{-0,8} - 6,5 \exp[-0,6 (f \text{ [kHz]} - 3,3)^2] + 10^{-3} (f \text{ [kHz]})^4$$

Diese beiden Formeln werden auch an anderen Stellen in dieser Arbeit verwendet. Anschließend werden die Mithörschwellen nach Maskierfrequenz und -pegel sortiert. Die nächsten Verarbeitungsschritte werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 3.3 Zur Interpolation

In jeder Interpolationsstufe besteht einzeln die Möglichkeit, zwischen linearer und kubischer Spline-Interpolation zu wählen. Die kubische Spline-Interpolation wurde deshalb gewählt, weil sie einen glatten Verlauf der Interpolationskurve ergibt, vorhersehbare Ergebnisse liefert und ohne weiteren Eingriff automatisch abläuft. Die Spline-Interpolationsroutinen stammen aus [20] (man verwende die 2. Auflage, da die erste fehlerhaft zu sein scheint). Weitere Informationen zur Spline-Interpolation finden sich in [3], [13] und [24]. Die kubische Spline-Interpolation legt durch je zwei benachbarte Eingangsdatenpunkte eine Kurve dritten Grades, so daß aneinandergrenzende Splines im Funktionswert an der Ansatzstelle, sowie dem Wert der ersten und zweiten Ableitung übereinstimmen. Bei der natürlichen kubischen Spline-Interpolation wird die Krümmung der Splines im ersten und letzten Datenpunkt zu Null festgelegt. Alle Interpolationen finden über der Bark-skalierten Frequenzachse statt. Die Hintergründe dazu werden in Kapitel 4 und Abschnitt 3.6 beleuchtet. Die Abtastung der Splines erfolgt äquidistant, also mit gleichen Pegel- oder Tonheitsunterschieden. Die Anzahl der Interpolationswerte ist für alle Interpolationsstufen frei wählbar, jedoch beschränkt durch den Speicherausbau des Rechners. Das Programm sucht sich den in jeder Interpolationsstufe vorkommenden minimalen und maximalen Eingangswert und berechnet mit der Anzahl der Interpolationswerte die Interpolationsstellen. Dabei gilt, daß für weitergehende Untersuchungen eine feinere Abtastung vorzuziehen ist, da sie die Lage der Maxima und Minima in der quantisierten Darstellung entscheidend beeinflusst.

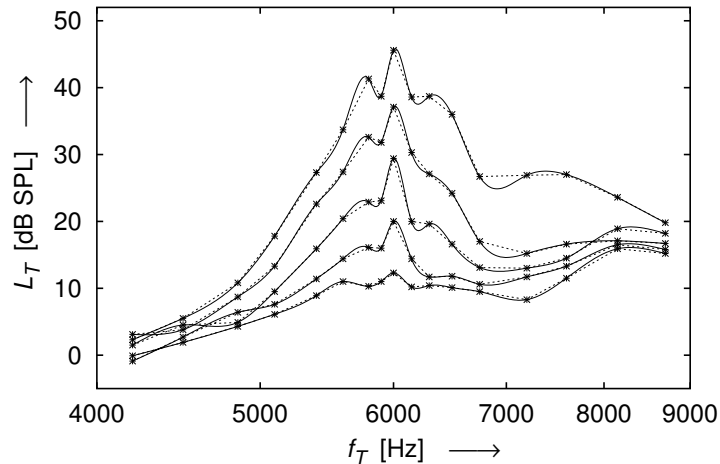
Die Untersuchungen in Abschnitt 5.3 machen folgende Eigenschaften nötig: Bei der Verwendung von Literaturdaten aus verschiedenen Quellen kann es vorkommen, daß zum Beispiel die verwendeten Maskierpegel nicht an allen Maskierfrequenzen übereinstimmen. In der internen, geordneten Repräsentation der Daten entstehen dadurch Bereiche ohne Eingangsdaten, die bei der Interpolation übersprungen werden müssen. Weiterhin wurde es nötig, Eingangsdaten auch doppelt anzugeben, um größere Bereiche ohne Interpolationswerte zu vermeiden. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur bei linearer Interpolation. Die nächsten Abschnitte widmen sich den einzelnen Interpolationsstufen und deren Überprüfung.

### 3.4 Interpolation über die Testtonfrequenzen

Die erste Interpolation schafft gleiche Testtonfrequenzen in allen Mithörschwellen und interpoliert somit in dem bekannten Mithörschwellenmuster. Sie ist im allgemeinen unproblematisch, da es meistens viele Eingangsdatenpunkte gibt. Dennoch sind einige Eigenschaften der Interpolationsmethode zu beachten, die anhand von Abb. 3.2 erklärt werden sollen:

- Das Maximum der Mithörschwellen verändert etwas seine Lage entsprechend der Symmetrie der Biegung des Splines und der Quantisierung der Testtonfrequenzen.
- Dieser Effekt kann bei Nebenmaxima noch stärker ausgeprägt sein.
- Am Übergang zu geraden Stücken kann es zum Überschwingen kommen, was Nebenmaxima vortäuschen kann.

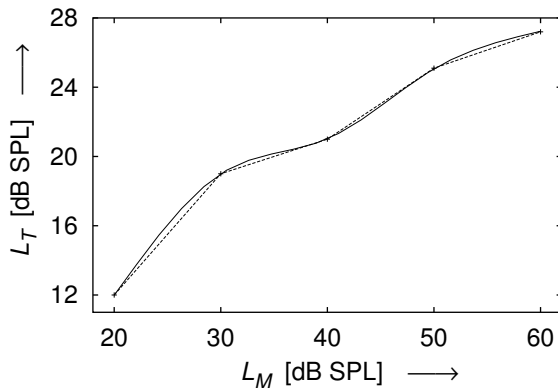
Bei einer geringen Anzahl von Eingangsdaten in der Nähe der Maskierfrequenz besteht zudem die Tendenz zur Aufweitung des Musters um das Maximum. Dieser Effekt trat bei den Daten von Fletcher [7] auf.



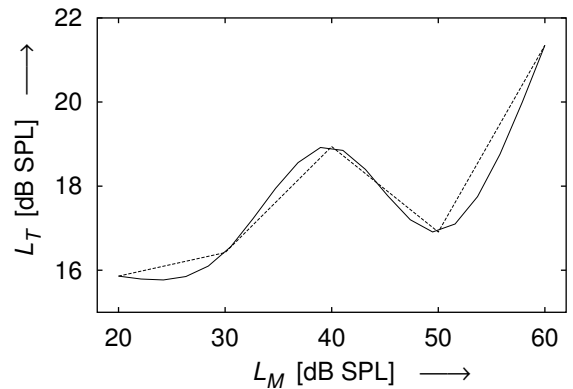
**Abb. 3.2:** Mithörschwellen eines 6030 Hz-Maskierers mit Pegeln von 20-60 dB SPL aus Abb. 5 in [44], jeweils linear (gestrichelt) und Spline-interpoliert (durchgezogene Linie).

### 3.5 Interpolation über die Maskiererpegel

Da die Maskierung im allgemeinen stetig mit dem Maskiererpegel steigt, ist diese Interpolation die unkomplizierteste. Dies gilt auch für die meist grobe Quantisierung der Maskiererpegel in den verwendeten Literaturdaten von 10 dB. Exemplarisch dafür steht Abb. 3.3. Eine Ausnahme bildet die 40 dB-Kurve in Abb. 3.2 (mittlere Kurve), die sich bei hohen und tiefen Testtonfrequenzen mit den benachbarten Kurven überschneidet. Aber auch in diesem Fall liefert die Spline-Interpolation die erwarteten Ergebnisse, wie in Abb. 3.4 zu sehen ist.



**Abb. 3.3:** Spline-interpolierte Maskierung in Abhängigkeit vom Maskiererpegel für 250 Hz-Maskierer und 171 Hz-Testton aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [44] (durchgezogene Linie) und Eingangsdaten dieser Interpolation (gestrichelt).



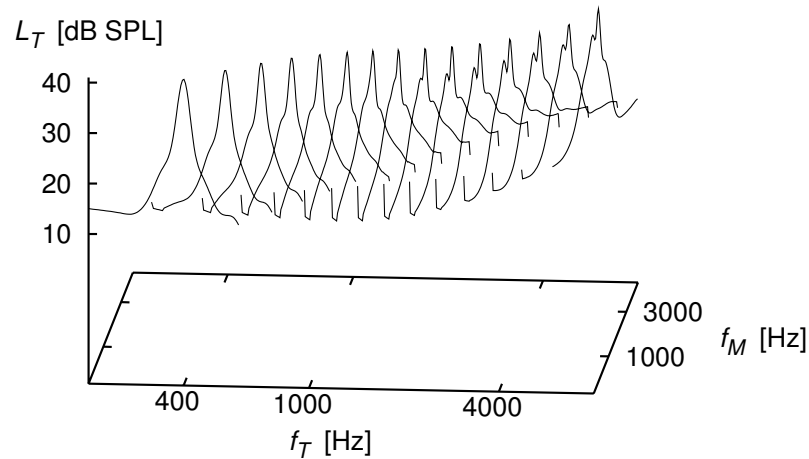
**Abb. 3.4:** Spline-interpolierte Maskierung in Abhängigkeit vom Maskiererpegel für 6030 Hz-Maskierer und 8469 Hz-Testton aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [44] (durchgezogene Linie) und Eingangsdaten dieser Interpolation (gestrichelt).

### 3.6 Interpolation über die Maskierfrequenzen

Sind Mithörschwellen auch für verschiedene Maskierfrequenzen gegeben, was eine Voraussetzung für die spätere Tuningkurvenberechnung ist, interpoliert das Programm auch über die Maskierfrequenzen. Dabei muß beachtet werden, daß das Mithörschwellenmuster als Funktion der Testtonfrequenzen deutlich von der Maskierfrequenz abhängt. Stellt man die Mithörschwellen über den Testtonfrequenzen in Bark dar, so ist die Form der Muster, abgesehen vom Einfluß der Ruhehörschwelle bei hohen und tiefen Frequenzen, nahezu unabhängig von der Maskierfrequenz. Diese Eigenschaft wird in Kapitel 4 verwendet und ausführlich diskutiert. Die Interpolation verschiebt das Muster als Funktion der Testtonfrequenz um die Differenz, die zwischen der nächstliegenden Maskierfrequenz in den Eingangsdaten und der interpolierten Maskierfrequenz besteht. Es wird diagonal durch die Mithörschwellen interpoliert, wie in Abb. 3.5 erkennbar ist. So müssen die Eingangs- wie Ausgangsdaten der Interpolation entsprechend ausgelesen und geschrieben werden. Stimmt jedoch die Differenz der interpolierten Testton- und Maskierfrequenzen nicht überein, kommt es zu Quantisierungseffekten bei der Zuordnung der interpolierten und verschobenen Maskierungswerte zu den Testtonfrequenzen. Diese äußern sich zum Beispiel in waagerechten Stellen in den berechneten Tuningkurven, da benachbarte interpolierte Maskierungswerte aus demselben Testtonfrequenz-Index am Eingang der Interpolation stammen. Diese Stufen treten nicht auf, wenn die Frequenzschrittweite für beide Frequenzen gleich gewählt wird, was das Programm durch Anpassung der Anzahl der interpolierten Maskierfrequenzen automatisch erledigt. Die Quantisierungseffekte durch die Lage der Maskierfrequenzen relativ zu den Testtonfrequenzen am Eingang der Interpolation bleiben jedoch weiter bestehen, wirken sich aber geringer aus, da gerundet wird.

Der Schwerpunkt der Überprüfungen lag auf der korrekten Verschiebung des Musters: Sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsdaten der Interpolation müssen dem passenden Index der Testtonfrequenzen zugeordnet werden. In Abb. 3.6 sind die Eingangs- und Ausgangsdaten der Interpolation an der unteren Flanke dargestellt. Da die Steigung der unteren Flanke nicht für alle Maskierfrequenzen gleich ist, kommt es zum





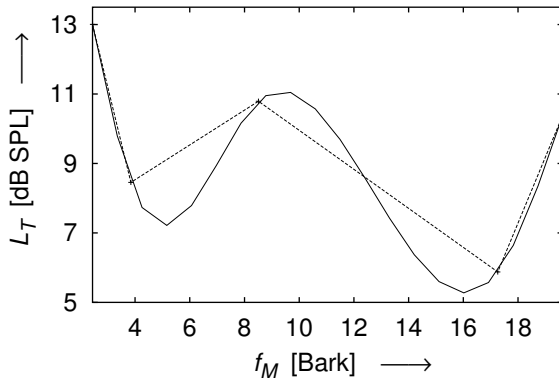
**Abb. 3.5:** Interpolierte Mithörschwellen bei 46,7 dB SPL Maskierpegel aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [44].

Überschwingen. Dieser Effekt ist jedoch relativ unkritisch und wirkt sich im Nahbereich um die Maskierfrequenz nicht aus. Der Einfluß der Ruhehörschwelle kann dagegen zum deutlichen Überschwingen führen, wenn nur wenige Maskierfrequenzen am Eingang vorhanden sind. Sichtbar ist dies in Abb. 3.7, wo der Unterschied zwischen linearer und Spline-Interpolation über 10 dB beträgt. Dieser Effekt tritt im Bereich der tiefsten und höchsten Testtonfrequenzen auf, wenn die Mithörschwelle für einige Maskierfrequenzen bereits endet, während noch über die Daten von anderen Mithörschwellen interpoliert wird. Kommt zu höheren Testtonfrequenzen eine Mithörschwelle für die Interpolation dazu, verändern die Splines ihre Form und es kommt zudem zu Unstetigkeitsstellen im interpolierten Mithörschwellenmuster. Wie kann man diesen Effekten begegnen? Zum einen können die Meßpunkte mit starkem Einfluß der Ruhehörschwelle weggelassen werden, zum anderen kann die mittlere Ruhehörschwelle von der Mithörschwelle subtrahiert werden. Aufgrund der internen Repräsentation der Maskierpegel unabhängig von der Maskierfrequenz ist es jedoch nicht möglich, die Ruhehörschwelle nach der Interpolation wieder zu addieren. Bei linearer Interpolation tritt kein Überschwingen auf, weshalb diese Option für jede Interpolation einzeln wählbar ist. Zu bemerken ist jedoch, daß der hohe Wert der Ruhehörschwelle bei linearer Interpolation zu mittleren Testtonfrequenzen hin „verschleppt“ wird.

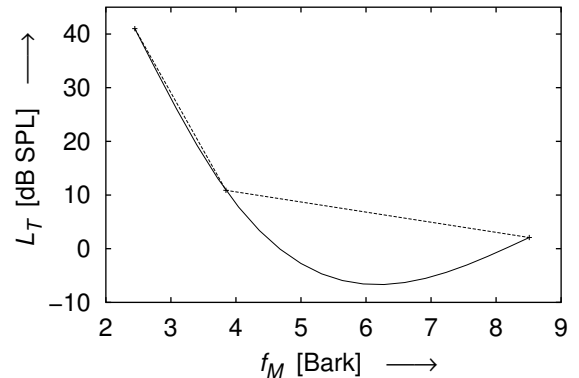
An diese Interpolation anschließend verzweigt sich der Ablauf des Programmes. Die Interpolationsergebnisse können ausgegeben werden oder verwendet werden, um die Maskierung an vorgegebenen Punkten zu berechnen oder die Mithörschwellen in Tuningkurven umzuwandeln.

### 3.7 Ausgabe der Interpolationsergebnisse

Es ist nach jeder Interpolationsstufe möglich, die Interpolationsergebnisse auszugeben. Dies geschieht auf den Bildschirm oder in eine oder mehrere Dateien. Der Dateiname kann angegeben werden, wobei er um die Maskierfrequenz oder den Maskierpegel



**Abb. 3.6:** Spline-Interpolation der Maskierung in Abhängigkeit von der Maskierfrequenz für Testtöne 0,38 Bark unterhalb der Maskierfrequenz und Maskiererpegel 20 dB SPL (durchgezogene Linie) und linear verbundene Eingangsdaten der Interpolation (gestrichelt); aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [44].



**Abb. 3.7:** Spline-Interpolation der Maskierung in Abhängigkeit von der Maskierfrequenz für Testtöne 1,95 Bark unterhalb Maskierfrequenz und Maskiererpegel 20 dB SPL (durchgezogene Linie) und linear verbundene Eingangsdaten der Interpolation (gestrichelt); aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [44].

erweitert wird, sollte in mehrere Dateien geschrieben werden. Die Ausgabe der Interpolationsergebnisse erfolgt geordnet nach Maskierfrequenzen oder -pegeln mit Frequenzen wählbar in Bark oder Hz.

### 3.8 Berechnung von einzelnen Maskierungspunkten

Die Tuningkurvenberechnung macht es notwendig, die Maskierung nicht nur in dem Raum aus quantisierten Testtonfrequenzen, Maskiererpegeln und Maskierfrequenzen zu berechnen, sondern auch für beliebige Frequenzen und Maskiererpegel. Dies wird durch drei aufeinanderfolgende lineare Interpolationen erreicht, die die acht dem Zielpunkt nächsten Datenpunkte verwenden. Es liegt nahe, diese Routine auch für die Berechnung von Mithörschwellen bzw. Maskierungen für vorgegebene Mithörschwellenparameter zu verwenden. Ein einzelner Datenpunkt kann über die Angabe von Testtonfrequenz, Maskiererpegel und Maskierfrequenz auf der Kommandozeile berechnet werden. Für mehrere Datenpunkte oder beliebige Mithörschwellen sind diese 3 Parameter in einer Datei anzugeben. Die Ausgabe kann wieder auf den Bildschirm oder in eine Datei erfolgen.

### 3.9 Berechnung der Tuningkurven

Die Tuningkurvenberechnung kann angestoßen werden durch die Angabe von Bestfrequenz und Maskierung auf der Kommandozeile oder durch deren Angabe in einer Datei, was mehrere Berechnungen hintereinander erlaubt. Das Programm berechnet mit Hilfe der in Abschnitt 3.8 vorgestellten Routine die Maskierung bei gegebener Bestfrequenz (Testtonfrequenz) für alle interpolierten Maskierfrequenzen. Der Maskiererpegel wird schrittweise erhöht, bis die vorgegebene Maskierung überschritten wird, um ihn dann so zu verändern, daß die Maskierungsvorgabe sukzessive auf 1 % genau erreicht wird.

Ebenfalls automatisch erfolgt die Berechnung des  $Q_{10\text{dB}}$ -Wertes. Die Ausgabe der Daten geschieht auf den Bildschirm oder in eine oder mehrere Dateien, deren Name angegeben werden kann. Werden die Daten in mehrere Dateien ausgegeben, so wird der angegebene Dateiname um Bestfrequenz und Maskierungspegel erweitert. Durch die Quantisierung der Frequenzen und die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Effekte der Spline-Interpolation tritt das Minimum der Kurve nicht immer exakt an der Bestfrequenz auf. Bei ungünstiger Wahl der Interpolationsauflösung kann es zu den in Abschnitt 3.6 erwähnten Stufen in der Tuningkurve kommen.

Im Folgenden wird das Programm zur Berechnung von Tuningkurven verwendet.

# Kapitel 4

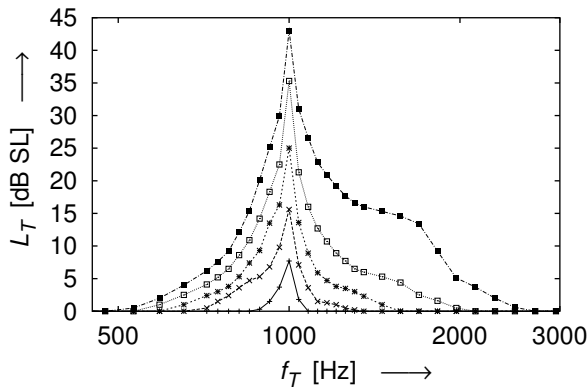
## Untersuchungen an Tuningkurven aus Mithörschwellen-Prototypen

### 4.1 Verfahren und Programm

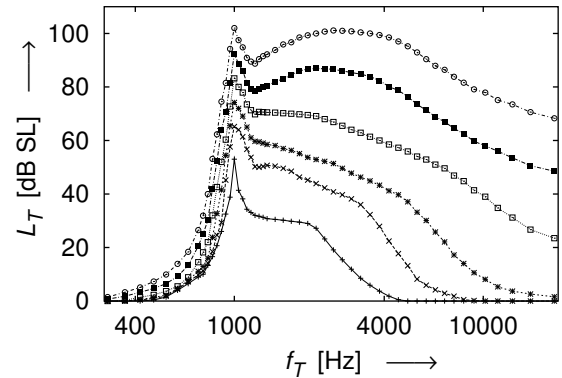
Möchte man Tuningkurven aus Mithörschwellen untersuchen, so ist es zunächst zweckmäßig, sich auf einfache Muster zu beschränken, um die grundlegenden Eigenschaften und Zusammenhänge leichter verstehen zu können. Diese einfachen Mithörschwellenmuster können auf zwei Arten beschrieben werden: parametrisch aus Geradenstücken oder durch Verschiebung eines Prototypen. Die parametrische Variante benutzt zum Beispiel die Steigung an der unteren und der oberen Flanke [21, 22, 27]. Da auf diese Art zusammengesetzte Mithörschwellen gerade Bereiche und Knicke aufweisen, sind sie für die Interpolation weniger geeignet. Außerdem ist die Modellierung des Musters in der Nähe der Spitze schwierig. Deshalb wird hier ein anderer Ansatz verwendet.

Stellt man Mithörschwellen von Sinustönen als Funktion der Tonheit dar und subtrahiert zudem noch die Ruhehörschwelle, so fällt auf, daß das Muster in weiten Bereichen unabhängig von der Maskierfrequenz ist (in Grundzügen in [12], weiterhin in [23] und [44]). Bei Small [25] finden sich ähnliche Betrachtungen, ausgehend von einer logarithmischen Frequenzskalierung. Es liegt nun nahe, diese Eigenschaft zu verwenden, um Mithörschwellen zu generieren. Dazu wurde das Programm `mprot` (masking prototypes) entwickelt, welches vorliegende Mithörschwellen-Prototypen entsprechend der Maskierfrequenz verschiebt, die mittlere Ruhehörschwelle addiert, die Frequenzen nach Hz umwandelt und die so entstandenen Mithörschwellen in für das Tuningkurvenprogramm lesbare Dateien schreibt. Die Formeln für die Ruhehörschwelle und die Frequenzumrechnung sind identisch mit den im Tuningkurven-Programm verwendeten und wurden im Abschnitt 3.2 angegeben. Dem Programm werden Maskierfrequenz und optional der Dateiname für die ausgegebenen Mithörschwellen auf der Kommandozeile übergeben. Der so angegebene Dateiname wird um die Maskierfrequenz und den Maskierpegel erweitert. Intern liegen Prototypen für Maskierpegel von 0-110 dB SL vor, die alle umgerechnet und ausgegeben werden. Diese Prototypen stammen zunächst von Schöne (Abb. 3 in [23]) und reichen über einen weiten Frequenzbereich. Da die Auflösung um die Spitze zu schlecht ist, wurden die Ergebnisse von Zwicker und Jaroszewski (Abb. 8 in [44]) hinzugezogen. In beiden Veröffentlichungen wurden Sinustöne als Maskierer und Testton verwendet. Die Kurve bei 110 dB SL wurde der 100 dB SL Kurve entsprechend angenähert. Die so

entstandenen Prototypen sind in Abb. 4.1 und 4.2 dargestellt und werden in der Folge mehrfach verändert.



**Abb. 4.1:** Mithörschwellen-Prototypen nach Schöne [23] und Zwicker & Jaroszewski [44] für Maskiererpegel 10-50 dB SL.



**Abb. 4.2:** Mithörschwellen-Prototypen wie in Abb. 4.1, jedoch für Maskiererpegel 60-110 dB SL.

## 4.2 Tuningkurven aus Prototypen

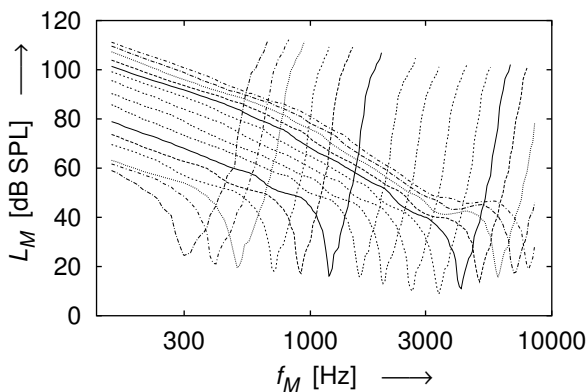
Aus den zuvor beschriebenen Prototypen wurden Tuningkurven errechnet, die in den Abbildungen 4.3 bis 4.6 dargestellt sind. Die Tuningkurven in den ersten drei dieser Abbildungen wurden bei Testtonpegeln von 10-30 dB SL relativ zur mittleren Ruhehörschwelle nach [27] berechnet. Abb. 4.6 enthält Tuningkurven bei festen Testtonpegeln von 20 dB SPL unabhängig von der Ruhehörschwelle.

An diesen Kurven sollen nun grundlegende Eigenschaften der berechneten Tuningkurven erläutert werden. Der allgemeine Verlauf von psychoakustischen Tuningkurven ist deutlich erkennbar: neben einer ausgeprägten Spitze gibt es eine steile obere Flanke und eine flachere untere Flanke. Eine Sättigung zu tiefen Maskierfrequenzen ist hier nicht feststellbar. Beim Übergang von der Spitze zur unteren Flanke entsteht eine Abflachung, die um 3 kHz als Eindellung ausgeprägt ist. Diese Eindellung wird mit steigendem Testtonpegel für die Tuningkurvenberechnung ausgeprägter. Wird die Tuningkurve bei festem Testtonpegel berechnet, kommt es in diesem Bereich zu Überschneidungen benachbarter Tuningkurven. Betrachtet man weiterhin die Veränderungen der Tuningkurven mit steigendem Testtonpegel, so fällt, neben der erwarteten Verschiebung der Kurven zu höheren Pegeln, auf, daß die Spitzen schmaler werden. Der Übergangsbereich von der Spitze zur unteren Flanke wird ebenfalls schmaler, so daß die Kurve scheinbar abknickt.

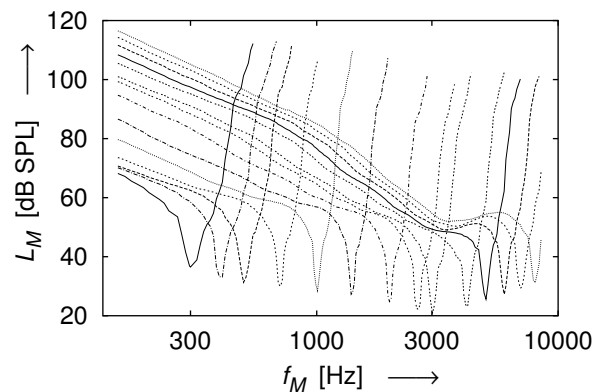
Was sind die Ursachen für diese Eigenschaften? Die steile untere Flanke der Mithörschwellen resultiert in einer steilen oberen Flanke bei Tuningkurven. Die obere Flanke der Mithörschwellen und besonders ihre Auffächerung ist verantwortlich für das Verhalten der unteren Flanke der Tuningkurven. Betrachtet man die Mithörschwellen-Prototypen der 40-60 dB SL Maskierer in den Abbildungen 4.1 und 4.2, so fällt die überproportionale Auffächerung an der oberen Flanke auf, die sich in einem größeren Abstand zu den benachbarten Mithörschwellen zeigt. Sie ist verantwortlich für die flachen Stellen an der unteren Flanke der Tuningkurven. Als weitere Ursache dafür kann die nahezu konstante, geringe Steigung in einem weiten Bereich der oberen Flanke der Mithörschwellen

angesehen werden. Da die 3 kHz-Senke der Ruhehörschwelle bei der Ruhehörschwellenaddition auf die Maskiererpegel und die Maskierung abgebildet wird, ist sie auch in den Tuningkurven sichtbar. Die Ursache dafür ist, daß die Maskiererpegel, die in der Tuningkurve dargestellt werden, um 3 kHz relativ abgesenkt werden, während die Maskierung, an der die Tuningkurve berechnet wird, bei höheren Bestfrequenzen unbeeinflusst bleibt. Bei gleichem Testtonpegel für die Berechnung der Tuningkurven an verschiedenen Bestfrequenzen kommt es dadurch zum Überschneiden der einzelnen Tuningkurven in diesem Bereich. Die Aufweitung der Spitzen zu niedrigen Pegeln ist auch in den Mithörschwellen-Prototypen zu erkennen und wird von diesen aus auf die Tuningkurven abgebildet. In den Mithörschwellen erkennt man ebenfalls, daß bei höheren Maskiererpegeln der Übergang von der Spitze zur oberen Flanke mit einem Knick erfolgt.

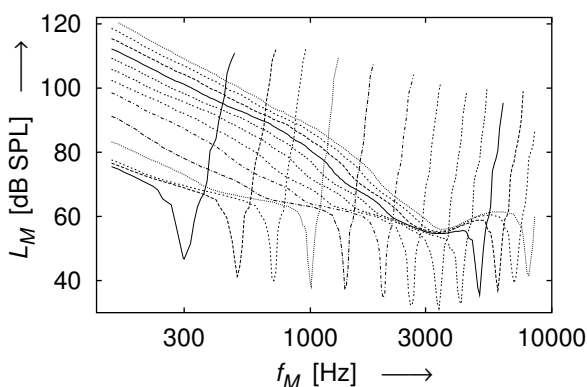
Eine detailliertere, quantitative Untersuchung der errechneten Tuningkurven erfolgt mit Tuningkurven aus Mithörschwellen aus der Literatur. Die nächsten Überlegungen sollen der im Modell der peripheren Schallsignalübertragung nach Terhardt [29, 30] vorausgesetzten Sättigung der Tuningkurven gelten.



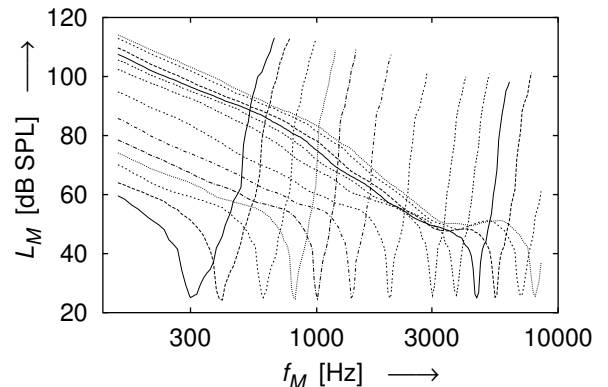
**Abb. 4.3:** Tuningkurven aus Mithörschwellen-Prototypen nach den Daten von Schöne [23] und Zwicker & Jaroszewski [44] für 10 dB SL Maskierung.



**Abb. 4.4:** Tuningkurven wie in Abb. 4.3, jedoch für 20 dB SL Maskierung. Zu den Prototypen vergleiche man Abb. 4.1 und 4.2.



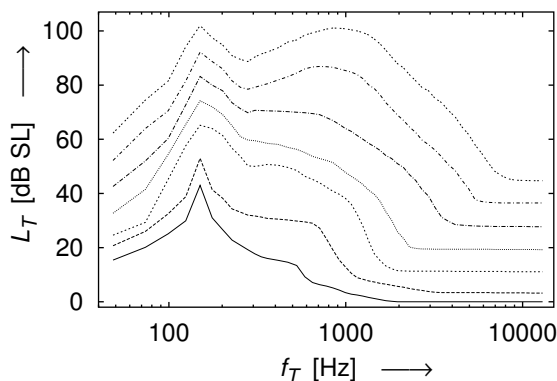
**Abb. 4.5:** Tuningkurven bei 30 dB SL Maskierung, ansonsten wie Abb. 4.3.



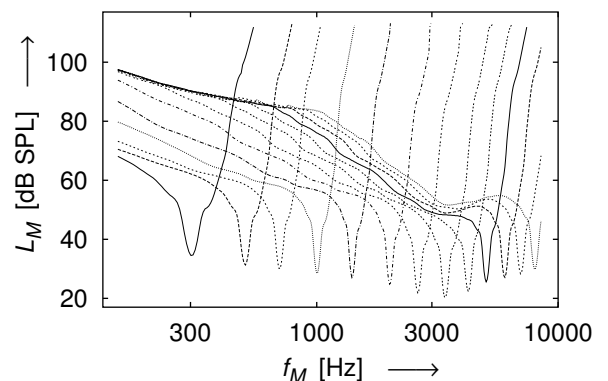
**Abb. 4.6:** Tuningkurven bei konstanter Maskierung von 20 dB SPL. Daten wie Abb. 4.3.

### 4.3 Zur Modellierung der Sättigung in Tuningkurven

Die mit dem bisher verwendeten Ansatz berechneten Tuningkurven steigen an der unteren Flanke mit nahezu konstanter Steigung stetig an. Es kann daher nicht von Sättigung gesprochen werden. Das wirft zwei Fragen auf: Warum läßt sich die Sättigung nicht modellieren? Welche Faktoren beeinflussen sie im vorliegenden Ansatz? Betrachtet man die Mithörschwellen-Prototypen in Abb. 4.2 genauer, so fällt auf, daß die Maskierung an der oberen Flanke mit zunehmendem Abstand der Testtonfrequenz zur Maskierfrequenz stark abfällt. Läßt man die Addition der Ruhehörschwelle unberücksichtigt, so führt dies dazu, daß der Maskiererpegel mit zunehmendem Abstand vom Testton angehoben werden muß, also die resultierende Tuningkurve nicht in Sättigung gehen kann. Deshalb wurde das Mithörschwellen-Prototypenmuster so verändert, daß es an der oberen Flanke Sättigungscharakter aufweist. In Abb. 4.7 sind die Prototypen mit extremster Sättigung dargestellt, in Abb. 4.8 die dazugehörigen Tuningkurven. Vergleicht man diese mit den Tuningkurven in Abb. 4.4, so fällt zunächst das Absinken der Tuningkurve um 20 dB bei niedrigen Maskierfrequenzen auf, da die Maskierung in den Mithörschwellen-Prototypen durch die Sättigung angehoben wurde. Die Steigung an der unteren Flanke ist nur noch gering. Die Tuningkurven verlaufen um 90-95 dB SPL asymptotisch ineinander, da die Maskierung im Sättigungsbereich gleich mit dem Maskiererpegel steigt. Insgesamt kann also von einer Sättigung der Tuningkurven gesprochen werden, obwohl die Kurven immer noch etwas ansteigen.



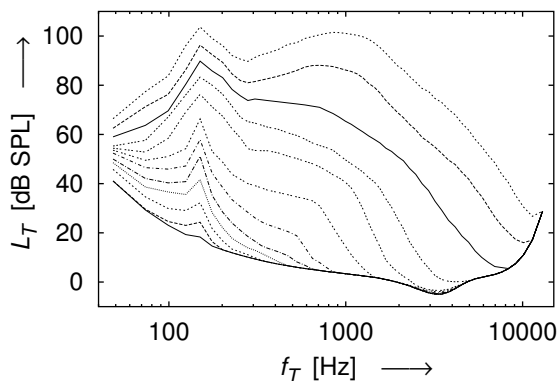
**Abb. 4.7:** Mithörschwellen-Prototypen nach den Daten von Schöne [23] und Zwicker & Jaroszewski [44] mit Sättigung zu hohen Testtonfrequenzen vor Addition der Ruhehörschwelle.



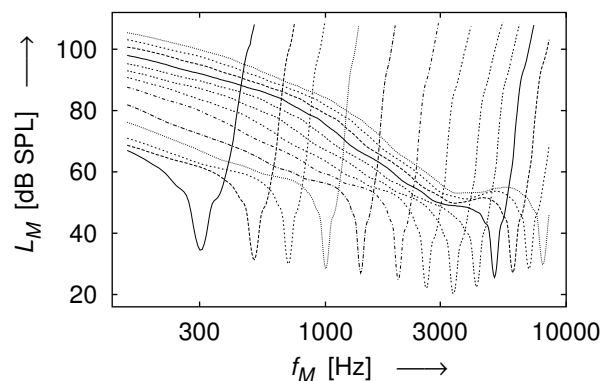
**Abb. 4.8:** Tuningkurven aus Mithörschwellen aus Prototypen mit Sättigung wie in Abb. 4.7 bei 20 dB SL Maskierung.

Dieser Anstieg hat seine Ursache in der Addition der Ruhehörschwelle. Die Grundannahme für die Generierung der Mithörschwellen, nämlich die Unabhängigkeit des Musters von der Maskierfrequenz, ist bei sehr hohen oder sehr tiefen Frequenzen nicht mehr gegeben. Die Addition der Ruhehörschwelle führt in diesem Bereich zu Fehlern. Stellt man sich die Ruhehörschwelle auf die Prototypen in Abb. 4.7 addiert vor, so erkennt man, daß die Maskierung zu hohen und tiefen Frequenzen stark ansteigt und Werte deutlich höher als die Ruhehörschwelle und der Maskiererpegel erreichen werden können. Dies steht offensichtlich im Widerspruch zur Realität und wurde zunächst durch eine Beschränkung des Frequenzbereiches der Testtonfrequenzen in den Mithörschwellen unterbunden. Vergleicht man gemessene Mithörschwellen mit den generierten bei sehr hohen und sehr tiefen Testtonfrequenzen, so stellt man fest, daß die gemessenen in Entfernung vom Maskierer eher

der Ruhehörschwelle entsprechen, in der Nähe aber eher dem Mithörschwellen-Prototypen ohne Addition der Ruhehörschwelle. Es scheint also eine Art Schwellenkriterium vorzuliegen: ist die Maskierung durch den Maskierer deutlich geringer als der Einfluß der Ruhehörschwelle, bildet letztere die Mithörschwelle. Überwiegt der Einfluß des Maskierers, wird die Mithörschwelle hauptsächlich durch diesen bestimmt. Die Ruhehörschwelle hat dennoch einen Einfluß und erhöht die Mithörschwelle, aber nicht um ihren vollen Betrag. Dies gilt für das hier verwendete Verfahren bei sehr hohen und sehr tiefen Testtonfrequenzen. Weil ein Frequenzbereich-orientiertes Schwellenkriterium schwer festzulegen und zu implementieren ist, wurde der folgende Weg eingeschlagen: Da die Maskierung bei hohen Maskiererpegeln meistens überwiegt, dagegen die Ruhehörschwelle bei niedrigen, wurde diese bei der Addition entsprechend dem Maskiererpegel gewichtet. Diese Gewichtung führt zu realitätsnahen Mithörschwellen auch bei sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen. Dazu betrachte man Abb. 4.9. Bei hohen Maskiererpegeln reduziert sich durch dieses Verfahren jedoch der Einfluß der Gehörgangsresonanz bei 3 kHz. Wenn der Prototyp keine Maskierung vorgibt, kann es vorkommen, daß durch die Gewichtung der Ruhehörschwelle die generierte Mithörschwelle für höhere Maskiererpegel in Entfernung vom Maskierer unter den Wert der Ruhehörschwelle absinkt. Das Programm vergleicht daher die berechnete Maskierung mit der Ruhehörschwelle und begrenzt sie zu niedrigen Werten hin auf die Ruhehörschwelle. Die Gewichtung wird bis zu einem Maskiererpegel von 30 dB SL bei dem Wert 1 belassen und dann zu höheren Maskiererpegeln hin allmählich gesenkt, um bei 110 dB SL den Faktor 0,1 zu erreichen.



**Abb. 4.9:** Mithörschwellen aus Prototypen nach den Daten von Schöne [23] und Zwicker & Jaroszewski [44] mit Gewichtung der Ruhehörschwellen-Addition bei 150 Hz Maskierfrequenz und Maskiererpegeln von 17-112 dB SPL.



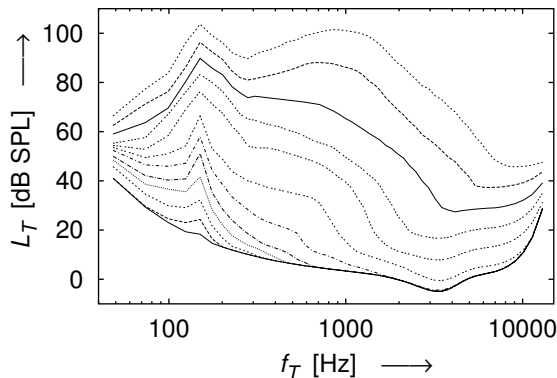
**Abb. 4.10:** Tuningkurven aus Mithörschwellen aus Prototypen wie in Abb. 4.9 mit Gewichtung der Ruhehörschwellen-Addition bei 20 dB SL Maskierung.

Tuningkurven aus diesen Mithörschwellen sind in Abb. 4.10 dargestellt. Man erkennt eine Tendenz zur Sättigung durch eine Krümmung der Kurve zu niedrigeren Maskiererpegeln hin. Die Tuningkurven sinken im Vergleich zu Abb. 4.4 bei sehr tiefen Frequenzen um ungefähr 10 dB ab. Dies entspricht dem erwarteten Wert, der sich aus der Ruhehörschwelle bei 150 Hz von 17 dB SPL und der Gewichtung der Ruhehörschwelle von etwa 0,4 für Maskiererpegel um 100 dB SPL ergibt.

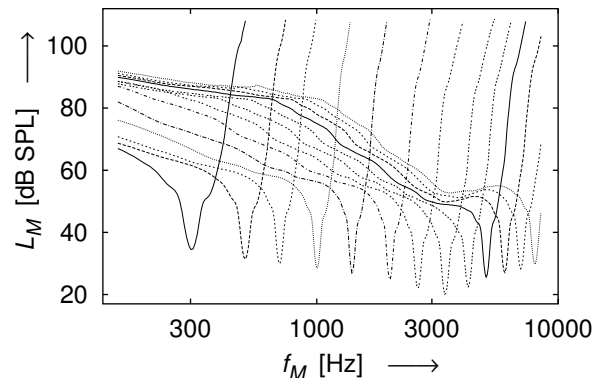
In Abb. 4.11 sind Mithörschwellen nach der gewichteten Addition der Ruhehörschwelle mit Sättigung des Prototypen, also der Verbindung beider Methoden, dargestellt. Bei sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen erkennt man, wie sich die Mithörschwellen der



Ruhehörschwelle anpassen, ohne jedoch realitätsferne Werte anzunehmen. In Abb. 4.12 sind die zugehörigen Tuningkurven dargestellt. Man erkennt eine im Vergleich zu Abb. 4.8 etwas stärkere Sättigung, die ohne Addition der Ruhehörschwelle sogar zu einem waagerechten Verlauf führen würde. Die Krümmung der Tuningkurven an der unteren Flanke, die bei der getrennten Verwendung beider Methoden beobachtet wurde, ist praktisch nicht mehr vorhanden. Durch die unterschiedliche Gewichtung bei verschiedenen Maskiererpegeln liegen die Kurven jetzt nicht mehr exakt aufeinander. Insgesamt hat sich der Pegel an der unteren Flanke im Vergleich zu den ursprünglichen Daten um etwa 30 dB reduziert. Eine Sättigung an der unteren Flanke der Tuningkurven ist jetzt deutlich erkennbar.



**Abb. 4.11:** Mithörschwellen aus Prototypen nach den Daten Schöne [23] und Zwicker & Jaroszewski [44] mit Gewichtung der Ruhehörschwellen-Addition wie in Abb. 4.9 und Sättigung des Prototypen wie in Abb. 4.7 bei 150 Hz Maskierfrequenz und Maskiererpegeln von 17-112 dB SPL.



**Abb. 4.12:** Tuningkurven aus Mithörschwellen aus Prototypen wie in Abb. 4.9 mit Gewichtung der Ruhehörschwellen-Addition und Sättigung des Prototypen wie in Abb. 4.11 bei 20 dB SL Maskierung.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß der allgemeine Verlauf von psychoakustischen Tuningkurven mit Tuningkurven aus einfachen Mithörschwellen-Prototypen übereinstimmt. Berechnet man die zugrunde liegenden Mithörschwellen aus Prototypen, die der Maskierfrequenz entsprechend über der Bark-skalierten Testtonfrequenz verschoben werden und addiert die Ruhehörschwelle, so kann man die Sättigung auf zwei Arten beeinflussen:

- Der Mithörschwellen-Prototyp weist Sättigungsverhalten zu hohen Testtonfrequenzen hin auf, oder
- die Ruhehörschwelle wird bei der Addition zu hohen Maskiererpegeln hin geringer gewichtet.

Im nächsten Kapitel werden die Eigenschaften von berechneten Tuningkurven aus gemessenen Mithörschwellen betrachtet.

# Kapitel 5

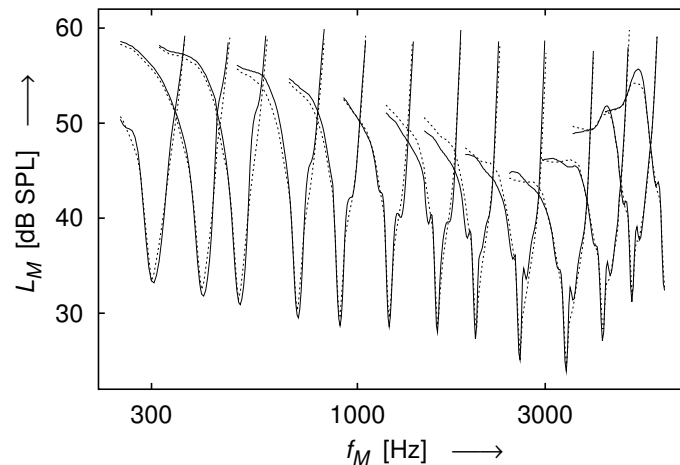
## Untersuchungen an Tuningkurven aus gemessenen Mithörschwellen

### 5.1 Untersuchungen mit Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski

Im Jahr 1982 veröffentlichten Zwicker und Jaroszewski Ergebnisse von Mithörschwellenmessungen, die mit Sinustonmaskierern mit den Frequenzen 250, 400, 1000, 4000 und 6030 Hz bei Maskiererpegeln von 20-60 dB SPL gemessen waren [44]. Aufgrund der niedrigen Maskiererpegel und der Verwendung von 15-17 Testtonfrequenzen im Abstand von etwa zwei Bark um die Maskierfrequenz sind diese Ergebnisse sehr gut zur Umrechnung in Tuningkurven geeignet. Bei der Messung wurde eine Békésy-Tracking-Prozedur verwendet, wobei die Testtöne gepulst waren und die Darbietung freifeldentzerrt über Kopfhörer stattfand.

Berechnet man aus diesen Mithörschwellen Tuningkurven, so ist die Testtonpegel-Vorgabe bei mindestens 20 dB über der mittleren Ruhehörschwelle (vergleiche dazu Abschnitt 3.2) zu halten, damit eine Berechnung bei allen Maskierfrequenzen möglich ist. So erhält man die Tuningkurven in Abb. 5.1. Über die Auswirkungen der beiden Interpolationsmethoden, die hier deutlich zutage treten, wurde bereits ausführlich in den Abschnitten 3.4 - 3.6 gesprochen.

Nun sollen die Eigenschaften dieser Tuningkurven betrachtet werden. Das Aussehen entspricht einem Ausschnitt aus den bekannten Mustern: der Spitze einer Tuningkurve mit dem Übergangsbereich zur Sättigung und der steilen oberen Flanke. Die Beschränkung der berechneten Tuningkurve geschieht durch den höchsten Maskiererpegel von 60 dB SPL an der oberen Flanke und an der unteren Flanke durch den maximalen Frequenzabstand zwischen Maskierer und Testton von etwa zwei Bark. Bei Verwendung der Spline-Interpolation treten im Bereich der Spitze durch Überschwingen Stufen auf, die bereits in Abb. 3.2 zu sehen sind und bei linearer Interpolation nicht auftreten. Bei tiefen Bestfrequenzen deutet sich an der unteren Flanke eine Sättigung an, die bei hohen Frequenzen als Plateau mit Überschwingen ausgeprägt ist. In Abschnitt 5.3 wird festgestellt, daß es sich bei dem Plateau noch nicht um die Sättigung handelt. Der Übergang von der Spitze in diesen Bereich geschieht bei etwa 18 dB oberhalb der Spitze. Bei tiefen Bestfrequenzen wird der Sättigungsbereich bei etwa 25-30 dB über der Spitze erreicht. Interessant ist die



**Abb. 5.1:** Berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski [44] bei 20 dB SL. Durchgezogene Linien: Ergebnisse von Spline-Interpolation, punktiert: von linearer Interpolation.

Tatsache, daß der Verlauf der Steigung im Sättigungs- bzw. Plateaubereich der Steigung der Ruhehörschwelle angepaßt ist. Ein ähnliches Verhalten war bei den Untersuchungen an Tuningkurven aus Prototypen festzustellen. Für Maskierfrequenzen zwischen den beiden Stützstellen 1000 und 4000 Hz treten an der unteren Flanke Unterschiede zwischen den zwei Interpolationsmethoden auf, die jedoch die allgemeine Aussagekraft der Ergebnisse nicht einschränken, da in beiden Fällen dieselben Eigenschaften der Tuningkurve zu erkennen sind. In der doppeltlogarithmischen Darstellung nimmt die Breite der Spitze mit zunehmender Bestfrequenz immer mehr ab. Die berechneten  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Bei niedrigen Bestfrequenzen betragen sie etwa 8, steigen dann an zu mittleren Bestfrequenzen auf 14-15, um dann wieder abzufallen auf etwa 8. Der Abfall zu hohen Bestfrequenzen beruht auf dem zunehmenden Einfluß der flachen Stelle in der oberen Flanke. Es gibt einen großen Unterschied der bei linearer und Spline-Interpolation ermittelten  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte, der den Faktor 1,5 ausmachen kann. Dies liegt an der Formung des Splines um die Spitze: Direkt an der Spitze verbreitert der Spline diese, da er nicht unbegrenzt gekrümmt wird. Im Bereich 10 dB oberhalb der Spitze ist diese deshalb im Vergleich zur linearen Interpolation schmaler, da die Steigung der Kurve durch die Aufweitung um die Spitze etwas steiler ist und zunächst weitestgehend beibehalten wird. Hinzu kommt der Einfluß des Überschwingens an der oberen Flanke der Mithörschwellen, was sich bei höheren Bestfrequenzen auswirkt. Nun soll die graphisch ermittelte Steigung an der oberen Flanke betrachtet werden, die ebenfalls in Tabelle 5.1 angegeben ist. Bei einer Bestfrequenz von 500 Hz beträgt sie etwa 130 dB/oct, um dann auf Werte um 160-180 dB/oct anzusteigen. Betrachtet man die Steigung in dB/Bark, so ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Skalierung ein anders Bild: sie fällt von 50 dB/Bark bei 300 Hz Bestfrequenz auf 38-40 dB/Bark bei Bestfrequenzen größer 500 Hz ab. Der Abfall zu hohen Bestfrequenzen ist ebenso wie bei den  $Q_{10\text{dB}}$ -Werten durch den Einfluß der flachen Stelle in der oberen Flanke bedingt. Die Steigung oberhalb dieser Unregelmäßigkeitsstelle ist deutlich höher und überschreitet Werte von 200 dB/oct. Weiterhin sind in Tabelle 5.1 die  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte bei 37 dB SL zur mittleren Ruhehörschwelle angegeben. Aufgrund der Beschränkung der Maskierpegel auf 60 dB SPL konnten jedoch nur noch wenige Werte berechnet werden. Es fällt auf, daß alle  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte bei 37 dB SL-Tuningkurven kleiner

oder gleich denen aus 20 dB SL-Tuningkurven sind, die Spitzen also breiter werden. Dies liegt zum einen an einer objektiven Verbreiterung der Spitze, zum anderen an der Lage der 10 dB Meßpunkte im Übergangsbereich von der Spitze zur unteren Flanke, da die Höhe der Spitze mit zunehmendem Pegel abnimmt. Der große Unterschied im  $Q_{10\text{ dB}}$ -Wert zwischen der linearen und Spline-Interpolation beruht auf dem in Abb. 5.1 sichtbaren unterschiedlichen Verhalten im Bereich des Überschwingens an der oberen Flanke und im Übergangsbereich von der Spitze zur unteren Flanke.

In der Folge wird nach weiteren Mithörschwellen in der Literatur gesucht, um die Sättigung zu untersuchen und die bisherigen Ergebnisse zu bestätigen.

Bestfrequenz [Hz]	$Q_{10\text{ dB}}^a$		Steigung obere Flanke <sup>b</sup>		$Q_{10\text{ dB}}^c$	
	linear	Spline	[dB/oct]	[dB/Bark]	linear	Spline
300	6,6	6,9	103	51		
400	8,0	8,4	141	49		
500	9,2	10,0	129	40		
700	11,4	13,4	145	34		
900	12,7	16,5	156	36	11,5	
1200	12,7	18,1	168	37		14,1
1600	11,8	17,1	174	38		
2000	9,7	14,1	193	38		
2600	10,3	13,0	174	40	6,5	11,9
3400	8,7	10,9	155	41	5,9	10,9
4200	6,9	8,2	154	39		
5000	7,5	9,7	157	38		

<sup>a</sup> bei 20 dB SL zur mittleren Ruheshwelle nach [27].

<sup>b</sup> graphisch ermittelte mittlere Steigung der oberen Flanke, ansonsten wie in (a).

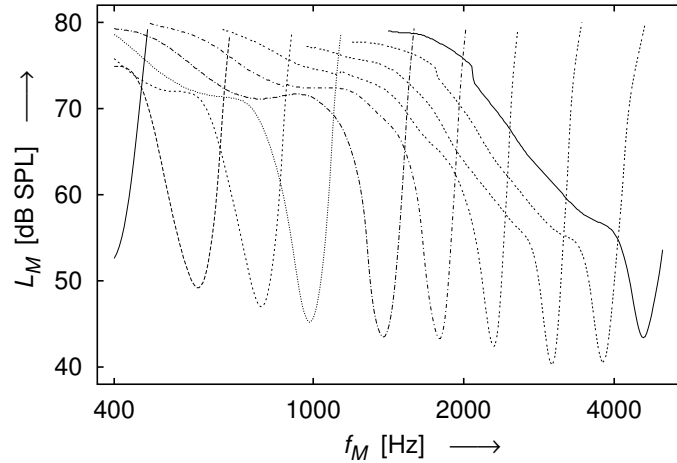
<sup>c</sup> bei 37 dB SL zur mittleren Ruheshwelle nach [27]. Fehlende Werte konnten nicht ermittelt werden.

**Tab. 5.1:** Steigung der oberen Flanke und  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte für Tuningkurven aus Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski [44].

## 5.2 Untersuchungen mit Mithörschwellen von Sonntag

Ebenfalls im Jahr 1982 veröffentlichte Sonntag einen Satz von Mithörschwellen, die aber im Unterschied zu denen von Zwicker und Jaroszewski bei Maskiererpegeln von 40-80 dB SPL gemessen wurden [26]. Die Sinustonmaskiererfrequenzen waren mit 400, 700, 1500, 3300 und 5000 Hz gleichmäßig verteilt. Es wurden 9-11 Testtonfrequenzen über einen weiten Frequenzbereich verwendet. Daher sind diese Daten besonders gut für die Untersuchung der unteren Flanke von berechneten Tuningkurven geeignet. Sonntag verwendete ebenso wie Zwicker und Jaroszewski einen gepulsten Testton und führte den Versuch mit freifeldentzerrter Kopfhörerdarbietung durch. Er arbeitete jedoch mit der Methode des pendelnden Einregelns und unterlegte den Testschallen gleichmäßig verdeckendes Rauschen, um Differenzöne zu maskieren. Aufgrund des hohen niedrigsten Maskiererpegels

sind vollständige Tuningkurven erst ab einer Testtonpegelvorgabe von 40 dB SL zur mittleren Ruhehörschwelle möglich. Sie sind in Abb. 5.2 dargestellt. Eine Berechnung nur der Flanken kann dagegen auch für niedrigere Vorgaben durchgeführt werden.



**Abb. 5.2:** Mit Spline-Interpolation berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von Sonntag [26] bei 40 dB SL.

Nun sollen die Tuningkurven bei 40 dB SL in Abb. 5.2 beschrieben werden. Im Bereich von 70-80 dB SPL deutet sich eine Sättigung an der unteren Flanke an. Bei Bestfrequenzen oberhalb 3000 Hz tritt bereits 15-20 dB oberhalb der Spitze (um 55 dB SPL) eine Abflachung der Kurve mit nachfolgender Verringerung der Steigung an der unteren Flanke auf. Dieses Verhalten war bereits in den Tuningkurven aus Prototypen zu erkennen. Die Tuningkurven zu tieferen Bestfrequenzen weisen eine hohe Spitze mit einem Plateau im Übergangsbereich zur unteren Flanke auf. Dieses Plateau liegt jedoch etwa 30 dB über der Spitze (um 73 dB SPL). Bei weiterer Entfernung von der Bestfrequenz steigen die Tuningkurven nochmals an. Die obere Flanke ist steil und regelmäßig. Die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte, angegeben in Tabelle 5.2, sind bei tiefen Bestfrequenzen im Mittel etwas niedriger als in den Tuningkurven aus den Daten von Zwicker und Jaroszewski, bei hohen etwas größer. Unter Berücksichtigung der geringen Anzahl von Meßdaten um die Maskierfrequenz in den Daten von Sonntag läßt sich von einer groben Übereinstimmung der Ergebnisse sprechen.

Berechnet man aus diesen Daten nur die Flanken von Tuningkurven bei einer niedrigeren Maskierung, so läßt sich die Sättigung weiter untersuchen. Dies soll im nächsten Abschnitt betrachtet werden.

### 5.3 Untersuchungen mit Mithörschwellen von Zwicker & Jaroszewski und Sonntag

Die Verbindung der Daten aus den Mithörschwellenmessungen von Zwicker & Jaroszewski [44] und Sonntag [26] ermöglicht es nun, Tuningkurven über einen weiten Frequenzbereich zu berechnen. Dies ist möglich, da beide Veröffentlichungen auf ähnlichen Versuchsbedingungen beruhen. Erschwerend wirken jedoch die unterschiedlichen Maskierfrequenzen und -pegel in beiden Datensätzen. An den Übergangsstellen kann es deshalb zu Diskontinuitäten kommen. Es wurden drei verschiedene Ansätze für die parallele Verarbeitung beider Datensätze untersucht:

Bestfrequenz	Sonntag <sup>a</sup>		Fletcher <sup>b</sup> Steigung	Schmalbandrauschen - Zwicker <sup>c</sup>		
	$Q_{10\text{ dB}}$			$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung obere Flanke	
[Hz]	linear	Spline	[dB/oct]	Spline	[dB/oct]	[dB/Bark]
400			121	2,0	94	29
500	5,8	4,4	122	2,3	113	30
700	6,9	5,1		2,9	141	35
900	8,0	5,9		3,4	160	37
1200	9,9	6,7	126	3,7	174	39
1600	10,6	7,7	90	3,7	184	40
2000	9,6	8,8	108	3,6	181	42
2600	9,0	9,8	158	3,5	181	49
3400	8,5	8,8		3,3		
4200	6,8	6,8				

<sup>a</sup> bei 40 dB SL zur mittleren Ruhehörschwelle aus Mithörschwellen von Sonntag [26].

<sup>b</sup> graphisch ermittelte mittlere Steigung der oberen Flanke in Tuningkurven aus Daten von Fletcher [7], berechnet bei 20 dB SL zur mittleren Ruhehörschwelle. Bei den fehlenden Werten ist eine sinnvolle Angabe nicht möglich.

<sup>c</sup> Tuningkurven berechnet bei 25 dB SL zur mittleren Ruhehörschwelle aus Mithörschwellen von Schmalbandrauschen nach Zwicker [41], siehe Text.

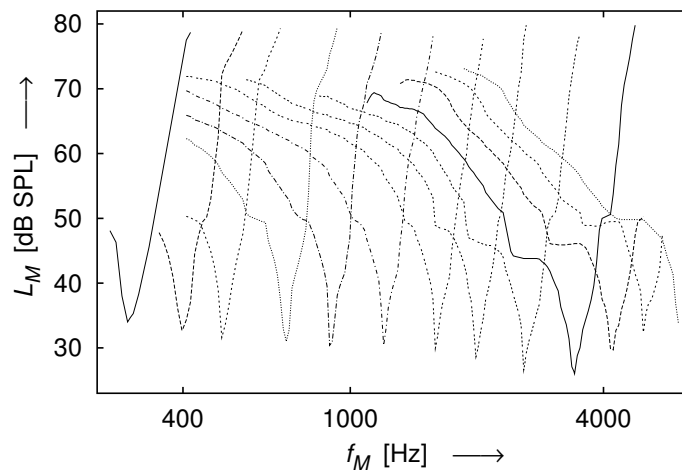
**Tab. 5.2:**  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte und Steigungen an der oberen Flanke von Tuningkurven aus Mithörschwellen von Sinustönen (Sonntag [26] und Fletcher [7]), sowie Schmalbandrauschen (Zwicker [41]).

- Es werden sämtliche Daten zur Berechnung parallel verwendet. Dadurch erscheinen die Muster nicht sehr homogen und es treten Sprungstellen im Übergangsbereich zwischen den Daten bei 40 und 60 dB SPL auf. Der Vorteil ist jedoch, daß es keine Lücken in den interpolierten Mithörschwellen gibt.
- Um die Homogenität der Ergebnisse zu erhöhen, werden die Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski im Bereich der Spitze von 20-40 dB SPL Maskiererpegel verwendet und von 50-80 dB SPL die Ergebnisse von Sonntag. Im Bereich zwischen 40 und 50 dB SPL ist jedoch aufgrund der verschiedenen Maskierfrequenzen keine Interpolation möglich, was zu einer Sprungstelle führt.
- Durch die Doppelangabe von Mithörschwellen bei 50 dB SPL können die Bereiche mit ungültigen Werten vermieden werden. Dies ist jedoch nur unter Verwendung der linearen Interpolation möglich. Diese, im Folgenden verwendete Methode, nutzt demnach von 20-50 dB SPL Maskiererpegel die Ergebnisse von Zwicker und Jaroszewski und von 50-80 dB SPL die Daten von Sonntag. So kommt es nur noch um 50 dB SPL zu Diskontinuitäten.

Alle drei Ansätze erforderten eine Modifikation der Interpolationsroutinen, auf die bereits in Abschnitt 3.3 eingegangen wurde. In Abbildung 5.3 sind die Tuningkurven nach der letzten Methode dargestellt. Die Spitzen und  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte sind identisch zu denen aus den Daten von Zwicker und Jaroszewski mit linearer Interpolation berechneten. In dieser Darstellung zeigt sich, daß die in Abb. 5.1 sichtbare „Sättigung“ an der unteren Flanke nur ein Plateau ist, von dem ausgehend die untere Flanke mit geringerer Steigung

weiterhin steigt. Hier kommt es zu einer Unstetigkeitsstelle in der Tuningkurve durch den Übergang zwischen beiden Datensätzen und die Begrenzung der Tuningkurven von Zwicker und Jaroszewski zu tiefen Maskierfrequenzen. Im weiteren Verlauf flacht sich die untere Flanke zunehmend ab, so daß sie Sättigungscharakter bekommt. Der Pegelbereich für die Sättigung beträgt etwa 70-80 dB SPL. Der bei einigen Tuningkurven beobachtete Abfall um 70 dB SPL hat seine Ursache in einem lokalen Anstieg der Maskierung in der zugrunde liegenden Mithörschwelle. Die obere Flanke weist bis auf wenige Ausnahmen bei höheren Bestfrequenzen einen glatten Verlauf auf. Dies bestätigt die Vergleichbarkeit beider Datensätze.

Durch die Verwendung von Daten aus zwei verschiedenen Veröffentlichungen konnten Tuningkurven über einen weiten Maskierfrequenz- und -pegelbereich berechnet werden. Diese haben das erwartete Aussehen von psychoakustischen Tuningkurven. Neben der Sättigung lassen sich Plateaus nachweisen. Diese Tuningkurven werden im nächsten Kapitel mit Tuningkurven in der Literatur verglichen. Zunächst soll jedoch noch auf weitere berechnete Tuningkurven eingegangen werden.



**Abb. 5.3:** Berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von Zwicker & Jaroszewski [44] (Maskierpegel 20-50 dB SPL), sowie Sonntag [26] (Maskierpegel 50-80 dB SPL).

## 5.4 Untersuchungen mit Mithörschwellen von Fletcher

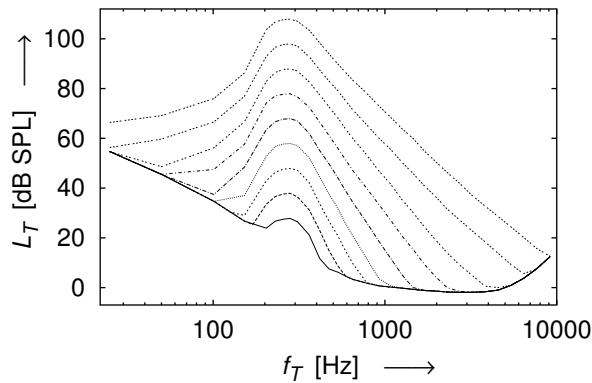
Sucht man in der Literatur nach gemessenen Mithörschwellen von Sinustönen und geht in die Anfangszeit der Psychoakustik zurück, so findet man die Mithörschwellensätze von Fletcher (1923) in [7] und Wegel & Lane (1924) [36]. Da die Daten von Fletcher bereits digitalisiert vorlagen, wurden sie in die Darstellung für die Interpolation umgewandelt und verwendet. Leider wurden von Fletcher nur wenige Testtonfrequenzen verwendet, so daß keine Aussage über den Nahbereich um die Spitze gemacht werden kann. Deshalb wird auf eine Angabe der Tuningkurven verzichtet. Die Steigung an der oberen Flanke ist Tabelle 5.2 zu entnehmen. Dabei fällt auf, daß sie bei hohen und tiefen Bestfrequenzen gut mit den berechneten Ergebnissen aus den Daten von Zwicker und Jaroszewski übereinstimmt, bei Bestfrequenzen um 1 kHz jedoch zu niedrigeren Werten abweicht.

## 5.5 Untersuchungen mit Mithörschwellen von Schmalbandrauschen

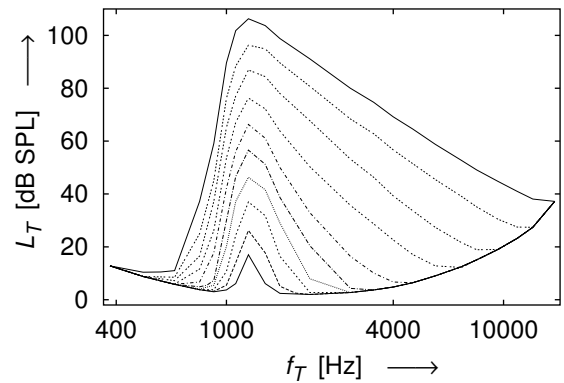
Die bisher untersuchten Mithörschwellen von Sinustönen weisen bei der Messung die Eigenschaft auf, daß Differenzöne und Schwebungen auftreten. Diese sind häufig eher detektierbar als der Testton selbst, was zu einer Veränderung des Entscheidungskriteriums führen kann. Verwendet man dagegen Schmalbandrauschen als Maskierer, so treten Differenzöne sehr viel seltener hervor, so daß die eigentliche Messung ungestörter verläuft. Trotz dieser Vorzüge ist es schwierig, Mithörschwellensätze von etwa frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen in der Literatur zu finden. Bilger und Hirsch [2] veröffentlichten einen sehr umfangreichen Satz von Mithörschwellen, der jedoch mit einer zu geringen Flankensteilheit des Rauschens von maximal 56 dB/oct gemessen wurde und deshalb nicht verwendbar war. Auch Zwicker hat Mithörschwellen von Schmalbandrauschen gemessen, sie jedoch nicht direkt veröffentlicht. In [41] gab er, neben einem Mithörschwellensatz zur Mittenfrequenz 1200 Hz, die aus den Mithörschwellen abgeleiteten Erregungskurven von Maskierern mit 280 und 4000 Hz Mittenfrequenz an. Die Messung fand mit Schmalbandrauschen statt, das etwas schmalere als frequenzgruppenbreit war und, abgesehen von Veränderungen im Bereich des Auftretens von Differenzönen, die selben Mithörschwellen liefern soll wie der Bandmittenton gleichen Schalldruckpegels. Mit Hilfe seiner Erläuterungen zur Umrechnung, den Angaben von Mithörschwellen und Erregungskurven bei 1200 Hz und der Darstellung des Amplitudenmodulationsgrades auf Seite 373 in [40], läßt sich der Übergangssummand von den Mithörschwellen auf die Erregungsverläufe bestimmen, der in Abb. 5.7 gegeben ist. In den Abbildungen 5.4 und 5.6 sind die aus den Erregungsverläufen durch Subtraktion der Werte von Abb. 5.7 berechneten Mithörschwellen dargestellt. Die Mithörschwellen zur Mittenfrequenz 1200 Hz sind in Abb. 5.5 gegeben und wurden [41] direkt entnommen. Die Frequenzen in Tonheit wurden mit Hilfe von Bild 34.2 in [43] nach Hertz zurückgerechnet, da sich mit der ansonsten in dieser Arbeit verwendeten Formel zu große Ungenauigkeiten ergaben. Die Kurven sind sehr glatt gezeichnet, was darauf schließen läßt, daß es sich um angenäherte Meßdaten handelt, die dann nach Erregungsverläufen mit hinreichender Genauigkeit umgewandelt wurden. Besonders günstig ist für die Umrechnung in Tuningkurven der große Maskiererpegelbereich von 20-110 dB SPL.

Die aus diesen Mithörschwellen bei 25 dB SL Pegel über der mittleren Ruhehörschwelle berechneten Tuningkurven sind in Abb. 5.8 dargestellt. Sie sind ebenso wie die Mithörschwellen glatte Kurven mit weiten Spitzen. In Tabelle 5.2 sind die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte angegeben. Das fast frequenzgruppenbreite Rauschen weitet die Spitzen entsprechend auf, was sich durch die Ähnlichkeit der logarithmischen Frequenzskale und der Tonheitsachse bei höheren Frequenzen in nahezu konstanten, niedrigen  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werten äußert. Der Übergang von der Spitze in die untere Flanke erfolgt in einem weiten Bogen. Dabei nimmt die Steigung der Kurve ab, so daß sie Sättigungscharakter erhält. Je nach Bestfrequenz kann von einer Sättigung im Bereich von 85-105 dB SPL, also etwa 70-80 dB über der Spitze, gesprochen werden. Um 1200 Hz fällt bei den Tuningkurven zu höheren Bestfrequenzen eine flache Stelle bei etwa 48 dB über der Spitze auf. Sie korrespondiert mit dem Einsatz der Auffächerung der oberen Flanke in den Mithörschwellen des Maskierers mit 1200 Hz Mittenfrequenz. Die oberen Flanken in den Tuningkurven sind steil und regelmäßig. Die

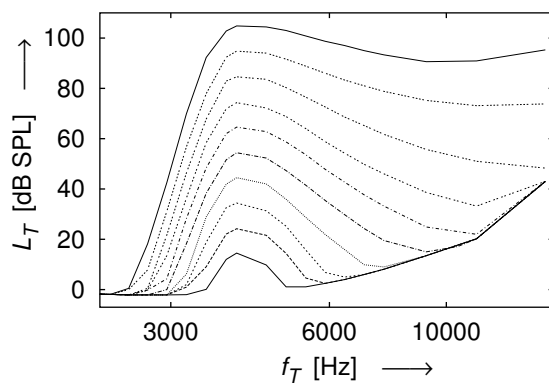




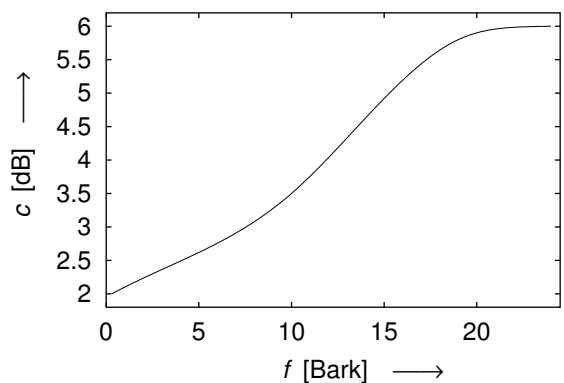
**Abb. 5.4:** Aus Erregungsverläufen von Zwicker [41] errechnete Mithörschwellen von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen mit Mittenfrequenz 280 Hz und Pegeln von 30-110 dB SPL.



**Abb. 5.5:** Mithörschwellen von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen mit Mittenfrequenz 1200 Hz und Pegeln von 20-110 dB SPL aus Zwicker [41].



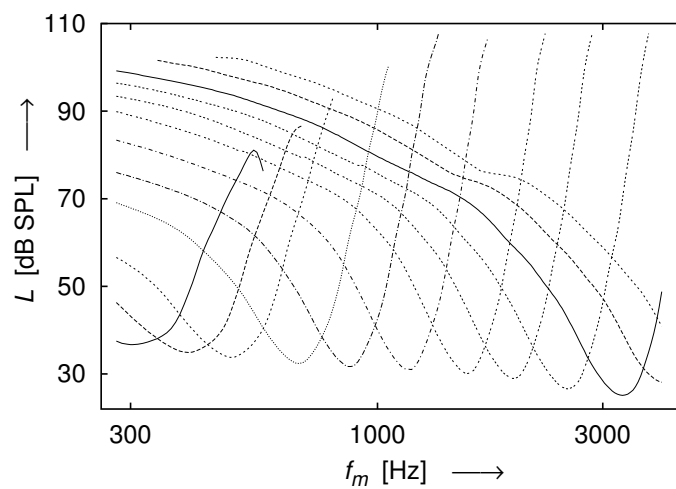
**Abb. 5.6:** Aus Erregungsverläufen von Zwicker [41] errechnete Mithörschwellen von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen mit Mittenfrequenz 4000 Hz und Pegeln von 20-110 dB SPL.



**Abb. 5.7:** Korrektursummand für den Übergang von Mithörschwellen von Schmalbandrauschen nach Erregungsverläufen, siehe Text.

Steigungswerte sind ebenfalls in Tabelle 5.2 gegeben. Vergleicht man sie mit den Steigungen an der oberen Flanke in berechneten Tuningkurven aus den Daten von Zwicker und Jaroszewski [44], so fällt die große Übereinstimmung auf. Dies gilt auch für höhere Bestfrequenzen, da die Sinuston-Tuningkurven Steigungen bis zu 200 dB/oct annehmen, was aus den Mittelwerten nicht ersichtlich ist.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von Schmalbandrauschen sehr gut geeignet sind, um das Verhalten an den Flanken zu untersuchen. Es zeigt sich Sättigungscharakter an der unteren Flanke und ein Übereinstimmen der Steigung an der oberen Flanke mit der in Tuningkurven von Sinustönen als Maskierer. Die Spitze dagegen ist deutlich durch den im Spektralbereich breiten Maskierer aufgeweitet.



**Abb. 5.8:** Bei 25 dB SL berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von frequenzgruppenbreitem Schmalbandrauschen nach Zwicker [41].

# Kapitel 6

## Literatur und Diskussion

### 6.1 Psychoakustische Tuningkurven in der Literatur

#### Die Messungen von Small

Nach den Veröffentlichungen von Tunturi (1952) [31] und Chistovich (1957)[4], die mir beide nicht vorliegen, ist die Publikation von Small (1959) [25] die erste bekannte Untersuchung über psychoakustische Tuningkurven. Die Eigenschaften dieser gemessenen Tuningkurven sowie die Besonderheiten bei der Messung sollen in diesem Abschnitt zusammengefaßt werden. Small hat psychoakustische Tuningkurven von Sinustönen als Maskierer bei 15 und 30 dB SL gemessen. Er verwendete die Maskierfrequenzen 400, 800, 1600, 3200 und 6400 Hz mit Pegeln bis über 100 dB SPL. Aufgrund der niedrigen verwendeten Testtonpegel seien keine Differenztöne hörbar gewesen, jedoch eine leichte Rauigkeitsempfindung für Maskierfrequenzen nahe der Bestfrequenz. Das Entscheidungskriterium lautete: „Detection of anything.“ Als Meßverfahren verwendete er eine Einregelmethode mit vier Nulldurchgängen. Eine Korrektur des Übertragungsfrequenzganges bei tiefen Frequenzen fand nicht statt. Dies mag die Ursache dafür sein, daß seine Tuningkurven keine Sättigung aufweisen, abgesehen von einer Tendenz dazu in den Kurven zur Bestfrequenz 6400 Hz. Ab mittleren Bestfrequenzen treten bei  $0,85 f_T$  Unregelmäßigkeiten an der unteren Flanke auf, die in den 15 dB SL-Kurven als Plateau und bei 30 dB SL als Kerben mit Nebenmaximum und -minimum ausgeprägt sind. Die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte sind in Tabelle 6.1 angegeben. In der Kurve zur Bestfrequenz 400 Hz beträgt er um 3,5, bei höheren Bestfrequenzen um 5. Die obere Flanke weist Steigungen um 80 dB/oct bei 400 Hz, 130 dB/oct bei mittleren Frequenzen und 170 dB/oct ab 3000 Hz auf, die ebenfalls in Tabelle 6.1 angegeben sind.

Bestfrequenz [Hz]	Small, 1959 <sup>a</sup>		Zwicker, 1974 <sup>b</sup>		Moore, 1978 <sup>c</sup>	
	$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung [dB/oct]	$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung [dB/oct]	$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung [dB/oct]
400	3,3	78				
630			3,8	87		
800	4,8	133				
1000					4,1	130
1600	5,5	126				
2000			4,0	128 <sup>d</sup>		
3200	4,9	169				
6000					9,0	185
6400	5,2	176				
8000			6,3	193		

<sup>a</sup> aus Fig. 2 in [25] bei 15 dB SL.

<sup>b</sup> aus Fig. 4 in [42] bei 5 dB SL.

<sup>c</sup> angegebene Mittelwerte aus Text S. 527f in [15] bei 10 dB SL.

<sup>d</sup> Steigung bis zu 178 dB/oct, da gekrümmt.

**Tab. 6.1:**  $Q_{10\text{ dB}}$  - Werte und Steigungen an der oberen Flanke von psychoakustischen Tuningkurven aus der Literatur: Small [25], Zwicker [42] und Moore [15].

## Die Messungen von Zwicker

Zwicker hat 1974 in [42], Abbildung 4, psychoakustische Tuningkurven aus simultaner Messung mit Sinustönen als Maskierer vorgestellt. Diese Mittelwerte von 4 Personen wurden mit Hilfe des Békésy-Trackings gewonnen. Der Testton war gepulst und die Darbietung geschah über freifeldentzerrte Kopfhörer. Die Testtöne lagen bei 630, 2000 und 8000 Hz und bei einem Pegel von 5 dB SL. In [15] wendet Moore ein, daß die Tuningkurvenmessung bei solchen niedrigen Pegeln große Anforderungen an die Versuchspersonen stellt, weshalb er einen Testtonpegel von 10 dB SL verwendet. Die Tuningkurve zur Bestfrequenz 630 Hz ist V-förmig und zeigt an der unteren Flanke keine Sättigung. Die unteren Flanken der beiden anderen Tuningkurven haben eine sehr geringe Steigung und weisen deshalb Sättigungscharakter auf. Der Übergang von der Spitze in die untere Flanke geschieht durch Abknicken der Kurve bei etwa 35-45 dB über der Spitze. In der 8 kHz-Tuningkurve zeichnet sich die 3-kHz-Senke der Ruheschwelle ab und die Sättigung wird bei 60-65 dB über der Spitze, d.h. etwa 85 dB SPL, erreicht. Es treten keine Plateaus oder Kerben auf. Die Steigungen an der oberen Flanke und die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte sind ebenfalls Tabelle 6.1 zu entnehmen. Letztere nehmen mit der Bestfrequenz von etwa 4 auf 6 zu, die Steigungen von 90 auf 190 dB/oct. Die obere Flanke der 2 kHz-Tuningkurve ist gekrümmt, während die anderen eine konstante Steigung aufweisen.

## Die Messungen von Moore

Weiterhin wurden Ergebnisse von Moore [15] zum Vergleich herangezogen. Dabei handelt es sich um simultan gemessene Tuningkurven von Sinusmaskierern bei 10 dB SL Testtonpegel bei den Bestfrequenzen 1 und 6 kHz, die mit einer two-interval-forced-choice-Methode mit 5 Versuchspersonen gemessen wurden. Kalibriert wurde die Apparatur mit

einem Meßmikrofon im Gehörgang. Da in der Veröffentlichung nur die Kurven von einzelnen Versuchspersonen mit eingeschränktem Frequenzbereich angegeben sind, kann keine Aussage über die Sättigung getroffen werden. Die untere Flanke weist jedoch in keiner Kurve Plateaus oder Kerben auf. In Tabelle 6.1 sind die von Moore angegebenen  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte und Steigungen wiedergegeben. Die Steigungen wurden bei 5 und 25 dB oberhalb der Spitze ermittelt. Moore gibt weiterhin an, daß das Minimum der Tuningkurve häufig bei einer Frequenz etwas höher als der Testtonfrequenz liegt.

## 6.2 Literaturvergleich und Diskussion

In diesem für die vorliegende Arbeit zentralen Abschnitt sollen die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der gemessenen Tuningkurven aus der Literatur zu den aus Mithörschwellen berechneten Tuningkurven herausgearbeitet und diskutiert werden. Dabei wird auf die drei Teilbereiche der Tuningkurve gesondert eingegangen.

### Der Bereich der unteren Flanke

Vergleicht man die Tuningkurven aus der Literatur hinsichtlich der Sättigung an der unteren Flanke, so findet man kein einheitliches Bild. Bei Small [25] kann, mit Ausnahme der Tuningkurven bei hohen Bestfrequenzen, nicht von Sättigung gesprochen werden. Bei Zwicker [42] ist sie dagegen deutlich sichtbar, während bei Moore [15] aufgrund des eingeschränkten Maskierfrequenzbereichs keine Aussage getroffen werden kann. Die Ursache für diese großen Unterschiede mögen in dem Übertragungsfrequenzgang bei tiefen Frequenzen liegen. Betrachtet man das Freifeldübertragungsmaß des von Zwicker verwendeten Kopfhörers DT 48 in [45], so bemerkt man ein Absinken des Übertragungsfaktors bei tiefen Frequenzen um bis zu 25 dB. Small dagegen korrigiert dieses Absinken des Übertragungsfaktors bei tiefen Frequenzen nicht, obwohl dieser Effekt sicherlich auch bei dem von ihm verwendeten Kopfhörer auftritt. Deshalb können seine Meßergebnisse im Frequenzbereich unter 300 Hz deutlich zu höheren Pegeln abweichen, was das Fehlen der Sättigung erklären kann. Geht man davon aus, daß eine psychoakustische Messung im Freifeld durchgeführt werden soll, was eher einer natürlichen Umgebung entspricht, so wird man aus dem eben diskutierten Grund heraus die These der Sättigung der Tuningkurven an der unteren Flanke bevorzugen. Der Pegel, bei dem diese Sättigung eintritt, ist abhängig von der Bestfrequenz und dem Pegel des Testtones. Bei tiefen Bestfrequenzen unter etwa 700 Hz hat die Tuningkurve V-förmiges Aussehen, und es tritt keine Sättigung auf. Liegt die Bestfrequenz im mittleren Frequenzbereich um etwa 1-3 kHz, so weist die untere Flanke nur noch eine geringe Steigung auf. Der Übergang von der Spitze in die untere Flanke verläuft bei etwa 35 dB über der Spitze. Der Sättigungswert wird bei 40-50 dB über der Spitze erreicht, was ebenfalls recht gut mit den Ergebnissen von Small übereinstimmt, setzt man eine Korrektur der tiefen Frequenzen voraus. Erhöht man die Bestfrequenz weiter, so finden sich bei Small nur Kurven mit einer Kerbe in der unteren Flanke. Bei Zwicker erhöht sich der Pegel für den Übergangsbereich zwischen Spitze und unterer Flanke auf etwa 45 dB über der Spitze. Der Maskierpegel erhöht sich zu tiefen Frequenzen um weitere 20 dB, die Steigung der Kurve ist jedoch geringer. Aufgrund des wahrscheinlichen Einflusses der Gehörgangsresonanz bei 3 kHz könnte man annehmen, daß der „wirkliche“ Pegel für den Übergang zwischen Spitze und unterer Flanke

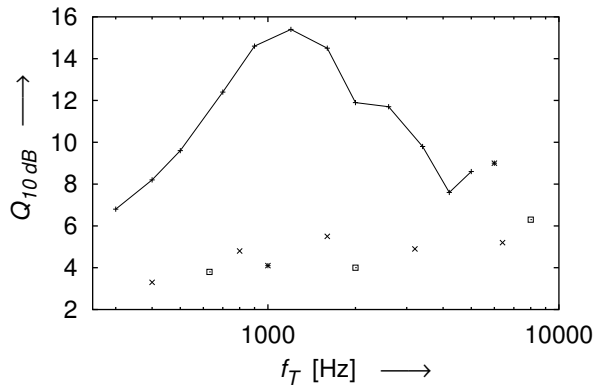
noch höher, bei etwa 50-55 dB über der Spitze, liegt. Insgesamt bleibt festzuhalten, daß sich mit steigender Bestfrequenz eine Knickstelle im Übergang zwischen Spitze und unterer Flanke ausbildet, die sich zu höheren Pegeln verschiebt. Dieser Verlauf ist bei sehr niedrigen Testtonpegeln zu beobachten. Erhöht man den Testtonpegel, so bilden sich um  $0,85 f_T$  Plateaus oder Kerben aus, wie sie in den Tuningkurven von Small zu sehen sind. In der Diskussion führt er Ergebnisse von Chistovic [4] an, die mit Schmalbandrauschen geringer Breite als Maskierer gewonnen wurden und bei denen diese Unregelmäßigkeiten verschwanden, sobald das Entscheidungskriterium der Versuchspersonen auf die Hörbarkeit des zweiten Tones eingeschränkt wurde. Diese Unregelmäßigkeiten können daher nach Chistovic auf der Detektion von Differenztönen oder Schwebungen beruhen, deren Intensität und damit die Auswirkung auf die Messung mit steigendem Pegel zunimmt. In den 15 dB SL-Kurven von Small findet sich das Plateau im Bereich von 15-20 dB über der Spitze, in den 30 dB SL-Kurven im Mittel bei niedrigeren Werten zwischen 12 und 20 dB über der Spitze. Der Abstand zwischen Spitze und Kerbe nimmt also mit steigendem Testtonpegel ab, während die Ausprägung zunimmt. Quasi identisches Verhalten weisen die Tuningkurven in Abb. 5.3 auf, die aus den Mithörschwellen von Zwicker & Jaroszewski sowie Sonntag berechnet wurden. Der Sättigungsbereich scheint ebenfalls bei ca. 40-50 dB über der Spitze zu liegen und mit der Bestfrequenz zuzunehmen, während für Tuningkurven mit niedrigen Bestfrequenzen keine Sättigung nachgewiesen werden kann. In den berechneten Tuningkurven finden sich bei etwa 18 dB über der Spitze ausgeprägte Plateaus, so daß sie eher den Tuningkurven von Small ähnlich sind. Zwicker hat jedoch in der Messung der Mithörschwellen Tiefpaßrauschen zur Maskierung von Differenztönen unterlegt, behauptet aber, daß es keinen Einfluß auf die Mithörschwellen gehabt habe. Betrachtet man die den Tuningkurven zugrunde liegenden Mithörschwellen, so scheint die Ursache für die Plateaus in Bereichen mit geringer Steigung an der oberen Flanke zu liegen. Lediglich in der Mithörschwelle des 4 kHz-60 dB-Maskierers findet sich ein Nebenmaximum, das sich als Kerbe in den Tuningkurven abbilden würde. Es ist jedoch zu bemerken, daß die Pegel deutlich niedriger sind. So treten Plateaus und Kerben bei Small erst ab 65 dB SPL auf – ein Maskiererpegel, der höher ist als die von Zwicker verwendeten. Vergleicht man dazu die Mithörschwellen von Egan und Hake (Abb. 2 und 4 in [5]), so stellt man ebenfalls fest, daß Unregelmäßigkeiten in der oberen Flanke erst in der Mithörschwelle bei 80 dB SPL und nicht bei 60 dB SPL auftreten. Die Ursache dafür können Differenztöne sein, die sich erst ab diesem Pegelbereich auswirken, was wiederum bewirkt, daß in den berechneten Tuningkurven keine Kerben auftreten. Betrachtet man die Tuningkurven bei 40 dB SL aus den Mithörschwellen von Sonntag in Abb. 5.2, so fällt die Ähnlichkeit dieser Tuningkurven mit denen von Small aufgrund des allgemeinen Verlaufs und der Andeutung der Plateaus bei ebenfalls etwa 18 dB über der Spitze auf. Das Fehlen der Plateaus in den von Zwicker gemessenen Tuningkurven mag demzufolge an dem sehr niedrigen Testtonpegel von 5 dB SL liegen. Die lokalen Abflachungen in den berechneten Tuningkurven der Abbildungen 4.5 und 5.8, die sich durch die starke Auffächerung der oberen Flanke in den Mithörschwellen ergeben, können in der Literatur nicht verifiziert werden, da die Ursachen für leichte Unregelmäßigkeiten im Muster nicht bekannt sind. Als möglicher weiterer Grund für die Unterschiede in der Form der Tuningkurven sei auch „off-frequency-listening“ genannt. Geht man davon aus, daß das auditorische System als Detektionskriterium eine Änderung der Erregung verwendet, so wird man zunächst annehmen, daß diese am Ort der Testtonfrequenz stattfindet. Je nach Lage des Maskierers zum Testton muß die maximale Änderung der Erregung oder das

beste Signal-Maskierer-Verhältnis jedoch nicht am Ort der Testtonfrequenz sein, so daß der Testton nicht an seiner Frequenz, also „off-frequency“, detektiert wird. Dies führt wahrscheinlich zu einer Veränderung der Tuningkurven, da man sich vorstellen kann, daß der Maskierer für eine Detektion an der Testtonfrequenz einen anderen Pegel aufweisen müßte. Eine ausführliche Diskussion dazu findet sich in [18] und soll an dieser Stelle nicht gegeben werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Plateaus und Kerben in der unteren Flanke von Tuningkurven mit Sinustönen als Maskierer und Testton erst bei Maskiererpegeln über 65 dB SPL auftreten und mit steigendem Maskierer- als auch Testtonpegel ausgeprägter erscheinen.

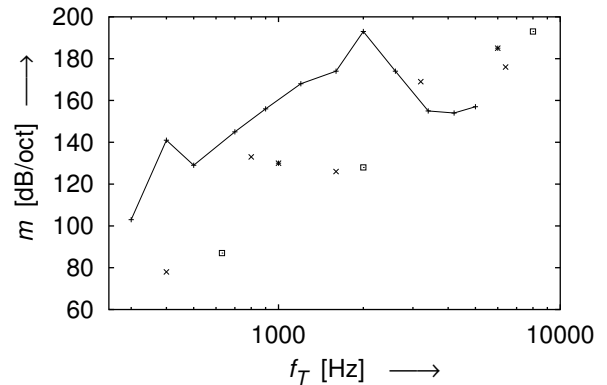
## Der Bereich um die Bestfrequenz

Als nächstes soll der Bereich um die Spitze untersucht werden. Um die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte der berechneten Tuningkurven mit denen aus der Literatur vergleichen zu können, sind sie in Abb. 6.1 dargestellt. Es handelt sich um die Werte aus den Tabellen 5.1 und 6.1, wobei die dargestellten  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte der berechneten Tuningkurven dem linearen Mittelwert der Werte aus den in linearer und Spline-Interpolation ermittelten Tuningkurven entsprechen. Die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte der gemessenen Tuningkurven nehmen, bis auf ein Wert von Moore bei 6000 Hz, linear in der logarithmischen Frequenzdarstellung von etwa 3.5 bei 400 Hz auf 6 bei 7000 Hz zu. Die berechneten  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte verhalten sich dagegen anders. Bei niedrigen Frequenzen erreichen sie bereits das Doppelte der Literaturwerte, um dann bei Frequenzen um 1000 Hz auf das über Dreifache anzusteigen und zu höheren Frequenzen auf etwa die Werte von niedrigen Frequenzen abzufallen. Hier liegt ein deutlicher Unterschied zwischen den berechneten und den gemessenen Ergebnissen vor, der nur teilweise erklärt werden kann. Betrachtet man die berechneten Tuningkurven in Abb. 5.1, so fallen die Unregelmäßigkeiten in der oberen und unteren Flanke der Spitze für Bestfrequenzen oberhalb 1000 Hz auf. Diese scheinen die Spitze „einzuschnüren“, treten aber auch bei höheren Frequenzen auf, bei denen der  $Q_{10\text{ dB}}$ -Wert bereits niedriger ist. Weiterhin spielt die verwendete Interpolationsmethode eine Rolle. Aber selbst wenn man sich auf die niedrigeren Werte der linearen Interpolation beschränkt, beträgt der Faktor zwischen den gemessenen und berechneten Werten bei Bestfrequenzen unter 3000 Hz mehr als zwei. Zu höheren Frequenzen geht er jedoch weiter zurück. Berechnungsunterschiede können diese Abweichungen also nicht erklären. Ein möglicher weiterer Grund können die unterschiedlichen verwendeten Testtonpegel sein. So wurden die Berechnungen bei 20 dB SL durchgeführt, während die Messungen bei 5, 10 und 15 dB SL stattfanden. Allgemein ist bei sehr niedrigen Testtonpegeln die Tendenz zur Erhöhung des  $Q_{10\text{ dB}}$ -Wertes mit dem Pegel vorhanden, die sich bei höheren Pegeln wieder umkehrt. Wie jedoch an der geringen Streuung der gemessenen Werten zu sehen ist, wirkt sich diese Tendenz nicht sehr stark aus, und es ist nicht zu erwarten, daß sich die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte durch eine weitere Erhöhung des Testtonpegels um 5 dB derart verändern. Die unterschiedliche Kalibrierung der Meßapparatur wird sich im Nahbereich der Spitze ebenfalls nur gering auf die Ergebnisse auswirken. Auch scheinen sich die verschiedenen Vorgehensweisen bei der Messung nur gering auszuwirken. So passen die Ergebnisse von Zwicker, die mit Békésy-Tracking gewonnen wurden, gut zu den Ergebnissen der anderen Autoren, die mit der Einregel- und 2AFC-Methode gearbeitet haben. Die Anzahl der Meßpunkte in der Nähe des Testtones beeinflusst ebenfalls den  $Q_{10\text{ dB}}$ -Wert. Es gab mindestens einen Maskierer im Pegelbereich

bis 10 dB über der Spitze mit Ausnahme an der oberen Flanke und einigen unteren Flanken in den Messungen von Small. Auch wurden die Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski mit vielen Testtönen in der Nähe des Maskierers gemessen, so daß nur bei einigen Mithörschwellen von 250 und 400 Hz Maskierern der nächste Meßpunkt mehr als 10 dB vom Spitzenwert entfernt ist. Insofern ist unter Verwendung der Interpolation der  $Q_{10\text{dB}}$ -Wert relativ gut gesichert. Eine weitere Ursache für die Unterschiede im  $Q_{10\text{dB}}$ -Wert kann auch die unterschiedliche Verwendung von Rauschen zur Maskierung der Differenzöne sein.



**Abb. 6.1:**  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte in Abhängigkeit von der Bestfrequenz für berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von Sinustönen aus Zwicker & Jaroszewski [44] (Linie, Mittelwert der Werte aus mit linearer und Spline-Interpolation ermittelten Tuningkurven), sowie für Tuningkurven aus der Literatur: Small [25] (x), Zwicker [42] (□) und Moore [15] (\*), die ebenfalls mit Sinustönen gemessen wurden.



**Abb. 6.2:** Steigung an der oberen Flanke in Abhängigkeit von der Bestfrequenz für berechnete Tuningkurven aus Mithörschwellen von Sinustönen aus Zwicker & Jaroszewski [44] (Linie), sowie für Tuningkurven aus der Literatur: Small [25] (x), Zwicker [42] (□) und Moore [15] (\*), die ebenfalls mit Sinustönen gemessen wurden.

## Der Bereich der oberen Flanke

In Abb. 6.2 sind die Steigungen an der oberen Flanke der berechneten Tuningkurven denen aus der Literatur gegenübergestellt. Diese wurden graphisch ermittelt und stellen den Mittelwert der Steigungen dar. Bis auf wenige Ausnahmen kann die obere Flanke sehr gut durch eine Gerade angenähert werden, nur in wenigen Fällen ist sie gekrümmt. In den berechneten Tuningkurven treten ab Bestfrequenzen von etwa 1000 Hz Unregelmäßigkeiten – Stufen oder Kerben – auf, die in den Literaturergebnissen nicht zu sehen sind. Dabei ist jedoch zu beachten, daß bei der Mithörschwellenmessung von Zwicker und Jaroszewski mehr Testtonfrequenzen verwendet wurden als vergleichsweise Maskierfrequenzen bei den Tuningkurvenmessungen aus der Literatur, so daß letztere besonders an der oberen Flanke eine schlechtere Meßauflösung erreichen. Eine Steigungsbetrachtung ist dennoch sehr gut möglich. Die Steigungen der Tuningkurven aus der Literatur bilden wie die  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte eine relativ homogene Punktwolke, die ebenfalls durch eine Gerade über einer logarithmischen Frequenzachse angenähert werden kann. Bei 400 Hz beträgt die mittlere Steigung ungefähr 80 dB/oct, um bei 1000 Hz auf etwa 120 dB/oct und bei 7000 Hz auf 180 dB/oct anzusteigen. Diese Mittelwerte lassen jedoch maximale Steigungen unbeachtet, die auch bei 1000 Hz Werte um 160 dB/oct erreichen können. Letztere Betrachtung ist im Vergleich zu den mittleren Steigungen der berechneten Tuningkurven wichtig, denn



diese liegen bei Bestfrequenzen unter 2500 Hz bis zum Faktor 1,8 höher, um zu höheren Bestfrequenzen unter die Werte aus der Literatur abzusinken. Dieses Absinken ist jedoch eine Folge der Mittelung der Steigung über die Kerben hinweg, die Steigung oberhalb der Kerben beträgt 180-200 dB/oct und liegt damit ebenfalls etwas über der der Literaturwerte. Weiterhin ist zu beachten, daß die Messung von Flanken mit einer solchen hohen Steigung schwierig ist, wodurch die Streuungen steigen. Small gibt für seine Messungen der oberen Flanke eine Standardabweichung von  $\pm 10,3$  dB an. Die Angaben von Vogten in [32], auf die noch in Abschnitt 6.3 eingegangen wird, bestätigen sehr deutlich die Übereinstimmung der Steigung der gemessenen Tuningkurven von Sinuston-Maskierern und der berechneten. Vergleicht man die Steigung der oberen Flanke der berechneten Tuningkurven von Schmalbandrauschen (siehe Tabelle 5.2) mit den Werten in Abb. 6.2, so stellt man fest, daß sie ebenfalls etwas oberhalb der der Meßergebnisse liegt, aber sehr gut mit der Steigung der berechneten Tuningkurven von Sinustönen übereinstimmt. Daher bleibt festzuhalten, daß die Steigung der oberen Flanke der berechneten Tuningkurven in etwa mit der von gemessenen Tuningkurven übereinstimmt und dabei minimal oberhalb liegt.

### 6.3 Tuningkurven bei Nachverdeckung

Die Messung der Verdeckung kurz nach dem Abschalten eines Sinuston-Maskierers (forward masking) hat den Vorteil, daß keine Differenztöne und Schwebungen die Messung stören. Trotz des Fehlens des Maskierers zum Zeitpunkt der Testtondarbietung sind Tuningkurven meßbar, die bei einer genügend kleinen Zeitspanne bis zum Beginn des Testtones ihr generelles Aussehen kaum verändern. Dennoch gibt es einige deutliche Unterschiede, auf die in diesem Abschnitt kurz eingegangen werden soll. Warum kommt es überhaupt zu einer Maskierungswirkung? Eine einfache Modellvorstellung lautet: Der Maskierer ruft eine frequenzabhängige Erregung in den verschiedenen Stufen des auditorischen Systems hervor. Wird er dann abgeschaltet, so nimmt die Erregung nicht schlagartig ab, sondern klingt langsam ab. Wird nun der Testton innerhalb weniger 10 ms dargeboten, so verursacht er nur dann eine detektierbare Erregung, wenn sie größer ist als die bereits vorhandene. So kommt es zu einer Maskierungswirkung, die Weber [34] als „excitatory masking“ bezeichnet. Deshalb kann man annehmen, daß Tuningkurven aus psychoakustischen Nachverdeckungsmessungen den physiologischen Tuningkurven besser entsprechen als simultan gemessene [19].

Der entscheidene Unterschied zwischen simultan und nichtsimultan gemessenen Tuningkurven mit Sinustönen als Maskierer und Testton liegt im Verlauf um die Spitze und an der oberen Flanke. So beschreiben verschiedene Autoren die Nachverdeckungstuningkurven als schmaler (vergleiche [35]). Moore [15] hat nicht nur simultane Tuningkurven von Sinustönen gemessen, sondern diese mit gemessenen Nachverdeckungstuningkurven verglichen. Die Versuchsbedingungen entsprachen den in Abschnitt 6.1 beschriebenen, jedoch wurde der Testton direkt nach dem Maskierer, nur durch die Abfall- und Anstiegszeit von 17 ms getrennt, präsentiert. In Tabelle 6.2 sind die  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte und Steigungen der oberen Flanke angegeben. Dabei stellen die Werte bei 1 und 6 kHz Mittelwerte von 5 Versuchspersonen dar, bei den anderen Frequenzen nur von 2 Personen. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus simultaner Messung in Tabelle 6.1 fallen die deutlich höheren  $Q_{10\text{dB}}$ - und Steigungswerte auf. Bei 1 kHz ist der  $Q_{10\text{dB}}$ -Wert aus der Nachverdeckungsmessung

2,7 mal größer, bei 6 kHz beträgt der Faktor 1,8. Im Vergleich zu den anderen verwendeten Literaturangaben für simultane Tuningkurven liegt der Faktor bei hohen Frequenzen eher über 2, was Moore in [16] bestätigt. So sind die  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte aus Nachverdeckungsmessungen den  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werten von berechneten Tuningkurven aus den Mithörschwellen von Zwicker und Jaroszewski sehr ähnlich. Bei den Steigungen an der oberen Flanke ergibt sich keine solche Ähnlichkeit, denn sie ist in den Nachverdeckungsmessungen deutlich größer und beträgt mehrere hundert, teilweise sogar weit über 1000 dB/oct, eine um den Faktor 10 größere Steigung als in den berechneten Tuningkurven. Moore gibt jedoch für die großen Werte einen Fehler von bis zu 40 % an. Bei sehr tiefen Bestfrequenzen stimmen die Steigungen dagegen grob überein.

Bestfrequenz [Hz]	Moore, 1978 <sup>a</sup>		Kiang, 1965 <sup>b</sup>		Evans, 1975 <sup>c</sup>	
	$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung [dB/oct]	$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung [dB/oct]	$Q_{10\text{ dB}}$	Steigung [dB/oct]
400			1,7			
500	6,5	144				
1000	11,2	390			2,5	30-150
2000	18,5	1075				
4000	25,0	1720	10,0 <sup>d</sup>	200 <sup>e</sup>		
6000	16,0	520				
8000	11,5	640				
10000					8,0 <sup>f</sup>	150-600 <sup>g</sup>
20000			11,1			

<sup>a</sup> Mittelwerte von Nachverdeckungstuningkurven aus Text S. 527f in [15] bei 10 dB SL für 5 Versuchspersonen (1 und 6 kHz), die anderen Werte nach Tab. 1, S. 529 von 2 Versuchspersonen.

<sup>b</sup> Werte aus physiologischen Tuningkurven gemessen im 8. Nerven von Katzen und zitiert in [14] nach Kiang [11].

<sup>c</sup> Werte aus physiologischen Tuningkurven gemessen im 8. Nerven von Katzen und zitiert in [19] nach Evans [6].

<sup>d</sup> 10 dB-Bandbreite oberhalb 3 kHz mit 10% der Bestfrequenz angegeben.

<sup>e</sup> Steigung nach Wilson [38] allgemein um 200 dB/oct.

<sup>f</sup> Angabe von 6-10 für Frequenzen um 10 kHz.

<sup>g</sup> Angabe der Steigung als 30-150 dB/oct unter 1 kHz und 150-600 dB/oct um 10 kHz.

**Tab. 6.2:**  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte und Steigungen an der oberen Flanke von psychoakustischen Nachverdeckungstuningkurven von Moore [15], sowie von physiologischen Tuningkurven gemessen an Katzen von Kiang [11] und Evans [6].

Auch Vogten kann diese Unterschiede bestätigen. Er gibt in [32] für Messungen an drei Personen bei 1 kHz Bestfrequenz und einem Testtonpegel von 35-40 dB SPL Steigungen von 560 dB/oct bei 10 ms Zeitverzögerung zwischen Sinuston-Maskierer und Testton an. Für höhere Bestfrequenzen berichtet er von etwa 1000 dB/oct Steigung an der oberen Flanke, gemessen allerdings nur mit einer Versuchsperson. Zum Vergleich wird die Steigung bei simultaner Messung mit etwa 150 dB/oct bei 1 kHz ansteigend auf 200 dB/oct zu höheren Bestfrequenzen angegeben. Diese Werte stimmen gut mit den aus Mithörschwellen berechneten überein und liegen etwas höher als die Werte in anderen Literaturangaben.  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte wurden von Vogten nicht angegeben und konnten aufgrund fehlender Angaben auch nicht berechnet werden. Weiterhin interessant ist der

Verlauf der Tuningkurven um die Spitze. Diese ist bei Nachverdeckungskurven asymmetrisch, bedingt durch die hohe Steigung der oberen im Vergleich zur niedrigen Steigung der unteren Flanke. Die Form entspricht somit einem zu tieferen Maskierfrequenzen hin gedrehten V. Da die Tuningkurven aus simultaner Messung in [33] und [32] ihr Minimum bei etwas höheren Maskierfrequenzen als der Testtonfrequenz haben, liegen die Nachverdeckungstuningkurven an der Spitze für Frequenzen unterhalb der Bestfrequenz unter den simultan gemessenen Tuningkurven. In den Nachverdeckungstuningkurven tritt keine Verschiebung des Minimums an der Testtonfrequenz auf. So schneiden sich beide Kurven bei etwa  $0,8f_T$ . Bei noch tieferen Maskierfrequenzen weist die untere Flanke der Nachverdeckungstuningkurven eine etwas größere Steigung auf als im simultanen Fall.

Die Ursachen für die Unterschiede zwischen den simultan gemessenen und den Nachverdeckungstuningkurven wurden in der Literatur umfangreich diskutiert. Als Gründe werden Suppressionseffekte und off-frequency-listening angegeben, worauf in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll.

## 6.4 Physiologische Tuningkurven

In diesem Abschnitt soll kurz auf die Eigenschaften von physiologischen Tuningkurven eingegangen werden, die die Frequenzauflösung auf der unteren Ebene des auditorischen Systems beschreiben und durch Messung an Tieren gewonnen werden. Alle Daten dazu sind Veröffentlichungen von Møller [14] und Pickles [19] entnommen, die das Thema ausführlich behandeln und Veröffentlichungen anderer Autoren zusammenfassen. Betrachtet man die untere Flanke der Tuningkurven, die im 8. Nerven gemessen wurden, so stellt man fest, daß sie, besonders für tiefe Bestfrequenzen, steil mit konstanter Steigung bis etwa 40-50 dB über der Spitze ansteigt. Bei höheren Bestfrequenzen zeigt sich eine ausgeprägte Sättigung der unteren Flanke etwa 40-50 dB über der Spitze, verbunden mit einer Senke um 1 kHz [39]. Pickles bemerkt zu dieser Senke, daß sie nicht mehr auftritt, wenn gegen eine konstante Geschwindigkeit des Stapes gezeichnet wird und zieht daraus den Schluß, daß sie auf der Mittelohrübertragungsfunktion beruht. Berechnet man aus den Daten von Kiang [11], die an Katzen gemessen wurden, die  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte, so ergibt sich bei 400 Hz ein Wert von etwa 1,7 und bei 20 kHz etwa 11, wobei er bereits ab 3 kHz um 10 liegt. Evans [6] gibt, ebenfalls aus Messungen an Katzen, für 1 kHz Bestfrequenz einen  $Q_{10\text{dB}}$ -Wert von 2-3 an, der zu höheren Frequenzen auf 6-10 ansteigt. Insofern sind die Daten beider Autoren in guter Übereinstimmung. Besonders interessant im Vergleich zu den Ergebnissen aus psychoakustischen Nachverdeckungsmessungen sind die im Hörnerven gemessenen Steigungen der oberen Flanke der Tuningkurven. Diese liegen bei den Daten von Kiang um 200 dB/oct (nach Wilson [38]). Evans gibt für die Steigungen Werte von 30-150 dB/oct für Bestfrequenzen unter 1 kHz und für Frequenzen um 10 kHz Steigungen von 150-600 dB/oct an. Weitere Steigungsangaben finden sich bei Frishkopf [8] von Messungen mit Fledermäusen, wobei Werte von 100 dB/oct bei tiefen und 300 dB/oct bei hohen Bestfrequenzen gemessen wurden. Alle Werte sind zur besseren Übersicht in Tabelle 6.2 angegeben. Auch wenn ein Vergleich der physiologischen Meßergebnisse an Tieren mit psychoakustischen Meßergebnissen von Menschen sehr schwierig erscheint, ist es bemerkenswert, wie gut Steigungs- und  $Q_{10\text{dB}}$ -Werte zumindest in der Größenordnung und der qualitative Verlauf übereinstimmen.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung

Die Modellierung der Frequenzselektivität des Gehörs durch eine Filterbank wirft die Frage nach deren Parametrisierung auf. Tuningkurven stellen eine Möglichkeit dar, diese Frequenzselektivität zu beschreiben. Deshalb wurden sie auf ihre Parameter hin und im Vergleich zu Mithörschwellen untersucht. Es wurde ein Programm vorgestellt und im Verlauf der Arbeit verwendet, welches Mithörschwellen interpoliert, um sie dann in Tuningkurven umzurechnen. Ein weiteres Programm zur Erstellung von Mithörschwellen aus Prototypen-Mustern wurde dazu verwendet, vereinfachte Tuningkurven zu untersuchen. Dabei konnte festgestellt werden, daß die allgemeine Form der berechneten Tuningkurven mit der von gemessenen übereinstimmt. Weiterhin konnte die Ursache für Plateaus im Verlauf der Tuningkurven mit der Auffächerung der oberen Flanke der Mithörschwellen erklärt und die Sättigung diskutiert werden. Diese läßt sich auf zwei Arten modellieren: Zum einen kann der Mithörschwellen-Prototyp, das ist die Maskierung relativ zur Ruhehörschwelle, zu hohen Frequenzen Sättigungsverhalten aufweisen. Zum anderen kann der Einfluß der Ruhehörschwelle durch eine geringere Gewichtung derselben bei der Addition bei höheren Maskiererpegeln reduziert werden. Die nächste Untersuchung fand mit berechneten Tuningkurven aus gemessenen Mithörschwellen aus der Literatur statt, die mit gemessenen Tuningkurven aus der Literatur verglichen wurden. Die allgemeine Form der Muster konnte wieder bestätigt werden. Im Bereich um die Spitze wurde festgestellt, daß die berechneten Tuningkurven einen  $Q_{10\text{ dB}}$ -Wert aufweisen, der besonders bei tiefen und mittleren Frequenzen deutlich über dem gemessenen Wert liegt. Bei Frequenzen um 400 Hz beträgt dieser etwa 8 und für Bestfrequenzen um 1 kHz etwa 15, was einem Faktor zwischen 2 und 3 zu den gemessenen  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werten entspricht. Die Steigung der oberen Flanke ist bei tiefen und mittleren Bestfrequenzen in den berechneten Tuningkurven ebenfalls etwas höher als in den gemessenen und steigt von etwa 130 dB/oct bei 400 Hz auf 185 dB/oct bei 2 kHz an, um mit etwa 160 dB/oct zu höheren Bestfrequenzen hin mit den gemessenen Werten übereinzustimmen. Es wurden mögliche Gründe für diese Unterschiede angegeben, die in den Eigenschaften der psychoakustischen Messung zu suchen sind. Weiterhin wurde festgestellt, daß  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte aus Nachverdeckungsmessungen mit Bestfrequenzen bis 2 kHz mit denen aus berechneten Tuningkurven aus Mithörschwellen übereinstimmen. Darüber hinaus wurden Steigungen der oberen Flanke und  $Q_{10\text{ dB}}$ -Werte aus verschiedenen physiologischen Tuningkurvenmessungen angegeben.

# Anhang A

## Programme

Dieses Kapitel soll einen Überblick über alle Programme der Arbeit geben: ihre Verwendung, Bedienung und Compilierung. Das Programm zur Tuningkurvenberechnung wird in einem eigenen Kapitel behandelt.

### A.1 Programm zur Generierung von Mithörschwellen aus Prototypen

Das Programm `mprot` dient der Berechnung von Mithörschwellen aus vorgegebenen Prototypen nach der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Methode. Dabei wird ein Prototypen-Muster der Maskierung in dB SL, welches relativ zur Maskierfrequenz mit Frequenzen in Bark und abhängig vom Maskiererpegel gegeben ist, entsprechend der Maskierfrequenz verschoben. Dieses Muster ist im Programm in dem Array `msk_prot` abgelegt. Die relativen Testtonfrequenzen in Bark befinden sich im Vektor `ttf_prot` und die Pegel in dB SL im Vektor `ml_prot`. Möchte man andere Prototypen verwenden, so ist das Array `msk_prot` zu modifizieren und anschließend das Programm zu compilieren. Weiterhin kann die Addition der Ruhehörschwelle durch das Setzen des Symboles `PRINT_SL=TRUE`, zum Beispiel zur Ausgabe der Prototypen, unterbunden werden. Die Gewichtung der Ruhehörschwelle mit dem Maskiererpegel wird durch das Symbol `THQ_W=TRUE` eingeschaltet und die Gewichtungsfaktoren befinden sich im Vektor `thq_weight`. Sämtliche Namen und auch das Programm sind in der Datei `mprot.c` dokumentiert. Der Aufruf von `mprot` ohne Parameter gibt die englische Hilfeseite aus. Der übliche Programmaufruf ist folgender:

```
mprot <Maskierfrequenz in Hz> [Dateiname]
```

Zu der so angegebenen Maskierfrequenz werden alle Mithörschwellen der intern angegebenen Maskiererpegel in Dateien mit den Namen:

```
DateinameMaskierfrequenz.Maskiererpegel
```

geschrieben, wobei der Standarddateiname `prot` durch Angabe eines Namens als zweiter Kommandozeilenparameter geändert werden kann. Zum Compilieren steht ein `Makefile` zur Verfügung, welches durch den Aufruf des Programmes `make` abgearbeitet wird. In den Dateien `SchoeneZwJar1-4.dat` befinden sich die von mir verwendeten Prototypen, die in `README` beschrieben sind. Zum Programm `mprot` gehören die folgenden Dateien:

mprot.c  
Makefile

Weiterhin aus den Untersuchungen:  
SchoeneZwJar1.dat ...SchoeneZwJar4.dat  
README  
makeprots

Zum Compilieren ist eine Installation der Library `etlib` [28] von Prof. Terhardt nötig. Die Pfade müssen im `Makefile` entsprechend gesetzt sein.

## A.2 Frontends zu den verwendeten Funktionen

Im Abschnitt 3.2 wurden mehrere Formeln vorgestellt, die in den Programmen `msk` und `mprot`, sowie in den Tuningkurvenuntersuchungen verwendet wurden. Für die Arbeit war es nötig, eine Ein- und Ausgaberoutine für diese Formeln zu schreiben. Die Formeln wurden von Prof. Terhardt in seiner Bibliothek `etlib` [28] implementiert und zu dem Code gelinkt. Es handelt sich um die folgenden Programme:

<code>h2b</code>	Rechnet Frequenzen in Hertz nach Bark mit Formel aus Abschnitt 3.2 um.
<code>b2h</code>	Wie <code>h2b</code> , jedoch Umrechnung von Bark nach Hertz durch sukzessive Approximation der Formel.
<code>thq</code>	Berechnet die mittlere Ruhehörschwelle mit der Formel aus Abschnitt 3.2.
<code>crtbdw</code>	Gibt die Breite der Frequenzgruppe zur Mittenfrequenz nach Formel 4 in [46] an.

Nach dem Aufruf des jeweiligen Programmes ist die Frequenz einzugeben. Die Programme werden ohne Angabe einer Frequenz beendet. Anweisungen zum Compilierungsvorgang befinden sich im Programmcode.

# Anhang B

## Bedienung und Compilierung des Tuningkurvenprogrammes

### B.1 Bedienung des Programmes msk

Das Programm `msk` wurde bereits ausführlich in Kapitel 3 vorgestellt. Auch wurde bereits auf die Wirkungsweise der Kommandozeilenoptionen eingegangen, die in diesem Abschnitt der Übersichtlichkeit halber nocheinmal zusammengefaßt werden sollen. Eine kurze Hilfe zum Programm kann durch Eingabe von `msk` erhalten werden, eine ausführliche durch Eingabe von `msk -?`. Diese Hilfeseiten sind in Englisch, weshalb an dieser Stelle eine etwas ausführlichere deutsche erscheinen soll. Es ist ratsam, den Ablaufplan des Programmes `msk` in Abb. 3.1 für die nächsten Ausführungen hinzuzuziehen. Die Kommandozeilenoptionen sind folgende:

```
msk [-lXYZic?amgsfoveqhb] [[-t Bestfrequenz Pegel] | [-u Datei] | [-d Datei]]
    [-n Datei] [-x|y|z Anzahl] Mithörschwelle1.msk Mithörschwelle2.msk ...
```

#### Allgemeine Parameter:

- |                            |   |
|----------------------------|---|
| <code>-t Freq Pegel</code> | Es wird eine Tuningkurve an der angegebenen Bestfrequenz in Hz mit dem gegebenen Testtonpegel in dB SPL berechnet. Dabei verzweigt das Programm, so daß die beiden anderen Zweige nicht gewählt werden können.  |
| <code>-u Dateiname</code>  | Kann anstelle der Option <code>-t</code> verwendet werden, wobei die Bestfrequenzen und Testtonpegel jeweils in einer Zeile in der angegebenen Datei stehen. Die Datenausgabe erfolgt mit Dateien, deren Namen sich aus der Dateinamenangabe mit <code>-n</code> , der Bestfrequenz und dem Testtonpegel ergeben. |
| <code>-d Dateiname</code>  | Berechnet zu den in der Datei gegebenen Datenpunkten die Maskierung und gibt sie auf den Bildschirm oder in eine Datei aus. Auf diese Weise können komplette interpolierte Mithörschwellen an vorgegebenen Punkten berechnet werden.  |
| <code>-l</code>            | Schaltet für alle Interpolationsschritte um von Spline auf lineare Interpolation oder umgekehrt, je nach Standardeinstellungen.   |
| <code>-x</code>            | Schaltet in der Interpolation über die Testtonfrequenzen um   |

	zwischen linearer und Spline-Interpolation.
-Y	Schaltet in der Interpolation über die Maskiererpegel um zwischen linearer und Spline-Interpolation.
-Z	Schaltet in der Interpolation über die Maskierfrequenzen um zwischen linearer und Spline-Interpolation.
-i	Subtrahiert die mittlere Ruhehörschwelle von den Mithörschwellen vor der ersten Interpolation. Es gibt keine einfache Möglichkeit für den umgekehrten Vorgang.
-c	Startet das Konfigurationsmenü, mit dem sämtliche Kommandozeilenparameter für diese Berechnung gesetzt werden können.
-?	Gibt die lange englische Hilfeseite aus.
-x Anzahl	Ändert die Anzahl der Abtaststellen der Interpolation über die Testtonfrequenzen. Die Auflösung der Testtonfrequenzen bestimmt sich aus der höchsten und niedrigsten Frequenz, sowie dieser Anzahl.
-y Anzahl	Ändert die Anzahl der Abtaststellen der Interpolation über die Maskiererpegel.
-z Anzahl	Ändert die Anzahl der Abtaststellen der Interpolation über die Maskierfrequenzen. In der Standardeinstellung wird die Auflösung automatisch gleich der der Testtonfrequenzen gewählt.

**Ausgabeparameter:**

-a, -m, -g	Ausgabe der interpolierten Mithörschwellen nach (a)llen Interpolationen, nach der Interpolation über die (M)askiererpegel, oder bereits nach der ersten Interpolation über die Testtonfrequenzen (g).
-s, -f	Schreibt die Berechnungsergebnisse auf den Bildschirm/(S)creen oder in eine oder mehrere Dateien/(F)iles.
-o, -v	Schreibt die interpolierten Mithörschwellen in eine/(o)ne oder mehrere/se(v)eral Dateien. Bei mehreren Dateien wird der Dateiname aus dem vorgegebenen Dateinamen und der Maskierfrequenz oder dem -pegel gebildet.
-n Datei	Name für sämtliche Ausgabedateien, der eventuell um Frequenz oder Pegel ergänzt wird.
-e, -q	Die Interpolationsergebnisse werden nach Gruppen/Dateien mit gleichem Maskiererp(e)gel oder gleicher Maskiererfre(q)uenz sortiert ausgegeben.
-h, -b	Die Ausgabe der Frequenzen erfolgt in (H)ertz oder (B)ark.

Die Groß- und Kleinschreibung der Optionen spielt bis auf die Parameter **x-z** keine Rolle. Alle Frequenzen an der Kommandozeile oder in den Eingabedateien sind in Hertz anzugeben. Es können beliebig viele Mithörschwellen angegeben werden, eventuell sind einige Maximalwerte heraufzusetzen. Dabei sollte mit Wildcards gearbeitet werden, da der Zeilenpuffer begrenzt ist. Nun soll noch auf das Format in den verschiedenen Eingabedateien eingegangen werden.



**Format der Mithörschwellendateien:**

Die ersten Zeilen dürfen Kommentare enthalten, sofern diese mit # auskommentiert sind. In der nächsten Zeile folgt das ebenfalls auskommentierte Schlüsselwort #Maskerdata: mit den Parametern <Maskiererfrequenz in Hz> und <Maskiererpegel in dB (SPL)>. Mit der folgenden Zeile beginnt der Abschnitt der Mithörschwellendaten, der nicht durch Leerzeilen oder Kommentare unterbrochen sein darf. In jede Zeile wird ein Datenpaar der Form <Testtonfrequenz in Hz> <Maskierung/Testtonpegel in dB (SPL)> geschrieben. Dies sieht folgendermaßen aus:

```
# Kommentar
# Kommentar
#Maskerdata: Maskiererfrequenz_in_Hz Maskiererpegel_in_dB_(SPL)
Testtonfrequenz_in_Hz Testtonpegel_in_dB_(SPL)
Testtonfrequenz_in_Hz Testtonpegel_in_dB_(SPL)
...
```

**Syntax der Eingabedateien zur Tuningkurvenberechnung (Option -u):**

Zu Beginn sind wieder auskommentierte Erklärungen erlaubt, die dann zeilenweise von Paaren aus der <Bestfrequenz in Hz> und der <Maskierung/Testtonpegel in dB (SPL)> gefolgt werden. In dieser Datensektion sind ebenfalls keine Kommentare oder Leerzeilen erlaubt:

```
# Kommentar
# Kommentar
Bestfrequenz_in_Hz Testtonpegel_in_dB_(SPL)
Bestfrequenz_in_Hz Testtonpegel_in_dB_(SPL)
...
```

**Syntax der Eingabedateien zur Maskierungsberechnung an einzelnen Punkten (Option -d):**

Soll die Maskierung aus den interpolierten Mithörschwellen an mehreren vorgegebenen Datenpunkten berechnet werden, so bietet sich wiederum die Eingabe der Datenpunkte über eine Datei an. Dabei gilt das zu den anderen Dateien Gesagte, wobei in diesem Fall die Datenpunkte folgendermaßen geordnet sind: <Maskiererfrequenz in Hz> <Maskiererpegel in dB (SPL)> und <Testtonpegel in dB (SPL)>, also:

```
# Kommentar
# Kommentar
Maskiererfrequenz_in_Hz Maskiererpegel_in_dB_(SPL) Testtonpegel_in_dB
Maskiererfrequenz_in_Hz Maskiererpegel_in_dB_(SPL) Testtonpegel_in_dB
...
```

## B.2 Hinweise zur Programmierung und Compilierung des Programmes `msk`

Zu dem Programm `msk` gehören die folgenden Dateien, deren Inhalt und Verwendung ebenfalls erklärt wird:

<code>Makefile</code>	Regelt den Compilierungsvorgang. Die Pfade für die Bibliothek von Prof. Terhart <code>etlib</code> [28] sind der eigenen Installation anzupassen, ebenso die Compiler- und Linkerkommandos.
<code>msk.c</code>	Enthält den steuernden Hauptteil <code>main()</code> , die Definitionen und Voreinstellungen der globalen Variablen, die temporär durch die Kommandozeilenparameter geändert werden, die Speicherallocationsroutinen, die Sortierung der Eingangsdaten und die Routine für die Subtraktion der Ruhehörschwelle.
<code>msk.h</code>	Headerdatei des gesamten Programmes mit den Voreinstellungen der Längen der Datenvektoren für den primären Einlesevorgang (Anzahl der Dateien etc.).
<code>msk_io.c</code>	Enthält Ein- und Ausgaberroutinen: Hilfeseiten, Konfigurationsmenü, Kommandozeilenparameter- und Eingangsdaten-Leserroutinen, sowie Ausgaberroutinen für die interpolierten Mithörschwellen.
<code>msk_pol.c</code>	Interpolationsroutinen und Tuningkurvenberechnung: vektororientierte Spline- und lineare Interpolationsroutinen, Routinen für Interpolation über Maskiererpegel und -frequenzen, Maskierungsberechnung an vorgegebenen Punkten und Ein-/Ausgabesteuerung dazu, Tuningkurvenberechnung mit dazugehörigen Ein-/Ausgaberroutinen.
<code>msknr.c</code>	Routinen aus „Numerical Recipies in C“, [20]: Einzelpunkt-Splineinterpolation und Allocationsroutinen.
<code>msknr.h</code>	Gekürzte Headerdatei aus „Numerical Recipies in C“.

Zur Compilierung ist das Programm `make` aufzurufen und es ist die Bibliothek `etlib` [28] von Prof. Terhardt nötig. Möchte man einige Voreinstellungen der Kommandozeilenparameter ändern, so sind diese in `msk.c` zu finden. Nach der Änderung ist das Programm neu zu compilieren. Bei der Benutzung des Programmes ist darauf zu achten, daß die – allerdings sehr hohen – Werte in `msk.h` für die maximale Anzahl der Eingangsdateien, der verschiedenen Testtonfrequenzen in einer Datei und aller verschiedenen Maskiererpegel und -frequenzen nicht überschritten werden. Eventuell können diese Werte auch angepaßt werden, um Speicherplatz zu sparen.

# Anhang C

## Inhalt der Diskette

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die auf der Diskette vorhandenen Dateien liefern. Dazu sind alle Dateien aufgelistet und der Ort ihrer Besprechung und Verwendung in dieser Arbeit nebst einigen kurzen Erklärungen angegeben.

```
/daten                # enthält verwendete Mithörschwellen und Prototypen
  /fletcher/weglan*   # Mithörschwellen von Fletcher (Sinustonmaskierer),
                    # Abschnitt 5.4; [7]
  /mprot              # enthält Prototypen zur Generierung von Mithörschwellen
    /README           # Übersicht über die SchoeneZwJar*-Dateien,
    /SchoeneZwJar1.dat
    /SchoeneZwJar2.dat
    /SchoeneZwJar3.dat
    /SchoeneZwJar4.dat
                    # Prototypen aus Kapitel 4; [23] und [44]
    /makeprots        # Script zum Generieren von Mithörschwellen mit mprot
/schmal               # Abschnitt 5.5; nach [41] und [40]
  /schm*              # Mithörschwellen von Schmalbandrauschen nach Zwicker
  /korr*              # Korrektursummand und Korrekturgraphiken (Gnuplot)
/so/so*              # Mithörschwellen von Sonntag (Sinustonmaskierer),
                    # Abschnitte 5.2 und 5.3; [26]
/zw/zw*              # Mithörschwellen von Zwicker (Sinustonmaskierer),
                    # Abschnitte 5.1 und 5.3; [44]
/prg                  # enthält den Quellcode und compilierte Programme
  /b2h/b2h.c          # Bark-in-Hertz Umrechnungsprogramm,
                    # Abschnitte 3.2 und A.2; [46]
  /crtbdw/crtbdw.c    # berechnet Frequenzgruppenbreite,
                    # Abschnitt A.2; [46]
  /h2b/h2b.c          # Hertz-nach-Bark Umrechnung,
                    # Abschnitte 3.2 und A.2; [46]
  /linux              # compilierte Programme für Linux
  /mprot              # Mithörschwellen-Prototypen-Programm
    /Makefile
    /mprot.c          # Kapitel 4 und Abschnitt A.1
  /msk                # Tuningkurven-Programm, Kapitel 3 und B
```

```
/Makefile
/msk.c      # Main() und Speicherallocationsroutinen
/msk.h      # Headerdatei
/msk_io.c   # alle Ein- und Ausgaberroutinen
/msk_pol.c  # Interpolationsroutinen und Tuningkurvenberechnung
/msknr.c    # Routinen aus „Numerical Recipies in C“, [20]
/msknr.h    # Header aus „Numerical Recipies in C“ (gekürzt)
/sgi_irix   # Programme compiliert für SGI IRIX 5.3
/thq/thq.c  # berechnet die mittlere Ruhehörschwelle,
            # Abschnitte 3.2 und A.2; [27]
```

Sämtliche Textdateien wurden unter Unix erstellt, so daß sie für die Benutzung unter DOS mit `unix2dos` konvertiert werden müssen. Alle Programme wurden unter SGI IRIX 5.3 entwickelt und getestet, sollten aber auch unter anderen Betriebssystemen lauffähig sein. Zum Compilieren der Programme ist die Bibliothek `etlib` [28] von Prof. Terhardt nötig, die hier nicht beigelegt ist. Die Routinen in den Dateien `/prg/msk/msknr.*` sind [20] entnommen, für die Numerical Recipes Software das Copyright hält.

# Literaturverzeichnis

- [1] ALLEN, J. B.: *A Short History of Telephone Psychophysics*. Audio Eng. Soc., Reprint 4636:1–37, September 1997.
- [2] BILGER, R. C. und I. J. HIRSCH: *Masking of Tones by Bands of Noise*. J. Acoust. Soc. Am., 28(4):623–630, Juli 1956.
- [3] BRONSTEIN, I. N. und K. A. SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*. Teubner und Verlag Nauka, Moskau, Stuttgart, Leipzig, 25. Auflage, 1991.
- [4] CHISTOVICH, L. A.: *Titel unbekannt*. Biofiz., 2:743–755, 1957. Zitiert in [25].
- [5] EGAN, J. P. und H. W. HAKE: *On the Masking Patterns of a Simple Auditory Stimulus*. J. Acoust. Soc. Am., 22(5):622–630, September 1950.
- [6] EVANS, E. F.: *Cochlear nerve and cochlear nucleus*. In: KEIDEL, W. D. und W. D. NEFF (Herausgeber): *Handbook of Sensory Physiology*, Band 5/2, Seiten 1–108, Berlin, 1975. Springer.
- [7] FLETCHER, H.: *Physical Measurements of Audition and Their Bearing on the Theory of Hearing*. Journal of the Franklin Institute, 1923.
- [8] FRISHKOPF, L. S.: *Excitation and inhibition of primary auditory neurons in the little brown bat*. J. Acoust. Soc. Am., 36:1016, 1964.
- [9] HELMHOLTZ, H. VON: *Die Lehre von der Tonempfindung als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Vieweg Verlag, 1863.
- [10] KERNIGHAN, B. W. und D. M. RITCHIE: *The C Programming Language*. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 2. Auflage, 1988.
- [11] KIANG, N. Y.-S., M. B. SACHS, E. C. TOMAS und L. F. CLARK: *Discharge patterns of single fibers in the cat's auditory nerve*. The M.I.T. Press, 1965. Research Monograph No. 35.
- [12] MAIWALD, D.: *Beziehungen zwischen Schallspektrum, Mithörschwelle und der Erregung des Gehörs*. Acustica, 18:69–80, 1967.
- [13] MEYBERG, K. und P. VACHENAUER: *Höhere Mathematik 1*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1. korr. Auflage, 1990.
- [14] MØLLER, A. R.: *Coding of sounds in lower levels of the auditory system*. Quarterly Reviews of Biophysics, 5(1):59–155, 1972.

- [15] MOORE, B. C. J.: *Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking*. J. Acoust. Soc. Am., 63(2):524–532, Februar 1978.
- [16] MOORE, B. C. J. und B. J. O´LOUGHLIN: *The use of nonsimultaneous masking to measure frequency selectivity and suppression*. In: MOORE, B. C. (Herausgeber): *Frequency Selectivity in Hearing*, Seiten 179–250. Academic Press INC. (London) LTD., 1986.
- [17] OHM, G. S.: *Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen*. Ann. Phys., 59:513–565, 1843.
- [18] PATTERSON, R. D. und B. C. MOORE: *Auditory filters and excitation patterns as representations of frequency resolution*. In: MOORE, B. C. (Herausgeber): *Frequency Selectivity in Hearing*, Seiten 123–177. Academic Press INC. (London) LTD., 1986.
- [19] PICKLES, J. O.: *The neurophysiological basis of frequency selectivity*. In: MOORE, B. C. (Herausgeber): *Frequency Selectivity in Hearing*, Seiten 51–121. Academic Press INC. (London) LTD., 1986.
- [20] PRESS, W., B. FLANNERY, S. TEUKOLSKY und W. VETTERLING (Herausgeber): *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 2. Auflage, 1993.
- [21] RÜCKER, C. v.: *Berechnung von Erregungsverteilungen aus FTT-Spektren*. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA ’97*, Seiten 484–485, Oldenburg, 1997. DEGA.
- [22] SCHÖNE, P.: *Nichtlinearitäten im Mithörschwellen-Tonheitsmuster von Sinustönen*. Acustica, 37(1):37–44, 1977.
- [23] SCHÖNE, P.: *Mithörschwellen-Tonheitsmuster maskierender Sinustöne*. Acustica, 43:197–204, 1979.
- [24] SCHRÜFER, E.: *Signalverarbeitung: numerische Verarbeitung digitaler Signale*. Hanser, München, Wien, 1990.
- [25] SMALL, A. M.: *Pure-Tone Masking*. J. Acoust. Soc. Am., 31:1619–1625, Dezember 1959.
- [26] SONNTAG, B.: *Zur Abhängigkeit der Mithörschwellen-Tonheitsmuster maskierender Sinustöne von deren Tonheit*. Acustica, 52:95–97, 1982.
- [27] TERHARDT, E.: *Calculating virtual pitch*. Hearing Research, 1:155–182, 1979.
- [28] TERHARDT, E.: *etlib*, 1996. C-Programm-Bibliothek, Version 0962.
- [29] TERHARDT, E.: *Lineares Modell der peripheren Schallübertragung im Gehör*. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA ’97*, Seiten 367–368, Oldenburg, 1997. DEGA.
- [30] TERHARDT, E.: *Akustische Kommunikation: Grundlagen mit Hörbeispielen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [31] TUNTURI, A. R.: *A difference in the representation of auditory signals for the left and right ears in the iso-frequency contours of the right middle ectosylvian auditory cortex of the dog*. Am. J. Physiol., 168:712–727, 1952. Zitiert in [19].

- [32] VOGTEN, L. L. M.: *Low-level pure-tone masking: A comparison of „tuning curves“ obtained with simultaneous and forward masking.* J. Acoust. Soc. Am., 63(5):1520–1527, 1978.
- [33] VOGTEN, L. L. M.: *Simultaneous pure-tone masking: The dependence of masking asymmetries on intensity.* J. Acoust. Soc. Am., 63(5):1509–1519, 1978.
- [34] WEBER, D. L.: *Do off-frequency simultaneous maskers suppress the signal?* J. Acoust. Soc. Am., 73(3):887–893, März 1983.
- [35] WEBER, D. L. und R. D. PATTERSON: *Sinusoidal and noise maskers in simultaneous and forward masking.* J. Acoust. Soc. Am., 75(3):925–931, März 1984.
- [36] WEGEL, R. L. und C. E. LANE: *The Auditory Masking of One Pure Tone by Another and Its Probable Relation to the Dynamics of the Inner Ear.* Physical Review, XXIII(2), Februar 1924.
- [37] WEVER, E. G. (Herausgeber): *Theory of Hearing.* Wiley, New York, 1949.
- [38] WILSON, O.: *In discussion to B. M. Johnstone and K. Taylor. Mechanical aspects of cochlear function.* In: PLOMP, R. und G. F. SMOORENBURG (Herausgeber): *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing,* Leiden, 1970. A. W. Sijthoff.
- [39] YOST, W. A. (Herausgeber): *Fundamentals of Hearing, an Introduction.* Academic Press, 3. Auflage, Januar 1994.
- [40] ZWICKER, E.: *Die elementaren Grundlagen zur Bestimmung der Informationskapazität des Gehörs.* Acustica, 6:365–381, 1956.
- [41] ZWICKER, E.: *Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit.* Acustica, 8:237–258, 1958.
- [42] ZWICKER, E.: *On a psychoacoustical equivalent of tuning curves.* In: ZWICKER, E. und E. TERHARDT (Herausgeber): *Facts and Models in Hearing,* Seiten 132–141. Springer, 1974.
- [43] ZWICKER, E. und R. FELDTKELLER: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger.* S. Hirzel Verlag, 2. Auflage, 1967.
- [44] ZWICKER, E. und A. JAROSZEWSKI: *Inverse frequency dependence of simultaneous tone-on-tone masking patterns at low levels.* J. Acoust. Soc. Am., 71(6):1508–1512, 1982.
- [45] ZWICKER, E. und D. MAIWALD: *Über das Freifeldübertragungsmaß des Kopfhörers DT 48.* Acustica, 13:181–182, 1963.
- [46] ZWICKER, E. und E. TERHARDT: *Analytical expressions for critical band rate and critical bandwidth as a function of frequency.* J. Acoust. Soc. Am., 68(6):1523–1525, 1980.