

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

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

**Auszug aus der
Diplomarbeit**

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

Verfasser : Bernhard U. Seeber
Betreuer : Prof. Dr.-Ing. E. Terhardt
Laborzeit : 03.06.1998 bis 02.12.1998
Abgabetermin : 17.02.1999

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffe und Definitionen	2
1.1	Mithörschwellen	2
1.2	Tuningkurven	4
2	Ein Programm zur Berechnung von Tuningkurven	6
2.1	Übersicht	6
2.2	Ablaufplan	7
2.3	Zur Interpolation	9
2.4	Interpolation über die Testtonfrequenzen	10
2.5	Interpolation über die Maskiererpegel	10
2.6	Interpolation über die Maskierfrequenzen	11
2.7	Ausgabe der Interpolationsergebnisse	12
2.8	Berechnung von einzelnen Maskierungspunkten	13
2.9	Berechnung der Tuningkurven	13
A	Bedienung des Tuningkurvenprogrammes	15
	Literaturverzeichnis	18

Kapitel 1

Begriffe und Definitionen

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

1.1 Mithörschwellen

Eine Mithörschwelle, in Abb. 1.1 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. 1.1 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. 1.1 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 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.

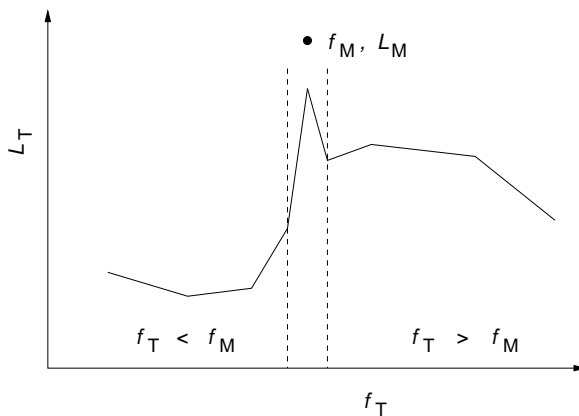


Abb. 1.1: Mithörschwelle, schematisch

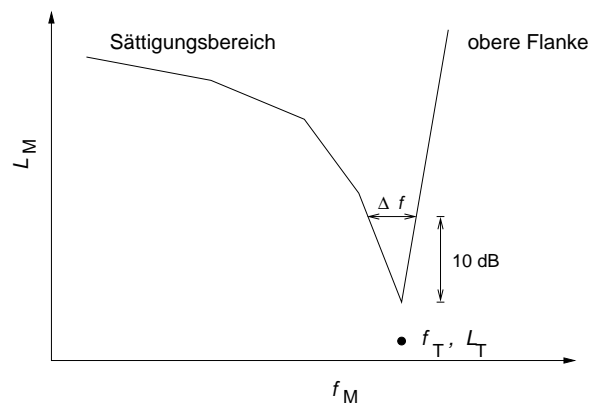


Abb. 1.2: Tuningkurve, schematisch

1.2 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. 1.2 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 Meßgenauigkeiten in psychoakustischen Messungen wird die Breite der Tuningkurve Δf 10 dB über der Spitze, wie in Abb. 1.2 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 [6] 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 2

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 A.

2.1 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 [4]. 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 A 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).

2.2 Ablaufplan

In Abb. 2.1 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` [10] verwendet. Die zugrunde liegende Formel ist [12]:

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

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 [10]. Einige Untersuchungen

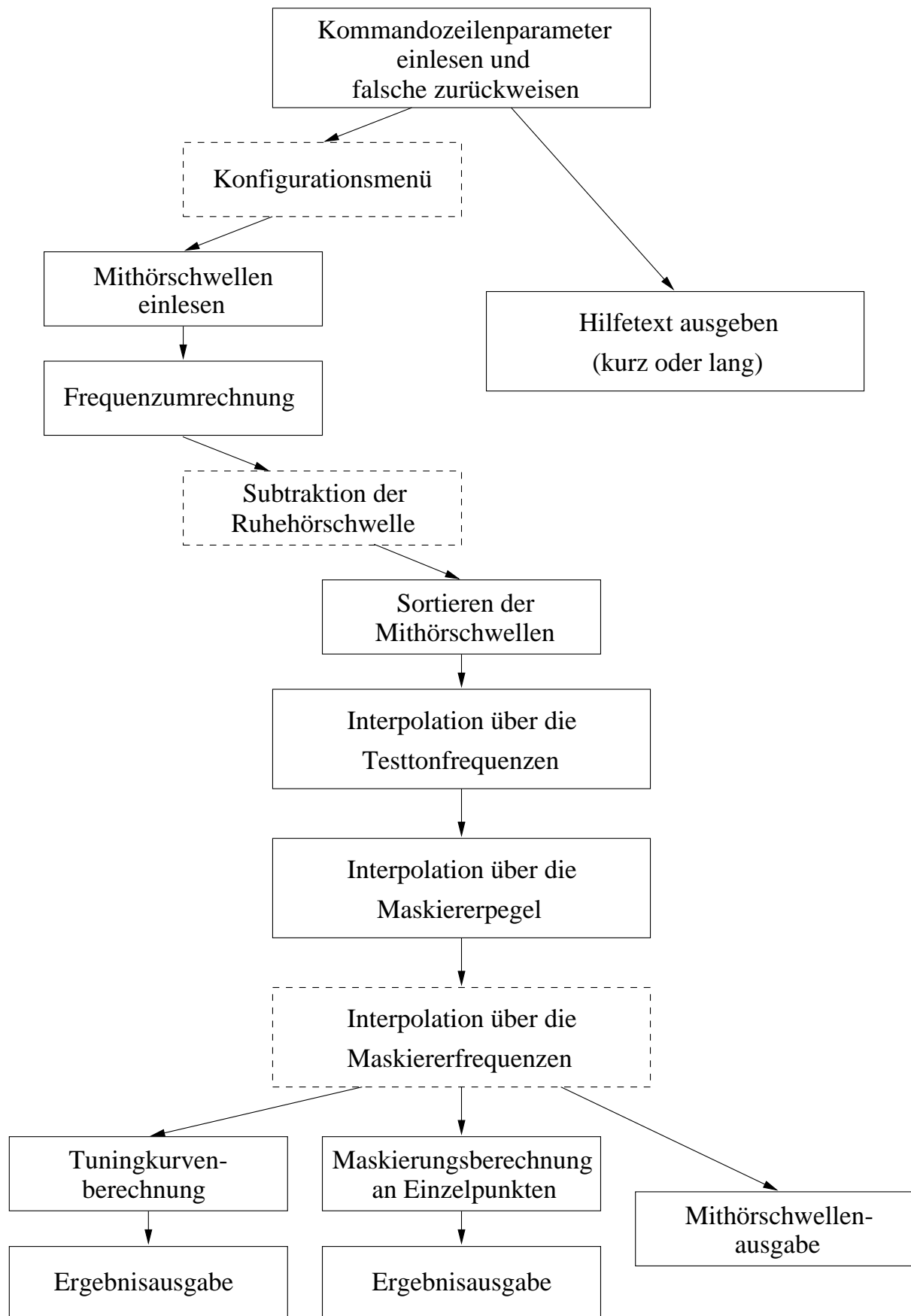


Abb. 2.1: Ablaufplan des Programmes msk.

machten es nötig, die Ruheshwelle zu subtrahieren. Die dazu verwendete Routine `efthresh` ist ebenfalls aus der Bibliothek `etlib` und nutzt folgende Formel, die die mittlere Ruheshwelle wiedergibt [9]:

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

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.

2.3 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 [7] (man verwende die 2. Auflage, da die erste fehlerhaft zu sein scheint). Weitere Informationen zur Spline-Interpolation finden sich in [2], [5] und [8]. 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 (unter anderem) in Abschnitt 2.6 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.

Weitergehende Untersuchungen 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.

2.4 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. 2.2 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 [3] auf.

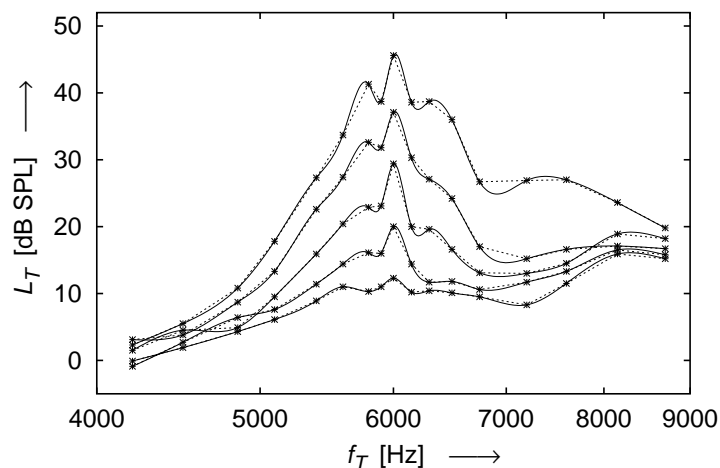


Abb. 2.2: Mithörschwellen eines 6030 Hz-Maskierers mit Pegeln von 20-60 dB SPL aus Abb. 5 in [11], jeweils linear (gestrichelt) und Spline-interpoliert (durchgezogene Linie).

2.5 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. 2.3. Eine Ausnahme bildet die 40 dB-Kurve in Abb. 2.2 (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. 2.4 zu sehen ist.

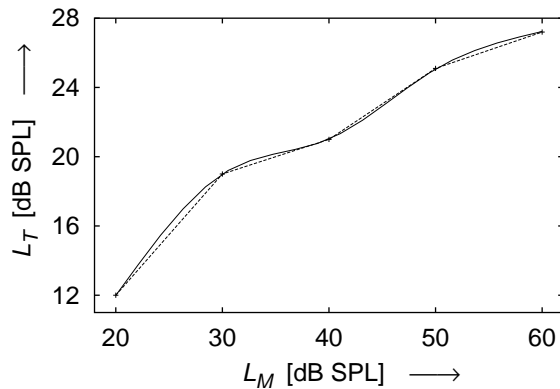


Abb. 2.3: Spline-interpolierte Maskierung in Abhängigkeit vom Maskiererpegel für 250 Hz-Maskierer und 171 Hz-Testton aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [11] (durchgezogene Linie) und Eingangsdaten dieser Interpolation (gestrichelt).

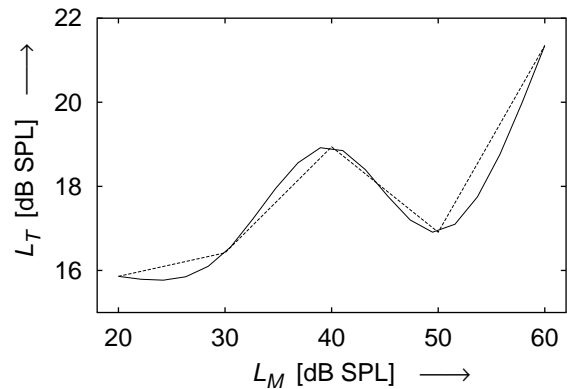


Abb. 2.4: Spline-interpolierte Maskierung in Abhängigkeit vom Maskiererpegel für 6030 Hz-Maskierer und 8469 Hz-Testton aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [11] (durchgezogene Linie) und Eingangsdaten dieser Interpolation (gestrichelt).

2.6 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. 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. 2.5 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. 2.6 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 Überschwingen. Dieser Effekt ist jedoch relativ unkritisch und wirkt sich im Nahbereich

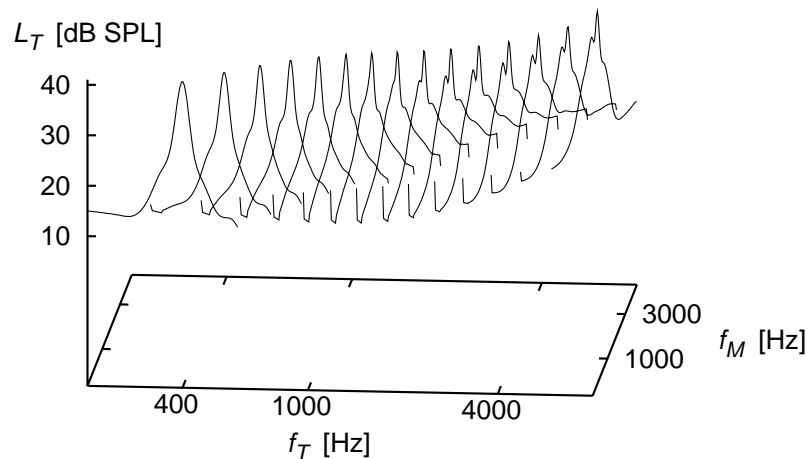


Abb. 2.5: Interpolierte Mithörschwellen bei 46,7 dB SPL Maskierpegel aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [11].

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. 2.7, 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.

2.7 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 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.

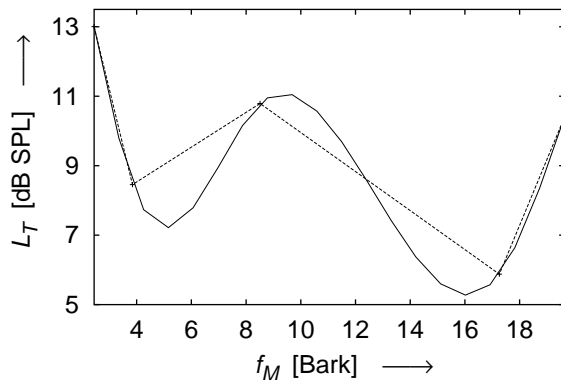


Abb. 2.6: Spline-Interpolation der Maskierung in Abhängigkeit von der Maskierfrequenz für Testtöne 0,38 Bark unterhalb der Maskierfrequenz und Maskiererpegel 20 dB SPL (durchgezogene Linie) und linear verbundene Eingangsdaten der Interpolation (gestrichelt); aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [11].

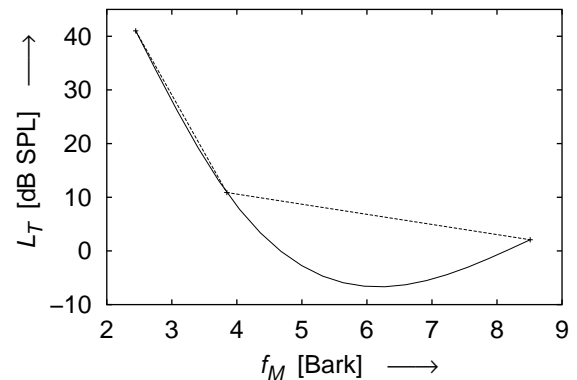


Abb. 2.7: Spline-Interpolation der Maskierung in Abhängigkeit von der Maskierfrequenz für Testtöne 1,95 Bark unterhalb Maskierfrequenz und Maskiererpegel 20 dB SPL (durchgezogene Linie) und linear verbundene Eingangsdaten der Interpolation (gestrichelt); aus Daten von Zwicker und Jaroszewski [11].

2.8 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.

2.9 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 2.8 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 2.4 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 2.6 erwähnten Stufen in der Tuningkurve kommen.

Anhang A

Bedienung des Tuningkurvenprogrammes

Das Programm `msk` wurde bereits ausführlich in Kapitel 2 vorgestellt. Auch wurde bereits auf die Wirkungsweise der Kommandozeilenoptionen eingegangen, die in diesem Abschnitt der Übersichtlichkeit halber noch einmal 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. 2.1 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:

- `-t Freq Pegel` 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.
- `-u Dateiname` Kann anstelle der Option `-t` 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 `-n`, der Bestfrequenz und dem Testtonpegel ergeben.
- `-d Dateiname` 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.
- `-l` Schaltet für alle Interpolationsschritte um von Spline auf lineare Interpolation oder umgekehrt, je nach Standardeinstellungen.
- `-X` 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 Maskierp(e)gel oder gleicher Maskierf(re)quenz 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
...
```

Literaturverzeichnis

- [1] ALLEN, J. B.: *A Short History of Telephone Psychophysics*. Audio Eng. Soc., Reprint 4636:1–37, September 1997.
- [2] BRONSTEIN, I. N. und K. A. SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*. Teubner und Verlag Nauka, Moskau, Stuttgart, Leipzig, 25. Auflage, 1991.
- [3] FLETCHER, H.: *Physical Measurements of Audition and Their Bearing on the Theory of Hearing*. Journal of the Franklin Institute, 1923.
- [4] KERNIGHAN, B. W. und D. M. RITCHIE: *The C Programming Language*. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 2. Auflage, 1988.
- [5] MEYBERG, K. und P. VACHENAUER: *Höhere Mathematik 1*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1. korr. Auflage, 1990.
- [6] MOORE, B. C. J.: *Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking*. J. Acoust. Soc. Am., 63(2):524–532, Februar 1978.
- [7] PRESS, W., B. FLANNERY, S. TEUKOLSKY und W. VETTERLING (Herausgeber): *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 2. Auflage, 1993.
- [8] SCHRÜFER, E.: *Signalverarbeitung: numerische Verarbeitung digitaler Signale*. Hanser, München, Wien, 1990.
- [9] TERHARDT, E.: *Calculating virtual pitch*. Hearing Research, 1:155–182, 1979.
- [10] TERHARDT, E.: *etlib*, 1996. C-Programm-Bibliothek, Version 0962.
- [11] 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.
- [12] 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.