

Entwicklung eines Modulkonzeptes für die psychoakustische Geräuschanalyse unter MatLab

Diplomarbeit

von

Alois Sontacchi

durchgeführt und eingereicht am

Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung
der Technischen Universität Graz
Vorstand: O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. DDr. Willibald Riedler

in Zusammenarbeit mit dem

Institut für Elektronische Musik
der Kunstuniversität Graz
Vorstand: O. HProf. Mag. Gerd Kühn

Begutachter:

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. DDr. Willibald Riedler

Betreuer:

**Dipl.-Ing. Dr. Martin Pflüger
Mag. Dipl.-Ing. Dr. Robert Höldrich**

Graz, Dezember 1998

Danksagung

Liebe Eltern, ich möchte mich bei Euch recht herzlich bedanken, daß Ihr mir durch Eure Mühe und harte Arbeit diese Ausbildung ermöglichen konntet.

Meine liebe Sonja, danke für Deine jahrelange Rücksichtnahme und Geduld. Danke für Dein Mittragen und Deine liebevollen Ermutigungen.

Herzlichen Dank gilt meiner lieben Schwester und meinem Freund Martin, die mir bei der Korrektur der Arbeit behilflich waren.

Auch Dir, lieber Franz, möchte ich einen Dank für das gemeinsame bestreiten der unzähligen Prüfungen und Hürden aussprechen.

Weiters gilt Ihnen, Herr Dr. Graber, mein besonderer Dank für die Begleitung durchs Studium, für die neuen Perspektiven und Ideen, sowie für die zahlreichen interessanten Unterhaltungen.

Ganz besonders möchte ich mich noch bei meinen beiden großartigen Betreuern Herrn Dr. Martin Pflüger und Herrn Dr. Robert Höldrich für die fachliche und organisatorische Unterstützung bedanken. Es war stets zu jeder Zeit ein „offenes Ohr“ für meine Fragen und Probleme vorhanden. Vielen herzlichen Dank.

Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Berechnung psychoakustischer Empfindungsgrößen, die auf der Grundlage von normierten Klangdateien mittels digitaler Signalverarbeitung ermittelt werden.

Die zur Berechnung dieser objektiven Parameter notwendigen Algorithmen, die die Signalverarbeitung des Gehörs modellieren, werden in ihren Funktionsschritten beschrieben. Es werden neue Modelle zur Berechnung der Rauigkeit und der Schwankungsstärke, sowie zur Detektierung von Impulsen vorgestellt. Die übrigen Parameter werden nach den üblichen standardisierten Berechnungsvorschriften ermittelt und ihren Kritikpunkten, hinsichtlich der Berechnung, gegenübergestellt.

Das im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Softwarepaket „PAAS“ (PsychoAkustische Analyse Software) enthält neben der Berechnung der psychoakustischen Parameter auch die in der Lärmmeßtechnik üblichen Meßgrößen wie beispielsweise das dB(A). Ebenso gibt es eine Kalibrierungsmöglichkeit der Klangdateien. Die Implementierung der Berechnungsalgorithmen wurde unter MatLab 5.1 durchgeführt.

Abstract

This thesis is concerned with the evaluation and scaling of psychoacoustic perceptions. These parameters are necessary for the specification of the subjective impression of noise. They are digitally computed from calibrated data stored in sound files.

Complex algorithms are used to obtain these objective parameters. The algorithms based on different hearing models are described. A new computation model for the sensation of roughness and fluctuation strength as well as a new method for impulse detection are presented.

The developed software-package ‘PAAS‘ (PsychoAcoustic Analysis Software) contains the computation of the psychoacoustic parameters and a calibration tool for sound files. Furthermore, additional parameters frequently used in noise measurement applications (e.g. dB(A)) can be calculated. The algorithms are implemented in MatLab 5.1.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Rauigkeit	4
1.1 Beschreibung der Rauigkeitsempfindung	4
1.2 Die Rauigkeit und mehrdimensionale Empfindungsgrößen	5
1.2.1 Lästigkeit	6
1.2.2 Sensorische Konsonanz – sensorischer Wohlklang	6
1.2.3 Rauigkeit und musikalische Konsonanz.....	7
1.3 Die Abhängigkeit der Rauigkeit von physikalischen Parametern.....	7
1.4 Modellansätze zur Bestimmung der Rauigkeit	8
1.4.1 Modellansatz von Vogel.....	9
1.4.2 Modellansatz von Fastl.....	10
1.4.3 Modellansatz von Aures	10
1.4.4 Modellansatz von Daniel.....	11
1.4.5 Modellansatz von Höldrich und Pflüger	12
2 Lautheit	17
2.1 Zusammenhänge zwischen Reiz und Empfindung	18
2.2 Auswirkung von Spektral- und Zeitauflösung des Gehörs	19
2.3 Lautheitsberechnung	21
2.3.1 Lautheitsberechnung auf Basis der Kurven gleicher Lautstärkepegel.....	22
2.3.2 Lautheitsberechnung auf Basis des Erregungsmusters.....	23
3 Schärfe	26
3.1 Wesentliche Eigenschaften der Schärfe	26
3.2 Berechnung der Schärfe	27
4 Klanghaftigkeit	29
4.1 Modell nach Terhardt.....	29
4.2 Modell nach Aures	30
5 Schwankungsstärke	32
5.1 Modell nach Höldrich	33

6 Impulshaltigkeit	36
6.1 Modelle zur Berechnung der Impulshaltigkeit.....	37
6.1.1 Modell nach Sottek, Vranken und Busch.....	37
6.1.2 Modell nach Krahé und Buchta.....	38
6.2 Impulsdetektierung nach Höldrich und Pflüger	40
7 Referenzbeispiele	42
7.1 Referenzbeispiele zur Rauhigkeit	42
7.2 Referenzbeispiele zur Lautheit und Schärfe	51
7.3 Referenzbeispiele zur Klanghaftigkeit.....	52
7.4 Referenzbeispiele zur Schwankungsstärke	55
Literaturverzeichnis	61
Literatur zur Rauhigkeit.....	61
Literatur zur Lautheit	64
Literatur zur Schärfe	65
Literatur zur Klanghaftigkeit	66
Literatur zur Schwankungsstärke.....	67
Literatur zur Impulshaltigkeit	68
Anhang A	69
Anhang B (Toolbox – Funktionsbeschreibungen)	74

Einleitung

Bei dieser Diplomarbeit steht die Implementierung der komplexen Algorithmen zur Berechnung der psychoakustischen Empfindungsgrößen im Mittelpunkt. Mit Hilfe der Lautheit, der Schärfe, der Rauigkeit, der Klanghaftigkeit, der Schwankungsstärke und der Impulshaltigkeit kann der subjektive Empfindungseindruck eines durchschnittlichen Menschen auf objektive Weise ermittelt und gemessen werden. Die Wahrnehmung wie z.B. die empfundene Lästigkeit eines Geräusches wird sicher in erster Linie durch den Reiz selbst bestimmt, die Wahrnehmungsschwelle und die Auswirkung jedoch sind stark vom psychischen Zustand eines Menschen abhängig. Dadurch ist eine absolute, eindeutige Vorhersage allgemein nicht, aber eine relative Reihung unter Umständen möglich.

Die psychoakustischen Parameter ermöglichen eine „gehörgerechte“ Schallbewertung und sind somit in vielen Bereichen besser geeignet, die Wirkung von Lärm auf den Menschen zu beschreiben, als dies der A-bewertete Schallpegel vermag. Vor allem im Planungs- und Entwicklungsbereich von Anlagen oder Maschinen kann zur Minimierung der störenden Geräuschentwicklungen die Anwendung der gehörbezogenen Bewertung empfohlen werden. Da in der Gesellschaft auch die akustischen Komfortansprüche gestiegen sind, können damit die Konsumentenwünsche bezüglich der Qualität des Geräusches z.B.: am Automobilentwicklungsbereich immer besser erfüllt werden.

In dieser Arbeit werden neue Modelle zur Berechnung der Rauigkeit (n. Höldrich und Pflüger, Kapitel 1), zur Berechnung der Schwankungsstärke (n. Höldrich, Kapitel 5) und zur Detektierung von Impulsen (n. Höldrich und Pflüger, Kapitel 6) vorgestellt und mit den bisherigen Methoden verglichen. Die Modelle zur Berechnung der Lautheit und der Schärfe (n. Zwicker, Kapitel 2 und 3) sowie der Klanghaftigkeit (n. Aures, Kapitel 4) werden kurz beschrieben (da sie als bekannt vorausgesetzt werden), und den Kritiken und Verbesserungsvorschlägen aus verschiedenen Literaturen gegenübergestellt.

Die Implementierung der Berechnungsalgorithmen wurde unter MatLab 5.1 durchgeführt. Die dabei entstandene Analysesoftware **PAAS (PsychoAkustische Analyse Software)** versteht sich als Toolbox für Psychoakustische Meßgrößen. Neben den bereits genannten Größen können weiters noch die Terz- und Oktavpegel sowie der A-bewertete Pegel berechnet werden. Die Algorithmen sind in modulartigen Funktionen ausgeführt, d.h. sie stehen als Einzelfunktionen, in Form von Testprogrammen und in automatisierten Berechnungsprogrammen zur Verfügung. Die Anwendung und Funktionsbeschreibung befindet sich im Anhang B.

1 Rauhigkeit

Die Klangfarbe besitzt neben der Lautstärke eine besondere Bedeutung bei der Schallbewertung. So können Schalle mit gleicher Lautstärke, aber unterschiedlichem Klang, sowohl angenehm als auch unangenehm, wohlklingend oder mißklingend bewertet werden. Grundlegende Untersuchungen von Bismarck (1974a,b) zeigen, daß die Schärfe einen wichtigen Faktor zur Beschreibung der Klangfarbe darstellt. Bei den Untersuchungen von Hashimoto et al. (Hashimoto et al., 1991a; Hashimoto et al. 1991b; Hashimoto und Hatano, 1994) zeigt sich eine hohe Korrelation zwischen der Rauhigkeit und der Empfindung „*angenehm*“-„*unangenehm*“. Die Rauhigkeit ist, ebenso wie die Größen Lautheit und Schärfe, eine Empfindungsgröße. Auf die Lautheit (siehe Kapitel 2) und auf die Schärfe (siehe Kapitel 3) wird noch näher eingegangen.

Eine praktische Anwendung findet die Rauhigkeit bei der Bewertung der akustischen Qualität von technischen Geräuschen wie z.B. bei der Beurteilung der Lärmemission von Kraftfahrzeugen im Fahrzeuginnenraum, bei Fehlern diverser Zahnradgetriebe (Reibungsgeräusche, die von Rauhigkeit dominiert werden), bei der Beurteilung von Sprachqualität u. a..

1.1 Beschreibung der Rauhigkeitsempfindung

Die Rauhigkeitsempfindung gehört zu den Empfindungsgrößen, die in der Psychoakustik als „elementare Hörempfindungen“ bezeichnet werden. Empfindungsgrößen bilden die Grundlage für eine gehörbezogene Schallanalyse und Bewertung. Diese Empfindungsgrößen müssen getrennt voneinander beachtet und beurteilt werden können (Zwicker, 1982). Die Rauhigkeit von Geräuschen kann dabei als Empfindungsgröße für schnelle Amplitudenschwankungen angesehen werden (Terhardt, 1974). Die Rauhigkeit ist eine Empfindung, die bei schnellen Hüllkurvenfluktuationen auftritt. Rauhe Schalle werden oft auch als „mißklingend“ und „unangenehm“ bezeichnet (ebd, 1974). Ein gutes Beispiel zur Wahrnehmung der Rauhigkeit ist die Darbietung zweier Sinustöne, gleicher Amplitude, mit den Frequenzen f_1 und f_2 . Zu Beginn ist f_2 gleich f_1 und wird dann langsam zunehmend größer. Die Hörempfindung ergibt bei dieser Darbietung zunächst einen Ton, dann eine Schwebung mit $\Delta f = f_2 - f_1$ d.h.: einen Ton mit der Frequenz $f = f_1 + \Delta f/2$, dessen Lautstärke mit Δf schwankt. Überschreitet diese Differenz den Betrag von ca. 15 Hz, so tritt an die Stelle der Schwebung eine Rauhigkeit bzw. „Unschönheit“ als resultierende Empfindung. Überschreitet Δf schließlich die Frequenzunterscheidungsgrenze Δf_D , werden plötzlich zwei einzelne Töne wahrgenommen, die den Frequenzen f_1 und f_2 entsprechen. Es scheint, daß sich die Resonanzbereiche auf der Basiliarmembran genügend weit voneinander entfernt haben, um zwei unterschiedliche Tonhörensinnale zu ergeben. Trotzdem werden die Tonhöhen noch immer als „rau“ wahrgenommen, besonders im unteren Frequenzbereich. Wird die Frequenzdifferenz größer als Δf_{CB} , die Frequenzgruppenbreite (critical band width), so nimmt die Rauhigkeit ab und beide Töne klingen „glatt“ und „angenehm“ (vgl. Roederer, 1977; S.31/32). Zur grafischen Veranschaulichung und besseren Illustration siehe Abbildung 1.1..

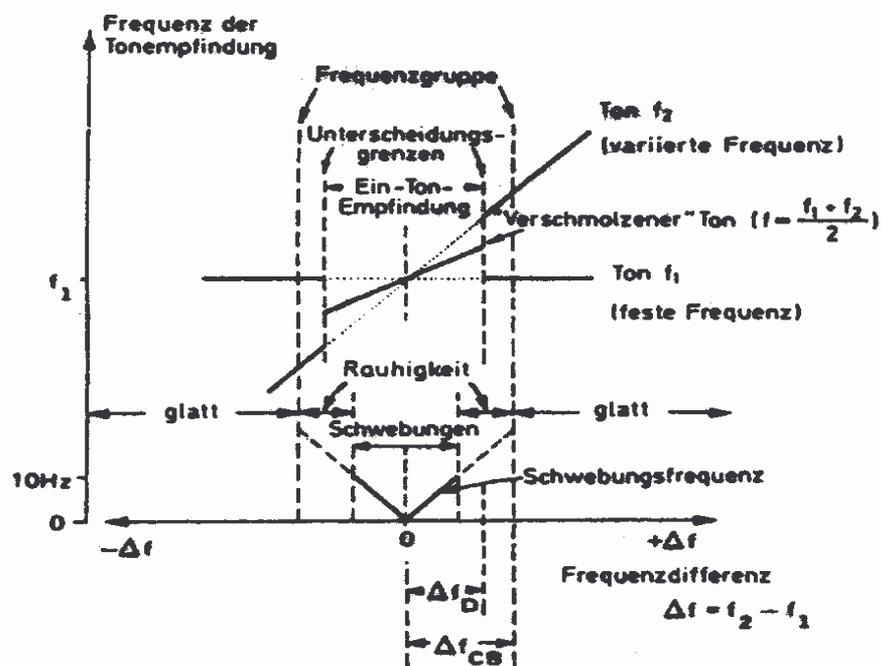


Abbildung 1.1.

Schematische Darstellung der Frequenz (dicke Linien) entsprechend der Tonempfindung, die durch die Überlappung zweier reiner Töne mit den nahe beieinander liegenden Frequenzen f_1 und $f_2 = f_1 + \Delta f$ hervorgerufen wird (nach Roederer, 1977)

Zur Illustration sei noch bemerkt, daß sich die Übergänge fließend und nicht abrupt ergeben, wie fälschlicherweise aus der Grafik interpretiert werden könnte.

Helmholtz, der als erster umfassende Untersuchungen bezüglich der Rauigkeit vorgenommen hat, unterscheidet je nach der Größe von Δf eine *größere Art von Rauigkeit*, die man als „Knattern odern Knarren“ bezeichnen könnte, und eine *schnellere feinere – schärfere Rauigkeit* (vgl. Helmholtz, 1868, S. 284). Den Begriffen wie „Rattern“ und „Knattern“ werden bei amplitudenmodulierten 200 Hz-Tönen Modulationsfrequenzen zwischen 12 und 40 Hz zugeordnet. Dem Begriff „Knarren“ werden Modulationsfrequenzen im Bereich zwischen 22 und 70 Hz zugewiesen (Springer und Weber, 1994).

„Als Bedingung der Rauigkeit kann jedenfalls eine weitgehende Überlappung von Erregungsbereichen der Basiliarmembran gesehen werden, die eine Auflösung der einzelnen anregenden Komponenten durch das Gehör erschwert beziehungsweise unmöglich macht. Dieser Sachverhalt wird besonders deutlich, wenn man die Frequenzkomponenten der Schwebung getrennt an je ein Ohr darbietet. Die Schwebung und Rauigkeit verschwindet sofort“ (Roederer, 1977, S.35).

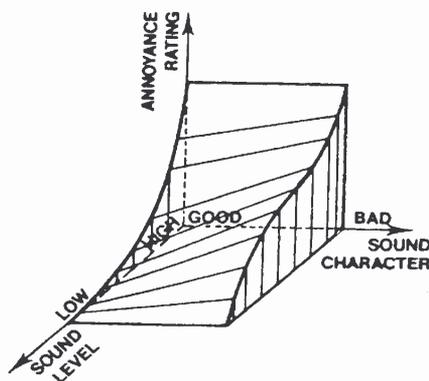
1.2 Die Rauigkeit und mehrdimensionale Empfindungsgrößen

Aus psychoakustischen Messungen läßt sich schließen, daß es vom Hörer unabhängige, weitgehend sensorisch bedingte Hörparameter gibt, die die empfundene Unangenehmheit von Schallen in systematischer Weise beeinflussen. Als relevante Parameter stellen sich dabei die psychoakustischen Empfindungsgrößen Lautheit, Schärfe, Tonhaltigkeit, Schwankungsstärke und Rauigkeit heraus (vgl. Daniel, 1995).

1.2.1 Lästigkeit

Zur Beschreibung der Lärmwirkung eines Schalles ist die Lästigkeit von besonderer Bedeutung. Eine eindeutige, allgemeine Definition des Begriffes „Lästigkeit“ liegt bis dato nicht vor. Das Problem der Begriffseinschränkung ergibt sich dadurch, daß Lästigkeit eine sowohl situations- als auch personengebundene Empfindungsgröße darstellt. D.h. Nicht die „musikalische – akustische Begabung“ sondern vielmehr der psychologische Zustand eines Menschen ist von Bedeutung (psychologische Belastbarkeit).

Zur Beurteilung der Lästigkeit von Geräuschen werden die psychoakustischen Parameter wie Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit herangezogen (Mellert und Weber, 1981; Mellert und Weber, 1984; Widmann, 1992; Cardozo und Van Lieshout, 1981a; Cardozo und Van Lieshout, 1981b; Cardozo und van der Ven, 1979; Terhardt und Stoll, 1981). Als Berechnungsverfahren können hier die *unbeeinflusste Lästigkeit*¹ von Zwicker (1990) und die *psychoakustische Lästigkeit* von Widmann (1992) genannt werden. Eine mögliche Darstellung des Zusammenhanges der psychophysikalischen Größen zeigt Abbildung 1.2..



„Sound level“ bezeichnet die Lautheit des Schalls, „Sound character“ faßt die Parameter Rauigkeit, Schärfe, Tonhaltigkeit und Schwankungsstärke zusammen, „Annoyance rating“ stellt quantitativ die Lästigkeit dar.

Abbildung 1.2.

Teil des Lästigkeits-Raumes (annoyance space). Die Zeichnung ist dazu gedacht, den Einfluß des Schallcharakters (sound character) auf die Lästigkeit zu illustrieren (nach Cardozo und van Lieshout, 1979)

Sensorische Konsonanz – sensorischer Wohlklang

Einen allgemeinen Ansatz stellt hier das *psychophysikalische Konzept* von Terhardt (1984) dar (siehe Abbildung 1.2.). Die mehrdimensionale Empfindungsgröße „Wohlklang“ (auch *sensorische Konsonanz*) trägt neben der Lautheit wesentlich zur Zwischengröße „Lärmigkeit“ bei. Auch die situationsabhängige Größe (psychologische Größen) „Lärmempfindlichkeit“ wird zur Bestimmung der „Lärmwirkung“ berücksichtigt. Nach Terhardt und Stoll (1981) wird der Wohlklang eines Schalls zum Großteil durch die Schärfe, der Rauigkeit und der Tonalität bestimmt. Eine systematische Untersuchung des Wohlklangs (sensorischer Wohlklang) ergab eine Abhängigkeit von den Hörempfindungen, die bei Aures (1985a) wie folgt angegeben wird:

$$P = e^{-0.55R / asper} e^{-0.113S / acum} (1.24 - e^{-2.2K}) e^{-(0.023N / sone)^2} \quad \text{Gl.1}$$

mit S...Schärfe, R...Rauigkeit, N...Lautheit, K...Klanghaftigkeit (Maß der Tonhaltigkeit)

¹ Unbeeinflusst heißt, daß zwischen dem Hörer und dem Schall keine Beziehung stehen soll.

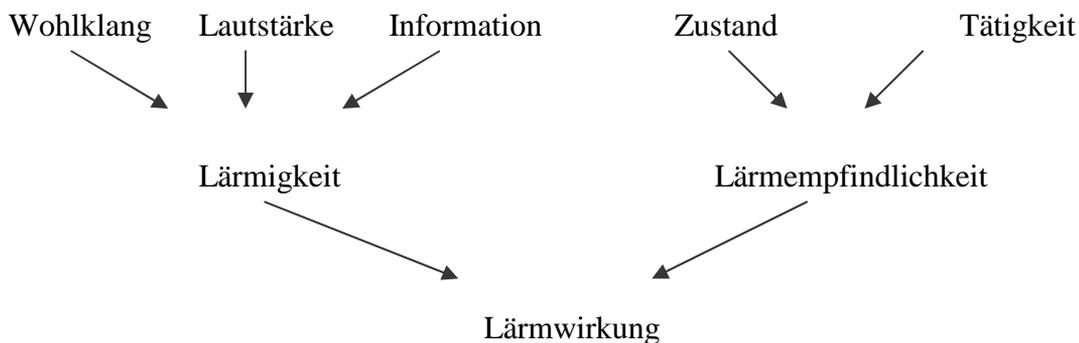


Abbildung 1.3.

Psychophysikalisches Konzept des Zustandekommens der Lärmwirkung (nach Terhardt, 1984)

1.2.3 Rauhigkeit und musikalische Konsonanz

Terhardt (1976) führt die Rauhigkeit als psychoakustische Grundlage für musikalische Konsonanz bei isoliert dargebotenen Klängen an. Dabei bezieht er sich auf die Begriffe Dissonanz und Konsonanz von Helmholtz.

*„Wenn zwei musikalische Klänge nebeneinander erklingen, ergeben sich im allgemeinen Störungen ihres Zusammenklanges durch die Schwebungen, welche ihre Partialtöne miteinander hervorbringen, so daß ein größerer oder kleinerer Teil der Klangmasse in getrennte Tonstöße zerfällt und der Zusammenklang rauh wird. Wir nennen dies Verhältnis **Dissonanz**.*

*Es gibt aber gewisse bestimmte Verhältnisse zwischen den Schwingungszahlen, bei denen eine Ausnahme von der Regel eintritt, wo entweder gar keine Schwebungen sich bilden, oder diese Schwebungen so schwach in das Ohr fallen, daß keine unangenehme Störung des Zusammenklanges veranlassen; wir nennen diese Ausnahmefälle **Konsonanzen**“*
(Helmholtz, 1868; S.320).

Daraus resultieren bei einem Zusammenklang komplexer Töne (Klang) mit einfachen, ganzzahligen Grundfrequenzverhältnissen besonders geringe Schwebungen. Beim Zusammenklang von zwei Sinustönen ist weniger das Frequenzverhältnis, sondern vielmehr der Frequenzabstand von Bedeutung. Einen Nachweis für den Zusammenhang zwischen Konsonanz, Dissonanz und Rauhigkeit liefern Untersuchungen von (Plomp und Levelt, 1965); (Levelt et al., 1966); (Plomp und Steeneken, 1968) sowie (Kameoka und Kuriyagawa, 1969a, 1969b); (zit. nach Daniel, 1995, S. 8).

1.3 Die Abhängigkeit der Rauhigkeit von physikalischen Parametern

Die Empfindung eines Schalls hängt einerseits von der persönlichen Einstellung des Hörers und andererseits von den physikalischen Eigenschaften des Schalls, die objektiv bestimmbar sind, ab. In der Empfindung der Rauhigkeit zeigt sich eine sehr komplexe Abhängigkeit von den physikalischen Parametern [vgl. Daniel, 1995]. In der Literatur werden zu den verschiedenen Abhängigkeiten teilweise inkonsistente Ergebnisse geliefert. Der Grund des schwierigen Vergleiches liegt vor allem in der großen Anzahl von Parametern.

Generell zeigen sich folgende Abhängigkeiten für die psychoakustischen Rauhigkeit:

„...Die Rauigkeit sinusförmig amplitudenmodulierter Töne hängt exponentiell vom Modulationsgrad m ab.

$$R \sim m^\alpha$$

Gl.2

Die Größe des Exponenten (α) liegt zwischen 1.5 und 2 und ist geringfügig abhängig von der Modulationsfrequenz und Trägerfrequenz. In weiten Bereichen zeigt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Modulationsgrad.

Für amplitudenmodulierte Schalle und frequenzmodulierte Schalle ergibt sich ein bandpaßartiger Verlauf der Rauigkeit in Abhängigkeit der Modulationsfrequenz f_{mod} mit einem Maximum bei $f_{mod}=70\text{Hz}$.

Bei amplitudenmodulierten Schallen verschiebt sich dieses Maximum für Trägerfrequenzen $f_{Tr} < 1\text{kHz}$ nach kleineren Modulationsfrequenzen, nimmt aber in seinem Wert ab. Für Modulationsfrequenzen größer als 1kHz ist ebenfalls eine Abnahme der Rauigkeit vorhanden, das Maximum bleibt jedoch bei $f_{mod} = 70 \text{ Hz}$. Einen guten Mittelwert der Literaturwerte der Rauigkeit in Abhängigkeit von Modulations- und Trägerfrequenz stellen die durch getrennte Veränderungen von Modulationsfrequenz bzw. Trägerfrequenz gewonnenen Daten von Aures (1984) dar. ...

Die Pegelabhängigkeit der Rauigkeit ist wesentlich geringer als die der Lautheit. So entspricht einer Erhöhung des Schallpegels um 20 dB maximal einer Verdopplung der empfundenen Rauigkeit.

Die Rauigkeit amplitudenmodulierter Töne addieren sich, wenn sich ihre Erregungsbereiche auf der Basiliarmembran nicht überlappen. Bei sich überlappenden Erregungsbereichen zeigt sich ein deutlicher Einfluß der Phase der Modulation.

Die Maskierung von Erregungsflanken eines Schalles reduziert dessen Rauigkeit. Eine Verbreiterung der Erregung wie im Falle eines größer werdenden Frequenzhubs bei einer Frequenzmodulation oder bei Zunahme des Pegels erhöht die Rauigkeit eines Schalles.

Dies deutet auf eine additive Zusammensetzung der Rauigkeit aus Teilrauigkeiten, den sogenannten spezifischen Rauigkeiten $r'(z)$ in Abhängigkeit von der Tonheit z hin.

Die spezifische Rauigkeit $r'(z)$ wird aus den in die Frequenzgruppe um die Tonheit z fallenden Spektralanteilen des Schalles gebildet. Dabei muß die Phasenlage verschiedener Modulationsfrequenzen beachtet werden. Die Rauigkeit R in Abhängigkeit von der Zeit t ergibt sich so zu:

$$R(t) = \int r'(z, t) \cdot dz$$

Gl.3

...“ (Daniel, 1995, S.30 ff).

1.4 Modellansätze zur Bestimmung der Rauigkeit

Die Grundlage zur Berechnung der Rauigkeit stellt Gleichung 2 dar. Daniel fordert (1995, S.33) für ein Berechnungsverfahren folgende 3 Punkte:

1. Nachbildung der Bandpaßcharakteristik der Rauigkeit in Abhängigkeit von f_{mod} Modulationsfrequenz und f_{Tr} Trägerfrequenz.
2. Die Rauigkeit setzt sich aus den spezifischen Rauigkeiten der Frequenzgruppen zusammen und Berücksichtigung der Pegelabhängigkeit der Rauigkeit.
3. Unmoduliertes Breitbandrauschen sollte eine Rauigkeit gleich Null besitzen.

Daniel verweist auf die Problematik der Punkte 2 und 3 wie folgt:

„...Berechnet man die Rauigkeit nicht aus spezifischen Rauigkeiten, so wird die Rauigkeit von unmoduliertem Breitbandrauschen², welches keine subjektive Rauigkeit besitzt, meist korrekt wiedergegeben. Dafür wird die Zunahme der Rauigkeit, z.B. bei größer werdendem Frequenzhub von frequenzmodulierten Tönen nicht berücksichtigt. Die Berechnung der Rauigkeit aus spezifischen Rauigkeiten hingegen stellt Probleme bei unmodulierten Breitbandrauschen. In den einzelnen Frequenzgruppen treten Schmalbandrauschen auf, deren spezifische Rauigkeiten in der Summe viel zu große Rauigkeiten ergeben...“ (Daniel, 1995, S.33).

Es folgen verschiedene Ansätze zur Berechnung der Rauigkeit, die den oben genannten Kriterien auf unterschiedliche Weise gerecht werden. Vorweg sollte noch eine Unterscheidung dieser Modelle bezüglich ihres Ansatzes im Ausgangspunkt besprochen werden. Die Modelle basieren entweder auf der Berechnung der Maskierungstiefe oder auf der Berechnung über den Modulationsgrad. Die zeitliche Maskiertiefe berechnet sich nach Zwicker (1982) aus der Pegeldifferenz zwischen Minima und Maxima von Mithörschwellen-Zeitmustern. Die entsprechende Modellgröße dazu ist die zeitliche Erregungspegelschwankung ΔL_E . Die Berechnung über den Modulationsgrad ist ähnlich der Berechnung über die Pegeldifferenzen der Hüllkurven.

1.4.1 Modellansatz von Vogel

Der Modellansatz von Vogel (1975) basiert auf der Berechnung der zeitlichen Maskiertiefe ΔL . Er nimmt eine Proportionalität zwischen Erregungspegelschwankung und spezifischer Rauigkeit an. Die Erregungsschwankung errechnet sich aus dem mittels Tiefpaß (Zeitkonstante τ_1) gemittelten gleichgerichteten Schalldruckverlauf. Bei amplitudenmodulierten Signalen wird der Modulationsgrad mit dem Abschwächungsfaktor k multipliziert (transformiert).³

$$m' = k \cdot m \quad \text{Gl.4}$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi\tau_1 f_{\text{mod}})^2}} \quad \text{Gl.5}$$

Durch Logarithmieren der Erregungsschwankung ergibt sich der Erregungspegel ΔL_E . Somit ergibt sich der Zusammenhang zwischen Modulationsgrad m und Erregungspegel ΔL_E mit:⁴

$$\Delta L_{Ez} = \Delta L_{Ez}(\text{max}) - \Delta L_{Ez}(\text{min}) = 20 \cdot \log \left(\frac{(1+k \cdot m)}{(1-k \cdot m)} \right) \quad \text{in dB} \quad \text{Gl.6}$$

Die spezifischen Rauigkeiten r' werden durch Bandpaßfilterung und Gleichrichtung von ΔL_E berechnet.

Das Modell liefert gute Näherungen bei der Berechnung der Rauigkeit von amplitudenmodulierten Tönen, aber zu große Werte für unmoduliertes weißes Rauschen (Mellert und Weber, 1981).

² Auch unmodulierte Schmalbandrauschen rufen aufgrund von Eigenmodulationen gewisse Rauigkeitsempfindungen hervor. Unmoduliertes Breitbandrauschen wird dagegen als nicht rau empfunden.

³ Die Wahl von k bedingt einen lineare oder exponentiellen Zusammenhang zwischen ΔL_E und m .

⁴ Die Dynamik wird auf 30 dB begrenzt, um nicht zu große Rauigkeitswerte zu erhalten.

1.4.2 Modellansatz von Fastl

Der Ansatz des Modells von Fastl (1977) basiert ebenso auf der Berechnung der Maskiertiefe. Er modelliert die Bandpaßcharakteristik der Rauhigkeit durch die Multiplikation von ΔL und f_{mod} .

$$R \sim f_{\text{mod}} \cdot \Delta L \quad \text{Gl.7}$$

Für kleine f_{mod} ist ΔL groß und für große f_{mod} strebt ΔL gegen Null, d.h. ihr Produkt ist in den beiden genannten Fällen minimal und bei mittleren f_{mod} (70Hz) maximal.

Das Verfahren gibt die Rauhigkeit von unmodulierten und modulierten Breitbandrauschen (BBR) sehr gut wieder, berücksichtigt jedoch nicht die Bildung von spezifischen Rauigkeiten.

Es erfolgte eine Revision von Zwicker und Fastl (1990) mit dem erweiterten Ansatz:

$$R \sim f_{\text{mod}} \int_0^{24\text{Bark}} \Delta L(z) dz \quad \text{Gl.8}$$

Die genaue Berechnung von $\Delta L(z)$ stellt jedoch ein Problem dar. Die Berechnungen für gemessene ΔL führen nur zu qualitativen und nicht zu quantitativen Übereinstimmungen mit gemessenen Rauigkeiten.

Widmann (1992) approximiert die zeitliche Maskiertiefe über die spezifischen Lautheits-Tonheitsmuster (mit 30 dB Dynamikbegrenzung). Die spezifischen Rauigkeiten gewichtet er mit den von Aures (1985) vorgeschlagenen Kreuzkorrelationsfaktoren der benachbarten Kanäle und reduziert damit die zu großen Rauigkeitswerte für unmoduliertes BBR. Dieses Verfahren bildet die Rauigkeit von BBR in Abhängigkeit von Modulationsgrad und Modulationsfrequenz gut nach, jedoch ergibt sich eine größere Abhängigkeit vom Pegel, die auf die Dynamikeinengung rückführbar sein könnte. Weiters erfolgt keine Angabe zu frequenzmodulierten Schallen.

1.4.3 Modellansatz von Aures

Aures (1985b) erweitert die Berechnung der Rauigkeit für beliebige Schalle und paßt die berechneten Werte den Rauigkeitswerten von amplitudenmodulierten Sinustönen, modulierten und unmodulierten Schmal- bzw. Breitbandrauschen an. Die Grundlage seiner Berechnungen stellen spezifische Rauigkeiten $r'(z)$ dar. Ausgehend von der Erregung des Gehörs läßt sich die spezifische Rauigkeit, abhängig vom Modulationsgrad, auch als frequenzbewertete, relative Schwankung der Erregung an der Stelle z interpretieren (Daniel, 1995). Für $r'(z)$ wird als Maß ein gewichteter, effektiver Modulationsgrad m^* der Erregungszeitfunktion an der Stelle z der Tonheit verwendet. Dieser effektive Modulationsgrad wird als Quotient des Effektivwertes der gefilterten Hüllkurve an der Stelle z und des Mittelwerts (Gleichanteil) der zweiweggleichgerichteten (Betrag) ungefilterten Erregungszeitfunktion $|e(t,z)|$ gebildet. Der Rauigkeitseinzahlwert ergibt sich durch Summierung der Teilrauigkeiten r'_i .

$$R = c \sum_{i=1}^N r'_i \Delta z \quad \text{Gl.9}$$

Aures schlägt eine Einteilung in $N=24$ Frequenzkanäle der Breite ein Bark vor. Nach Fouriertransformation und Filterung⁵ wird aus der Erregungspegelverteilung über der Tonheit die Erregungszeitfunktion $e(t,z)$ durch inverse Fouriertransformation⁶ erhalten. In Gl. 2 wählt man den Exponenten $\alpha=2$ (Terhardt, 1968). Die berechneten R-Werte nach Gl. 9 sind eindeutig größer als jene, die durch psychoakustische Messungen hervorgegangen sind. „Ein Grund hierfür könnte darin liegen, daß das Gehör in diesem Fall offenbar aufgrund fehlender Korrelation die Hüllkurvenschwankungen in angrenzenden Tonheitsbereichen nicht mehr getrennt auswertet“ (Daniel, 1995, S.36). Die Teilrauhigkeiten r'_i werden mit den Mittelwerten der normierten Kreuzkorrelationkoeffizienten k_{i-1} und k_i der bandpaßgefilterten Hüllkurvenzeitfunktionen der Kanäle $i-1$, i und $i, i+1$ gewichtet. Somit ergibt sich aus Gl.9 die neue modifizierte Gleichung:

$$R = c \sum_{i=1}^N r'_i \frac{(k_{i-1} + k_i)}{2} \Delta z \quad \text{Gl.10}$$

Dieses Modell liefert gute Übereinstimmungen (Aures, 1985b) der Rauigkeitswerte von amplitudenmodulierten Sinustönen in Abhängigkeit der Trägerfrequenz (f_{Tr}), der Modulationsfrequenz (f_{mod}) und des Modulationsgrades (m), sowie eine gute Wiedergabe der Rauigkeit für moduliertes bzw. unmoduliertes Bandpaß- und Breitbandrauschen.

1.4.4 Modellansatz von Daniel

Da sich bei kleinen, geringfügigen Veränderungen von f_{mod} und f_{Tr} große Änderungen der Rauigkeitswerte, bei Verwendung des Modells von Aures ergaben, modifizierte Daniel dieses Modell mit folgendem Ergebnis:

1. Verwendung von 47 sich überlappenden Frequenzkanälen der Breite ein Bark mit den Mittenfrequenzen $z_i = 0.5 \cdot i$ (mit $i = 1$ bis 47).
2. Verwendung einer gehörbezogenen Filterbank:
Approximation der Flanken der Erregungsverteilungen nach Terhardt et al. (1982) wie folgt:

Für die untere Flankenerregung:

$$S_1 = -27 \frac{dB}{Bark} \quad \text{Gl.11}$$

Für die obere Flankenerregung (pegelabhängig):

$$S_2 = \left[-24 - \frac{0.23kHz}{f} + \frac{0.2L}{dB} \right] \frac{dB}{Bark} \quad \text{Gl.12}$$

3. Zur Ermittlung der für die Rauigkeit relevanten Hüllkurvenschwankungen werden die Spektren von $|e_i(t)|$ mit neuen, aus psychoakustischen Meßergebnissen ermittelten, spektralen Wichtungsfunktionen gewichtet.

⁵ Übertragungsfunktion des Außen- und Mittelohres; Berücksichtigung frequenzgruppenbreiter Bänder sowie nichtlinearer Simultanmaskierung.

⁶ Durch die Rücktransformation in den Zeitbereich kann auch die Phase berücksichtigt werden.

4. Die effektiven Modulationsgrade m^* werden zur Verhinderung von zu großen Rauigkeitswerten nach oben mit 1 begrenzt.
5. Die Abhängigkeit der Rauigkeit von der Trägerfrequenz wird durch eine geeignete Gewichtungsfunktion $g(z_i)$, die zwischen 0.6 und 1.1 liegt, berücksichtigt.
6. Die Kreuzkorrelationskoeffizienten werden multipliziert, d.h. die spezifischen Rauigkeiten werden mit dem quadrierten geometrischen Mittel der normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten gewichtet.

Somit berechnet sich die Gesamtrauhigkeit zu:

$$R = 0.25 \sum_{i=1}^{47} (k_{i-2} \cdot k_i \cdot g(z_i) \cdot m_i^*)^2 \text{ asper} \quad \text{Gl.13}$$

Der Faktor 0.25 dient zur Kalibrierung des Berechnungsverfahrens auf 1 asper, welches durch die Definition: *Amplitudenmodulierter 1 kHz Ton mit einem Pegel von 60 dB, mit dem Modulationsgrad $m = 1$, und der Modulationsfrequenz $f_{mod} = 70$ Hz festgelegt ist.*

1.4.5 Modellansatz von Höldrich und Pflüger

Ausgangspunkt des Modellansatzes bildet der Ansatz von Aures (1985) bzw. die Revision – Verbesserung von Daniel (1995), bei dem die Berechnung des Rauigkeitsmodells über den Modulationsgrad erfolgt.

Das Modell basiert auf der Berechnung der effektiven Modulationsgrade in Bandpaßsignalen, die durch eine gehörgerechte Filterung aus dem Eingangssignal gewonnen werden können. Die gehörgerechte Filterung geschieht durch die Berücksichtigung der Außen- und Mittelohrfilterung (siehe Anhang A, Abbildung 1a), der kritischen Bandbreiten, der nichtlinearen Simultanmaskierung und der Ruhehörschwelle d.h. Berücksichtigung der Differenz zwischen Ruhehörschwelle und inversen 100 Phonkurve (siehe Anhang A, Abbildung 1b). Die effektiv wirksamen Modulationsgrade werden durch geeignete Filterung der Hüllkurvenspektren (siehe Anhang A, Abbildung 2) der einzelnen kritischen Bänder berechnet und entsprechend der Korrelation zwischen benachbarten Kanälen und einer trägerfrequenzabhängigen Gewichtung (siehe Anhang A, Abbildung 3) zu spezifischen Modulationsparametern umgerechnet, die wiederum zu einem Einzahlwert (R) überlagert werden. Die Berechnung erfolgt monaural da noch keine binauralen Modelle existieren (vgl. Höldrich und Pflüger, 1998a,b).

Struktur des Modells im Überblick:

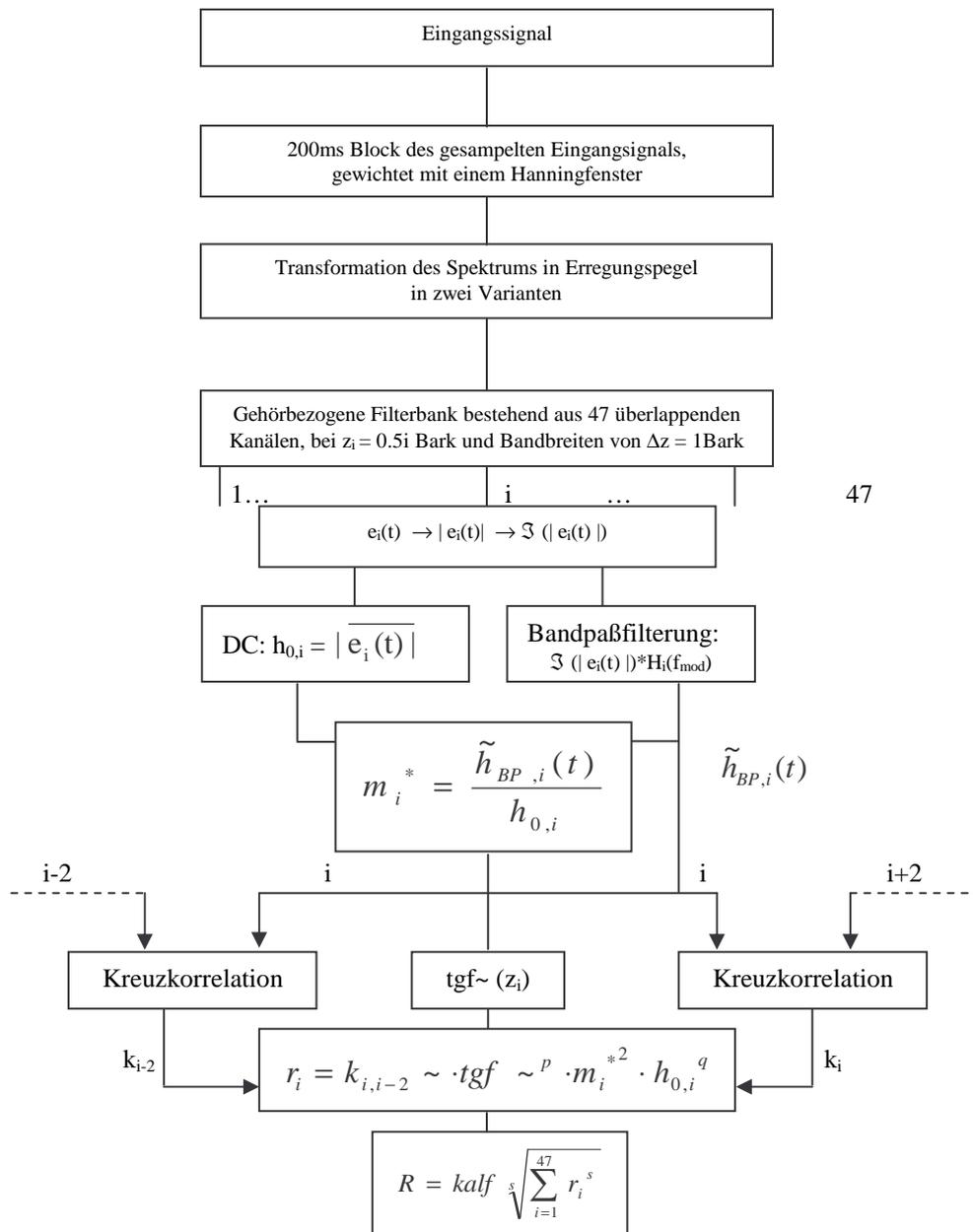


Abbildung 1.4.

Modifiziertes Strukturbild (nach Höldrich und Pflüger 1998a,1998b)

1. Berechnung der Bandpaßsignale $e_i(t)$

Die Bandpaßsignale sind Erregungszeitfunktionen $e_i(t)$ mit der Mittenfrequenz z_i , deren Bandbreite im 'Durchlaßbereich' ein Bark beträgt und die überlappend im Abstand 0.5 Bark berechnet werden. Die Überlappung dient zur Minimierung der Ergebnisvarianz der Filterübertragungsfunktionen in Abhängigkeit von der konkreten Frequenz einer Signalkomponente. Die Aufgabe der Bandpaßfilterung ist es die nichtlineare Auffächerung der Erregung zu modellieren. In der Berechnung geschieht dies durch blockweise Fouriertransformation des Signals und Multiplikation mit pegelabhängigen Filterübertragungsfunktionen. Diese Übertragungsfunktion ist primär im Amplitudenbereich

durch den Verlauf der Simultanverdeckung spezifiziert, der Phasengang wird linearphasig angenommen. Auf eine minimalphasige Realisierung, die den physiologischen Befunden eher entspricht (Geisler und Rhode, 1992; Green et al., 1992), wird verzichtet um die umfangreichen zusätzlichen Berechnungen für den Phasengang zu vermeiden (vgl. Höldrich und Pflüger, 1998a).

2. Wahl der Blocklänge, des Überlappungsfaktors und der Fensterfunktion

Die Modulationsparameter werden nicht für jedes Sample berechnet. Die Berechnung alle 100ms kann als ausreichend angenommen werden, da aus psychoakustischen Untersuchungen keine genaueren Angaben über die Reaktionszeit bei der Wahrnehmbarkeit von Modulationsänderungen bekannt sind. Zu tiefen Modulationsfrequenzen hin sollte eine gute Frequenzauflösung vorhanden sein. Das kann mit einer langen Blocklänge oder mit einer vollständigen Rekonstruktion der Einhüllenden, in jedem kritischen Band, erreicht werden. Es sollte jedoch keine zu große Blocklänge verwendet werden, um die stationären Verhältnisse innerhalb eines Blockes noch zu gewährleisten. Es kommt somit zu den Parametern:

Überlappungsfaktor : HS = 100ms (4800 Punkte @ fs=48kHz)

Blocklänge: N ≈ 200ms (8192 Punkte @ fs=48kHz)

Fensterfunktion: Hanningfenster $w(n) = 0.5 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (n-1)}{N}\right)\right)$

3. Außen- und Mittelohrfilterung

Diese Filterung wird vor der nichtlinearen Berechnung der Flankenerregungen im Frequenzbereich durchgeführt. Da das verwendete Dämpfungsmaß für Freifeld oberhalb von 1kHz den annähernd gleichen Verlauf hat wie die inverse Ruhehörschwelle, unterhalb aber gerade verläuft (inverse 100-Phon-Kurve), dürfen vorwiegend im unteren Frequenzbereich nur jene Energiebeträge zur Bildung der Flankenerregung herangezogen werden, die tatsächlich über der Ruhehörschwelle zu liegen kommen.

4. Berechnung von Kern und Flankenerregung

Für alle 47 Bänder z_i wird in jedem Signalblock jeweils eine Erregungsverteilung berechnet. Nach (Aures, 1985a; Daniel und Weber, 1993 und 1997) etc. wird für jede Spektralkomponente getrennt deren Anteil in jedes Zielband berechnet. Als untere und obere Flanke der Erregung kommen die Gleichungen 11 und 12 zum Einsatz.

Ist die Frequenz einer Signalkomponente (FFT-Bin) größer als $(z_i + 0.5)$ Bark, wobei z_i die Mittenfrequenz des Filters ist, so wird der Beitrag dieser Komponente zum Filterausgang mit der Flanke S_1 berechnet. Ist die Frequenz einer Signalkomponente kleiner als $(z_i - 0.5)$ Bark, so wird der Betrag dieser Komponente zum Filterausgang mit der Flanke S_2 berechnet. Liegt die Frequenz einer Komponente innerhalb des Frequenzbandes von $(z_i - 0.5)$ Bark bis $(z_i + 0.5)$ Bark, so wird ihr Pegel vollständig als Erregungspegel in diesem Filter verwendet. Der so resultierende Beitrag einer Signalkomponente wird noch um das Dämpfungsmaß der Ruhehörschwelle an der

Filtermittenfrequenz reduziert. Liegt die berechnete Erregung einer Komponente unter der Ruheshwelle, so trägt sie nicht zum Spektrum des Filterausganges bei.

Diese Berechnung erfolgt im vorliegenden Modell in 2 Varianten. Zum einen wird für jede einzelne Spektralkomponente (jeden FFT-Bin) ihr Beitrag zur Erregung einer Filtermittenfrequenz berechnet, zum anderen wird berücksichtigt, daß die Signalenergie innerhalb eines kritischen Bandes integriert wird und diese zusammengefaßte Energie eine pegelabhängig Erregung in anderen Filtern erzeugt.

Durch Rücktransformation jedes Filterspektrums in den Zeitbereich ergeben sich die Erregungszeitfunktionen $e_i(t)$.

5. Berechnung der effektiven Modulationsgrade m_i^*

Die effektiven Modulationsgrade werden durch geeignete Filterung der Einhüllendenspektren bestimmt. Die Einhüllende eines Bandes wird durch den Betrag des analytischen Signals (Hilberttransformation) berechnet. Die Einhüllendenspektren werden nach folgenden drei Varianten gewichtet:

- Gewichtung nach den modifizierten Aureskurven (Aures, 1985a) mit struktureller linearer Interpolation für den gesamten Frequenzbereich (siehe Anhang A, Abbildung 2a und 2b).
- Frequenzunabhängige Gewichtung: Maximum von 1 zwischen $f_{\text{mod}} = 25$ Hz und 70 Hz, Anstieg von 0 beginnend bei 10 Hz, Abfall auf 0.75 bei 130 Hz, weiter auf 0.2 bei 400 Hz und wird wieder 0 für Frequenzen größer gleich 600 Hz (siehe Anhang A, Abbildung 2c).
- R-Rauhigkeit: Maximum von 1 zwischen $f_{\text{mod}} = 20$ Hz und 35 Hz, Anstieg von 0 beginnt bei 10 Hz, Abfall auf 0 bis 70 Hz (Springer und Weber, 1994) (siehe Anhang A, Abbildung 2d).

Die rücktransformierten der gewichteten Einhüllendenspektren ergeben die Bandpaßsignale $h_{BP,i}(t)$. Der effektive Modulationsgrad $m_i^*(t)$ wird durch die Division des Effektivwertes $\tilde{h}_{BP,i}$ durch den Gleichanteil vor der Bandpaßfilterung $h_{0,i}$ bestimmt mit der Beschränkung:

$$m_i^* = \min \left[1, \frac{\tilde{h}_{BP,i}}{h_{0,i}} \right] \quad \text{Gl.14}$$

6. Transformation des Modulationsgrades in den spezifischen Modulationsparameter r_i

Für die Transformation des Modulationsgrades in den spezifischen Modulationsparameter wird der quadrierte Modulationsgrad in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz und der Korrelation zwischen den Hüllkurven der benachbarten Kanäle gewichtet mit:

$$r_i = kn \cdot \text{tgf} \sim^p \cdot m_i^{*2} \cdot h_{0,i}^q \quad \text{Gl.15}$$

tgf~ ist eine trägerfrequenzabhängige Gewichtung (siehe Anhang A, Abbildung 3), die im Falle 'Gesamter Frequenzbereich' (Abbildung 3a) mit dem Faktor $p=1$ oder 2 potenziert wird und im Falle 'Tieffrequenz – Modulation' (Abbildung 3b) nur mit dem Faktor $p=1$. Der Faktor $p=1$ wird von Aures verwendet, $p=2$ von Daniel.

$k_{n\sim}$ ist ein Mittelwert zwischen den Kreuzkorrelationskoeffizienten k_i und k_{i-2} ; Es werden sowohl der arithmetische (Aures,1985a) als auch der quadrierte geometrische Mittelwert (Daniel und Weber, 1997) vorgeschlagen.

Der Kreuzkorrelationskoeffizient k_i berechnet sich wie folgt:

$$k_i = \frac{\sum_n (h_{BP,i}(n) - \overline{h_{BP,i}(n)})(h_{BP,i+2}(n) - \overline{h_{BP,i+2}(n)})}{\sqrt{\sum_n (h_{BP,i}(n) - \overline{h_{BP,i}(n)})^2 \sum_n (h_{BP,i+2}(n) - \overline{h_{BP,i+2}(n)})^2}} \quad \text{Gl.16}$$

$q > 0$ ermöglicht eine explizite Berücksichtigung des absoluten Pegels, durch Berücksichtigung des Gleichanteils der Hüllkurve vor der Filterung.

7. Überlagerung der spezifischen Modulationsparameter zu einem Einzahlwert R

Die Überlagerung erfolgt nach Gleichung 17. Mit $s=1$ wird linear superponiert (Sottek, 1993), (Daniel und Weber, 1997) etc., mit $s=2$ erfolgt eine quadratische Superponierung bei der eine erhöhte Aufmerksamkeit auf 'herausragende' Signalanteile modelliert wird. Der Kalibrierungsfaktor $kalf$ stellt den Bezug - Normierung zu den Definition $asper$ bzw. $rasper$ ⁷ (bezieht sich auf die R-Rauhigkeit -Gewichtungskurve) dar.

$$R = kalf * \sqrt[s]{\sum_{i=1}^{47} r_i^s} \quad \text{Gl.17}$$

Es ergeben sich durch dieses Modell über 100 Varianten zur Berechnung des R-Einzahlwertes. Eine Übersicht zu diesen Varianten bildet die Darstellung der R-Matrix, die bei einer Berechnung für ein Soundfile entsteht (siehe R-Matrix im Anhang A).

⁷ Definition: 1 $rasper$ hat ein amplitudenmodulierter Sinus mit 60 dB, $f_{Tr}= 1\text{kHz}$, $f_{mod}= 30\text{ Hz}$ und $m=1$.

2 Lautheit

Die wahrgenommene Lautstärke eines Schallreizes wird in der Psychoakustik als Lautheit bezeichnet. Sie ist eine Empfindungsgröße und kann getrennt von anderen psychoakustischen Größen wahrgenommen und beurteilt werden. Die Lautheit ist die zentrale Größe bei der gehörbezogenen Geräuschanalyse. In einer Studie zur Beurteilung der Lästigkeit von Geräuschen wird die Beurteilungsgröße z.B. der „Annoyance-Index“⁸ der Grazer Firma AVL, welche durch einige psychoakustische Parameter berechnet wird, mit einem Beitrag von 80% durch die Lautheit bestimmt (Fratz, 1997). Als ein wesentliches Charakteristikum gilt, daß die Lautstärkeempfindung eine Intensitätsempfindung ist (Zwicker, 1982). Die damit verbundenen Beziehungen, zwischen Reiz und Empfindung, werden in den folgenden Betrachtungspunkten genauer erläutert. Zur Bestimmung der Empfindungsfunktion sind Ergebnisse aus Verhältnismessungen notwendig. Da jedoch Vergleichsmessungen genauer sind als Verhältnismessungen werden sie bevorzugt und ihre Ergebnisse werden zur Festlegung von Zwischengrößen benutzt (ebd, 1982). Hier wird die Tonhöhenfrequenz als Zwischengröße benutzt. Der Vergleich von Tönen verschiedener Frequenzen und variablen Pegeln mit dem Testton der Standardfrequenz 1kHz und einem bestimmten Schallpegel⁹ führt abhängig vom Schallpegel des Testtones zu den Kurven gleicher Lautstärke. Da die Maßzahl nur auf Vergleichsmessungen beruht, wurde eine eigene Einheit, das „Phon“, anstelle des dB und die Bezeichnung „Lautstärkepegel“¹⁰ eingeführt. Bei 1kHz sind die Phon- und dB Skala ident.

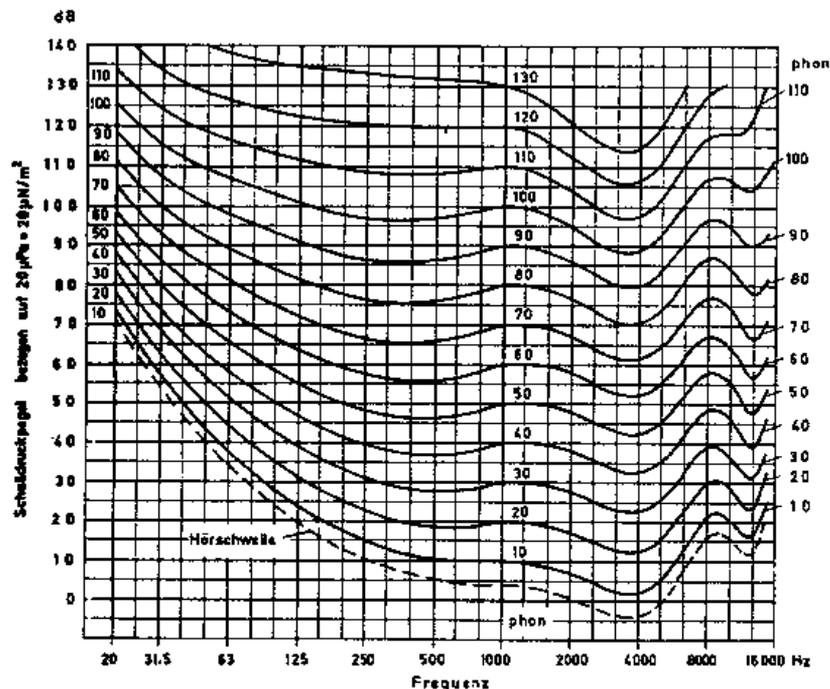


Abbildung 2.1.
Kurven gleicher Lautstärke (ISOPHONE).

⁸ Beim AVL annoyance index wird die Lautheit mit 80 – 85% gewichtet. Die restlichen Empfindungsgrößen wie die wahrgenommene Periodizität, Rauigkeit, Schärfe und Impulshaltigkeit gehen mit 15 – 20 % in diese Größe ein (Ronacher und Stückelschwaiger, 1994; Ronacher, 1996).

⁹ Als Schallpegel wird hier der absolute Schalldruckpegel, mit dem Bezugsschalldruck $p_0 = 20\mu\text{Pa}$, bezeichnet, dasselbe gilt auch für den Begriff Pegel.

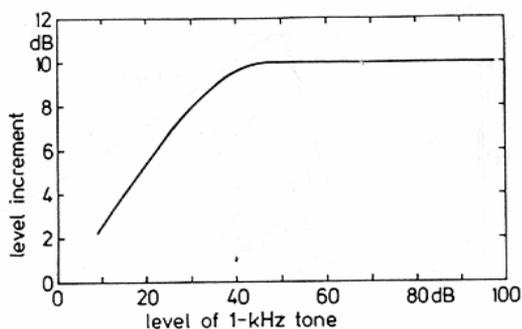
¹⁰ Zwicker (1982, S. 68) findet die Bezeichnung „Pegellautstärke“ passender, jedoch hat sich dieser Begriff nicht durchgesetzt.

Anhand der Kurven gleicher Lautstärke¹¹ (Abbildung 2.1.) ist es ersichtlich, daß das Gehör den Schalldruck abhängig von der Frequenz unterschiedlich bewertet. So ist das menschliche Gehör im Frequenzbereich um 4kHz am empfindlichsten. Zu tiefen und hohen Frequenzen hin wird das Gehör unempfindlicher.

2.1 Zusammenhänge zwischen Reiz und Empfindung

Bei Untersuchungen mit künstlichen Schallen im Labor (Zwicker und Feldtkeller, 1967) wurden die unterschiedlichen Zusammenhänge und Auswirkungen von physikalischen Parametern auf die Lautheitsempfindung analysiert. Einige wichtige Zusammenhänge werden im folgenden betrachtet. Die Erkenntnis dieser Zusammenhänge stellt die Basis einer im Sinne der Psychoakustik „gehørsbezogenen Lautheitsberechnung“ und somit auch der „gehørsbezogenen Lärmbewertung“ dar.

Zusammenhang zwischen dem Schallpegel und der Lautheit



Bei Versuchen zur Bestimmung der Abhängigkeit der Lautheit vom Schallpegelanstieg wurde ermittelt, daß über einem Schallpegel von 40 dB (für 1 kHz Sinuston) eine Pegelzunahme von 10 dB (entspricht einer Verzehnfachung der Schalleistung) nur zu einer Verdoppelung der Lautheitswahrnehmung führt (siehe Abbildung 2.2). Für geringere Schallpegel genügt ein geringerer Pegelanstieg zur Lautheitsverdoppelung.

Abbildung 2.2.

Pegelanstieg bei Verdoppelung der Lautheit eines 1 kHz- Tones

Zusammenhang zwischen der Bandbreite und der Lautheit

Die Lautheit ist von der Bandbreite eines Schalles abhängig. Steigt der Pegel eines Schalles, dessen Bandbreite innerhalb einer Frequenzgruppenbreite⁵ liegt, so nimmt die Lautheit ungleich weniger zu als bei einem konstanten Pegel und einer sich über eine Frequenzgruppenbreite hinaus vergrößernden Bandbreite. D.h. Die Lautheit bleibt bei konstanten Pegel solange gleich, solange sich die Bandbreite innerhalb der Frequenzgruppenbreite befindet. Vergrößert sich die Bandbreite darüber hinaus, so steigt die Lautheit deutlich an. Über einen weiten Bereich stimmt

¹¹ Zu den Kurven gleicher Lautstärke und auch zur Ruhehörschwelle (Kurve der gerade wahrnehmbaren Lautstärke) ist zu bemerken, daß auf diesem Gebiet in letzter Zeit zahlreiche neue Untersuchungen durchgeführt worden sind, welche die Ergebnisse von Fletcher und Munson (1933) sowie jene von Robinson und Dadson (1956, in der internationalen Norm ISO unter ISO R 226 aufgenommen) vor allem im tieffrequenten Bereich auf ihre Validität hin anzweifeln. Diese Unterschiede betragen bis zu 20dB. Der Frequenzbereich unter 1kHz ist zur Bildung der Lautheit insofern wichtig, da bei natürlich vorkommenden Schallen in diesem Frequenzbereich die überwiegende Leistung konzentriert ist. Ein wesentlicher Grund, der eine Revision dieses Standards nicht ermöglichte, sind die enormen Abweichungen der neuen Untersuchungen untereinander. Die Unterschiede sind mitunter beträchtlich. Einen signifikanten Einfluß auf diesen Tatbestand haben die methodischen Randbedingungen (Pflüger, 1997).

dieses Verhältnis überein, jedoch bei sehr geringen Lautheiten spielt die Bandbreite für die Lautstärkewahrnehmung keine Rolle mehr.

Zusammenhang zwischen der Dauer und der Lautheit

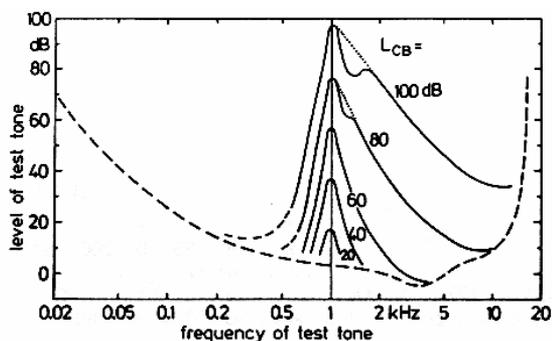
Die Dauer eines Schalls ist ebenso ausschlaggebend für die empfundene Lautstärke. Ist die Einwirkungsdauer eines Schalls größer als 200 ms dann hat die Dauer keinen Einfluß mehr auf die Empfindung. Bei Pulsen mit geringerer Dauer wird die empfundene Lautstärke von der Dauer mitbestimmt. So wird ein Puls mit dem Pegel L_1 und der Dauer $t_i = 10$ ms halb so laut empfunden als ein Puls mit dem selben Pegel L_1 mit der Dauer $t_i = 100$ ms (Zwicker und Feldtkeller, 1967). Die Annahme, daß das Ohr bei der Bewertung der Lautstärke über ein bestimmtes Zeitintervall den Reiz aufintegriert, liegt somit nahe.

2.2 Auswirkung von Spektral- und Zeitauflösung des Gehörs

Das spektrale- und zeitliche Auflösungsvermögen des Gehörs kann durch Verdeckungsmuster (Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmuster) beschrieben werden (Fastl, 1982). Für das spektrale Auflösungsvermögen treten die Begriffe der „Frequenzgruppe“ (critical band) und der „Frequenzgruppenbreite“ (critical bandwidth) in den Vordergrund¹².

- **Spektrale Verdeckung (spectral masking)**

Durch Mithörschwellen kann der Effekt der spektralen Verdeckung beschrieben werden. Aus dem Alltag ist bekannt, daß ein sehr lautes Störgeräusch (z.B. Preßlufthammer) einen leisen Schall (z.B. Sprache) unhörbar macht. Die Mithörschwelle für einen bestimmten Schall gibt an, welche Pegel bezüglich der Frequenzen (Spektrum) eines anderen Schalles notwendig wäre um ihn hörbar zu machen. Als Beispiel sei hier die Verdeckung von Sinustönen durch Schmalbandrauschen bei 1kHz dargestellt (Abbildung 2.3), die sehr stark abhängig vom Pegel des verdeckenden Schmalbandrauschens ist.



Die Ursache der Maskierung liegt in der Ausbreitungsform der Schallwelle im Innenohr. Die Maskierungskurven zeigen ähnliches Verhalten wie die Wanderwelle. Die spektrale Einhüllende ist unsymmetrisch. Sie weist eine steile Flanke zu tiefen und eine flache Flanke zu hohen Frequenzen hin. Die Flankensteilheit der oberen Flanke ist stark vom Pegel abhängig.

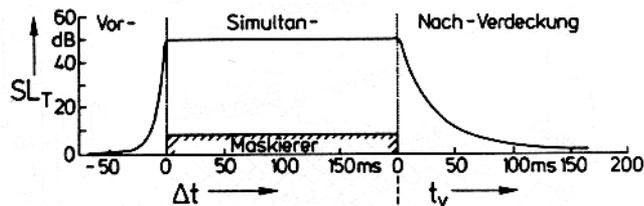
Abbildung 2.3.

Verdeckung von Sinustönen durch Schmalbandrauschen bei 1kHz.

¹² Auf die Begriffe Frequenzgruppe und Frequenzgruppenbreite und deren Bestimmung soll hier nicht näher eingegangen werden. Als stark vereinfachte Darstellungsform kann man sich die Frequenzgruppen als im Gehör realisierte Filter vorstellen, deren Amplitudengänge den Frequenzgruppenbreiten entsprechen (idealisierte Annahme).

• Zeitliche Verdeckung (temporal masking)

Zur Messung der Effekte der zeitlichen Verdeckung müssen sehr kurze Testtonimpulse verwendet werden. Die Störgeräuschkdauer liegt unter 500 ms und die Testtonimpulsdauer unterhalb von 10 ms (Zwicker und Fastl, 1990). Bei der zeitlichen Verdeckung wird zwischen drei Bereichen unterschieden (siehe Abbildung 2.4.).



Schema für die Zeiteffekte bei der Verdeckung: Aufgetragen wird der Pegel (über Ruhehörschwelle) SL_T des Testschalls in Abhängigkeit von der Zeit Δt nach dem Einschalten des Maskierers bzw. der Zeit t_v nach dem Abschalten.

Abbildung 2.4.

Schematische Darstellung von Vorverdeckung, Simultanverdeckung und Nachverdeckung

1. Vorverdeckung

Der Begriff der Vorverdeckung steht nicht im Widerspruch zur physikalischen Kausalität. Das Gehör braucht zur Verarbeitung eines Schallreizes unterschiedlich viel Zeit bis eine Empfindung entsteht (Zwicker und Feldtkeller, 1967). Daher ist es möglich, daß ein sehr lauter Störschall in kürzerer Zeit eine Empfindung auslöst als ein sehr leiser Testschall.

Die Genauigkeit, mit der die Vorverdeckung gemessen werden kann, reicht kaum aus, um eindeutig festzustellen, ob eine Abhängigkeit der Vorverdeckung von der Impulsdauer des Maskierers vorhanden ist. Da sich die Dauer der Vorverdeckung etwa im Bereich um 20ms bewegt und im Vergleich zur Nachverdeckung eine untergeordnete Rolle spielt, wird sie in vielen Fällen vernachlässigt.

2. Simultanverdeckung

Testimpuls und maskierender Impuls werden gleichzeitig dargeboten. Die Ergebnisse der spektralen Verdeckung sind hier ebenso zu berücksichtigen.

3. Nachverdeckung

Die Nachverdeckung kann wie folgt aufgefaßt werden: verstummt ein Schall plötzlich, dann benötigt das Ohr eine bestimmte Zeit um sich zu erholen und seine Grundempfindlichkeit wieder zu erhalten. Somit kann ein leiser, hörbarer Tonimpuls, der kurz nach einem langen Rauschimpuls folgt, unhörbar werden. Die Nachverdeckung ist von der Dauer des Maskierers abhängig und liegt im Bereich zwischen 10 und 100ms. Sie klingt für kürzere Maskierdauer schneller ab. Diese Abhängigkeit von der Maskierdauer muß als nichtlinearer Effekt angesehen werden (Zwicker, 1982). Als Ursache für die Nachverdeckung kann sowohl die Bewegung der Basilarmembran als auch der Neuronale Regelkreis (neural feedback) genannt werden.

2.3 Lautheitsberechnung

Der Lautstärkepegel

Der Lautstärkepegel L_N in phon eines beliebigen Schallsignals stimmt zahlenmäßig mit dem Schalldruckpegel eines gleich laut empfundenen 1kHz Signals überein. Ein Schallsignal besitzt also beispielsweise einen Lautstärkepegel von 60 phon, wenn es gleich laut empfunden wird wie ein 1kHz Ton mit einem absoluten Schalldruckpegel von 60dB.

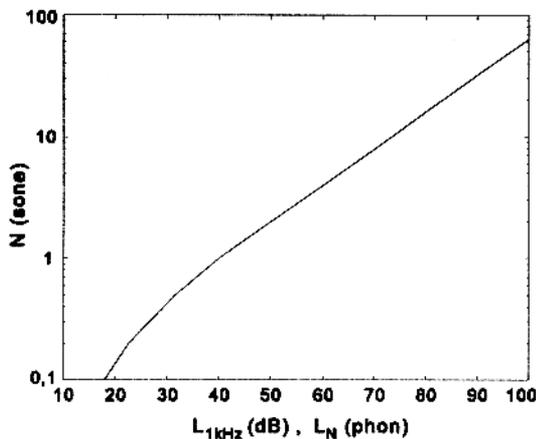
Mit dieser Referenz ist es grundsätzlich möglich, jedem beliebigen Schallsignal einen Einzahlwert für die empfundene Lautstärkeempfindung zuzuordnen. Das Phonmaß stellt damit einen ersten wichtigen Schritt zur Entwicklung von Lautstärke- bzw. Lautheitsmeßverfahren dar. Alle Lautheits-, Lautstärke- oder Lärmmeßverfahren stehen in irgendeiner Form mit dem Phonmaß in Verbindung. Die Auseinandersetzung mit den theoretischen Formulierungen und daraus resultierenden Gültigkeitsbereichen des Phon-Maßes ist dadurch von grundlegender Bedeutung (Pflüger, 1997).

Die Lautheit

Umgangssprachlich werden die beiden Begriffe Lautstärke und Lautheit als gleichwertig betrachtet. Bei der quantitativen Erfassung der Lautstärke- bzw. Lautheitsempfindung unterscheidet man jedoch diese beiden Begriffe durch unterschiedliche Einheiten. Der Lautstärkepegel L_N wird in phon angegeben und die Lautheit N in sone.

Einem Sinussignal mit 1kHz und 40dB absolutem Schalldruckpegel (dies entspricht einem Lautstärkepegel von $L_N = 40$ phon) wird eine Lautheit von $N=1$ sone zugeordnet. Die Skalierung in sone wurde so gewählt, daß eine Änderung der Lautstärkeempfindung um einen bestimmten Faktor zahlenmäßig die gleiche Änderung des Lautheitsmaßes bewirkt. Verdoppelt man beispielsweise die empfundene Lautstärke eines 1kHz Signals mit $L_p = 40$ dB ($L_N = 40$ phon, $N = 1$ sone), so ergibt sich ein absoluter Schalldruckpegel von $L_p = 50$ dB ($L_N = 50$ phon) und eine Lautheit von $N = 2$ sone. Damit ist aus der quantifizierten Empfindungsgröße der Lautheit direkt ableißbar, um wieviel mal lauter ein Schallereignis im Vergleich zu einem anderen Schallereignis ist. Daraus wird die größere Nähe dieser Empfindungsgröße zur tatsächlichen Lautstärkeempfindung abgeleitet (Zwicker und Feldtkeller, 1967; Zwicker, 1982; Zwicker und Fastl, 1990; Moor und Glasberg, 1996).

Die Ermittlung der Lautheitsskalierung beruht auf psychoakustischen Messungen der Verhältnislautheit; d.h. man konzentriert sich bei den Messungen auf die Fragestellung, um welchen Schallpegel ein 1kHz Sinussignal verändert werden muß, um ein gewisses Verhältnis (beispielsweise eine Verdoppelung) der ursprünglichen Lautheit zu erreichen. Damit läßt sich zwischen dem absoluten Schalldruckpegel eines 1kHz Signals bzw. dem Lautstärkepegel L_N und der Lautheit N eine eindeutige Beziehung definieren. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.5. dargestellt.



Mit diesem Zusammenhang können, unabhängig von der Art des Schallsignals, Lautstärkepegel und Lautheiten eindeutig ineinander umgerechnet werden. Dies ist insofern erforderlich, da diese beiden Größen die gleiche Qualität mit unterschiedlichen Quantitäten ausdrücken. Aufgrund der größeren Nähe der Lautheit zur tatsächlichen Lautstärkeempfindung wird sie in der Psychoakustik dem Lautstärkepegel für gewöhnlich vorgezogen (Pflüger, 1997).

Abbildung 2.5.

Zusammenhang zwischen der Lautheit N und dem Lautstärkepegel L_N (vgl. Moore und Glasberg, 1996)

2.3.1 Lautheitsberechnung auf Basis der Kurven gleicher Lautstärkepegel

Der A-bewertete Schalldruckpegel

Das Problem bei der Bewertung der Lautstärke mit Hilfe der A-Bewertungskurve¹³ ist komplexer Natur. Erstens ist die Gültigkeit der Kurven gleicher Lautstärke nur für reine Sinustöne bzw. schmalbandige Geräusche gegeben. Zweitens ist der Verlauf der Kurven vom Pegel des Schalls abhängig (Abhilfe: dynamische Phonkurvenanpassung ELC) d.h. der Verlauf der 20 phon und der 100 phon Kurve sind im tieffrequenten Bereich sehr unterschiedlich. Somit werden tieffrequente Töne vor allem bei großen Pegeln hinsichtlich ihrer Lautstärke wesentlich unterschätzt. Drittens können die erhaltenen Pegel (für bestimmte Frequenzen) nicht ungeachtet aufsummiert werden, da das Ohr in „Frequenzgruppenbreiten“ die Intensität integriert und entsprechend bewertet (Zwicker, 1982).

Dynamische Phonkurvenanpassung dB(ELC)

Als Erweiterung des dB(A) wurde die Meßgröße dB(ELC), die eine Filterung mit der inversen 40, 60, 80 oder 100 Phon-Kurve in Abhängigkeit eines Lautstärkepegel-Schätzwertes verwendet, vorgeschlagen¹⁴. Der Schätzwert, der als Steuerparameter des ELC-Filters benötigt wird berechnet sich aus unbewertetem und A-bewertetem Schallpegel. Somit ergibt sich eine Kompatibilität zu den vorhandenen dB(A)-Meßgeräten. Zusätzlich wird zur Differenzierung zwischen freiem und diffusem Schallfeld das Ausgangssignal des dynamischen ELC-Filter mit einem Diffusfeld-Filter gewichtet (Pflüger, 1996a),(Pflüger, 1996b).

¹³ Als A-Bewertungskurve wird eine vereinfachte Nachbildung der inversen 40-Phon-Kurve nach ISO R226 verwendet.

¹⁴ ELC...Equal Loudness Curves

2.3.2 Lautheitsberechnung auf Basis des Erregungsmusters

Die Grundlage für das Verfahren zur Lautheitsberechnung nach Zwicker, bildet das Erregungsmuster beziehungsweise das Mithörschwellen-Tonheits-Zeitmuster (Zwicker und Feldtkeller, 1967, S.184-203; Zwicker, 1982, S.138-145; Zwicker und Fastl, 1990, S.283-291; [DIN 45 631]; [ISO 532]). Dieses Verfahren ist bis zur heutigen Zeit gültig, da die vorgeschlagenen Verbesserungen die gleiche Grundstruktur besitzen und keine qualitativen Neuerungen beinhalten.¹⁵ Dieses Verfahren teilt sich wie folgt in zwei Teile.

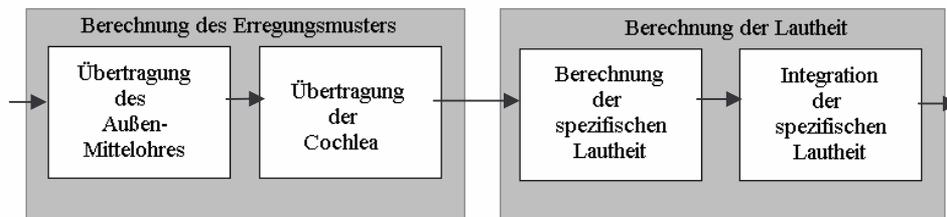


Abbildung 2.6.

Modell der Lautheitsberechnung auf Basis des Erregungsmusters.

Im ersten Teil wird das Erregungsmuster berechnet, im zweiten Teil wird aus dem Erregungsmuster die Lautheit als Einzahlwert bestimmt. Das Erregungsmuster (Zeit-Frequenzdarstellung des Schalls unter Berücksichtigung der Übertragungseigenschaften des Gehörs) kann unabhängig von der Lautheit betrachtet werden.

Modell der Lautheitsberechnung nach Zwicker

Berechnung des Erregungsmusters

- Übertragung des Außen- und Mittelohres

Der Hörfrequenzbereich wird in Bänder der Breite 1 CB (critical bandwidth) aufgeteilt. Dies entspricht eher der gehörgerechten Bewertung als die Aufteilung in Terzbänder. Das aus dieser Spektralanalyse gewonnene Spektrum wird mit der Dämpfungsfunktion des Außenohres multipliziert¹⁶. Weiters wird die Frequenzskala von 0 bis 15500 Hertz in die gehörsangepasste Barkskala von 0 bis 24 Bark transformiert¹⁷. Die Anregung bzw. die Anregungspegel werden durch berechnen der Schallintensität bzw. der dazugehörigen Pegel innerhalb jedes kritischen Bandes bestimmt.

¹⁵ Es kommt deshalb zu Verbesserungsvorschlägen, weil die Bestimmung der Maskierungsmuster bei Zwicker von Nebeneffekten beeinflusst wird und es sich um eine starre Barkzuteilung handelt.

Verbesserung nach Zollner (1996): Die Berechnung des Erregungsmusters erfolgt aus dem Maskierungsmuster. Verbesserung nach Glasberg und Moore (1996) und Agerkvist (1994): Das Erregungsmuster wird mit Hilfe von auditiven Filtern bestimmt.

¹⁶ Durch Berücksichtigung der Dämpfungsfunktion wird der Übertragungseigenschaft des Ohres bei der Umwandlung von Luftschall (Außenohr) in Flüssigkeitsschall (Mittel- und Innenohr) und der dabei stattfindenden Impedanzwandlung Rechnung getragen. Dabei ist auch zu berücksichtigen ob der Schall aus einem ebenen oder diffusen Schallfeld stammt.

¹⁷ Angaben zu den genauen Frequenzwerten der Barkbänder können der Tabelle (Zwicker und Fastl, 1990, S. 142 Tabelle 6.1) entnommen werden.

- Übertragungsverhalten der Cochlea

Die Berechnung der Erregungspegel-Tonheitsmuster, welche die eigentliche Grundlage der Lautheitsberechnung bilden, wird in zwei Schritten durchgeführt. Erstens Berechnung der Kernerregung¹⁸ und zweitens Berechnung der Flankenerregung¹⁹. Die Kernerregung wird durch Intensitätsaddition aller Anregungspegel einer Frequenzgruppe bestimmt. Es wird überprüft, ob der Kernerregungspegel über den Frequenzgruppenpegel an der Ruhehörschwelle liegt. Ist dies der Fall, so muß die Kernlautheit der betrachteten Frequenzgruppe bei der Berechnung der Gesamtlautheit berücksichtigt werden. Anderenfalls wird diese Kernlautheit gleich Null gesetzt und liefert somit keinen Beitrag zur Gesamtlautheit. Es folgt eine Bandpaßfilterung gemäß den 24 Frequenzstufen. Alle Teilfilter besitzen eine endliche Flankensteilheit, wobei die tieffrequente durch eine konstante und die hochfrequente durch eine pegelabhängige Steilheit bestimmt werden. Die Flankensteilheit eines Frequenzgruppenfilters ist somit durch die Mittenfrequenz und dem Pegel der Kernerregung der betrachteten Frequenzgruppe definiert. Zur Ermittlung der Flankenerregung einer Frequenzgruppe, werden die von den anderen restlichen Kernerregungen hervorgerufenen Anteile durch Pegeladdition zusammengefaßt. Die Gesamterregung einer Frequenzgruppe ergibt sich durch Intensitätsaddition von dazugehörigen Flankenerregungspegel und Kernerregungspegel.

Berechnung der Lautheit

- Berechnung der spezifischen Lautheit

Die Erregungspegel - Tonheitsmuster werden in spezifische Lautheits – Tonheitsmuster transformiert. Diese Transformation erfolgt laut Stevens (1955) nach einem Potenzgesetz, ausgedrückt durch Gl.1. Bei der Wahrnehmung von Schall durch das menschliche Gehör handelt es sich prinzipiell um eine Intensitätswahrnehmung; d.h. eine relative Änderung der spezifischen Lautheit ist proportional zur relativen Intensitätsänderung. Man erhält somit aus der Verteilung der Erregungspegel die spezifische Lautheit $N'(z)$.

$$N' = 0.08 \cdot \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^k \cdot \left[\left(1 - s + s \cdot \frac{E}{E_{TQ}} \right)^k - 1 \right] \quad (\text{im Bereich um 1kHz}). \quad \text{Gl. 1}$$

mit $s = \frac{E_{TQ}}{E_0}$

wobei N' spezifische Lautheit.

E_{TQ} ...Erregung an der Ruhehörschwelle.

E_0 Erregung, die $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ entspricht.

k Exponent für das Potenzgesetz nach Stevens ($k=0.23$).

s Schwellenfaktor²⁰.

E_{gr} Intensität der Grunderregung innerhalb eines kritischen Bandes.

¹⁸ Diese entspricht der Anregung innerhalb einer CB.

¹⁹ Die Flankenerregung entsteht durch Anlegen der Maskierungsflanken entsprechend der Mithörschwellen an der Kernerregung ohne Sprung.

²⁰ Der Schwellenfaktor berücksichtigt die Weiterleitung der Erregungspegel zur Lautheitsberechnung, wenn sie die Ruhehörschwelle (hier $E_{TQ}(z)$) überschreiten.

- Integration der spezifischen Lautheit

Die Integration der spezifischen Lautheits-Tonheitsmuster zur Gesamtlautheit N erfolgt nach Gl. 2. Die Aufteilung der Berechnung, die zu Teillautheiten führt ist insofern sinnvoll, da sich das menschliche Lautheitsempfinden innerhalb der kritischen Bandbreiten nach eigenen Gesetzmäßigkeiten verhält (vgl. Pflüger, 1997).

$$N = \int_{z=0}^{24\text{Bark}} N' dz \quad \text{Gl. 2}$$

wobei NGesamtlautheit in Sone.
 N'spezifische Lautheit.
 zTonheit in Bark.

Basierend auf diesem Lautheitsmodell wurde ein graphisches Verfahren zur Ermittlung der spezifischen Lautheitsverteilung und der Gesamtlautheit nach grafischer Integration entwickelt. Dieses Verfahren ist nach ISO 532B genormt, welches jedoch kleine Abänderungen der oben genannten Spezifikationen aufweist. Eine Verbesserung dieses Verfahrens, welche eine höhere Genauigkeit im tieffrequenten Bereich mit sich bringt, ist in der DIN 45631 zugelassen (vgl. Flatz, 1997).

3 Schärfe

Die Schärfe ist ein wesentliches Merkmal zur Beurteilung der Klangfarbe und repräsentiert einen wesentlichen Anteil der Klangfarbenwahrnehmung (v. Bismark, 1974). Sie ist ein Indikator der spektralen Balance zwischen tiefen und hohen Frequenzen. Je mehr hohe Frequenzen in einem Signal enthalten sind, desto schärfer wird es empfunden. Die Hörempfindung Schärfe wird durch einen Versuch, bei dem Versuchspersonen Geräusche einer Skala mit den Optionen „stumpf“ bis „scharf“ zuordnen, abgeleitet (Fastl, 1993). Die im folgenden angeführten Eigenschaften der Schärfe sind, wenn nicht anders erwähnt, aus (Zwicker und Fastl, 1990; Zwicker, 1982) entnommen.

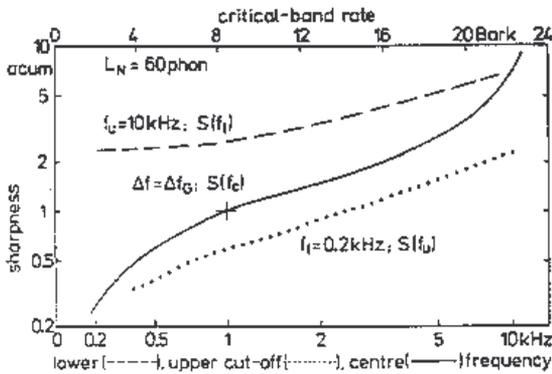
3.1 Wesentliche Eigenschaften der Schärfe

Die Schärfe läßt sich getrennt von anderen Empfindungsgrößen wahrnehmen und kann für unterschiedliche Reize verglichen²¹ werden. Weiters läßt sie sich wie eine Verhältnisgröße z.B. wie die Lautheit behandeln, d.h. man kann einen halb so scharfen, fünfmal so scharfen, etc. Schallreiz finden. Die spektrale Einhüllende eines Geräusches ist für die Schärfeempfindung von grundlegender Bedeutung. Hingegen spielt die Feinstruktur²² des Spektrums eine untergeordnete Rolle. Eine Abhängigkeit vom Pegel kann für Schalle mit geringen Pegeldifferenzen vernachlässigt werden, da es im Bereich von 30 bis 90 dB nur zu einer Steigerung um den Faktor 2 in der Empfindung kommt. Als Referenzschall wird das Schmalbandrauschen bei 1kHz mit der Bandbreite $\Delta f \leq f_G \cong 160\text{Hz}$, die der Frequenzgruppenbreite entspricht, und einem Pegel von 60 dB verwendet. Diesem Schall wird die Schärfe 1 acum²³ zugeordnet. Durch diese Referenzgröße kommt man auf eine Zuordnung der Schärfe für Schmalband- bzw. Hochpaß- und Tiefpaßrauschen, bezüglich der Mittenfrequenz bzw. Grenzfrequenz, die in Abbildung 3.1. dargestellt ist. Hohe Spektralanteile sind für sehr dominante, ausgeprägte Schärfe verantwortlich. In dem Bereich von 200Hz bis 10kHz steigt die Schärfe etwa um den Faktor 50 an. Die Bandbreite eines Schalls ist eine wesentliche Variable, die die Schärfe beeinflusst. Wird zu einem vorhandenen Schall zusätzlich ein tieffrequenter Schall hinzugefügt, so läßt sich dessen ursprüngliche Schärfe reduzieren. Der dadurch entstehende Schall ist lauter, wird aber meistens als „weniger lästig“ bzw. „weniger störend“ empfunden.

²¹ Werden die Abhängigkeiten der Größenschätzung relativ zu einem bestimmten Schall gewonnen, dann spricht man von der relativen Schärfe.

²² Für die Schärfeempfindung ist es unbedeutend ob es sich um ein Linienspektrum (diskrete Spektrallinien) oder um ein kontinuierliches Spektrum handelt.

²³ Die Bezeichnung 'acum' kommt von 'acer' (lat.) bedeutet „scharf“.



Schärfe (sharpness) S von Schmalbandrauschen (durchgezogen), von Tiefpaßrauschen (punktiert) und von Hochpaßrauschen (gestrichelt) als Funktion der Mittenfrequenz f_m bzw. der oberen Grenzfrequenz f_{og} bzw. der unteren Grenzfrequenz f_{ug} .

Abbildung 3.1.
Frequenzabhängigkeit der Schärfe

3.2 Berechnung der Schärfe

Die spektrale Einhüllende wird in der Psychoakustik durch das Erregungspegel - Tonheitsmuster bzw. durch die spezifischen Lautheiten beschrieben. Es existiert somit ein Modell zur Beschreibung der Schärfe, das auf dem Lautheits - Tonheitsmuster basiert. Als objektive Beschreibungsgröße für die psychoakustische Schärfe wird das erste spektrale Moment des spezifischen Lautheits-Tonheitsmusters (nach Zwicker) verwendet. Ein wesentlicher Punkt dieses Modelles stellt die Gewichtungskurve dar, welche das Lautheits-Tonheitsmuster bei hohen Frequenzen stärker gewichtet. Der Verlauf der Gewichtungskurve bringt damit die Abhängigkeit der Schärfe von der Frequenz in das Modell mit ein. Um das Ergebnis unabhängig vom Pegel zu machen wird der berechnete Flächenschwerpunkt, des gewichteten Lautheits - Tonheitsmusters, durch die Gesamtlautheit N dividiert (Zwicker, 1982). Der sich ergebende Quotient (siehe Gl.1) ist dann ein repräsentativer Einzahlwert für die Schärfe, wobei der Faktor c das Ergebnis auf den Referenzschall normiert (bei Zwicker (1982) ist $c = 0.11$).

$$S = c \cdot \frac{\int_{z=0}^{24\text{Bark}} N'(z) \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{\int_{z=0}^{24\text{Bark}} N'(z) dz} \quad (\text{gewichtete Schärfe in acum}) \quad \text{Gl.1}$$

Die Gewichtungskurve $g(z)$ hat den Funktionswert 1 (unit gain) von 1 Bark bis 16 Bark, oberhalb von 16 Bark steigt dieser exponentiell an (siehe Abbildung 3.2.).

Widmann (1992) fordert eine stärkere Gewichtung $g'(z)$ der hohen Frequenzen, da für schmalbandige Schalle hoher Frequenzlage teilweise zu geringe Schärfewerte berechnet wurden. Durch diese Modifikation erreicht er bei psychoakustischen Messungen eine mittlere Abweichung von 16%, mit der Gewichtungskurve nach Zwicker jedoch 22%.

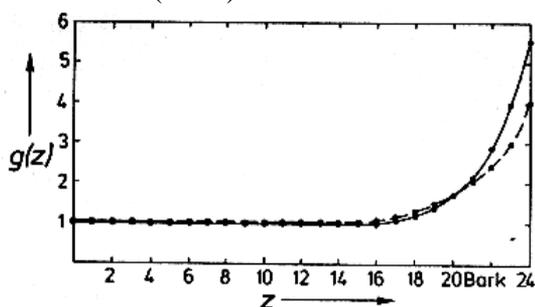


Abbildung 3.2.
Gewichtungsfunktionen $g'(z)$ (durchgezogen) und $g(z)$ (strichliert)

Mathematische Beschreibung der Gewichtungskurve nach Zwicker (1982)

$$g(z) = 1 \quad \text{für} \quad 0 < z \leq 16 \text{Bark} \quad \text{Gl.2a}$$

$$g(z) = 0.066 \cdot e^{0.171 \cdot z} \quad \text{für} \quad 16 < z \leq 24 \text{Bark} \quad \text{Gl.2b}$$

Aures (1984) schlägt eine Modifikation Gl.3 und Gl.4 dieses Verfahrens vor, da die Berechnung nach Gl.1 und Gl.2a,b noch zu große Pegelabhängigkeiten zeigte.

$$S = c \cdot \frac{\int_{z=0}^{24 \text{Bark}} N'(z) \cdot g''(z) \cdot z \cdot dz}{\ln \left(\frac{N}{\text{sone}} + 20 \right) \text{sone}} \text{ acum} \quad \text{Gl.3}$$

$$g''(z) = e^{\left(\frac{0.171 \cdot z}{\text{Bark}} \right)} \quad \text{Gl.4}$$

Die folgenden drei Beispiele sollen das Berechnungsverfahren (nach Zwicker) und dessen Ergebnisse veranschaulichen (siehe Abbildung 3.3.). In der Abbildung 3.3. ist links der Frequenzgruppenpegel L_G eines 1kHz-Tones (durchgezogene Linie), von gleichmäßigem anregenden Rauschen²⁴ (GAR) und von Hochpaßrauschen als Funktion der Tonheit dargestellt. Auf der rechten Seite sind die gewichteten Spezifischen Lautheiten in Abhängigkeit von der Tonheit zusammen mit den dazugehörigen Schwerpunkten (Pfeile) abgebildet. Aus dieser Abbildung ist erkennbar, daß ein 1 kHz-Ton eine wesentlich kleinere Schärfe als ein Hochpaßrauschen mit der Grenzfrequenz 3 kHz hat. Wird das Rauschen nach tieferen Frequenzen hin erweitert, wie im Falle von GAR, so ist dessen Schärfe wesentlich geringer aber immer noch größer als die des 1 kHz-Tones.

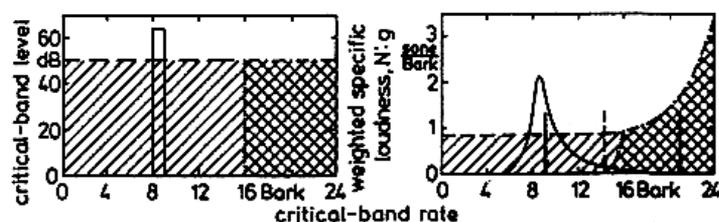


Abbildung 3.3.

Veranschaulichung der Berechnung der Schärfe. Frequenzgruppenpegel L_G (links) und gewichtete Spezifische Lautheit $N' \cdot g$ (rechts) in Abhängigkeit von der Tonheit z für alle drei Schalle.

²⁴ Als gleichmäßig anregendes Rauschen wird jenes Bandrauschen bezeichnet, daß eine konstante Schallintensität in den Frequenzgruppen besitzt.

4 Klanghaftigkeit

Einen wesentlichen Einfluß auf die Lästigkeit eines Geräusches hat der Anteil von tonalen Komponenten. Diese tonalen Anteile werden durch die Klanghaftigkeit beschrieben. Sie ist ein Maß für den Anteil der tonalen Komponenten am Spektrum eines Schalls. Bei breitbandigem Geräusch gilt in weiten Bereichen, vorausgesetzt es handelt sich dabei um keine Musik bzw. kein Gemisch von Instrumentalklängen, je mehr tonale Anteile vorhanden sind desto lästiger wird der Schall empfunden. Betrachtet man tonale Komponenten, so können zwei Fälle unterschieden werden: Einerseits die prominenten – dominanten Spektralkomponenten (Spektrallinien), sprich einzelnen Frequenzen, und andererseits dominante - schmalbandige Rausch- oder Geräuschanteile. Hörbare, reine Töne in breitbandigen Geräuschen werden als sehr lästig empfunden, obwohl ihr Beitrag zur Lautheit sehr gering sein kann. Wird das breitbandige Geräusch im Vergleich zum Ton im Pegel angehoben, so verliert der Ton an Dominanz. Reine und komplexe Töne (Klänge) verursachen eine ausgeprägte Klanghaftigkeit (Zollner, 1993). Der Einfluß von schmalbandigen Rauschanteilen ist nur dann von Bedeutung, wenn deren Bandbreite kleiner als die kritische Bandbreite ist. Nur dann werden sie vom Ohr als tonale Komponenten interpretiert. Ihre Ausgeprägtheit nimmt mit zunehmender Bandbreite ab.

4.1 Modell nach Terhardt

Erste grundlegende Untersuchungen wurden von Terhardt (1974) durchgeführt und führten zu einem ersten Modell (Terhardt, Stoll und Seewann, 1982). Bei diesem Modell wird zur Detektion der tonalen Komponenten folgendes Verfahren vorgeschlagen:

Im ersten Schritt wird das Spektrum L nach lokalen, Maxima (Pegeln L_i) abgesucht:

$$L_{i-1} < L_i \geq L_{i+1} \quad \text{Gl. 1}$$

Im zweiten Schritt muß für ein gefundenes, lokales Maximum folgende Bedingung²⁵ erfüllt werden:

$$L_i - L_{i+j} \geq 7\text{dB} \quad \text{für } j = -3, -2, +2, +3 \quad \text{Gl. 2}$$

Wenn Gleichung 2 erfüllt ist, wird die Gruppe von sieben Stützstellen als tonale Komponente mit dem Pegel L_i und der Frequenz f_i bezeichnet und aus dem Gesamtspektrum entfernt.

²⁵ Diese Bedingung ist dann gültig, wenn zur Gewichtung des Zeitsignals ein Hanning-Fenster verwendet wird, anderenfalls muß sie dementsprechend geringfügig modifiziert werden.

4.2 Modell nach Aures

Aures übernimmt die Ansätze von Terhardt und erweitert sie bezüglich schmalbandiger Geräuschanteile. Weiters werden die Einflüsse von Bandbreite, Frequenzlage und Pegelüberschuß²⁶ berücksichtigt (Aures, 1984). Bei Terhardt dient der Algorithmus dazu, die Tonhöhe von Klängen zu ermitteln, während der Algorithmus bei Aures zur Bestimmung einer psychoakustischen Größe, die zum Wohlklang²⁷ von Schallereignissen beiträgt, verwendet wird.

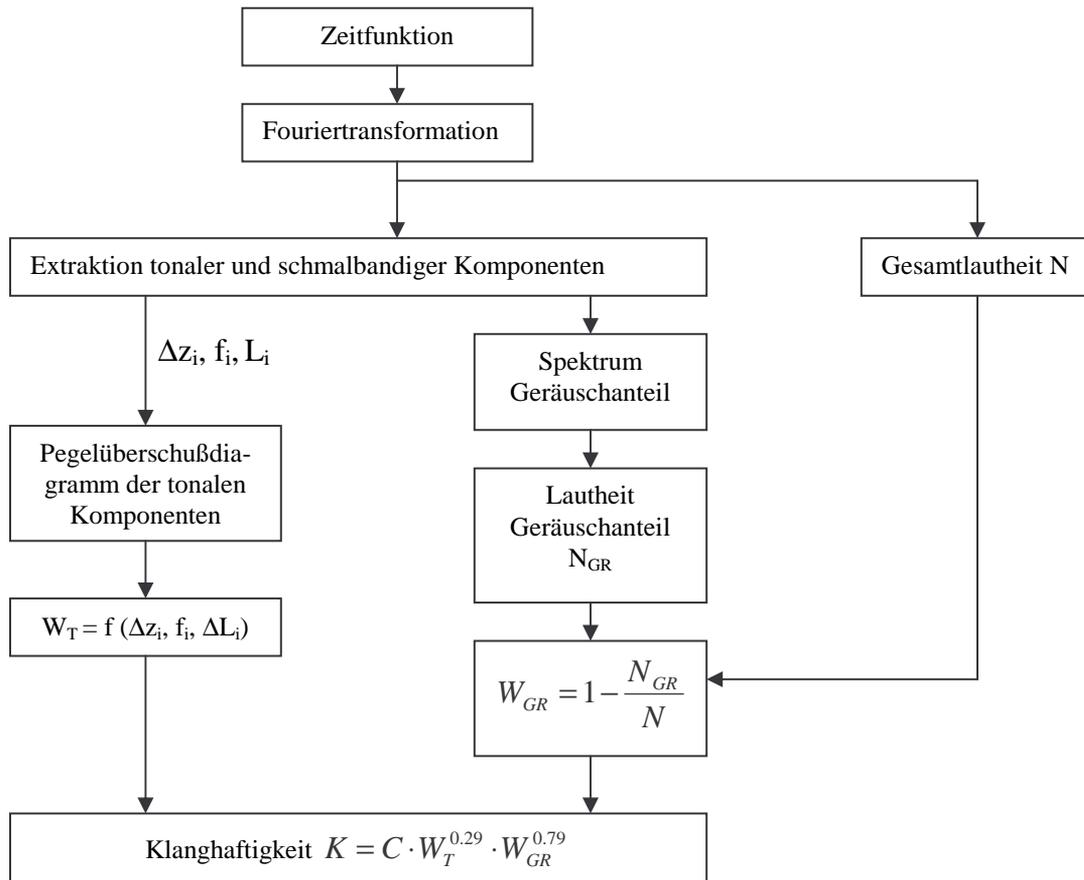


Abbildung 4.1.

Blockschaltbild des Berechnungsverfahrens der Klanghaftigkeit für den Wohlklang (nach W. Aures).

²⁶ Der sogenannte Pegelüberschuß ΔL_i ergibt sich aus dem Pegel der Komponente abzüglich der Ruheshwelle, der Rauschleistung in der jeweiligen Frequenzgruppe, gegeben durch die Leistung der nach Abzug der tonalen Komponente dort verbleibenden Spektrallinien, und des Erregungspegels, der sich an dieser Stelle durch die anderen tonalen Komponenten ergibt.

²⁷ Zur Bestimmung des Wohlklanges siehe Kapitel *Rauhigkeit* Gleichung 1.

Einflüsse von Bandbreite, Frequenzlage und Pegelüberschuß

Die Klanghaftigkeit nimmt mit zunehmender Bandbreite Δz ab. Dieses Verhalten wird durch die Gewichtungsfunktion w_1 nachgebildet.

$$w_1(\Delta z_i) = \left(\frac{0.13}{\frac{\Delta z_i}{\text{Bark}} + 0.13} \right)^{\frac{1}{0.29}} \quad \text{Gl. 3}$$

Die Klanghaftigkeit ist abhängig von der Frequenz und weist einen ähnlichen Verlauf wie der „Dominante Frequenzbereich“, welcher bei der Tonhöhenwahrnehmung zum tragen kommt, auf. Dieser Verlauf gleicht einer Bandpaßcharakteristik mit der Mittenfrequenz bei 700Hz (Terhardt, Stoll und Seewann, 1982). Mit der Gewichtungsfunktion w_2 wird diese Abhängigkeit von der Frequenz f_i der tonalen Komponente modelliert.

$$w_2(f_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.2 \cdot \left(\frac{f_i}{0.7\text{kHz}} + \frac{0.7\text{kHz}}{f_i} \right)^2}} \quad \text{Gl. 4}$$

Mit dem Pegelüberschußdiagramm werden die Verdeckungseffekte erfaßt. Da ein Ansteigen des Pegelüberschusses über 20 bis 30 dB für die Klanghaftigkeit keine Rolle mehr spielt, wird dieser mit der Gewichtungsfunktion w_3 bewertet. Für große ΔL strebt diese Funktion gegen 1.

$$w_3(\Delta L_i) = \left(1 - e^{-\frac{\Delta L_i}{15\text{dB}}} \right) \quad \text{Gl. 5}$$

Die Berücksichtigung des Geräuschanteils im Gesamtschall wird durch Gleichung 6 ausgedrückt. Dazu wird für den Geräuschanteil des Spektrums (ohne tonale Komponenten) die Lautheit N_{GR} berechnet und mit der Gesamtlautheit N des Schalls in Beziehung gesetzt.

$$w_{GR} = 1 - \frac{N_{GR}}{N} \quad \text{Gl. 6}$$

Die Klanghaftigkeit berechnet sich nun mit Gleichung 3 bis 6 zu:

$$K = C \cdot w_{GR}^{0.79} \cdot \left(\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} [w_1(\Delta z_i) \cdot w_2(f_i) \cdot w_3(\Delta L_i)]^2} \right)^{0.29} \quad \text{Gl. 7}$$

Als Referenz zur Bestimmung der Klanghaftigkeit wird ein Sinuston mit 1kHz und 60dB verwendet, dessen Klanghaftigkeit²⁸ beträgt 1 tu (100%). Der Faktor C dient zur Normierung. Mit steigender Klanghaftigkeit steigt der Wohlklang, aber auch die Lästigkeit nimmt zu. Zwicker (1991) schlägt vor, zur Berechnung der Lästigkeit die Klanghaftigkeit nicht zu berücksichtigen, da tonale Signale bereits eine größere Lautheit besitzen als rauschartige Signale gleichen Pegels.

²⁸ In der Literatur wird neben dem Begriff *Klanghaftigkeit* auch der Begriff *Tonhaltigkeit* bzw. im englischen Sprachraum *pitch-strength* und *tonality* verwendet. Die *Klanghaftigkeit* wird in der Einheit tu (*tonality unit*) angegeben.

5 Schwankungsstärke

Die Empfindungsgröße Schwankungsstärke ist sehr nahe verwandt mit der *Rauhigkeit* (vgl. Kapitel 1). Bei der Schwankungsstärke handelt es sich jedoch um periodische Schwankungen des Schallsignals mit Modulationsfrequenzen kleiner als 20 Hz. Diese Änderungen können vom Gehör als Einzelereignisse erkannt werden und werden somit als zeitliche Lautstärkeänderungen wahrgenommen. Bei höheren Modulationsfrequenzen bleibt die empfundene Lautheit gleich und die ausgelöste Empfindung nähert sich der *Rauhigkeitsempfindung*. Die wahrgenommenen Pegeländerungen zeigen bezüglich der Modulationsfrequenz eine Bandpaßcharakteristik, die ihr Maximum bei 4 Hz besitzt²⁹ (Fastl, 1982; Fastl, 1992; Widmann, 1992). Signale mit einer großen Schwankungsstärke sind störender als solche mit einer großen Rauhigkeit. Die Abhängigkeit der Schwankungsstärke von der Trägerfrequenz kann wie folgt beschrieben werden: zu hohen (ca. 7 kHz) und tiefen Frequenzen (ca. 100 Hz) erfolgt ein Abfall auf 70% des Wertes bei mittleren Frequenzen. Der Einfluß des Pegels auf die Schwankungsstärke ist vergleichbar mit jenem bei der Rauhigkeit. Bei einem Schall mit einem Pegel von 90 dB ist die Schwankungsstärke etwa 10 mal so groß wie im Vergleich zu einem mit 40 dB (Fastl, 1992). Als Referenzsignal mit der Schwankungsstärke $F = 1$ vacil wurde ein sinusförmiger amplitudenmodulierter 1 kHz-Ton mit dem Modulationsgrad $m = 1$, der Modulationsfrequenz $f_{\text{mod}} = 4$ Hz und dem Pegel $L = 60$ dB gewählt.

Die Schwankungsstärke kann direkt aus der Lautheitsverteilung berechnet werden.

$$F = \frac{C \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} \log\left(\frac{N'_{\text{max}}}{N'_{\text{min}}}\right) dz}{\frac{T}{0.25s} + \frac{0.25s}{T}} \text{ vacil} \quad \text{Gl. 1}$$

N'_{min} und M'_{max} sind dabei jeweils zeitlich aufeinanderfolgende Minimal - bzw. Maximalwerte der spezifischen Lautheit und T der zeitliche Abstand zweier aufeinanderfolgender Lautheitsmaxima, mit der Einschränkung $f_{\text{mod}} < 20$ Hz ! C ist der Normierungsfaktor.

Da jedoch die exakte Berechnung der Maskierungstiefe³⁰ bzw. die Bestimmung der zeitlich, veränderlichen Mithörschwellen-Zeitmuster nicht so einfach möglich ist, wird die Berechnung über die Modulationsgrade der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen durchgeführt. Somit ist das hier verwendete Modell in seiner Struktur ähnlich dem Rauhigkeitsmodell.

²⁹ Das ist auch der Grund, warum viele Alarmsignale mit ca. 4 Hz moduliert werden.

³⁰ $\Delta L = \log \frac{N'_{\text{max}}}{N'_{\text{min}}}$ Maskierungstiefe, Differenz zwischen Maximum und Minimum der zeitlichen Maskierung.

5.1 Modell nach Höldrich

Struktur des Modells im Überblick

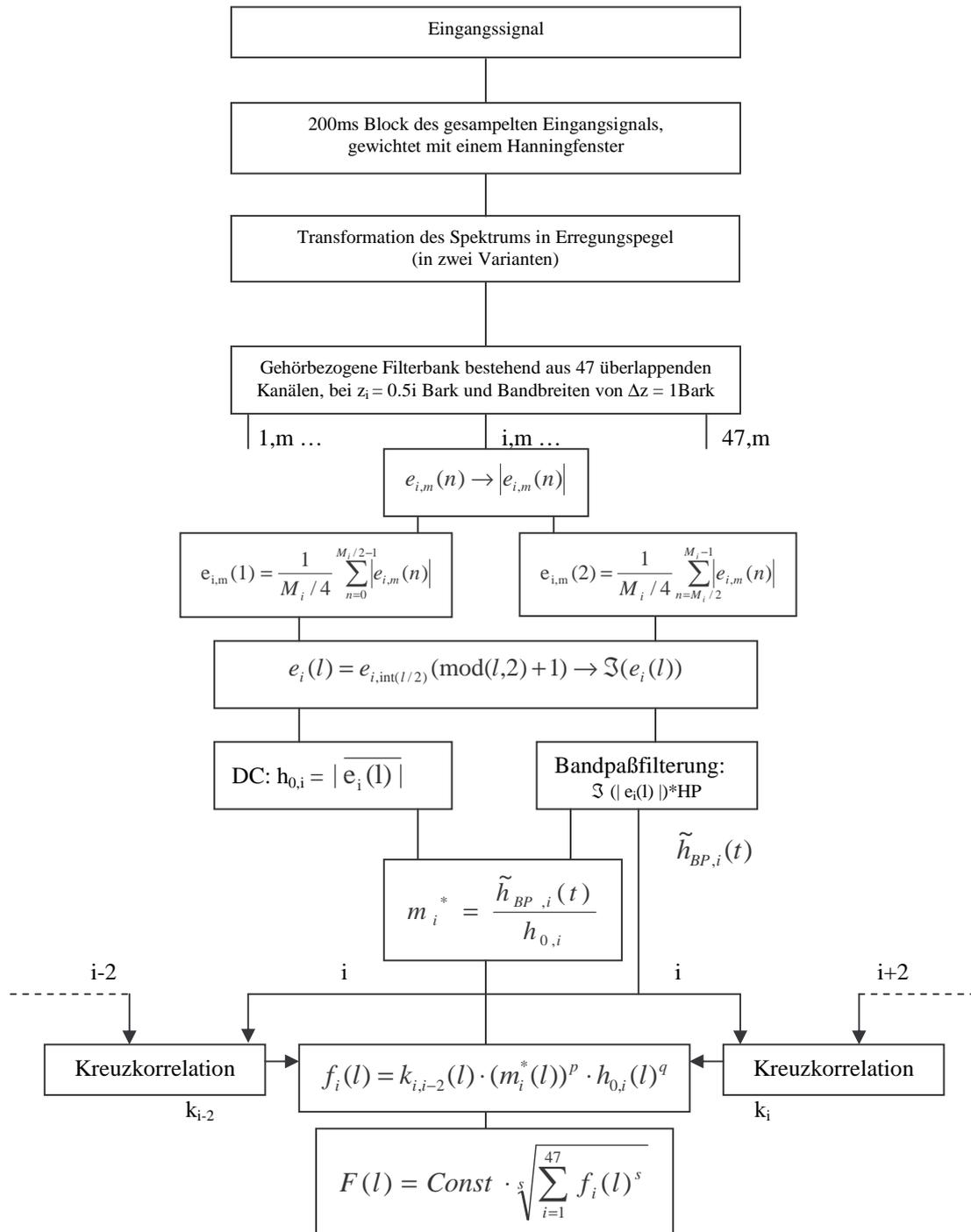


Abbildung 5.1.

Strukturbild zur Berechnung der Schwankungsstärke (Höldrich, 1998). Der Index i bezeichnet die kritischen Barkbänder 1 bis 47. Der Index m bezeichnet die berechneten Blöcke 1 bis 40.

Berechnung der Bandpaßsignale $e_{i,m}(n)$:

Die Berechnung der Erregungszeitfunktionen der einzelnen Bänder $i = 1$ bis 47 für die Signalauschnitte (Blöcke) 1 bis m , der Länge $N=8192$ Punkte mit dem Versatz $HS=4800$ Punkte, erfolgt wie bei der Rauigkeitsberechnung (siehe Kapitel 1).

Berechnung der abtastreduzierten Einhüllenden $e_i(l)$:

Aus den Erregungszeitfunktionen werden die Einhüllenden berechnet.

$$|e_{i,m}(n)| = \sqrt{\text{Re}\{e_{i,m}(n)\}^2 + \text{Im}\{e_{i,m}(n)\}^2} \quad \text{Gl. 2}$$

Da das Maximum der Schwankungsstärke zwischen 2 Hz und 6 Hz liegt, ist eine gesonderte Berechnung des Einhüllendenspektrums eines einzelnen Frames (170 ms) nicht sinnvoll. Für eine genaue Berechnung ist eine höhere Frequenzauflösung notwendig. Durch eine Vergrößerung der Framelänge erreicht man eine bessere Frequenzauflösung, jedoch würde die Recheneffizienz darunter leiden. Eine wesentliche Verbesserung der Auflösung erhält man daher durch Reduzierung der Abtastfrequenz.

Die Schwankungsstärke wird somit aus dem Verlauf der Frame-Mittelwerte der Erregungszeitfunktionen über m Signalblöcke berechnet. Bei einer Mittelung über jeweils nur einer Hälfte des Frames ergibt sich eine Filterung mit einem halben Hanning-Fenster als Impulsantwort (siehe Abbildung 5.2.) und einer anschließenden Abtastraten-Reduktion, gemäß dem Frameversatz, zu $f_s = 20$ Hz. Der Frequenzgang des halben Hanning-Fensters (siehe Abbildung 5.3.) entspricht ab ca. 4Hz dem hochfrequenten Verlauf der Abhängigkeit von f_{mod} in hohem Maß (Höldrach, 1998).

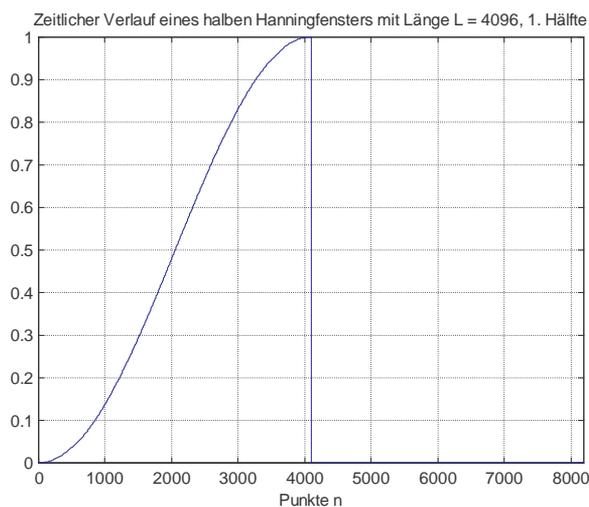


Abbildung 5.2.
Zeitlicher Verlauf eines halben Hanning-Fensters.

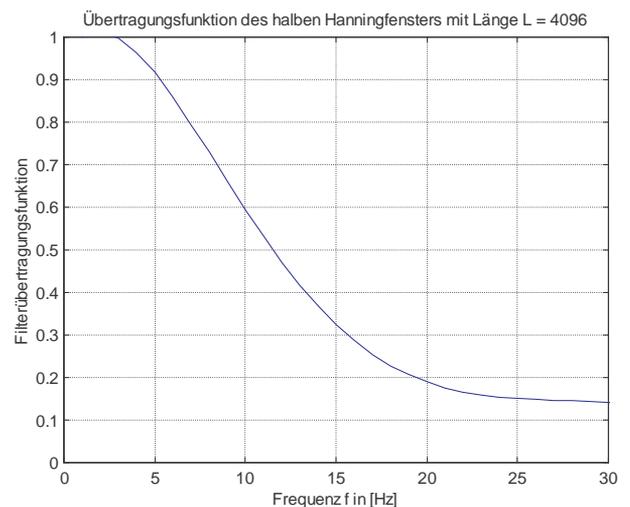


Abbildung 5.3.
Frequenzgang eines halben Hanning-Fensters.

Die beiden Frame - Mittelwerte $e_{i,m}(1)$ und $e_{i,m}(2)$ berechnen sich mit:

$$e_{i,m}(1) = \frac{1}{M_i/4} \sum_{n=0}^{M_i/2-1} |e_{i,m}(n)| \quad \text{und} \quad e_{i,m}(2) = \frac{1}{M_i/4} \sum_{n=M_i/2}^{M_i-1} |e_{i,m}(n)| \quad \text{Gl. 3}$$

Die abtastreduzierten, teilgefilterten Einhüllenden $e_i(l)$ ergeben sich durch abwechselnde Zusammensetzung der beiden Frame – Mittelwerte $e_{i,m}(1)$ und $e_{i,m}(2)$.

Berechnung des effektiven Modulationsgrades $m_i^*(l)$:

Für jede Einhüllende $e_i(l)$ wird der effektive Modulationsgrad berechnet. Die Länge des Einhüllendenausschnitts, für die die Berechnung durchgeführt wird, wird festgesetzt mit mindestens 2 Sekunden. Die Berechnung erfolgt analog wie bei der Rauigkeitsberechnung. Zur Bestimmung der bandpaßgefilterten Einhüllenden erfolgt eine Filterung mit dem Hochpaßfilter HP (siehe Abbildung 5.4.).

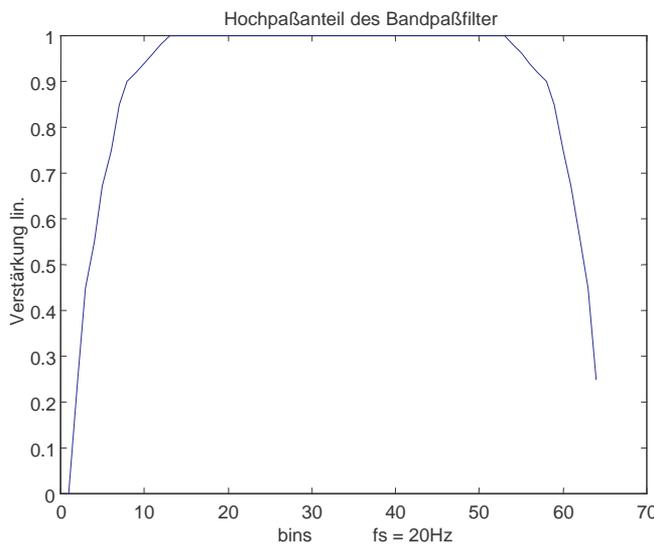


Abbildung 5.4.

Hochpaßfilter HP, Hochpaßanteil des Bandpaßfilters zur Modellierung der Abhängigkeit der Schwankungsstärke von der Modulationsfrequenz.

Transformation von Modulationsgrad in spezifische Schwankungsstärke $f_i(l)$ und Superposition zu Einzahlwert $F(l)$:

Die Abhängigkeit der Empfindungsgröße von der Korrelation zwischen den Hüllkurven der benachbarten kritischen Bänder wird berücksichtigt. Eine explizite Berücksichtigung des Trägerfrequenzeinflusses findet nicht statt. Die Gewichtung mit den normierten Korrelationskoeffizienten erfolgt in 2 Varianten: arithmetisches Mittel und quadratisch geometrisches Mittel. Die spezifische Schwankungsstärke $f_i(l)$ wird in mehreren Varianten berechnet.

$$f_i(l) = k_{i,i-2}(l) \cdot (m_i^*(l))^p \cdot h_{0,i}(l)^q \quad \text{Gl. 4}$$

Die Superposition der spezifischen Schwankungsstärke zu einem Einzahlwert $F(l)$ erfolgt linear mit $s = 1$ und quadratisch mit $s = 2$.

$$F(l) = Const \cdot \sqrt[s]{\sum_{i=1}^{47} f_i(l)^s} \quad \text{Gl. 5}$$

Die freie Variable *Const* dient zur Normierung der Ergebniswerte. Der Aufbau der F-Matrix befindet sich im Anhang A.

6 Impulshaltigkeit

Die Impulshaltigkeit kann negative Einflüsse auf die klanglichen Eigenschaften eines Schalles haben (Buchta, 1994; Krahé und Buchta, 1993; Ikeda und Findell, 1993). In der Lärmmeßtechnik wird die Lästigkeit durch einen Bewertungspegel bemessen, der sich aus einer physikalischen Meßgröße und einem Zuschlag zusammensetzt. Der Zuschlag³¹ berücksichtigt die Eigenschaften des Gehörs. Als objektivere Meßgröße hat sich bei stationären Geräuschen die Lautheit bewährt, jedoch bei der Beurteilung der Lästigkeit von impulshaltigen Geräuschen sind eher die Spitzenwerte der Lautheit von Bedeutung. Zwicker (1991) verwendet in seiner vorgeschlagenen Definition der „unbeeinflussten Lästigkeit“ den Percentilwert³² N_{10} . Dieses statistische Maß ist jedoch nur für länger dauernde bzw. stationäre Geräuschsequenzen sinnvoll. Bei Untersuchungen von Krahé und Buchta (1993) stellte sich heraus, daß bei einer Zunahme der Impulsanzahl nicht nur die Lautheitsspitzen sondern vielmehr deren Anzahl von Bedeutung sind. Dies entspricht dem Prinzip der Energie-Äquivalenz. Bei einer zu dichten Impulsfolge werden die Einzelimpulse unter Umständen nicht mehr isoliert wahrgenommen, was zu einem reduzierten Lästigkeitseindruck führt (Vos und Smoorenburg, 1985).

Zur Beschreibung der Impulshaltigkeit stellen sich die Kurtosis und der Crestfaktor (Scheitelfaktor) als geeignete Meßgrößen dar (Auweraer und Ponsele, 1996), wobei man bemerken muß, daß die Kurtosis zuverlässiger als der Crestfaktor ist (Erdreich, 1986). Die Kurtosis berücksichtigt bei Spitzen die Pegeldifferenz zum Grundgeräusch, die Dauer und die Wiederholrate. Sie ist definiert als das vierte statistische Moment des zeitlichen Signalverlaufs (Auweraer und Ponsele, 1996).

$$\delta_4 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{x(n) - \alpha_1}{\sigma} \right]^4 \quad \text{Kurtosis (viertes statistisches Moment)} \quad \text{Gl. 1}$$

$$\text{mit: } \alpha_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \quad \text{Mittelwert (erstes statistisches Moment)}$$

$$\text{und } \sigma = \sqrt{\mu_2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \alpha_1)^2} \quad \text{Standardabweichung (berechnet sich aus dem zweiten statistischen Moment, der Varianz)}$$

$x(n)$zeitliche Signalfolge

NAnzahl vorhandener Signalwerte

Die Kurtosis ist eine dimensionslose Größe und beschreibt die Impulshaltigkeit einer Verteilung relativ zu einer Normalverteilung. Je größer der Betrag der Kurtosis ist, desto mehr prominente, impulsartige Spitzen sind im Signal vorhanden.

³¹ Die Zuschläge sollten vom Geräusch abhängig sein. Diese Berücksichtigung wird in der ISO 1996-2 von der 1993 gegründeten Arbeitsgruppe WG 45 gefordert (Schomer, 1995).

³² Der Percentilwert N_{10} ist jener Wert, den die Lautheit in 10% der Meßzeit überschreitet.

6.1 Modelle zur Berechnung der Impulshaltigkeit:

6.1.1 Modell nach Sottek, Vranken und Busch

Zu Beginn der Untersuchungen standen Hörversuche in denen die Abhängigkeit der Impulshaltigkeit von Impulsform (insbesondere Flankensteilheit), Impulshöhe und Impulswiederholffrequenz bestätigt werden konnte (Heldmann, 1994, S.61 ff.). Es wurden sowohl künstliche als auch teilweise natürliche Testsignale verwendet. Mit den Versuchsreihen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

1. Impulshaltigkeit hängt von der mittleren Impulsfolgefrequenz³³ ab.
2. Impulshaltigkeit nimmt mit steigendem Signalpegel zu.
3. Impulshaltigkeit hängt von der relativen Impulsüberhöhung monoton ab.
4. Impulshaltigkeit nimmt zunächst mit der relativen Impulsbreite zu, fällt dann aber wieder ab.
5. Der Eindruck der Impulshaltigkeit verstärkt sich, wenn die Impulsformen mit größeren Flankensteilheiten verwendet werden.

Das Gehörmodell³⁴ von Sottek (1993), bei dem die Berechnung der Erregungsmuster auf eine neuartige Weise erfolgt, bildet die Grundlage. Es erfolgt eine Außenohrfilterung, die Aufteilung in Frequenzbänder, die Berücksichtigung der Ruhehörschwelle und die Hüllkurvenbildung mit anschließender Tiefpaßfilterung.

1. Berechnungsvariante:

Die berechneten Erregungsgrößen³⁵ $e(z_i, t)$, kurz e_j , werden auf Impulshaltigkeit untersucht. Dazu wird folgende Formel (Gl. 2) verwendet:

$$I = \sum_{j=1}^N k_j \cdot \frac{\overline{(e_j - \overline{e_j})^n}}{\overline{e_j^m}} \quad \text{Gl. 2}$$

mit k_jkanalabhängiger Gewichtungsfaktor und $n=2, m=4$

Die Differenz $n - m$ erlaubt die Einstellung der Pegelabhängigkeit. Mit $n - m = 0.25$ werden die oben genannten Punkte 2., 3. und 4. sehr gut wiedergegeben.

³³ Sie steigt bis 10Hz an, fällt dann deutlich ab und geht in eine Rauigkeitsempfindung über. Bei Folgefrequenzen zwischen 5 und 8 Hz bzw. auch bei Einzelimpulsen stellt sich eine maximale Impulshaltigkeit heraus (Heldmann, 1994).

³⁴ Dieses Modell ist neu und dessen Zuverlässigkeit ist noch nicht ausreichend untersucht worden. Es ist stark an die Anatomie und Physiologie des Gehörs angelehnt.

³⁵ z_i steht für das Band i .

2. Berechnungsvariante:

Die Erregungsverteilung wird nichtlinear verzerrt und hochpaßgefiltert. Der sich ergebende Pegel des Signals wird als Maß für die Impulshaltigkeit genommen³⁶. Dieses Modell wird den fünf genannten Anforderungen gerecht.

Ausblick für eine neue Berechnungsvariante:

Eine Addition der Erregungen e_j , da sich breitbandige Impulse konstruktiv überlagern, zur Summenerregung $e_z(t)$. Erst ihr Verlauf wird auf Impulshaltigkeit hin untersucht. Als erstes Ergebnis wird dazu angegeben, daß sich Kanäle mit niedriger Mittenfrequenz konstruktiv überlagern und zu höheren Mittenfrequenzen hin die Korrelation zwischen den benachbarten Erregungsfunktionen nachläßt. Eine mögliche Lösung besteht in der Kombination aus Summation und Einzelauswertung.

6.1.2 Modell nach Krahé und Buchta

Ein Verfahren zur Beurteilung der Lästigkeit von Impulsgeräuschen muß einerseits die zeitliche Struktur und andererseits das Spektrum berücksichtigen. Der Dualismus von Zeitverlauf und Spektrum führt zur Frage, in welcher Domäne einzelne Effekte in geeigneter Weise berücksichtigt werden können. Durch die Bestimmung der Lautheit werden die spektralen Eigenschaften eines Geräusches wesentlich besser erfaßt als mit einer A - oder C - Bewertung. Für stationäre Schalle korreliert die Lautheit mit der Lästigkeit; d.h. Schalle gleich großer Lautheit werden meist als gleich störend oder lästig empfunden. Das Modell basiert daher auf der Lautheitsberechnung. Das Ziel ist ein lautheitsbezogener Wert, der aus dem zeitlichen Verlauf der Lautheit berechnet wird und bei einem Vergleich von gleich großen Werten für impulsartige und für stationäre Geräusche eine gleiche Lästigkeit impliziert (Krahé und Buchta, 1994).

Aus den durchgeführten Untersuchungen (Buchta, 1994; Krahé und Buchta 1993) wurden folgende Sachverhalte festgestellt:

- Die Mittelwerte der zeitlichen Lautheitswerte für Impulsgeräusche sind im allgemeinen geringer als jene der stationären Geräusche.
- Die Differenz zwischen den Lautheits - Spitzenwerten von gleich lästig empfundenen stationären und impulsartigen Geräuschen ist umso größer, je höher die Anzahl der Impulse ist.

Dieser Sachverhalt führt zu einem integrierenden Verfahren, bei dem die Impulse gegenüber ihrer Lautheitsmessung verstärkt in die Summenbildung eingehen müssen. Weiters wurde vom Funktionsschema der verzögerten Adaption³⁷ ausgegangen.

³⁶ Die Impulsempfindung wird bei zusätzlichem Grundrauschen wesentlich schwächer.

³⁷ Mit der Verzögerung wird die Empfindlichkeit der Reizverarbeitung, die abhängig von der Einwirkungsdauer des Geräusches ist, gedrosselt. Setzt das Geräusch aus, so nimmt die Empfindlichkeit mit einer Verzögerung wieder zu.

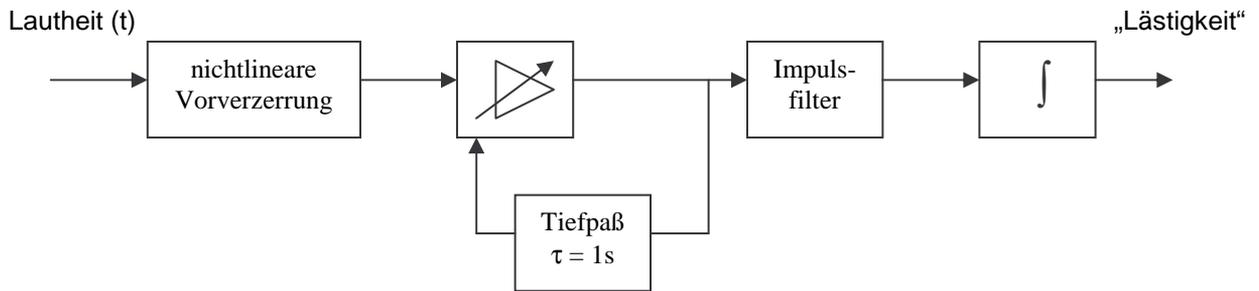


Abbildung 6.1.

Schaltung zur Modellierung der Lästigkeitsbeurteilung bei impulsartigen Geräuschen (Krahé und Buchta, 1994)

Eine rückgekoppelte Steuerung, deren Wirkung durch das Tiefpaßfilter verzögert wird, reduziert bei wachsendem Ausgangssignal die Verstärkung des Verstärkers. Die vorgeschaltete nichtlineare Verzerrung ist so ausgelegt, daß sie bei stationären oder sich nur langsam ändernden Geräuschen genau invers zu dem nachfolgenden Verstärker arbeitet. Damit ist bei diesen Geräuschtypen ein neutrales Verhalten der Schaltung gewährleistet und die bewährten Eigenschaften der Lautheit bei Geräuschen dieser Art werden nicht beeinträchtigt.

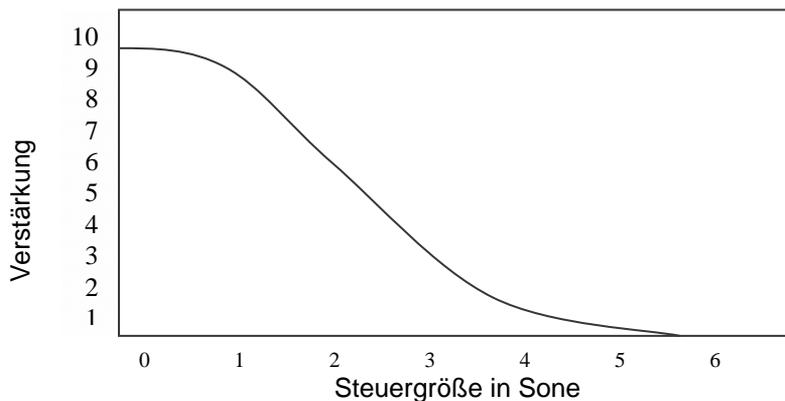


Abbildung 6.2.

Verwendete Verstärkercharakteristik

Mit der vorgestellten Schaltungsstruktur (Abbildung 6.1.) wird das Empfindungsverhalten bei der Beurteilung der Lästigkeit von impulsartigen Geräusche prinzipiell erfaßt. Es ist noch nicht geklärt, ob eine absolute Beurteilung der Lästigkeit damit möglich ist und wie Geräusche gemischter Art verarbeitet werden.

6.2 Impulsdetektierung nach Hödrich und Pflüger

Variante 1:

Das zu untersuchende Schallsignal, welches als zeitliche Folge von absoluten Schalldruckwerten vorliegt, wird in Blöcke der Länge Δt (frei definierbar) unterteilt. Im ersten Schritt wird für jeden dieser Blöcke der absolute Schalldruckpegel (d.h. bezogen auf $p_0 = 20\mu\text{Pa}$) berechnet. Im zweiten Schritt erfolgt für jeden Pegel L_i dieser Blöcke ein Vergleich mit den „benachbarten Blockpegel“ zu beiden Seiten (Vorgängerpegel und Nachfolgerpegel). Die Anzahl der miteinbezogenen Vorgängerblöcke und Nachfolgerblöcke kann unabhängig voneinander festgelegt werden. Zur Bildung der „benachbarten Blockpegel“ werden die Pegel der Vorgängerblöcke und der Nachfolgerblöcke leistungsmäßig aufsummiert. Zur Detektion eines Impulses wird nun die Detektierungsbedingung (Gl. 3) mit den beiden Schwellwerten TH_{pre} für den Vorgängerpegel L_{pre} , und TH_{post} für den Nachfolgerpegel L_{post} wie folgt festgelegt:

$$(L_i - L_{pre} \geq TH_{pre}) \wedge (L_i - L_{post} \geq TH_{post}) \quad \text{Gl. 3}$$

Die Vorteile dieser Methode sind die freien Einstellungsparameter, durch die eine spezielle Impulsform aus dem Signalverlauf detektiert werden kann. Die Anfangs- und Endblöcke sind gesondert zu behandeln, da sie je nach Einstellung keine Vorgänger bzw. Nachfolger besitzen.

Variante 2:

Auch hier erfolgt wie bei der Variante 1 eine Aufteilung in Blöcke und eine Berechnung derer Leistungen, jedoch ist hier die Blocklänge $\Delta t = 2\text{ms}$ vorgegeben. Die Bewertung der benachbarten Pegel erfolgt mit einem teilweise freidefinierbaren „Analysezeitfenster“ (Abbildung 6.3.).

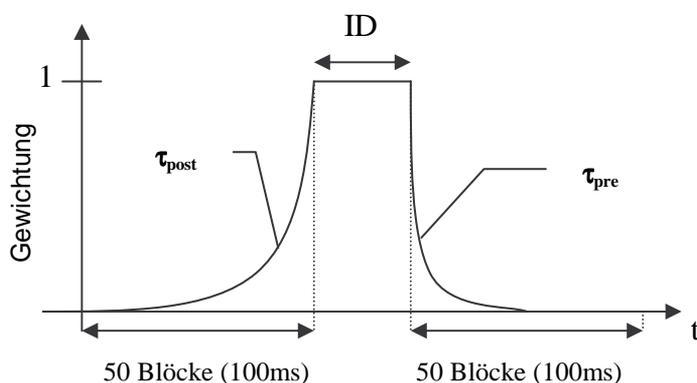


Abbildung 6.3.

Analysezeitfenster zur Beurteilung der benachbarten Pegel.

Die Zeitkonstante τ_{post} ist frei wählbar und ermöglicht bei der Bestimmung der Vorgängerleistung P_{pre} die Berücksichtigung der Nachverdeckung. Analog dazu ist die Zeitkonstante τ_{pre} ebenso frei wählbar und ermöglicht bei der Bestimmung der Nachfolgerleistung P_{pre} die Berücksichtigung der Vorverdeckung (gehörgerechte Analyse). Mit ID wird die Anzahl der Blöcke bestimmt, die zur Bildung der Mittenleistung P_m herangezogen werden und somit auch die Form der detektierten Impulse festlegen. Mit zwei Schwellwerten (siehe Variante 1) kommt man wieder zu der Detektierungsbedingung (Gl. 4), wobei man hier die logische Verknüpfung wahlweise zwischen ‚UND‘ und ‚ODER‘ wählen kann.

$$(10 \cdot \log\left(\frac{P_m}{P_{\text{pre}}}\right) - TH_{\text{pre}} \geq 0) \wedge / \vee (10 \cdot \log\left(\frac{P_m}{P_{\text{post}}}\right) - TH_{\text{post}} \geq 0) \quad \text{Gl. 4}$$

Der Vorteil dieser Variante ist die Berücksichtigung der Impulsform, sowie einer gehörgerechten Analyse.

7 Referenzbeispiele

Referenzbeispiele zur Rauigkeit

Amplitudenmodulierter Sinus

Das untersuchte Signal ist ein amplitudenmodulierter Sinus mit folgenden Spezifikationen:

Pegel:60dB Trägerfrequenz:.....1 kHz

Modulationsfrequenz:..70 Hz Modulationsgrad:.....1

Tabelle: 7.1.

Barkbänder z_i	Frequenz (Hz)	Berechnungsmethode 1				Berechnungsmethode 2			
		m_i^*	$h_{0,i}$	k_{n1}	k_{n2}	m_i^*	$h_{0,i}$	k_{n1}	k_{n2}
1	78	0	0	0	0	0	0	0	0
2	119	0	0	0	0	0	0	0	0
3	161	0	0	0	0	0	0	0	0
4	204	0	0	0	0	0	0	0	0
5	250	0	0	0	0	0	0	0	0
6	297	0	0	0	0	0	0	0	0
7	347	0	0	0	0	0	0	0	0
8	399	0	0	0	0	0	0	0	0
9	453	0	0	0	0	0	0	0	0
10	509	0	0	0	0	0	0	0	0
11	569	0	0	0	0	0	0	0	0
12	631	0	0	0	0	0	0	0	0
13	697	1	0.0000	0.3776	0	1	0.0000	0.3769	0
14	765	1	0.0002	0.4651	0	1	0.0002	0.4650	0
15	838	1	0.0011	0.8767	0.7538	1	0.0011	0.8760	0.7524
16	915	1	0.0073	0.9462	0.8950	1	0.0073	0.9464	0.8955
17	995	1	0.0142	0.9979	0.9958	1	0.0142	0.9986	0.9972
18	1081	1	0.0150	0.9796	0.9593	1	0.0150	0.9813	0.9626
19	1172	1	0.0039	0.9976	0.9951	1	0.0043	0.9992	0.9985
20	1268	1	0.0018	0.9968	0.9935	1	0.0022	0.9996	0.9992
21	1370	1	0.0009	0.9948	0.9936	1	0.0011	0.9993	0.9985
22	1479	1	0.0004	0.9961	0.9897	1	0.0006	0.9974	0.9948
23	1595	1	0.0002	0.9033	0.9923	1	0.0003	0.9907	0.9813
24	1720	1	0.0001	0.6437	0.8082	1	0.0002	0.9917	0.9834
25	1853	1	0.0000	0.4073	0.2905	1	0.0001	0.4911	0
26	1997	0	0	0.1459	0	1	0.0000	0.4940	0
27	2152	0	0	0	0	0	0	0	0
28	2319	0	0	0	0	0	0	0	0
29	2501	0	0	0	0	0	0	0	0
30	2698	0	0	0	0	0	0	0	0
31	2915	0	0	0	0	0	0	0	0
32	3152	0	0	0	0	0	0	0	0
33	3413	0	0	0	0	0	0	0	0
34	3702	0	0	0	0	0	0	0	0
35	4025	0	0	0	0	0	0	0	0
36	4386	0	0	0	0	0	0	0	0
37	4794	0	0	0	0	0	0	0	0
38	5258	0	0	0	0	0	0	0	0
39	5790	0	0	0	0	0	0	0	0
40	6407	0	0	0	0	0	0	0	0
41	7131	0	0	0	0	0	0	0	0
42	7992	0	0	0	0	0	0	0	0
43	9033	0	0	0	0	0	0	0	0
44	10317	0	0	0	0	0	0	0	0
45	11941	0	0	0	0	0	0	0	0
46	14061	0	0	0	0	0	0	0	0
47	16942	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle: 7.2.

R – Einzahlwerte													
Für Berechnungsmethode 1&2 mit modifizierte Aures – Gewichtungskurven.													
Variante:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ber. meth.1	s=1	11.1838	7.0357	11.9398	7.4859	8.1856	5.3254	9.2970	6.0245	10.0332	6.4667	7.0224	4.6869
	s=1 k. ⁷	1.0155	1.0130	1.0169	1.0141	1.0065	1.0053	1.0379	1.0306	1.0408	1.0331	1.0151	1.0119
Ber. meth.2	s=1	12.3403	7.7088	13.2461	8.2483	8.4346	5.4938	10.3295	6.6467	11.2310	7.1876	7.3652	4.9072
	s=1 k.	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9998	0.9998
Variante:		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ber. meth.1	s=2	3.2693	2.0964	3.5499	2.2545	2.5154	1.7010	3.0374	1.9834	3.3085	2.1381	2.3829	1.6306
	s=2 k.	1.0108	1.0072	1.0123	1.0084	1.0018	1.0012	1.0064	1.0043	1.0072	1.0048	1.0013	1.0009
Ber. meth.2	s=2	3.4785	2.2100	3.8020	2.3930	2.5409	1.7206	3.3007	2.1236	3.6320	2.3115	2.4261	1.6587
	s=2 k.	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9998

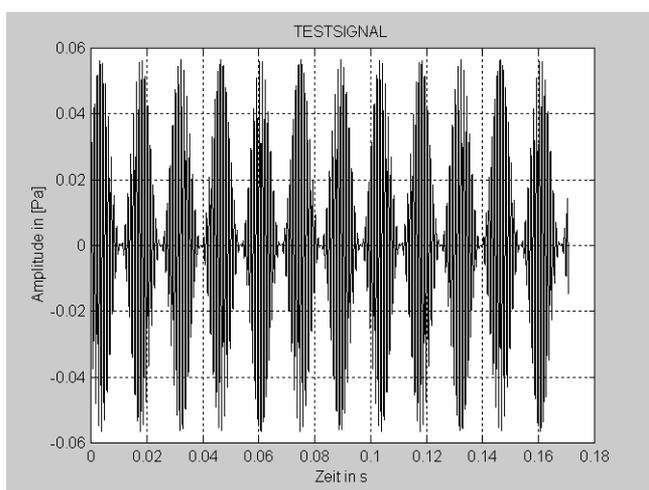


Abbildung 7.2.

Amplitudenmodulierter Sinus 1kHz, 60 dB,
 $f_{\text{mod}} = 70 \text{ Hz}$ und $m = 1$.

Abbildungen zur Berechnungsmethode 1

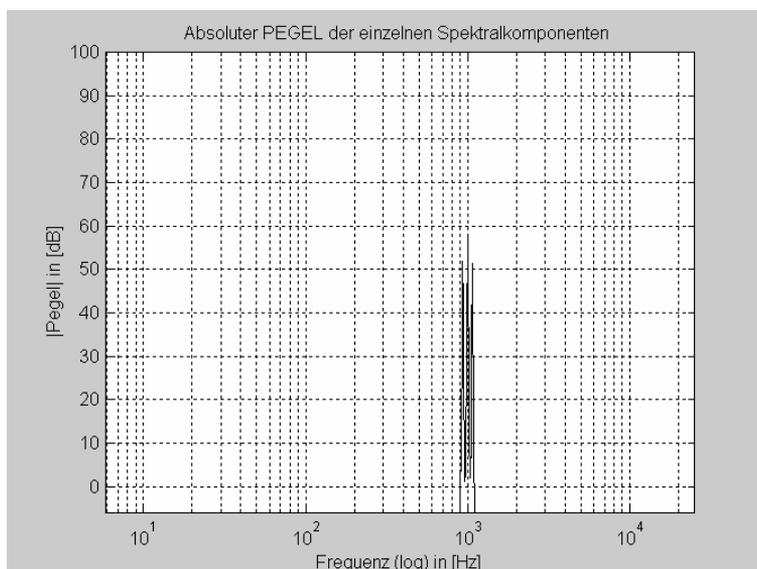


Abbildung 7.3.

Absoluter Pegel, der für jede einzelne
 Spektralkomponente berechnet wurde.

⁷ k. steht für kalibrierte Werte (bezügl. 1 asper)

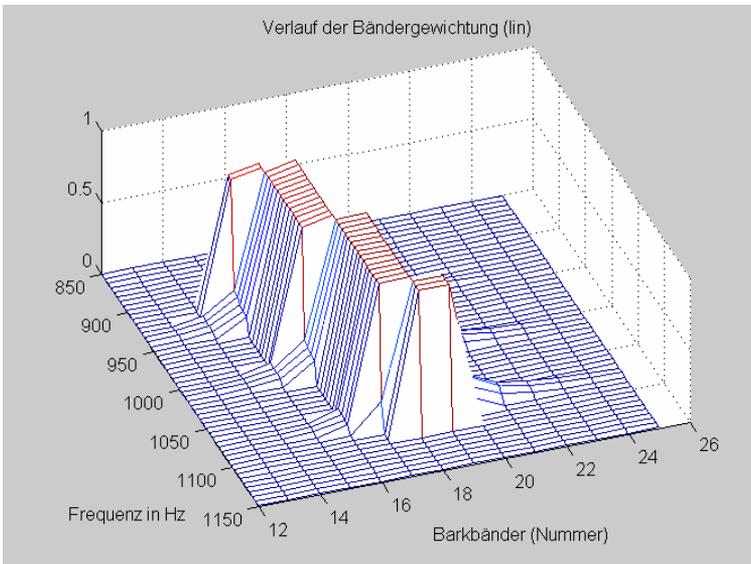


Abbildung 7.4.

Ausschnitt der Übertragungsfunktionen für die einzelnen Zielbänder, diese entsprechen den 47 Barkbandfilter – Bändergewichtungskurven. Unter der „Barkbänder (Nummer)“ verstehen sich die 47 überlappenden Bänder $z_i = i \cdot 0.5$ Bark, mit $i = 1$ bis 47.

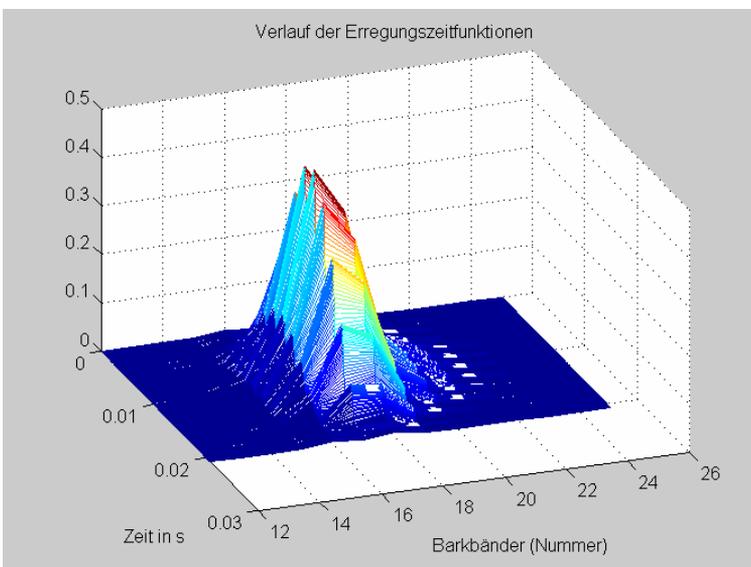


Abbildung 7.5.

Verlauf des Betrages der Erregungszeitfunktionen.

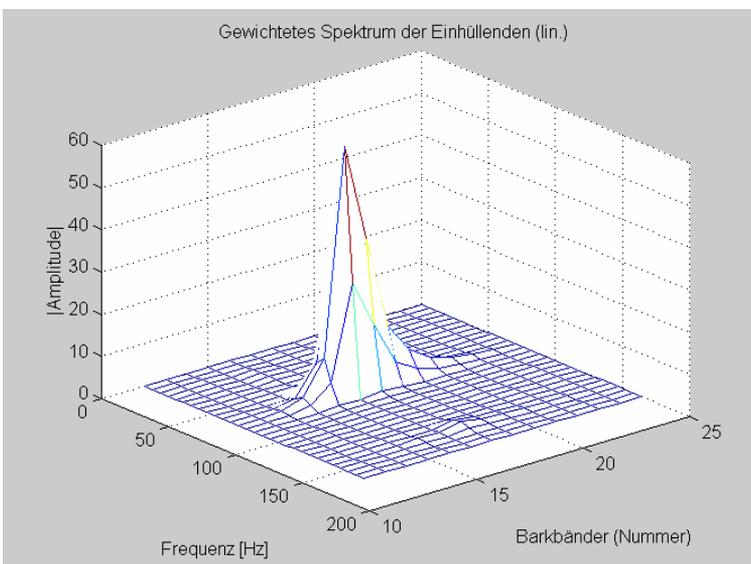


Abbildung 7.6.

Mit den modifizierten Aureskurven gewichtetes Spektrum der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen.

Abbildungen zur Berechnungsmethode 2

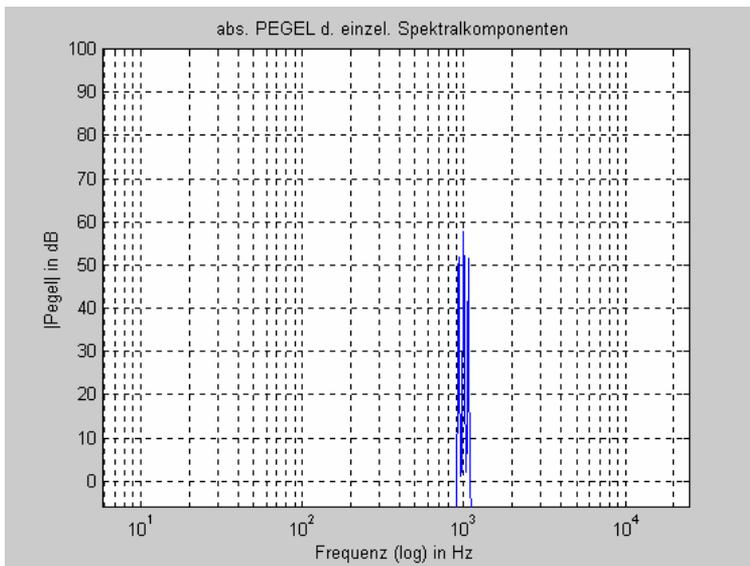


Abbildung 7.7.
Absoluter Pegel der einzelnen Spektralkomponenten.

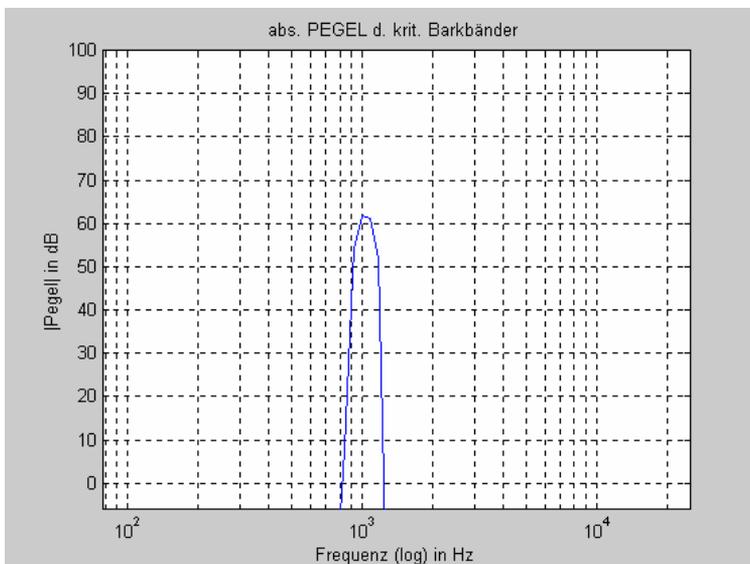


Abbildung 8.7.
Absoluter Pegel der jeweiligen kritischen Bänder.

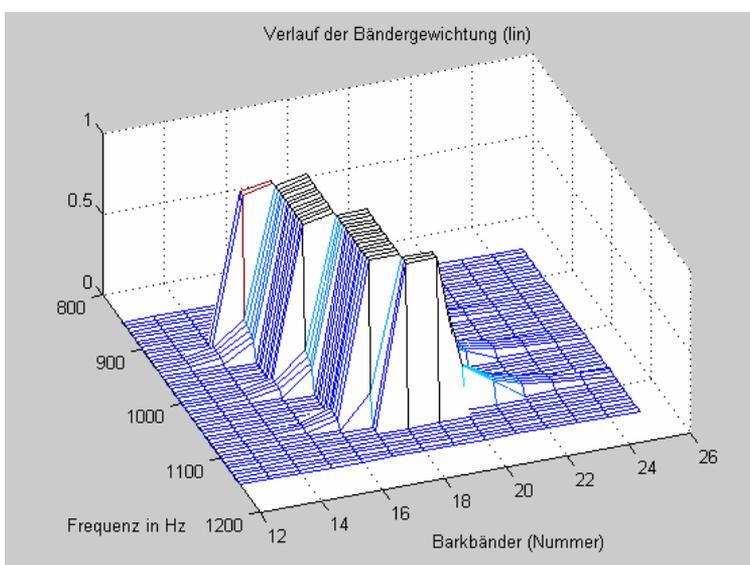


Abbildung 7.9.
Ausschnitt der Übertragungsfunktionen für die einzelnen Zielbänder, diese entsprechen den Barkbandfilter – Bändergewichtungskurven.

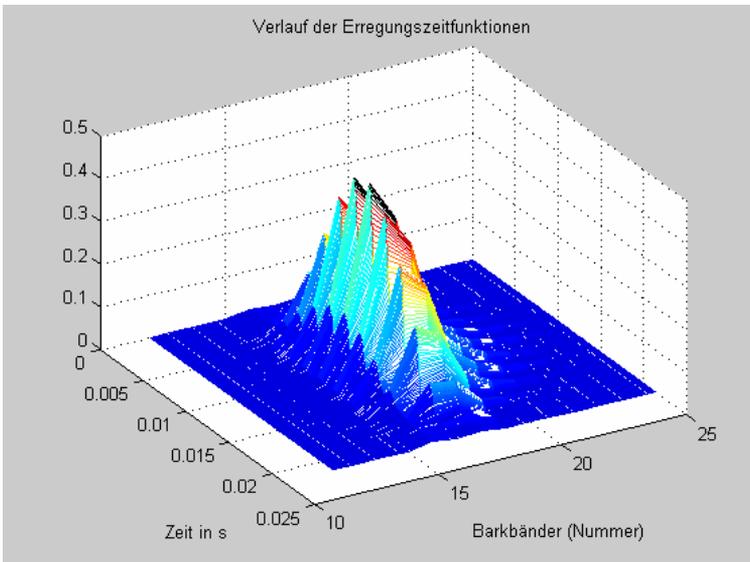


Abbildung 7.10.
Verlauf des Betrages der Erregungszeitfunktionen.

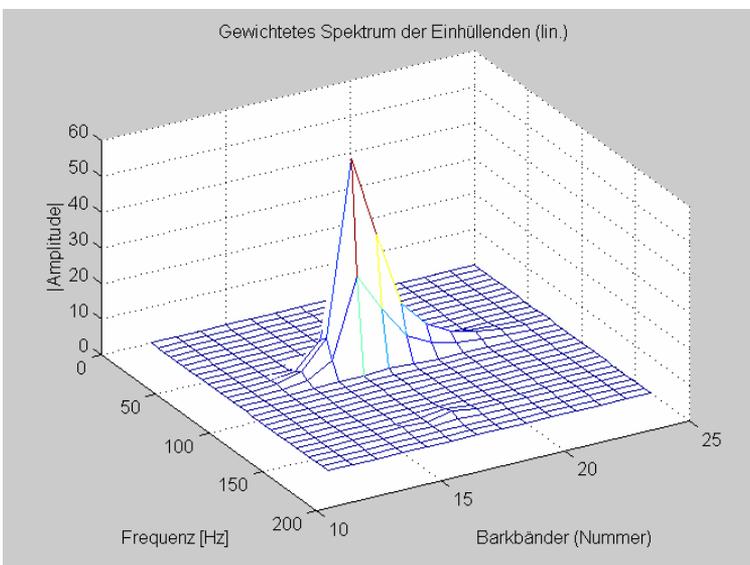


Abbildung 7.11.
Mit den modifizierten Aureskurven gewichtete Spektrum der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen.

Weißes Rauschen

Das untersuchte Signal ist weißes Rauschen mit folgender Spezifikation:

Pegel:60dB

Tabelle: 7.3.

Barkbänder z_i	Frequenz (Hz)	Berechnungsmethode 1				Berechnungsmethode 2			
		m_i^*	$h_{0,i}$	k_{n1}	k_{n2}	m_i^*	$h_{0,i}$	k_{n1}	k_{n2}
1	78	0	0	0	0	0	0	0	0
2	119	1	0.0000	0.1176	0	1	0.0001	0.3230	0.0000
3	161	1	0.0001	0	0	1	0.0001	0.1632	0.0000
4	204	1	0.0002	0.0813	0.0053	1	0.0001	0.2453	0.0000
5	250	1	0.0002	0	0	1	0.0001	0.3502	0.0542
6	297	1	0.0003	0.0316	0.0008	1	0.0003	0.0838	0.1221
7	347	1	0.0003	0.0819	0	1	0.0005	0.3192	0.0000
8	399	1	0.0004	0.0090	0	1	0.0006	0.0000	0.0989
9	453	1	0.0005	0.1981	0.0381	1	0.0005	0.2716	0.0000
10	509	1	0.0007	0	0	1	0.0006	0.0054	0.0737
11	569	1	0.0008	0.1162	0	1	0.0007	0.4752	0.0000
12	631	1	0.0009	0	0	1	0.0010	0.1886	0.1873
13	697	1	0.0010	0.0457	0	1	0.0011	0.3357	0.0039

14	765	1	0.0010	0.0698	0	1	0.0001	0.2793	0.0000
15	838	1	0.0009	0.0931	0.0087	1	0.0009	0.1148	0.0704
16	915	1	0.0007	0.0845	0.0041	1	0.0010	0.0961	0.0000
17	995	1	0.0010	0.0624	0.0028	1	0.0013	0.1148	0.0000
18	1081	1	0.0011	0.0147	0	1	0.0011	0.0062	0.0000
19	1172	1	0.0011	0.0150	0	1	0.0013	0.0000	0.0000
20	1268	1	0.0014	0.0076	0	1	0.0015	0.0745	0.0017
21	1370	1	0.0015	0.0999	0	1	0.0016	0.0449	0.0000
22	1479	1	0.0014	0.0076	0	1	0.0017	0.0684	0.0000
23	1595	1	0.0015	0.0999	0	1	0.0018	0.0449	0.0000
24	1720	1	0.0015	0.1241	0	1	0.0019	0.0549	0.0000
25	1853	1	0.0018	0.2508	0	1	0.0019	0.0000	0.0000
26	1997	1	0.0022	0.1241	0	1	0.0021	0.1216	0.0147
27	2152	1	0.0023	0.2508	0	1	0.0021	0.0000	0.0000
28	2319	1	0.0023	0.0493	0	1	0.0020	0.0668	0.0000
29	2501	1	0.0023	0	0	1	0.0024	0.0194	0.0000
30	2698	1	0.0024	0.0493	0	1	0.0026	0.0315	0.0000
31	2915	1	0.0027	0.0051	0	1	0.0025	0.0429	0.0018
32	3152	1	0.0031	0	0	1	0.0029	0.1261	0.0119
33	3413	1	0.0033	0.0051	0	1	0.0029	0.0903	0.0063
34	3702	1	0.0035	0.0335	0	1	0.0034	0.2195	0.0473
35	4025	1	0.0036	0.0482	0	1	0.0040	0.0984	0.0085
36	4386	1	0.0038	0.0335	0	1	0.0042	0.1540	0.0145
37	4794	1	0.0039	0.0500	0	1	0.0041	0.1406	0.0138
38	5258	1	0.0035	0	0	1	0.0038	0.0889	0.0070
39	5790	0.5489	0.0033	0.0502	0.0003	0.6655	0.0032	0.1592	0.0219
40	6407	0.6546	0.0027	0.0329	0.0003	0.5725	0.0028	0.0599	0.0000
41	7131	0.5228	0.0025	0.0536	0.001	0.4737	0.0026	0.0764	0.0053
42	7992	0.5311	0.0021	0.0329	0	0.4439	0.0020	0.0000	0.0000
43	9033	0.3988	0.0018	0.0051	0	0.3249	0.0017	0.1001	0.0078
44	10317	0.4178	0.0015	0	0	0.4256	0.0015	0.0734	0.0000
45	11941	0.4353	0.0012	0.0115	0	0.4214	0.0012	0.1233	0.0146
46	14061	0.6034	0.0006	0	0	0.4343	0.0006	0.1468	0.0145
47	16942	0	0	0.0229	0.0005	0.4276	0.0001	0.0989	0.0098

Tabelle: 7.4.

R – Einzahlwerte													
<i>Für Berechnungsmethode 1&2 mit modifizierte Aures – Gewichtungskurven.</i>													
Variante:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ber. meth.1	s=1	2.1045	1.3197	2.0148	1.2725	1.0076	0.6065	0.0455	0.0270	0.0350	0.0209	0.0450	0.0267
	s=1 k.	0.1911	0.1900	0.1716	0.1724	0.1239	0.1145	0.0051	0.0046	0.0036	0.0033	0.0065	0.0058
Ber. meth.2	s=1	3.8257	2.3463	3.0370	1.8813	2.5684	1.5157	0.5378	0.3232	0.3914	0.2369	0.4259	0.2487
	s=1 k.	0.3100	0.3043	0.2293	0.2281	0.3045	0.2758	0.0521	0.0486	0.0348	0.0330	0.0578	0.0507
Variante:		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ber. meth.1	s=2	0.5326	0.3384	0.5554	0.3555	0.2679	0.1610	0.0287	0.0169	0.0210	0.0124	0.0287	0.0169
	s=2 k.	0.1647	0.1626	0.1584	0.1590	0.1067	0.0948	0.0095	0.0086	0.0064	0.0058	0.0121	0.0104
Ber. meth.2	s=2	0.7893	0.4790	0.6198	0.3819	0.7091	0.4201	0.1974	0.1171	0.1455	0.0871	0.1922	0.1132
	s=2 k.	0.2269	0.2167	0.1630	0.1596	0.2790	0.2442	0.0598	0.0552	0.0401	0.0377	0.0792	0.0683

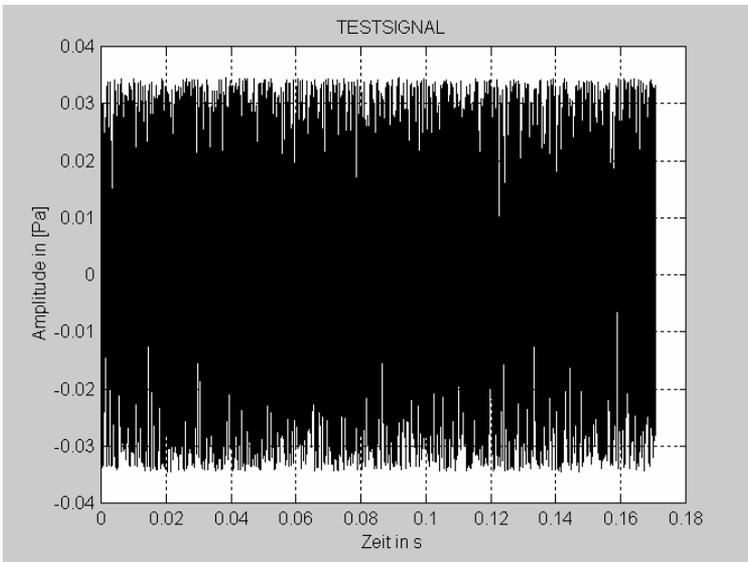


Abbildung 7.12.
Weißes Rauschen 60 dB.

Abbildungen zur Berechnungsmethode 1

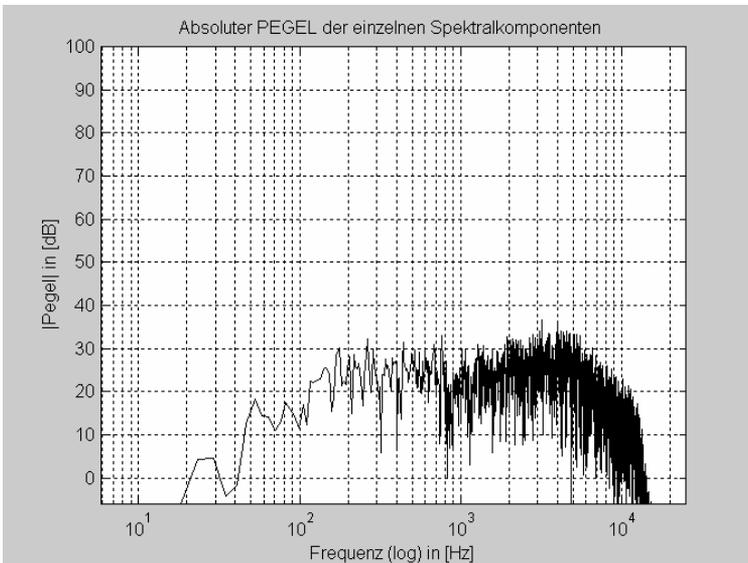


Abbildung 7.13.
Absolute Pegel der einzelnen
Spektralkomponenten.

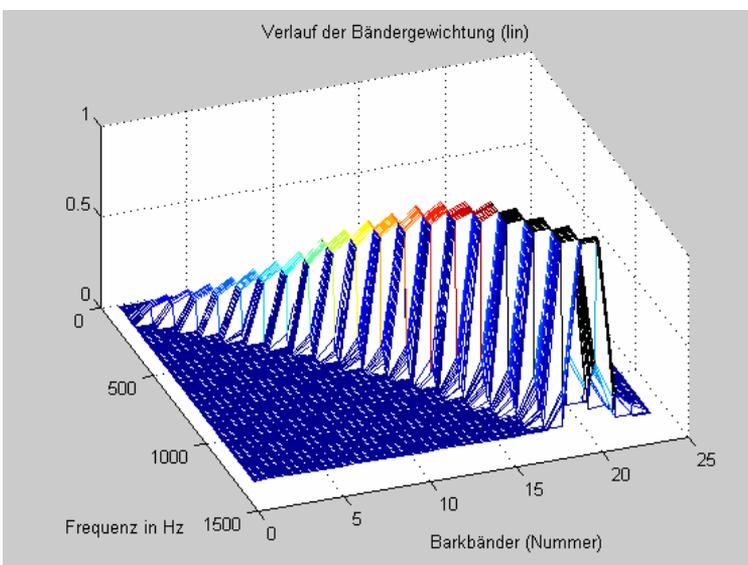


Abbildung 7.14.
Ausschnitt der Übertragungsfunktionen
für die einzelnen Zielbänder, diese
entsprechen den Barkbandfilter –
Bändergewichtungskurven.

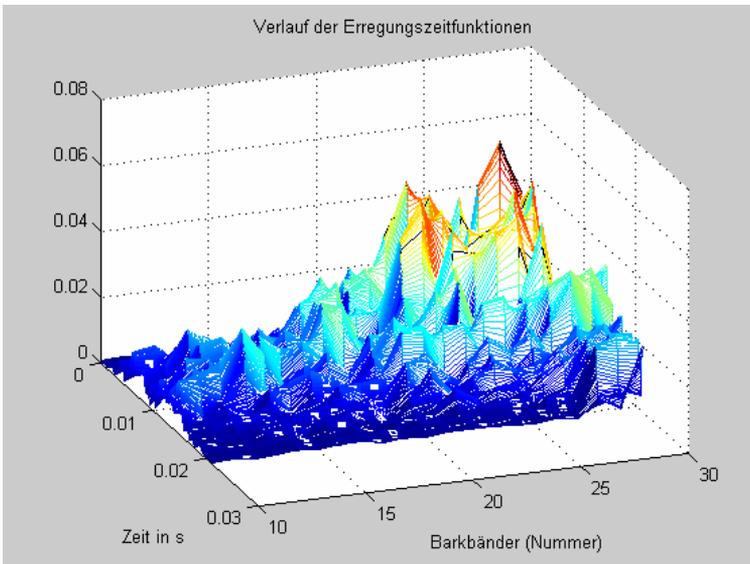


Abbildung 7.15.
Verlauf des Betrags der Erregungszeitfunktionen.

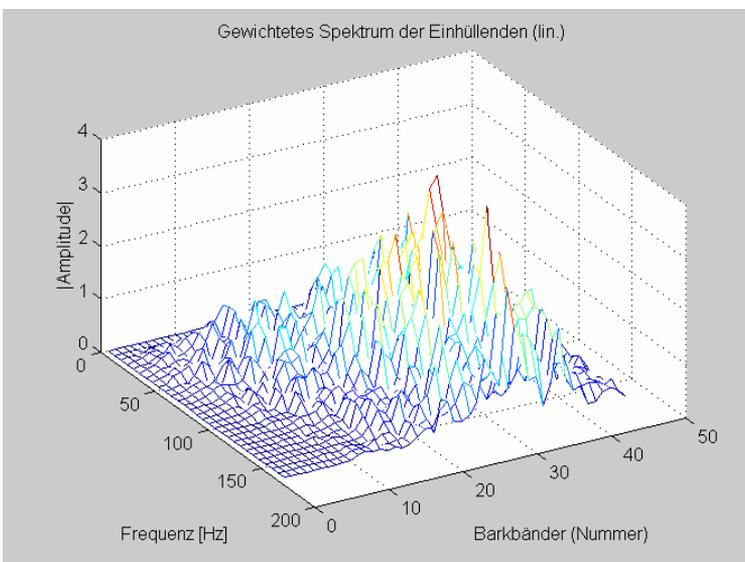


Abbildung 7.16.
Gewichtetes Spektrum der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen.

Abbildungen zur Berechnungsmethode 2

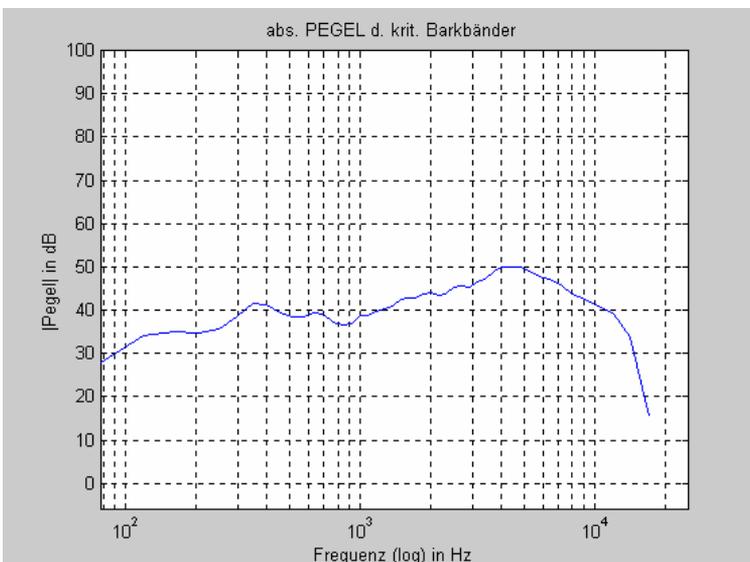


Abbildung 7.16.
Absolute Pegel der jeweiligen kritischen Barkbänder.

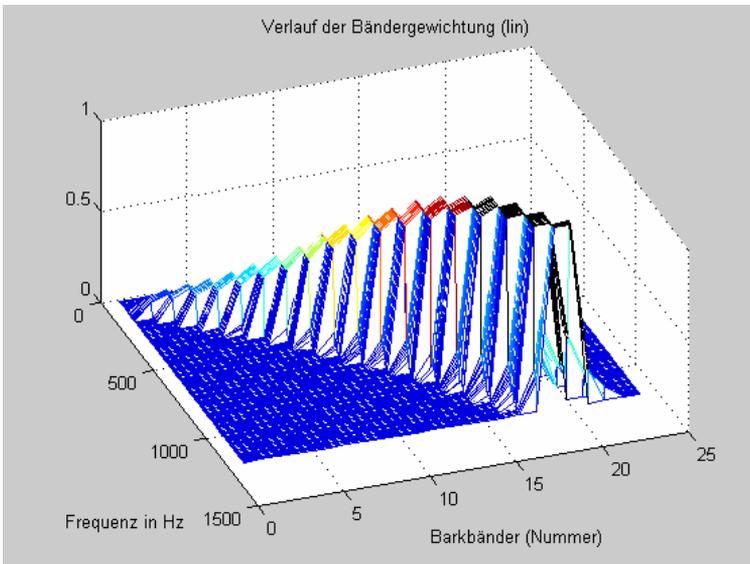


Abbildung 7.17.
Ausschnitt der Übertragungsfunktionen für die einzelnen Zielbänder, diese entsprechen den Barkbandfilter – Bändergewichtungskurven.

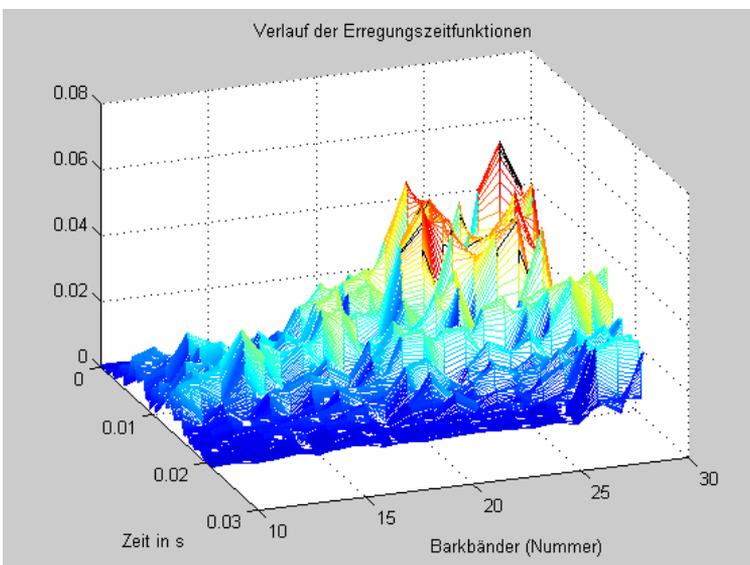


Abbildung 7.18.
Verlauf des Betrags der Erregungszeitfunktionen.

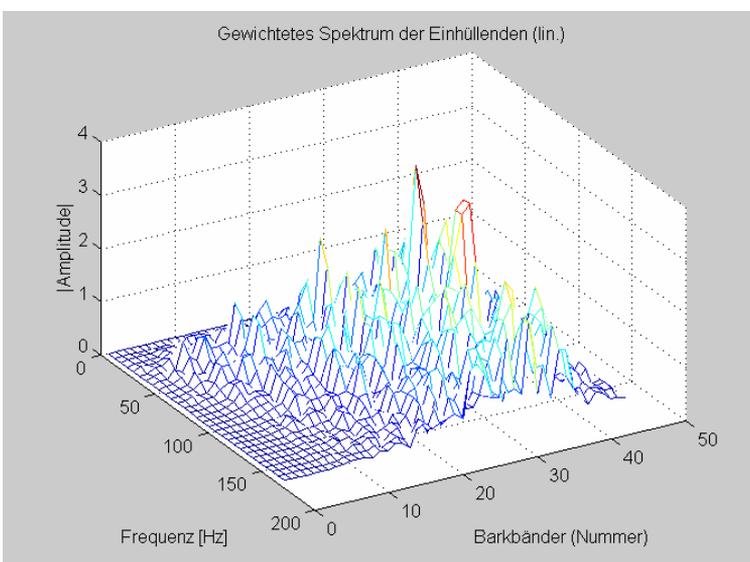


Abbildung 7.19.
Gewichtetes Spektrum der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen.

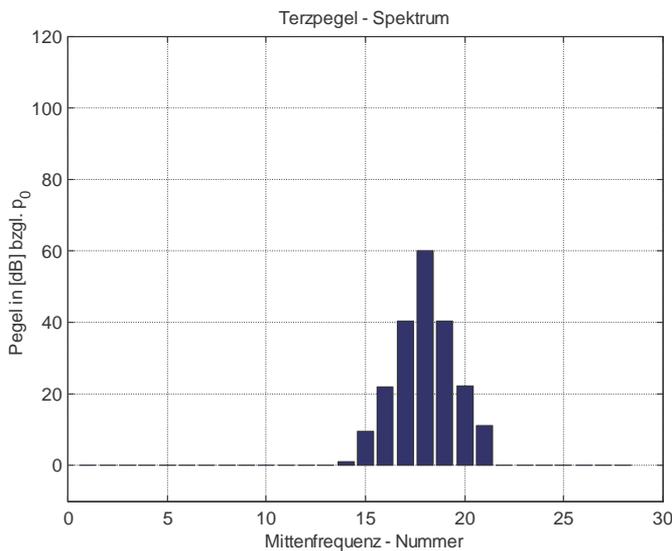
7.2 Referenzbeispiele zur Lautheit und Schärfe

Für Freifeldmeßwerte (d.h. ebene Wellenausbreitung); Zur Berechnung wird der Frequenzbereich 25 Hz bis 12,5 kHz in 28 Terzbänder (ANSI S1.6-1984 Standard Format) unterteilt. Deren Mittenfrequenz wird eine „Mittenfrequenz-Nummer“ zugewiesen.

Sinus

Das untersuchte Signal ist ein Sinus mit folgenden Spezifikationen:

Pegel:.....60dB Frequenz:.....1kHz



Berechnete Werte:

$$N = 4.0960 \text{ sone}$$

$$LN = 60.3422 \text{ phon}$$

$$S = 0.9927 \text{ acum}$$

Abbildung 7.20.

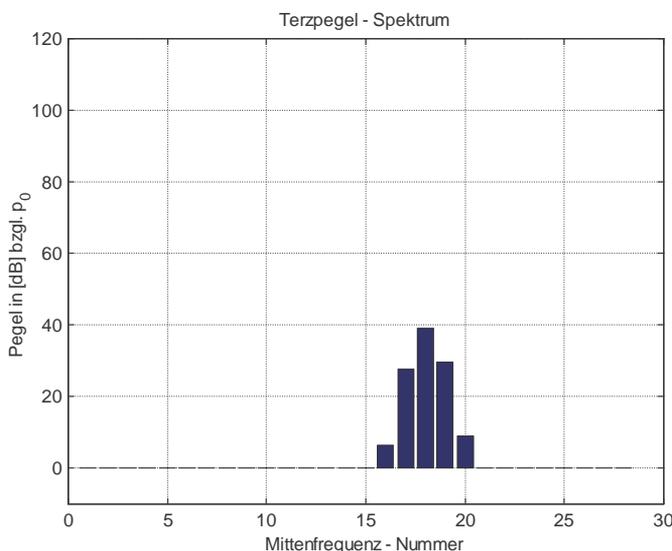
Terzpegelspektrum für einen 1kHz Sinus mit 60 dB.

Terzbandrauschen

Das untersuchte Signal ist ein bandpaßgefiltertes Rauschsignal mit folgenden Spezifikationen:

Leistungsdichte:.....60 dB/Hz Mittenfrequenz:.....1 kHz

Bandbreite:.....ca. 160 Hz (1CB bei 1kHz)



Berechnete Werte:

$$N = 1.1380 \text{ sone}$$

$$LN = 41.8650 \text{ phon}$$

$$S = 1.0038 \text{ acum}$$

Abbildung 7.21.

Terzpegelspektrum für ein terzpaßgefiltertes Rauschsignal.

7.3 Referenzbeispiele zur Klanghaftigkeit

Sinus

Das untersuchte Signal ist ein Sinus mit folgenden Spezifikationen:

Pegel:.....60dB Frequenz:.....1kHz

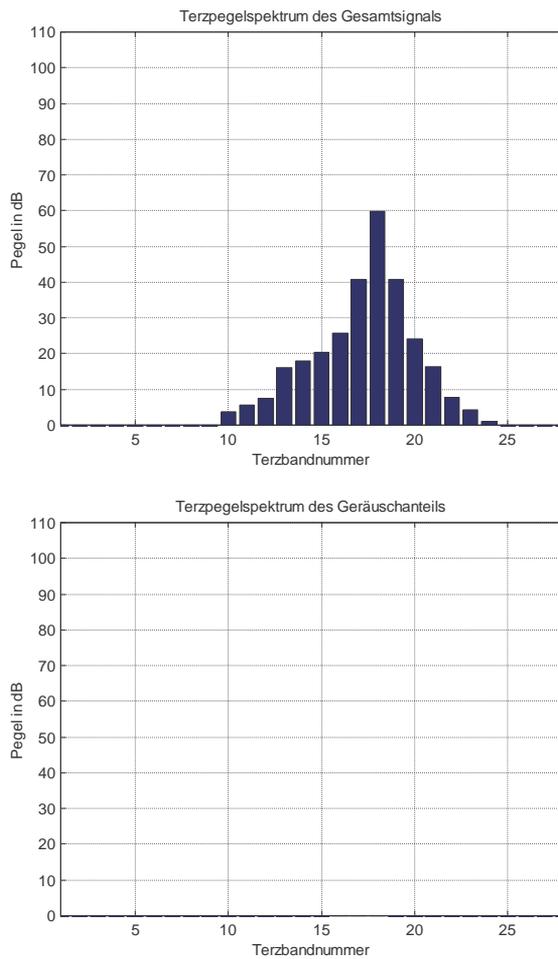


Abbildung 7.22.
Terzpegelspektrum des Gesamtsignals (oben),
Terzpegelspektrum des Geräuschanteils (unten).

Berechneter Wert: Klanghaftigkeit $K = 1$

Terzbandrauschen

Das untersuchte Signal ist ein bandpaßgefiltertes Rauschsignal mit folgenden Spezifikationen:

Leistungsdichte:.....16 dB/Hz

Mittenfrequenz:.....1 kHz

Bandbreite:.....ca. 160 Hz (ca. 1CB bei 1kHz)

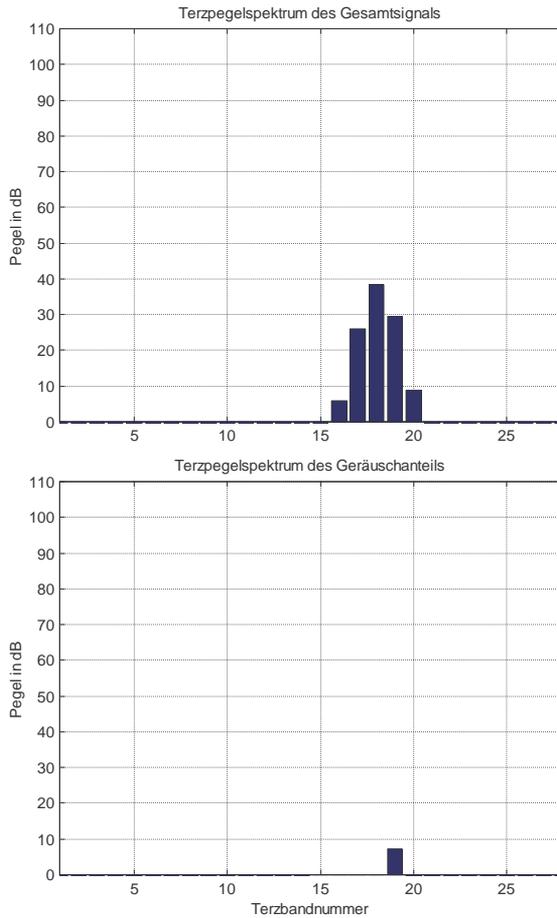


Abbildung 7.23.

Terzpegelspektrum des Gesamtsignals (oben),
Terzpegelspektrum des Geräuschanteils (unten).

Berechneter Wert:

Klanghaftigkeit $K = 0.9936$

Weißes Rauschen

Das untersuchte Signal ist weißes Rauschen mit 60dB.

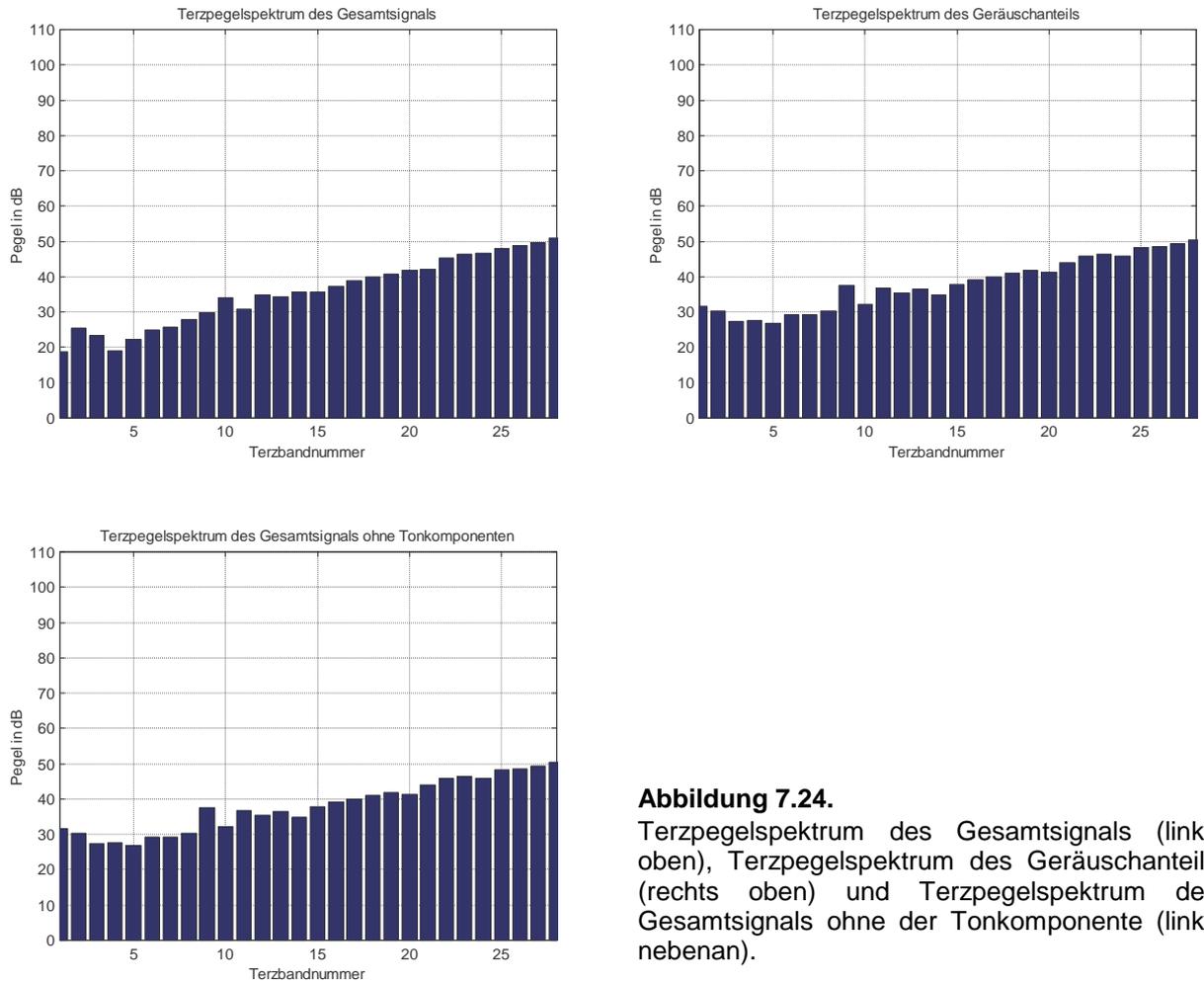


Abbildung 7.24.

Terzpegelspektrum des Gesamtsignals (links oben), Terzpegelspektrum des Geräuschanteils (rechts oben) und Terzpegelspektrum des Gesamtsignals ohne der Tonkomponente (links nebenan).

Berechneter Wert: Klanghaftigkeit $K = 0$

7.4 Referenzbeispiele zur Schwankungsstärke

Amplitudenmodulierter Sinus

Das untersuchte Signal ist ein amplitudenmodulierter Sinus mit folgenden Spezifikationen:

Pegel:60dB Trägerfrequenz:.....1 kHz

Modulationsfrequenz:..4 Hz Modulationsgrad:.....1

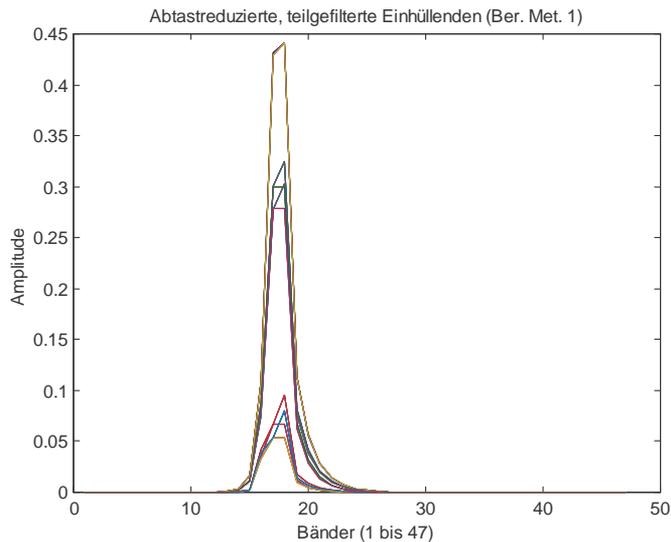


Abbildung 7.25.

Abtastreduzierten, teilgefilterten Einhüllenden der Bänder 1 bis 47 für die Berechnungsmethode 1. Sie sind zeitlich übereinandergelagert. Diese berechnet die Erregungsmuster aus den Pegeln der einzelnen Spektralkomponenten.

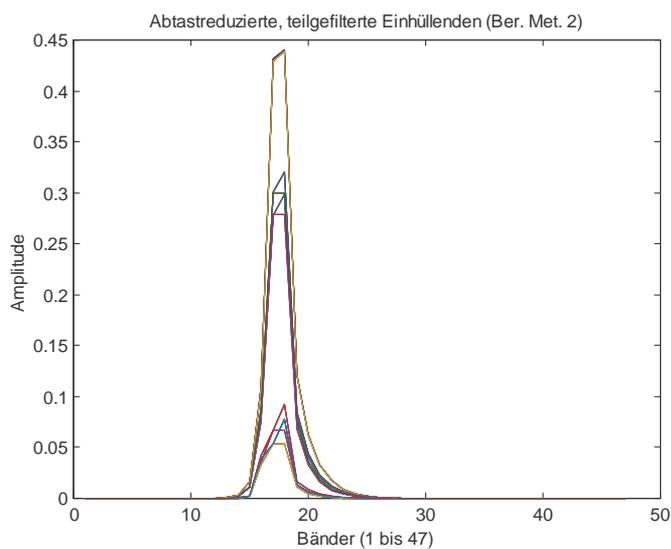


Abbildung 7.26.

Abtastreduzierten, teilgefilterten Einhüllenden der Bänder 1 bis 47 für die Berechnungsmethode 2. Sie sind zeitlich übereinandergelagert. Diese berechnet die Erregungsmuster aus den Pegeln der kritischen Bänder.

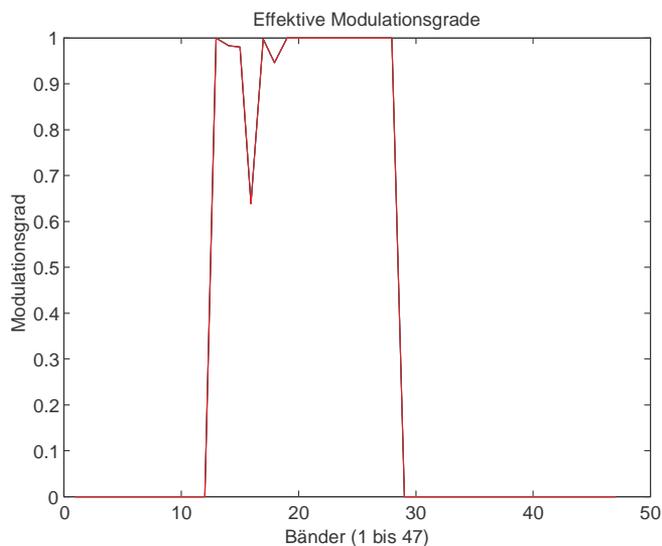


Abbildung 7.27.
Effektive Modulationsgrade der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen für die Bänder 1 bis 47.

Tabelle: 7.5.

Effektiven Modulationsgrade der 47 bandpaßgefilterten Einhüllenden nach den Berechnungsmethoden 1 & 2								
Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2
1	0.0000	0.0000	17	0.9964	0.9964	33	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	18	0.9400	0.9456	34	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	19	1.0000	1.0000	35	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	20	1.0000	1.0000	36	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	21	1.0000	1.0000	37	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	22	1.0000	1.0000	38	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	23	1.0000	1.0000	39	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	24	1.0000	1.0000	40	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	25	1.0000	1.0000	41	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	26	1.0000	1.0000	42	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	27	1.0000	1.0000	43	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	28	0.0000	1.0000	44	0.0000	0.0000
13	1.0000	1.0000	29	0.0000	0.0000	45	0.0000	0.0000
14	0.9825	0.9825	30	0.0000	0.0000	46	0.0000	0.0000
15	0.9793	0.9793	31	0.0000	0.0000	47	0.0000	0.0000
16	0.6394	0.6394	32	0.0000	0.0000			

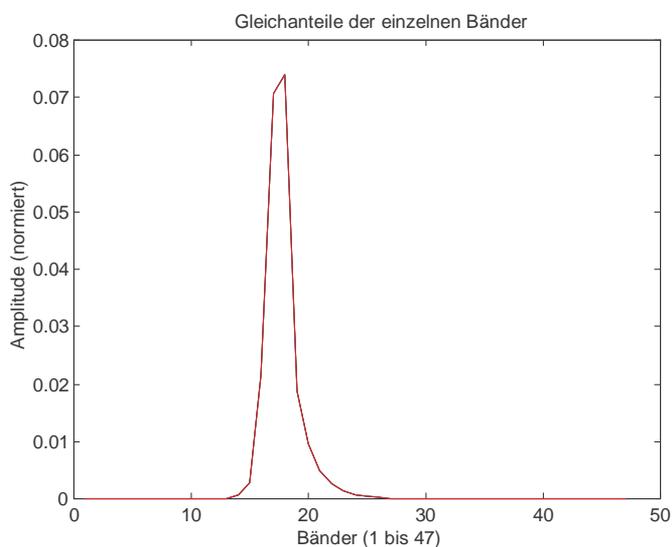


Abbildung 7.28.
Gleichanteile der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen für die Bänder 1 bis 47.

Tabelle: 7.6.

Gleichanteile der 47 bandpaßgefilterten Einhüllenden nach den Berechnungsmethoden 1 & 2								
Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2
1	0.0000	0.0000	17	0.0706	0.0706	33	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	18	0.0745	0.0740	34	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	19	0.0177	0.0188	35	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	20	0.0087	0.0095	36	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	21	0.0043	0.0049	37	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	22	0.0021	0.0025	38	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	23	0.0011	0.0013	39	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	24	0.0005	0.0007	40	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	25	0.0003	0.0003	41	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	26	0.0001	0.0002	42	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	27	0.0001	0.0001	43	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	28	0.0000	0.0000	44	0.0000	0.0000
13	0.0001	0.0001	29	0.0000	0.0000	45	0.0000	0.0000
14	0.0005	0.0005	30	0.0000	0.0000	46	0.0000	0.0000
15	0.0027	0.0027	31	0.0000	0.0000	47	0.0000	0.0000
16	0.0215	0.0215	32	0.0000	0.0000			

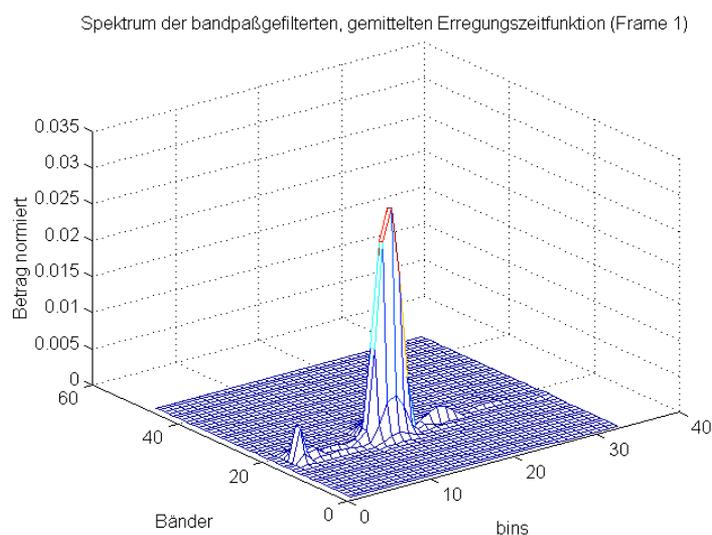


Abbildung 7.29.

Spektrum des normierten Betrags der bandpaßgefilterten, abtast-reduzierten Erregungszeitfunktionen der Bänder 1 bis 47 (nur positives Spektrum).

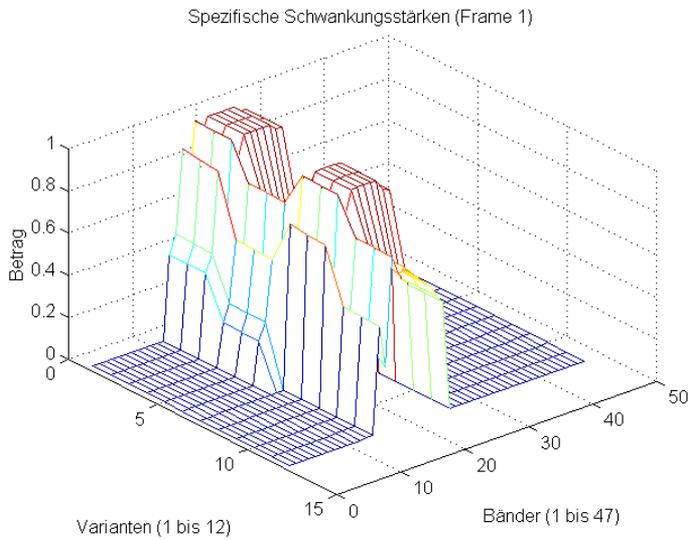


Abbildung 7.30.
Spezifische Teilschwankungsstärken für die Bänder 1 bis 47 nach den Berechnungsvarianten 1 bis 12.

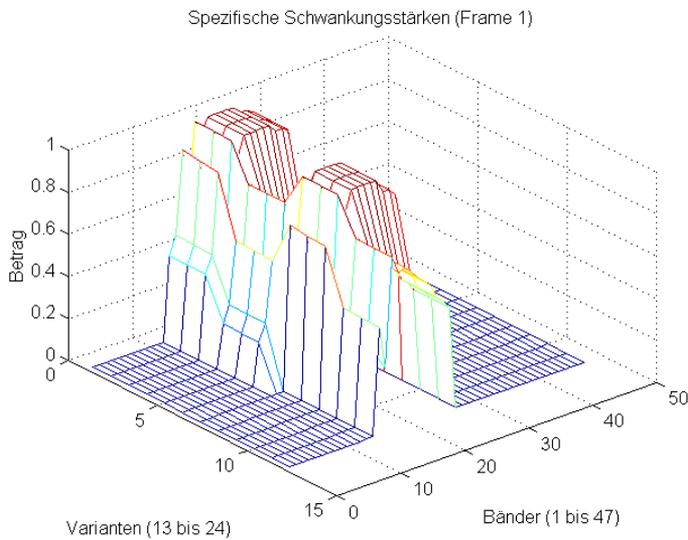


Abbildung 7.31.
Spezifische Teilschwankungsstärken für die Bänder 1 bis 47 nach den Berechnungsvarianten 13 bis 24.

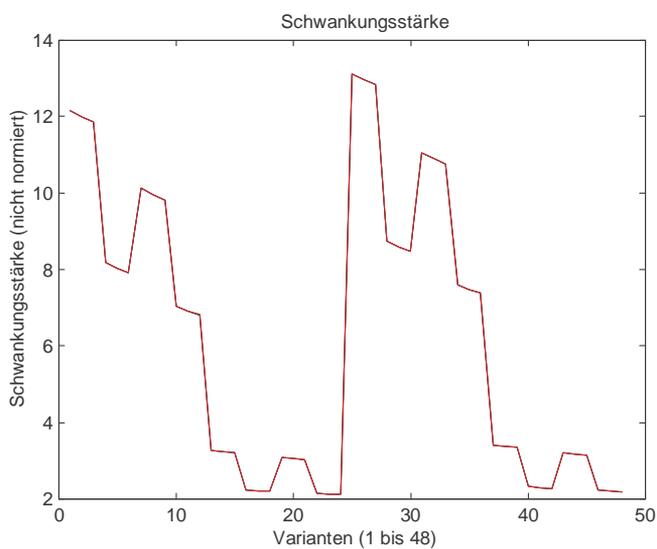


Abbildung 7.32.
Schwankungsstärke Einzahlwerte für die 48 Berechnungsvarianten.

Tabelle: 7.7.

Schwankungsstärke – Einzahlwerte nach den 48 Berechnungsvarianten								
Variante	s = 1	Variante	s = 2	Variante	s = 1	Variante	s = 2	Gewichtung:
1	12.1650	13	3.2671	25	13.1362	37	3.4074	ka*m (arithmetisch)
2	11.9944	14	3.2331	26	12.9681	38	3.3754	ka*m ^{1.5}
3	11.8502	15	3.2075	27	12.8262	39	3.3514	ka*m ²
4	8.1612	16	2.2467	28	8.7184	40	2.3204	ka*m*h ^{0.07}
5	8.0304	17	2.2172	29	8.5897	41	2.2925	ka*m ^{1.5} *h ^{0.07}
6	7.9198	18	2.1948	30	8.4810	42	2.2713	ka*m ² *h ^{0.07}
7	10.1282	19	3.0754	31	11.0521	43	3.2118	kg*m (quad. geometr.)
8	9.9643	20	3.0412	32	10.8905	44	3.1796	kg*m ^{1.5}
9	9.8265	21	3.0156	33	10.7550	45	3.1556	kg*m ²
10	7.0475	22	2.1554	34	7.6037	46	2.2304	kg*m*h ^{0.07}
11	6.9210	23	2.1258	35	7.4791	47	2.2024	kg*m ^{1.5} *h ^{0.07}
12	6.8145	24	2.1035	36	7.3745	48	2.1814	kg*m ² *h ^{0.07}

Sinus

Das untersuchte Signal ist ein Sinus mit folgender Spezifikationen:

Pegel:60dB

Frequenz:.....1 kHz

Tabelle: 7.8.

Effektiven Modulationsgrade der 47 bandpaßgefilterten Einhüllenden nach den Berechnungsmethoden 1 & 2								
Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2
1	0.0000	0.0000	17	0.0957	0.0957	33	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	18	0.0957	0.0957	34	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	19	0.0957	0.0957	35	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	20	0.0957	0.0957	36	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	21	0.0957	0.0957	37	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	22	0.0957	0.0957	38	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	23	0.0957	0.0957	39	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	24	0.0956	0.0957	40	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	25	0.0956	0.0956	41	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	26	0.0956	0.0956	42	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	27	0.0000	0.0000	43	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	28	0.0000	0.0000	44	0.0000	0.0000
13	0.0956	0.0956	29	0.0000	0.0000	45	0.0000	0.0000
14	0.0957	0.0957	30	0.0000	0.0000	46	0.0000	0.0000
15	0.0957	0.0957	31	0.0000	0.0000	47	0.0000	0.0000
16	0.0957	0.0957	32	0.0000	0.0000			

Tabelle: 7.9.

Gleichanteile der 47 bandpaßgefilterten Einhüllenden nach den Berechnungsmethoden 1 & 2								
Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2	Bänder	Methode 1	Methode 2
1	0.0000	0.0000	17	0.0706	0.0706	33	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	18	0.0723	0.0720	34	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	19	0.0171	0.0178	35	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	20	0.0082	0.0088	36	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	21	0.0040	0.0044	37	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	22	0.0019	0.0022	38	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	23	0.0009	0.0011	39	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	24	0.0005	0.0006	40	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	25	0.0002	0.0003	41	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	26	0.0001	0.0001	42	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	27	0.0000	0.0000	43	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	28	0.0000	0.0000	44	0.0000	0.0000
13	0.0001	0.0001	29	0.0000	0.0000	45	0.0000	0.0000
14	0.0006	0.0006	30	0.0000	0.0000	46	0.0000	0.0000
15	0.0027	0.0027	31	0.0000	0.0000	47	0.0000	0.0000
16	0.0138	0.0138	32	0.0000	0.0000			

Tabelle: 7.10.

Schwankungsstärke – Einzahlwerte nach den 48 Berechnungsvarianten (nicht normierte und normierte Werte)											
Var.	s = 1	norm.	Var.	s = 2	norm.	Var.	s = 1	norm.	Var.	s = 2	norm.
1	1.1285	0.0298	13	0.3118	0.0268	25	1.1230	0.0855	37	0.3102	0.0910
2	0.3490	0.0093	14	0.0964	0.0084	26	0.3474	0.0268	38	0.0960	0.0284
3	0.1080	0.0966	15	0.0298	0.0879	27	0.1074	0.0084	39	0.0297	0.0089
4	0.7661	0.0303	16	0.2171	0.0276	28	0.7664	0.0879	40	0.2170	0.0935
5	0.2369	0.0095	17	0.0671	0.0086	29	0.2371	0.0276	41	0.0671	0.0293
6	0.0733	0.0949	18	0.0208	0.0827	30	0.0733	0.0086	42	0.0208	0.0091
7	0.9227	0.0297	19	0.2918	0.0259	31	0.9135	0.0827	43	0.2889	0.0899
8	0.2854	0.0093	20	0.0903	0.0081	32	0.2826	0.0259	44	0.0894	0.0281
9	0.0883	0.0960	21	0.0279	0.0851	33	0.0874	0.0081	45	0.0276	0.0088
10	0.6504	0.0301	22	0.2068	0.0268	34	0.6469	0.0851	46	0.2058	0.0923
11	0.2012	0.0094	23	0.0640	0.0084	35	0.2001	0.0268	47	0.0637	0.0289
12	0.0622	0.0855	24	0.0198	0.0910	36	0.0619	0.0084	48	0.0197	0.0090

Literaturverzeichnis

Literatur zur Rauigkeit:

Aures W., (1984). *Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse*. Dissertation, TU München.

Aures W., (1985a). „Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale“, *Acustica* 59, pp 130-141.

Aures W., (1985b). „Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit“, *Acustica* 58, pp. 268-281.

Cardozo B. L. und van der Ven K. G., (1979). „Estimation of Annoyance due to Low Level Sound“, *Appl. Acoust.* 12, pp. 389-396.

Cardozo B. L. und Van Lieshout R., (1981a). „Estimation of Annoyance of Sounds of Different Character“, *Appl. Acoust.* 14, pp. 323-329.

Cardozo B. L. und Van Lieshout R., (1981b). „Splitting Sound Annoyance into Two Components Level and Sound Character“. Annual Progress Report 16, IPO.

Daniel P., (1995). *Berechnung und kategoriale Beurteilung der Rauigkeit und Unangenehmheit von synthetischen und technischen Schallen*. Dissertation, C. v. O. Universität Oldenburg.

Daniel P. und Weber R., (1993). „Calculating psychoacoustical roughness“. In Schick A., Hellbrück J. und Weber R., Hrsgb., *Contributions to Psychological Acoustics: Results of the Sixth Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics*, pp. 251-265, Bibliotheks- und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

Daniel P. und Weber R., (1997). „Psychoacoustical Roughness: Implementation of an optimized Model“, *Acustica* Vol.83, pp. 113-123.

Fastl H., (1977). „Roughness and temporal masking patterns of sinusoidally amplitude modulated broadband noise“. In Evans, E. F. und Wilson, J. P., Hrsgb., *Psychophysics and Physiology of Hearing*, pp. 403-414, London. Academic Press.

Geiseler C. und Rhode W., (1982). „The phases of basilar-membrane vibrations“. *J. Acoust. Soc. Am.* 71(5), May, pp. 1201 – 1203.

Green D., Richards V. und Onsan Z., (1990). „Sensitivity to envelope coherence“. *J. Acoust. Soc. Am.* 87(1), January, pp. 323-329.

Hashimoto T., Hatano S. und Takao H., (1991a). „Subjective Estimation of Running Car Interior Noise by Real and Artificial Sounds“. *INTER•NOISE* 91, pp. 871-874, Sidney.

Hashimoto T., Hatano S. und Takao H., (1991b). „Subjective Estimation on Unpleasantness of Running Car Interior Noise by Real and Artificial Sounds“. *INTER•NOISE* 91, pp. 875-878, Sidney.

- Hashimoto T.** und **Hatano S.**, (1994). „Roughness level as a measure for estimation unpleasantness: modification of roughness level by modulation frequencies“. INTER•NOISE 94, pp. 887-892, Yokohama.
- Höldrich R.** und **Pflüger M.**, (1998a). „Ein allgemeines Modell für Modulationsparameter“. Interner Bericht, Institut f. Angewandte Systemtechnik, Akustik und Lärmschutz, Joanneum Research.
- Höldrich R.** und **Pflüger M.**, (1998b). „Ein Algorithmus für Modulationsparameter“. Interner Bericht, Institut f. Angewandte Systemtechnik, Akustik und Lärmschutz, Joanneum Research..
- Kameoka A.** und **Kuriyagawa M.**, (1969a). „Consonance theory Part I: Consonance of dyads“, J. Acoust. Soc. Am. 45, pp. 1451.
- Kameoka A.** und **Kuriyagawa M.**, (1969b). „Consonance theory Part II: Consonance of complex tones and ist calculation method“ , J. Acoust. Soc. Am. 45, pp. 1460.
- Levelt W.**, van de **Geer J.** und **Plomp R.**, (1966). „Triadic comparisons of musical intervals“ , Brit. J. Math. Statist. Psychol. 19, pp. 163.
- Mellert V.** und **Weber R.**, (1981). „Physikalische Faktoren der Lästigkeit“. In Schick, A., Hrsgb., *Akustik zwischen Physik und Psychologie*, S. 48, Stuttgart. Klett-Cotta.
- Mellert V.** und **Weber R.**, (1984). „Gehörbezogene Verfahren zur Lärmbeurteilung“. In Walcher K. P. und Schick A., Hrsgb., *Bedeutungslehre des Schalls*, S. 183, Bern. Verlag Peter Lang.
- Plomp R.** und **Levelt W.**, (1965). „Tonal Consonance and Critical Bandwidth“, J. Acoust. Soc. Am. 38, pp. 548-560.
- Plomp R.** und **Steeneken H.**, (1968). „Interference between two simple tones“, J. Acoust. Soc. Am. 43, pp. 883-884.
- Roederer J.**, (1977). *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sotttek R.**, (1993). *Modelle zur Siganlverarbeitung im menschlichen Gehör*. Dissertation TU Aachen.
- Springer N.** und **Weber R.**, (1994). „Existenzbereich der R-Rauhigkeit“. In Fortschritte der Akustik, DAGA '94, Seite 1221-1224, DPG-GmbH, Bad Honnef.
- Terhardt E.**, (1968a). „Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke“, Acustica 20, pp. 215-224.
- Terhardt E.**, (1974). „On the Preception of Periodic Sound Fluctuation (Roughness)“, Acustica 30, pp. 201-213.
- Terhardt E.**, (1976). „Ein psychoakustisches begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz“, Acustica 36, pp. 121-137.

Terhardt E., (1984). *Wohlklang und Lärm aus psychophysikalischer Sicht*. In Walcher, K. P. und Schick, A., Hrsgb., *Bedeutungslehre des Schalls*, S. 403, Bern. Verlag Peter Lang.

Terhardt E. und Stoll G., (1981). „Skalierung des Wohlklangs (der sensorischen Konsonanz) von 17 Umweltschallen und Untersuchung der beteiligten Hörparameter“, *Acustica* 48, pp. 248-253.

Terhardt E., Stoll G. und Seewann M., (1982). „Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals“, *J. Acoust. Soc. Am.* 71, pp. 679-688.

v. Bismarck G., (1974a). „Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds“, *Acustica* 30, pp. 159-172.

v. Bismarck G., (1974b). „Timbre of steady sounds: a factorial investigation of its verbal attributes“, *Acustica* 30, pp. 146-159.

v. Helmholtz H., (1868). *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 7., unveränderte Auflage (1. Aufl. Braunschweig 1863).

Vogel A., (1975b). „Über den Zusammenhang zwischen Rauigkeit und Modulationsgrad“, *Acustica* 32, pp. 300.

Widmann U., (1992). *Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung*. Dissertation, TU München.

Zwicker E., (1982). *Psychoakustik*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Zwicker E., (1991). „A proposal for defending and calculating the unbiased annoyance“. In Schick A. und other, Hrsgb., *Contributions to Psychological Acoustics*, pp. 187-202. Bibliotheks- und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

Zwicker E. und Fastl H., (1990). *Psychoakustics*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Literatur zur Lautheit:

Fastl H., (1982). *Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern*. Dissertation, Freiburg, Hochschulverlag.

Flatz W., (1997). *Entwicklung einer Analysesoftware zur Berechnung akustischer Parameter für die Korrelation mit der subjektiv empfundenen Lästigkeit von Geräuschen*. Diplomarbeit, Inst. f. Elektronische Musik Universität der Künste Graz und Inst. f. Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung TU Graz.

Moor B., und **Glasberg B.**, (1996). „A Revision of Zwicker’s Loudness Model“, *Acoustica united with acta acoustica*, pp. 335-345.

Pflüger M., **Höldrich R.**, **Riedler W.**, (1996a). „dB(ELC) – dynamische Phonkurvenanpassung als Erweiterung des dB(A)“, Konferenz der Deutschen Gesellschaft für Akustik, DAGA 96, Bonn.

Pflüger M., **Höldrich R.**, **Riedler W.**, (1996b). „dB(ELC) – A proposal to modify the dB(A)“, INTER NOISE, Liverpool.

Pflüger M., **Höldrich R.**, **Riedler W.**, (1997). „A nonlinear model of the peripheral auditory system“, AES 103rd Convention, New York.

Ronacher A., (1996). „Praktische Anwendung der Psychoakustik; Geräuschgestaltung: Über die Psychoakustik zur Kundenzufriedenheit“, Beitrag zum FVV-Workshop, VDMA-Haus, Frankfurt am Main.

Ronacher A., und **Stückelschwaiger W.**, (1994). „Entwicklung eines objektiven Beurteilungsmaßstabes für die subjektive Lästigkeit von Motorengeräuschen“, Beitrag zur Fachtagung: Soundengineering / kundenbezogene Akustikentwicklung in der Fahrzeugtechnik, Haus der Technik, Essen.

Stevens S. S., (1955). „The Measurement of Loudness“, *J. Acoust. Soc. Am.*, Bd. 27(5), pp. 815-829.

Zollner W., (1996). „Psychoakustische Meßtechnik“, Cortex electronic GmbH, Erzb.-Buchberger-Allee 14, D_93051 Regensburg.

Zwicker E., (1982). *Psychoakustik*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Zwicker E. und **Fastl H.**, (1990). *Psychoacoustics – Facts and Models*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Zwicker E. und **Feldtkeller R.**, (1967). *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart.

Literatur zur Schärfe:

Aures W., (1984). *Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse*. Dissertation, TU München.

Fastl H., (1993). „Psychoakustik II“. Beitrag zum Tagungsband des internationalen Seminars: Psychoakustik – Gehörbezogene Lärmbewertung, im Kongreßzentrum Innsbruck-Igls, Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung.

Geiseler, C. Rhode, W., (1982). „The phases of basilar-membrane vibrations“. *J. Acoust. Soc. Am.* 71(5), May 1982, pp 1201 – 1203.

v. Bismarck G., (1974). „Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds“, *Acustica* 30, pp. 159-172.

Widmann U., (1992). *Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung*. Dissertation, TU München.

Zwicker E., (1982). *Psychoakustik*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Zwicker E. und Fastl H., (1990). *Psychoacoustics – Facts and Models*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Literatur zur Klanghaftigkeit:

Aures W., (1984). *Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalys.* Dissertation, TU-München.

Terhardt E., (1974). „Pitch, consonance and harmony“. J. Acoust. Soc. Am. 55, pp. 1061.

Terhardt E., Stoll G., und Seewann M., (1982). „Algorithm for extraction of pitch salience from complex tonal signals“, J. Acoust. Soc. Am. 71, pp. 3.

Zollner W., (1993). „Psychoacoustics – a tool for industrial sound design“, Cortex electronic GmbH, Erzb.-Buchberger-Allee 14, D-93051.

Zwicker E., (1991). „Ein Vorschlag zur Definition und zur Berechnung der unbeeinflussten Lästigkeit“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 38.

Literatur zur Schwankungsstärke:

Fastl H., (1982). „Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern“. Dissertation, Freiburg, Hochschulverlag.

Fastl H., (1992). „Fluctuation Strength of Narrow Band Noise“ In Auditory Physiology and Perception Ed: Demany, Horner. Pergamon Press, pp. 331-336.

Höldrich R., (1998). „Algorithmus für Schwankungsstärke“. Interner Bericht, Institut f. Angewandte Systemtechnik, Akustik und Lärmschutz, Joanneum Research.

Widmann U., (1992). „Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung“. Dissertation, TU - München.

Literatur zur Impulshaltigkeit:

Buchta E., (1994). „Lästigkeit von impulsartigen Geräuschen in Abhängigkeit vom Geräuschpegel und Immissionsort“, DAGA 94, Seite 1125 - 1128.

Erdreich T., (1986). „A distribution based definition of impulsive noise“, J. Acoust. Soc. Am. 79 (4), April, pp. 990-998.

Heldmann K., (1994). *Wahrnehmung, gehörgerechte Analyse und Merkmalsextraktion technischer Schalle*. VDI Verlag, Düsseldorf.

Ikeda M. und **Findell I. H.**, (1993). „Subjective tests of impulse noise annoyance and the listening environment“, INTER•NOISE 93, pp. 1133 - 1136.

Krahe D. und **Buchta E.**, (1993). „Lautheit und Lästigkeit von impulsartigen Geräuschen“, DAGA 93, Seite 1133 - 1136.

Krahe D. und **Buchta E.**, (1994). „Bestimmung der Lästigkeit von impulsartigen Geräuschen auf Basis der Lautheit“, DAGA 94, Seite 1117 - 1120.

Schomer P. D., (1995). „Amendments to ISO 1996 PART 2: The Impulsive Noise Penalty“, INTER•NOISE 95, pp. 851 - 856.

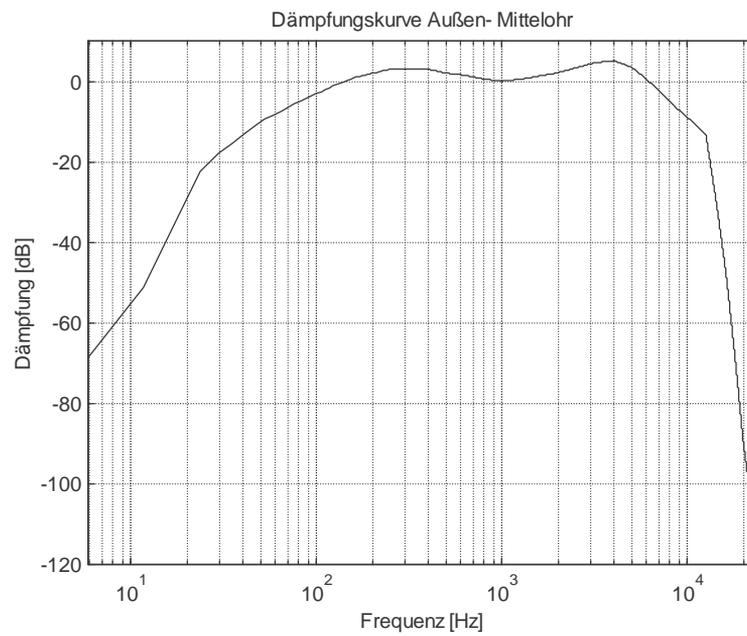
Sotttek R., (1993). *Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör*. Dissertation, RTWH Aachen.

Sotttek R., **Vranken P.** und **Busch G.**, (1995). „Ein Modell zur Berechnung der Impulshaltigkeit“, DAGA 95, Seite 791 - 794.

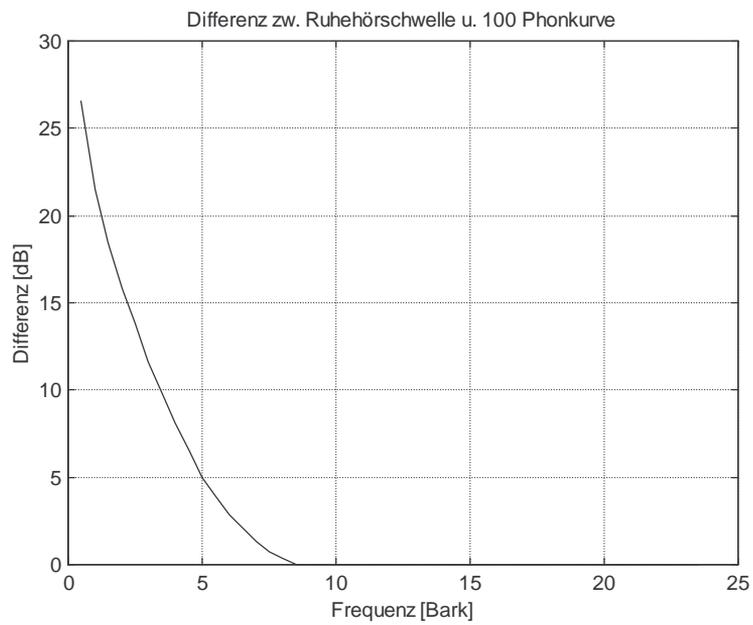
Van der Auweraer H. und **Van der Ponsele P.**, (1996). „Sound Quality Evaluation and Measurement Criteria“. LMS International, Heverlee, Belgium, Publications CETIM, pp. 23-51.

Vos J. und **Smoorenburg G.**, (1985). „Penalty for impulse noise, derived from annoyance ratings from impulse and road-traffic sounds“, J. Acoust. Soc. Am. 77 (1), pp. 193 - 201.

Zwicker E., (1991). „Ein Vorschlag zur Definition und zur Berechnung der unbeeinflussten Lästigkeit“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 38, Seite 91 - 97.



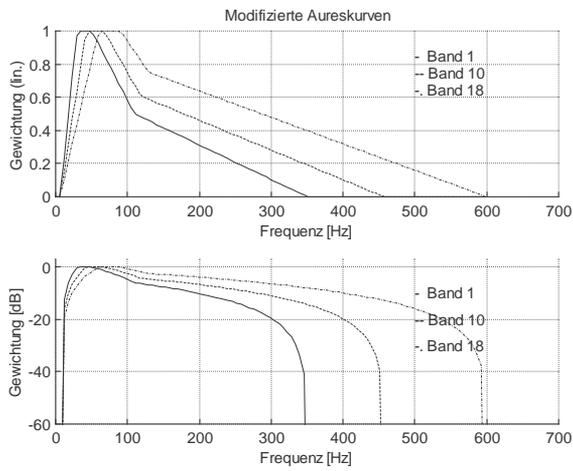
(a)



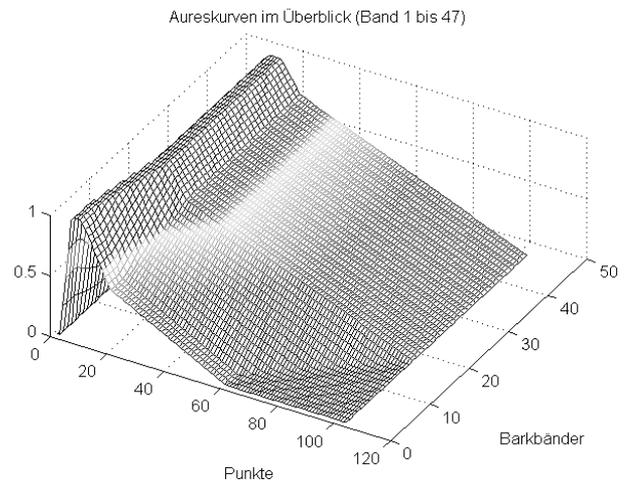
(b)

Abbildung 1

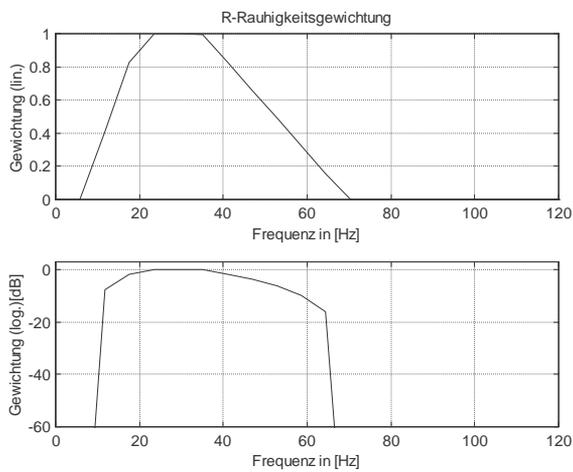
Gehörgerechte Filterung : Außen- und Mittelohrfilterung (a), Differenz zwischen Ruheshwelle und 100 Phonkurve (b)



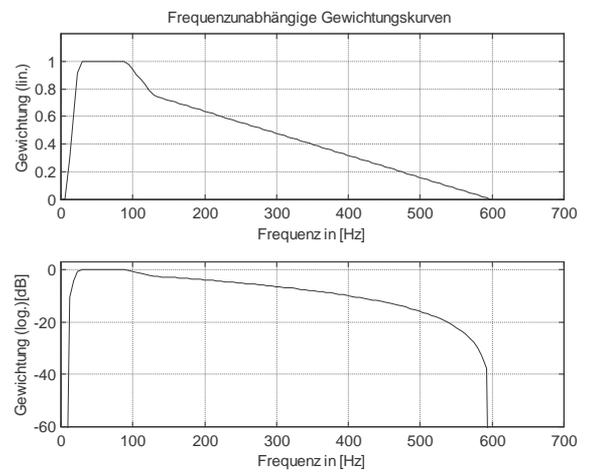
(a)



(b)



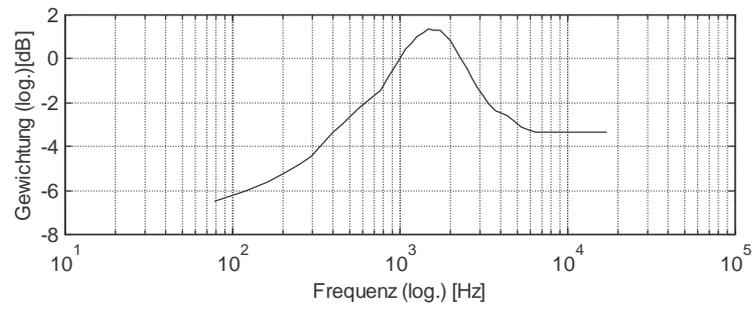
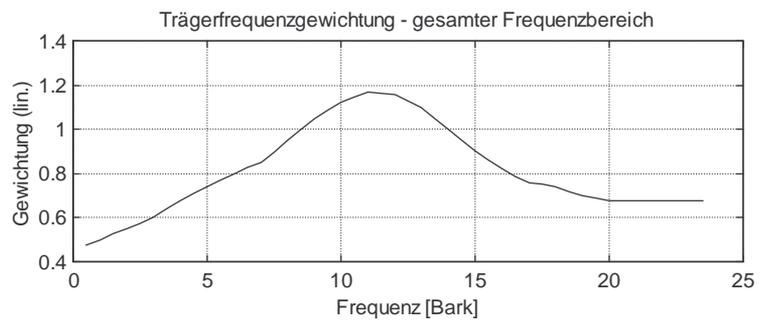
(c)



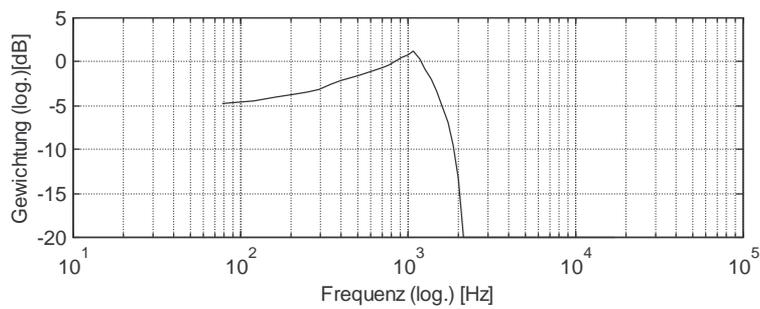
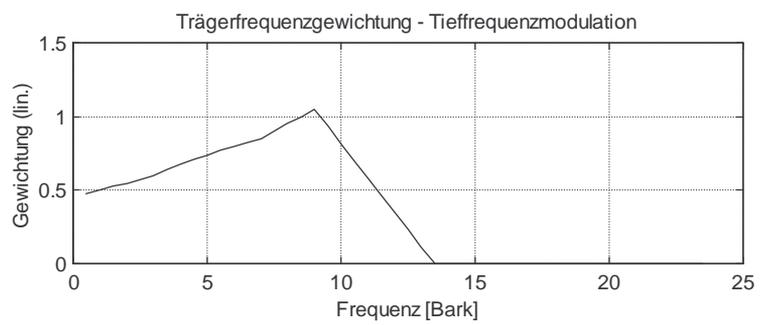
(d)

Abbildung 2

Unterschiedliche Filterungskurven der Hüllkurvenspektren $H_i(f_{\text{mod}})$ zur Rauigkeitsberechnung: Modifizierte Aureskurven (a und b), R-Rauhigkeitskurve (c), Frequenzunabhängige Gewichtungskurve (d)



(a)



(b)

Abbildung 3

Unterschiedliche trägerfrequenzabhängige Gewichtungskurven $g(z_i)$ zur Rauigkeitsberechnung: Für den gesamten Frequenzbereich (a) und die Tieffrequenzmodulation (b)

R- Einzahlwerte:

Die sich ergebende R-MATRIX ist nach folgender Darstellung aufgebaut.

Format von R: [x * 144]

x Länge der Matrix ist variabel, sie ist abhängig von der Länge der untersuchten Klangdatei.

144 .. Breite der Matrix wird bestimmt durch die Anzahl der verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten.

	meth=1, var=1, s=1,	meth=1, var=1, s=2,	meth=1, var=2, s=1,	meth=1, var=2, s=2,	meth=1, var=3, s=1,	meth=1, var=3, s=2,	meth=2, var=1, s=1,	meth=2, var=1, s=2,	meth=2, var=2, s=1,	meth=2, var=2, s=2,	meth=2, var=3, s=1,	meth=2, var=3, s=2,
1,2,3,.....x Signalkomponenten	12 Var.											

	12 Var.											

Bezeichnungserklärung:

meth.....Berechnungsmethode:

meth=1 Zur Berechnung der oberen Flanke der Erregung, der einzelnen CB-Bänder, wird der Pegel jeder einzelnen Spektralkomponente berücksichtigt.

meth=2 Zur Berechnung der oberen Flanke der Erregung, der einzelnen CB-Bänder, wird der Pegel des jeweiligen CB-Bandes berücksichtigt.

var.....Gewichtungsvariante:

var=1	modifizierte Aures-Kurven
var=2	Frequenzunabhängige Gewichtung
var=3	R-Rauhigkeitsgewichtung

s.....Art d. Superposition:

s=1	linear
s=2	quadratisch

(Art der Überlagerung der Teilrauhigkeiten r_i)

Die Teilrauhigkeiten r_i werden nach folgender Formel in 12 Varianten berechnet:

$$r_i = kn \cdot (tfg)^p \cdot (m_i^2) \cdot (ho_i^q)$$

VARIANTE 1 kn1,tfg1,p=1,q=0	VARIANTE 2 kn1,tfg1,p=1,q=0.07	VARIANTE 3 kn1,tfg1,p=2,q=0	VARIANTE 4 kn1,tfg1,p=2,q=0.07
VARIANTE 5 kn1,tfg2,p=1,q=0	VARIANTE 6 kn1,tfg2,p=1,q= 0.07	VARIANTE 7 kn2,tfg1,p=1,q=0	VARIANTE 8 kn2,tfg1,p=1,q=0.07
VARIANTE 9 kn2,tfg1,p=2,q=0	VARIANTE 10 kn2,tfg1,p=2,q=0.07	VARIANTE 11 kn2,tfg2,p=1,q=0	VARIANTE 12 kn2,tfg2,p=1,q=0.07

kn1: arith. gewichtete Korrel.koeff., kn2: quadrat. geometr. gew. Korrel.koeff., tfg1: Trägerfreq. Gew.fkt. (ges. f-Bereich), tfg2: Trägerfreq. Gew.fkt. (Tiefrequenz-Modulation), m_i : effektiven

Modulationsgrade, h_0 : Gleichanteile der Einhüllenden, p : Potenz (1 oder 2), q : mit Pegelberücksichtigung: $q=0.07$, ohne Pegelberücksichtigung: $q=0$.

F- Einzahlwerte:

Die sich ergebende F-MATRIX ist nach folgender Darstellung aufgebaut.

Format von F: [48 * x]

48.... Länge der Matrix wird bestimmt durch die Anzahl der verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten.

x..... Breite der Matrix ist variabel, sie ist abhängig von der Länge der untersuchten Klangdatei.

Variante	Berechnungsmethode	Art der Superposition	Berechnung der spezifischen Teilschwankungsstärken	Art der normierten Kreuzkorrelationsgewichtungsfaktoren
1	1	s = 1 (linear)	$ka*m$	arithmetische Gewichtung
2	1	s = 1	$ka*m^{1.5}$	
3	1	s = 1	$ka*m^2$	
4	1	s = 1	$ka*m*h^{0.07}$	
5	1	s = 1	$ka*m^{1.5}*h^{0.07}$	
6	1	s = 1	$ka*m^2*h^{0.07}$	
7	1	s = 1	$kg*m$	quadratische geometrische Gewichtung
8	1	s = 1	$kg*m^{1.5}$	
9	1	s = 1	$kg*m^2$	
10	1	s = 1	$kg*m*h^{0.07}$	
11	1	s = 1	$kg*m^{1.5}*h^{0.07}$	
12	1	s = 1	$kg*m^2*h^{0.07}$	
13	1	s = 2	$ka*m$	arithmetische Gewichtung
14	1	s = 2 (quad.)	$ka*m^{1.5}$	
15	1	s = 2	$ka*m^2$	
16	1	s = 2	$ka*m*h^{0.07}$	
17	1	s = 2	$ka*m^{1.5}*h^{0.07}$	
18	1	s = 2	$ka*m^2*h^{0.07}$	
19	1	s = 2	$kg*m$	quadratische geometrische Gewichtung
20	1	s = 2	$kg*m^{1.5}$	
21	1	s = 2	$kg*m^2$	
22	1	s = 2	$kg*m*h^{0.07}$	
23	1	s = 2	$kg*m^{1.5}*h^{0.07}$	
24	1	s = 2	$kg*m^2*h^{0.07}$	
25	2	s = 1	$ka*m$	arithmetische Gewichtung
26	2	s = 1	$ka*m^{1.5}$	
...

usw. bis 48 (ab 25 für Berechnungsmethode 2)

Berechnungsmethode =1

Zur Berechnung der Flankenerregung, der einzelnen CB-Bänder, wird der Pegel jeder einzelnen Spektralkomponente berücksichtigt.

Berechnungsmethode =2

Zur Berechnung der Flankenerregung, der einzelnen CB-Bänder, wird der Pegel des jeweiligen CB-Bandes berücksichtigt.

Erläuterung zur Verwendung der Analyse - Software für psychoakustische Empfindungsgrößen unter MatLab 5.1 .

Die notwendigen Funktionen und Programme sind in verschiedenen Ordner aufgeteilt, die sich im Hauptordner „ **PAAS** “ (PsychoAkustische Analyse Software) befinden (siehe FILESTRUKTUR). Das setzen der Pfade der neuen Ordner ist vor Beginn der ersten Analyse d.h. in der Installation notwendig. Diese kann händisch oder durch Aufruf des Programmes **INSTALLPAAS** erfolgen (für weitere Informationen siehe HELP INSTALLPAAS). Mit Save Settings im Menü: File / Set Path kann die Verbindung zu den Ordner gespeichert werden. Für alle „functions & scripts“ gibt es HELP-TEXTE.

ACHTUNG : Vorhandene globale Variablen sollten nicht verwendet werden.

Die globalen Variablen werden von Unterfunktionen benötigt und es könnte dadurch zu fehlerhaften Ergebnissen kommen. Mit dem Befehl *WHOES* werden alle verwendeten Variablen angezeigt. Die vorhandenen globalen Variablen sind speziell gekennzeichnet.

Berechnung der Rauhigkeit

rauhigkeitstest.m

Zur Untersuchung und Berechnung der Rauhigkeit einzelner Frames (Länge N vorgegeben), wobei dazu künstlich erzeugte Testschalle oder auch Ausschnitte aus Soundfiles verwendet werden können.

roughcalc.m

Automatisierung zur Berechnung der Rauhigkeit beliebiger Soundfiles. Diese Soundfiles müssen in txt-Files spezifiziert werden, wodurch ein öffnen des Matlab/Debugger-Editors vor Aufruf des Programms notwendig ist. Die notwendigen txt-Files werden dort automatisch geöffnet und können dann beliebig geändert werden (SPEICHERN nicht vergessen). Nach den jeweiligen Änderungen muß man das Fenster selbständig wechseln, durch selektieren des Matlab/Command Window. Genauere Angaben zu den txt-Files finden sich in >>HELP ROUGHCALC. Die berechneten Daten können mit READR gelesen werden (siehe HELP READR).

Mit ROUGHCALC1 werden die nicht kalibrierten Rauhigkeitswerte berechnet und gespeichert. Die Ergebnisse können ebenfalls mit READR gelesen werden.

Berechnung der Lautheit, Lautstärke, Schärfe, dB(A), Terz- und Oktavpegel

lautheittest.m

Zur Berechnung der Lautheit, der Lautstärke und der Schärfe einzelner Frames (Länge N beliebig), wobei dazu künstlich erzeugte Testschalle oder auch Ausschnitte aus Soundfiles verwendet werden können (wesentlich [Nsone, LN, S] = **zwicker** (TP, M) siehe >>HELP ZWICKER).

Berechnung der Terzpegel:

[TP, fm] = **terzfilterbank** (sig, fs, [T]); (siehe HELP TERZFILTERBANK)

Berechnung der Oktavpegel:

[OP, fm] = **oktavfilterbank** (sig, fs, [T]); (siehe HELP OKTAVFILTERBANK)

Berechnung des dB(A):

dB_A = **abewertung** (sig, fs, [T]); (siehe HELP ABEWERTUNG)

loudnesscalc.m

Automatisierte Berechnung der Lautheit, der Lautstärke, des dB(A), der Schärfe, sowie der Terz- und Oktavpegel. Spezifikationen siehe roughcalc bzw. >>HELP LOUDNESSCALC. Die berechneten Daten können mit READL bzw. READP gelesen werden (siehe HELP READL, HELP READP).

Berechnung der Impulshaltigkeit

impulstest1.m & impulstest2.m

Zur Berechnung der Impulshaltigkeit einzelner Frames (Länge N beliebig), wobei künstlich erzeugte Testschalle oder auch Ausschnitte aus Soundfiles verwendet werden können.

Für IMPULSTEST1 wird zur Detektierung der Impulse die Funktion IMPULS verwendet. Dazu wird ein Analysezeitfenster in Subframes unterteilt (benutzerdefiniert), für die jeweils der Pegel berechnet wird. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Pegel der Subframes mit benachbarten Frames (Anzahl in beide Richtungen benutzerdefiniert) und bei Überschreitung eines bestimmten „Thresholds“ (benutzerdefiniert) wird ein Impuls detektiert (siehe HELP IMPULS bzw. IMPULSTEST1).

Für IMPULSTEST2 wird zur Detektion der Impulse die Funktion IMPULSDETECT verwendet. Dazu wird ein Analysezeitfenster in Subframes (2ms) unterteilt, für die jeweils die Leistung berechnet wird. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Leistungen der Subframes mit benachbarten Frames (unter Berücksichtigung der Vor- und Nachverdeckung) und bei Überschreitung eines bestimmten „Thresholds“ (benutzerdefiniert) wird ein Impuls detektiert (siehe HELP IMPULSDETECT bzw. IMPULSTEST2).

Impulscal1.m & impulscal2.m

Automatisierte Berechnung der Impulshaltigkeit. Spezifikationen siehe roughcalc bzw. >>HELP IMPULSCALC1 bzw. IMPULSCALC2. Die berechneten Daten können mit READI gelesen werden (siehe HELP READI).

Berechnung der Klanghaftigkeit (Tonhaltigkeit)

tonalitytest.m

Zur Berechnung der Klanghaftigkeit (Tonhaltigkeit) für einzelne Frames (Länge N vorgegeben), wobei dazu künstlich erzeugte Testschalle oder auch Ausschnitte aus Soundfiles verwendet werden können (siehe HELP TONALITYTEST).

tonality.m

Automatisierung zur Berechnung der Klanghaftigkeit (Tonhaltigkeit) beliebiger Soundfiles. Die Soundfiles müssen in txt-Files spezifiziert werden, wodurch ein Öffnen des Matlab/Debugger-Editors vor Aufruf des Programms notwendig ist. Die notwendigen txt-Files werden dort automatisch geöffnet und können dann beliebig geändert werden (SPEICHERN nicht vergessen). Nach den jeweiligen Änderungen muß man das Fenster selbstständig wechseln, durch selektieren des MATLAB – Command Windows. Genauere Angaben zu den txt-Files finden sich in >>HELP TONALITY. Die berechneten Daten können mit READT gelesen werden (siehe HELP READT).

Berechnung der Schwankungsstärke

schwankungstest.m

Zur Berechnung der Schwankungsstärke. Die Dauer, der untersuchten Signale, ist mit 2.2 s vorgegeben. Es ergeben sich somit jeweils 3 Ergebniswerte, da die Schwankungsstärke über 40 sich überlappende Frames (Versatz HS = 4800 Punkte) der Länge N (N = 8192 Punkte) berechnet wird. Es können künstlich erzeugte Testschalle oder auch Ausschnitte aus Soundfiles verwendet werden (siehe HELP SCHWANKUNGSTEST).

fluctuation.m

Automatisierung zur Berechnung der Klanghaftigkeit (Tonhaltigkeit) beliebiger Soundfiles. Diese Soundfiles müssen in txt-Files spezifiziert werden, wodurch ein Öffnen des Matlab/Debugger-Editors vor Aufruf des Programms notwendig ist. Die notwendigen txt-Files werden dort automatisch geöffnet und können dann beliebig geändert werden (SPEICHERN nicht vergessen). Nach den jeweiligen Änderungen muß man das Fenster selbstständig wechseln, durch selektieren des MATLAB – Command Windows. Genauere Angaben zu den txt-Files finden sich in >>HELP FLUCTUATION. Die berechneten Daten können mit READF gelesen werden (siehe HELP READF).

FILESTRUKTUR

paas installpaas
readme

div {abewertung, adsgn, bfftg, changebuffer, ezeitfkb, ezeitfs, fileinfo, kbpegel,
konvert, leq, oct3dsgn, octdsgn, readname, readpn, sfr, spegel, window }

fluct {fluctmod, fluctuation, fmodell, readF, spezfluct }

imp {impuls, impulscalc1, impulscalc2, impulsdetect, readI }

kal {makeinfo, readkal, writeinfo }

laut {loudnesscalc, oktavfilterbank, readL, readP, terzfilterbank, zwicker }

rauh {effmg, nkkkg, rauhp24, readR, rmodell, roughcalc, roughcalc1, tabber, tabellen }

test {impulstest1, impulstest2, lautheitest, rauhigkeitstest, schwankungstest,
tonalitytest }

**m_files ** {gausimp, initfile, plfun, rauhp12, rauschimp, tbfftg, testsig, tezeitfkb,
tezeitfs, tonimp, wavesig }

ton {readT, terzkomp, tmodell, tonality, tonkomp }

Für alle angeführten Funktionen und Programme (Scripts) gibt es Help – Texte, die in MatLab durch die Eingabe: *HELP* ‘*Funktionsname*‘ bzw. *HELP* ‘*Programmname*‘ gelesen werden können.

abewertung.m

SYNTAX:

dB_A = abewertung (Signal, Fs, T)

Signal: Folge von absoluten Druckwerten, zu untersuchendes Signal

Fs: Abtastfrequenz

T: zeitliches Integrationsintervall (in Sekunden)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet den A-bewerteten Pegel(dB) eines Signals (*Signal*), wobei mit *T* das Integrationsintervall (in s) festgelegt wird. *T* muß nicht unbedingt angegeben werden, *T* kann auch mit *T* = [] spezifiziert werden. In beiden Fällen wird dann die Zeitdauer des gesamten Signals herangezogen. *Fs* ist die Abtastrate des Signals. Das Ergebnis wird in Form eines Vektors [x * 1] zurückgeliefert.

adsgn.m

SYNTAX:

[B, A] = adsgn (Fs)

Fs: Abtastfrequenz

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet die Filterkoeffizienten B (Zähler) und A (Nenner) für das A-Bewertungsfilter. Die Filterung des Signals kann mit der in der MatLab signal processing toolbox vorhandenen Funktion FILTER durchgeführt werden.

bfftg.m

SYNTAX:

P_{AM} = bfftg (Signal, w)

Signal: Folge von absoluten Druckwerten [1*N]

w: Fensterfunktion [1*N]

BESCHREIBUNG:

Die Funktion **bfftg** beinhaltet folgende Punkte:

b schneidet aus dem Signal einen Block der Länge N. **f** fenstert diesen Block mit der Fensterfunktion **w**. **ft** transformiert diesen gefensterten Block mit der Fouriertransformation und **g** gewichtet das erhaltene Spektrum mit der Außenmittelohr-Gewichtungsfunktion. Das Ergebnis wird in Form eines Vektors **PAM** [1*N] zurückgeliefert.

*Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.*

Benötigte globale Variablen:

*AM....Außen-, Mittelohrfilter [1*N]*

*N.....Blocklänge [1*1]*

*df.....Frequenzauflösung [1*1]*

changebuffer.m

SYNTAX:

buffer = changebuffer (buffer, list)

buffer: Ist eine beliebige Matrix, welche die Information reihenweise enthält

list: Ist ein Vektor [1*x], der mit seinen Eintragungen die gewünschten Zeilen selektiert

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion aktualisiert den Pufferinhalt eines selektierten Puffers. Der Puffer, der zurückgeliefert wird, enthält nur jene Zeilen, die vom Benutzer (**list**) spezifiziert werden.

SYNTAX:

$$[m_i^*, H_{BP}, h_0] = \text{effmg}(e, \text{'var'})$$

e: stellt die Matrix $[47 * \max(M_i)]$ für die Erregungszeitfunktionen dar

var: 'a' modifizierte Aureskurven
'f' frequenzunabhängige Gewichtungskurven
'r' R-Rauhigkeitskurven

BESCHREIBUNG:

Die Funktion effmg berechnet die effektiven Modulationsgrade m_i^* , die bandpaßgefilterten Einhüllenden Spektren H_{BP} und den Gleichanteil h_0 der ungefilterten Einhüllenden, aus den Erregungszeitfunktionen $e_i(n)$. Zu dieser Berechnung werden verschiedene Bandpaßgewichtungsfunktionen wahlweise verwendet, die als MAT-Files wie folgt vorliegen müssen.

AURES.MAT mit der Variable AURES
FUGK.MAT mit der Variable FUGK
RRK.MAT mit der Variable RRK

Diese MAT-Files werden durch den Aufruf des INITFILEs angelegt.

*Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.*

Benötigte globale Variablen:

tab3.....*Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte, Algorithmus zur Rauhigkeitsberechnung) $[47*2]$*
df.....*Frequenzauflösung $[1*1]$*

ezeitfkb.m

SYNTAX:

$$\mathbf{e} = \text{ezeitfkb}(\mathbf{L}_{AM(k)}, \mathbf{L}_{AM}, \mathbf{P}_{AM})$$

$L_{AM(k)}$: absoluter Pegel für jedes kritische Band [1*47]
 L_{AM} : absoluter Pegel für jede Spektralkomponente [1*N/2]
 P_{AM} : außen- und mittelohrgefiltertes Signalspektrum [1*N]

BESCHREIBUNG:

Berechnung der Erregungszeitfunktionen unter Zuhilfenahme der absoluten Pegel, die sowohl für jedes kritische Band ($L_{AM(k)}$) als auch für jede Spektralkomponente (L_{AM}) berechnet wurden. Das Ergebnis ist eine Matrix der Dimension [47*max(M_i)]

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

DHRS100...Differenz zwischen Ruheshwelle und 100-Phonkurve [47*1]

tab3.....Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte, Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung) [47*2]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

ezeitfs.m

SYNTAX:

$$\mathbf{e} = \text{ezeitfs}(\mathbf{L}_{AM}, \mathbf{P}_{AM})$$

L_{AM} : absoluter Pegel für jede Spektralkomponente [1*N/2]
 P_{AM} : außen- und mittelohrgefiltertes Signalspektrum [1*N]

BESCHREIBUNG:

Berechnung der Erregungszeitfunktionen unter Zuhilfenahme der absoluten Pegel, die für jede Spektralkomponente (L_{AM}) berechnet wurden. Das Ergebnis ist eine Matrix [47* max(M_i)].

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

DHRS100...Differenz zwischen Ruheshwelle und 100-Phonkurve [47*1]

tab3.....Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte, Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung) [47*2]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

fileinfo.m

SYNTAX:

[fid, channels, k, bias, l, f, flag] = fileinfo ('name', kanal)

name: Name des Soundfiles (string)

kanal: zu analysierender Kanal des Soundfiles ('l', 'r' oder 'm')

BESCHREIBUNG:

Mit name (string) wird das gewünschte Soundfile selektiert und mit kanal ('l' = linke, 'r' = rechte Tonspur, bzw. 'm' = Mono) die zu analysierende Tonspur spezifiziert. Zurückgeliefert werden folgende Parameter – Fileinformationen:

fid:	File Identifikation
channels:	Anzahl der Kanäle (1=MONO, 2=STEREO)
k:	Kalibrierungsfaktor des zu analysierenden Signals
bias:	BYTE-OFFSET, ab dem die Signaldaten beginnen
l:	Länge des Files in Samples, die untersucht werden können
f:	Abtastrate des Soundfiles

fluctmod.m

SYNTAX:

[h, HBP, m] = fluctmod (e, HP)

e: abtastreduzierte, teilgefilterte Einhüllende der Erregungszeitfunktionen
[47*mind.40]

HP: Frequenzgang des zusätzlichen Hochpaßfilters

BESCHREIBUNG:

Berechnung der effektiven Modulationsgrade m. Weiters werden die Gleichanteile h und die bandpaßgefilterten Spektren HBP berechnet.

fluctuation.m

SYNTAX:

fluctuation

BESCHREIBUNG:

Programm zur Automation der Schwankungsstärkeberechnung beliebiger Soundfiles. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien, in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions der Speicherdateien werden automatisch hinzugefügt: `_KANAL.F` (mit `KANAL = 'l' oder 'r' bzw. 'm'`). Gelesen werden die Daten mit der Funktion `READF`.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger-Editor geöffnet werden.

fmodell.m

SYNTAX:

F = fmodell (fid, channels, kanal, bias, k, l)

fid:	File Identifikation
channels:	Anzahl der Kanäle des Soundfiles (1=MONO, 2=STEREO)
kanal:	Selektierter Kanal zur Analyse ('l' oder 'r' bzw. 'm')
bias:	BYTE-OFFSET, ab dem die Signaldaten beginnen
k:	Kalibrierungsfaktor bzw. Umrechnungsfaktor für absolute Druckwerte
l:	Länge des Soundfiles in Samples

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet, durch Aufruf anderer Funktionen, die Schwankungsstärke. Die Eingabeparameter beziehen sich zum Großteil auf das zu analysierende Soundfile und sind wie oben spezifiziert und können mit `FILEINFO` erstellt werden.

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

N.....Blocklänge in Punkten [1*1]

u.....Energie der Fensterfunktion [1*1]

w.....Fensterfunktion [1*N]

tab3..... Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte, Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung) [47*2]

WICHTIG: Das Soundfile muß vor Aufruf dieser Funktion geöffnet und im „Lesemodus“ betrieben werden.

gausimpuls.m

SYNTAX:

sig = gausimp (peff, ti, dura)

peff: effektiver Druckwert [$L_i = 20\log(\text{peff}/p_0)$] (mit $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$)

ti: äquivalente Intensitätsimpulsdauer (in Sekunden)

dura: zeitliche Länge des Signals (in Sekunden)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion generiert ein Druckimpulssignal sig.

Benötigt die globale Variable:

fs..... Abtastfrequenz

impuls.m

SYNTAX:

[anz, p, frame] = impuls (sig, dt, lframe, rframe, ltriggers, rtriggers)

sig: ist das zu analysierende Signal

dt: Länge der Subframes in Punkten

lframe: Anzahl der linken Subframes, die zu berücksichtigen sind

rframe: Anzahl der rechten Subframes, die zu berücksichtigen sind

ltriggers: linke Triggerschwelle, Wert in dB

rtriggers: rechte Triggerschwelle, Wert in dB

BESCHREIBUNG:

Die Funktion liefert für das Signal sig die Anzahl anz der detektierten Impulse, deren Pegel um ltriggers bzw. rtriggers dB größer sind als die Pegel der betrachteten linken lframe und rechten rframe Pegel. Die Größe dt wird als Integrationsintervall zur Bildung der Pegel der Subframes benötigt. Der Vektor frame beinhaltet, für das untersuchte Subframe, eine 1 für eine Detektion oder anderenfalls eine 0. Somit ist eine zeitliche Zuordnung zum Auftreten eines Impulses möglich. Mit p werden die Pegel der einzelnen Subframes zurückgeliefert.

impulscal1.m

SYNTAX:

impulscal1

BESCHREIBUNG:

Programm zur Automation der Berechnung der Impulshaltigkeit beliebiger Soundfiles. Zur Detektierung der Impulse wird die Funktion IMPULS verwendet. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien, in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions werden automatisch hinzugefügt: _KANAL.I1 (mit KANAL = '1' oder 'r' bzw. 'm'). Gelesen werden die Daten mit der Funktion READI.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger-Editor geöffnet werden.

impulscal2.m

SYNTAX:

impulscal2

BESCHREIBUNG:

Programm zur Automation der Berechnung der Impulshaltigkeit beliebiger Soundfiles. Zur Detektierung der Impulse wird die Funktion IMPULSDETECT verwendet. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien, in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions werden automatisch hinzugefügt: _KANAL.I2 (mit KANAL = '1' oder 'r' bzw. 'm'). Gelesen werden die Daten mit der Funktion READI.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger-Editor geöffnet werden.

impulsdetect.m

SYNTAX:

[detect, Ppost, Ppre] = impulsdetect (p, T_post, T_pre, ID, PÜpost, PÜpre, flag)

p: Vektor mit den Leistungswerten des Signalausschnittes
T_post: Vordere Abklingkonstante (Bewertung der vorderen Energie)
T_pre : Hintere Abklingkonstante (Bewertung der nachfolgenden Energie)
ID: Breite des detektierten Impulses (Anzahl in Subframes)
PÜpost: vorderer Pegelüberschuß (in dB)
PÜpre : hinterer Pegelüberschuß (in dB)
flag : Verknüpfungsart der Pegelkonditionen ('and' / 'or')

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion detektiert die Impulse eines Signalausschnittes, der in Form eines Vektors p mit Leistungswerten vorliegen muß. Der untersuchte Signalausschnitt muß 1.2 sek lang sein. Dieser Frame wird in 600 Subframes der Dauer 2ms geteilt. Für jeden Subframe muß die Leistung berechnet werden (liegt in p vor). Mit den obigen Parametern wird das Impulsdetektierungsfenster festgelegt. Die Ergebnisse liegen im Vektor detect (0 für keine Detektierung bzw. 1 für eine Detektierung), Ppost (Pegelüberschuß vorne) und Ppre (Pegelüberschuß hinten) vor.

impulstest1.m

SYNTAX:

impulstest1

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Untersuchung von Testsignalen hinsichtlich vorhandener Impulse. Sie stellt die Version 1 dar und verwendet die Funktion IMPUS zur Detektierung von Impulsen d.h.: als Berechnungsbasis dient der Vergleich von benachbarten Pegeln. Die Anzahl der zu betrachtenden Nachbarpegel und die Unterschiedsschwellen sind vom Benutzer definierbar.

Die Ergebnisgrößen lauten wie folgt:

anz: Anzahl der detektierten Impulse.
frame: zeitl. Zuordnung der Detektionen je nach Einstellungen; beinhaltet „0“ für keine und „1“ für eine Detektierung.
p: Pegel der untersuchten Ausschnitte.

impulstest2.m

SYNTAX:

impulstest2

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Untersuchung von Testsignalen hinsichtlich vorhandener Impulse. Sie stellt die Version 2 dar und verwendet die Funktion IMPULSDETECT zur Detektierung von Impulsen d.h.: als Berechnungsbasis wird ein, vom Benutzer frei definierbares, Bewertungszeitfenster herangezogen, das die Vor- und Nachverdeckung berücksichtigt. Weiters können die Pegelüberschüsse nach beiden Seiten angegeben werden und die logisch Verknüpfung der Pegelbedingungen ist wählbar.

Die Ergebnisgrößen lauten wie folgt:

d:	Vektor enthält die detektierten Impulse (0/1). Da die Eintragungen für jeweils 2ms stehen ist eine zeitliche Zuordnung möglich.
pue_vorne:	Pegelüberschuß vorne.
pue_hinten:	Pegelüberschuß hinten.

initfile.m

SYNTAX:

initfile

BESCHREIBUNG:

Diese Programm initialisiert den Arbeitsbereich (globale Variablen) und ladet die notwendigen Variablen (interpolierte Tabellen) in den Speicher.

kbpegel.m

SYNTAX:

$L_{AM(k)} = \text{kbpegel}(P_{AM}, U)$

P_{AM} : außen- und mittelohrgefiltertes Signalspektrum [1*N]

U: Energie des Fensters, welches zur Fensterung verwendet wurde

BESCHREIBUNG:

Berechnet für jedes kritische Band den absoluten Pegel und liefert eine Vektor [1*47] $L_{AM(k)}$ mit den dB-Werten der Bänder bezüglich des Bezugsschalldruckes von $p_0 = 20\mu\text{Pa}$.

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

N.....Blocklänge [1*1]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

konvert.m

SYNTAX:

konvert('VarName', Variable)

VarName: Speichername für die Variable

Variable: Variablenbezeichnung im Programm

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion speichert eine Variable namens VarName (string) in der Datei VarName.txt im festen Format 7.4 (float) ab. Somit können die Eintragungen bzw. Variablenwerte zur Dokumentation oder Weiterverarbeitung in beliebigen Anwenderprogrammen verwendet werden (wie z.B. Excel, Winword, ...). Die Zeilen- und Spaltenvorgaben werden aus der Variablenvorlage übernommen. Diese Funktion ist nur für 2 - dimensionale Variablen geeignet.

lautheittest.m

SYNTAX:

lautheittest

BESCHREIBUNG:

Das Programm berechnet die Lautheit (in sone), die Lautstärke (in phon) und die Schärfe (in acum) von Testsignalen.

Die Ergebnisgrößen lauten wie folgt:

Nsone:	Lautheit des Signals in sone
LN:	Lautstärke des signals in phon
S:	Schärfe in acum

leq.m

SYNTAX:

[p, P] = leq (SIG , T, Pref)

SIG: zu analysierendes Signal (Folge von absoluten Druckwerten)

T: Integrationsintervall zur Bestimmung der Pegel in Punkten ausgedrückt

Pref: Bezugsleistung zur Bestimmung des Pegels (z.B. p_0^2 mit $p_0 = 20\mu\text{Pa}$)

BESCHREIBUNG:

Berechnet die Folge von Energieäquivalenten Leistungen P und Pegel p für ein Signal SIG. Die Länge der zurückgelieferten Vektoren p bzw. P wird bestimmt durch das Verhältnis LENGTH(SIG)/T. Wird keine Bezugsleistung Pref angegeben, so wird diese durch die Voreinstellung gleich 1 gesetzt. Ist die Leistung für ein Integrationsintervall gleich Null, so wird für den Pegel dieses Intervalls ein „NaN“ zurückgeliefert.

loudnesscalc.m

SYNTAX:

loudnesscalc

BESCHREIBUNG:

Programm zur Automation der Berechnung der Lautheit, der Lautstärke, der dB(A), der Schärfe, der Terzpegel und der Oktavpegel für beliebige Soundfiles. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions werden automatisch hinzugefügt: _KANAL.L bzw. _KANAL.P (mit KANAL = 'l' oder 'r' bzw. 'm'). Gelesen werden die Daten mit der Funktion READL bzw. READP.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger-Editor geöffnet werden.

makeinfo.m

SYNTAX:

makeinfo (filename, savename, Kanäle, Kf(li), Kf(re), flag1, flag2, flag3, flag4)

filename: Dateiname des Soundfiles
savename: Dateiname, unter dem das modifizierte Soundfile gespeichert wird
Kanäle: Anzahl der Kanäle (1 = MONO, 2 = STEREO)
Kf(li): linker Kalibrierungsfaktor
Kf(re): rechter Kalibrierungsfaktor
flag1: CHARACTER frei wählbar
flag2: CHARACTER frei wählbar
flag3: CHARACTER frei wählbar
flag4: CHARACTER frei wählbar

BESCHREIBUNG:

Schreibt in den Standard-Header des Soundfiles filename einen Infoblock, der wie folgt aufgebaut ist und speichert das File unter savename ab:

BYTE 01 - 12 : Standard-Header-Teil_1

BYTE 13 - 16 : TEXT 'info'

BYTE 17 - 20 : Anzahl der Bytes im INFO -BLOCK

BYTE 21 : FLAG 1

BYTE 22 : FLAG 2

BYTE 23 - 26 : KALIBRIERUNGSFAKTOR - LINKS (im FLOAT32 FORMAT)

BYTE 27 - 30 : KALIBRIERUNGSFAKTOR - RECHTS (im FLOAT32 FORMAT)

BYTE 31 : FLAG 3

BYTE 32 : FLAG 4

Diese Darstellung gilt für STEREO-FILES; für MONO-FILES entfallen die Bytes von 27 bis 32.

nkkkg.m

SYNTAX:

$$[k_{n1}, k_{n2}] = \text{nkkkg}(\mathbf{H}_{BP})$$

H_{BP} : Ist das bandpaßgefilterte Spektrum [47*ganzzahlige Vielfache von 33] der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet die normierten Kreuzkorrelationskoeffizientengewichte der 47 Bänder für zwei unterschiedliche Gewichtungsverfahren: k_{n1} = arithmetisches Mittel, k_{n2} = quadratisch, geometrisches Mittel.

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

tab3.....Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte, Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung) [47*2]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

oct3dsgn.m

SYNTAX:

$$[\mathbf{B}, \mathbf{A}] = \text{OCT3DSGN}(\mathbf{F}_m, \mathbf{F}_s, \mathbf{N})$$

F_m : Mittenfrequenz des Terzbandfilters

F_s : Abtastfrequenz

N : Ordnung des Filters

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet für ein digitales Terzbandfilter mit der Mittenfrequenz F_m und der Abtastfrequenz F_s die Koeffizienten B und A der Übertragungsfunktion. Das Filter wird bestimmt in Übereinstimmung mit der Ordnung N Spezifikation durch das ANSI S1.6-1984 Standard Format. Voreinstellung $N = 3$.

ACHTUNG: Für sinnvolle Ergebnisse sollte die Bedingung für die Mittenfrequenz $F_s/200 < F_m < F_s/5$ eingehalten werden.

Verwendung des Filters mit: Signalausgang = `FILTER(B ,A, Signaleingang)`.

octdsgn.m

SYNTAX:

[B ,A] = OCTDSGN (Fm, Fs, N)

Fm: Mittenfrequenz des Oktavbandfilters

Fs: Abtastfrequenz

N: Ordnung des Filters

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet für ein digitales Oktavbandfilter mit der Mittenfrequenz Fm und der Abtastfrequenz Fs die Koeffizienten B und A der Übertragungsfunktion. Das Filter wird bestimmt in Übereinstimmung mit der Ordnung N Spezifikation durch das ANSI S1.1-1986 Standard Format. Voreinstellung N = 3.

ACHTUNG: Für sinnvolle Ergebnisse sollte die Bedingung für die Mittenfrequenz $Fs/200 < Fm < Fs/5$ eingehalten werden.

Verwendung des Filters mit: Signalausgang = FILTER(B, A, Signaleingang).

oktavfilterbank.m

SYNTAX:

[P, F] = oktavfilterbank (Signal, Fs, [T])

Signal: zu analysierendes Signal (Folge von absoluten Druckwerten)

Fs: verwendete Abtastfrequenz

T: Untersuchungsintervall – Integrationsintervall zur Bestimmung der Pegel (optional) in Sekunden

BESCHREIBUNG:

Berechnet das Oktavbandspektrum des Signals unter Berücksichtigung der Abtastfrequenz. P ist ein Reihenvektor und beinhaltet die Pegel (gemessene Effektivwerte RMS) die für jedes Oktavband berechnet werden und wird in dB (bezüglich $p_0 = 20\mu\text{Pa}$ als Bezugsschalldruck) angegeben. P ist eine Matrix $[(\text{LENGTH}(\text{Signal})/(\text{T}*\text{Fs})) * \text{LENGTH}(\text{F})]$. Wobei F jener Vektor ist, der die Mittenfrequenzen der Oktavbänder enthält (Standard ANSI S1.1-1986). Ist T = [], dann wird die Gesamtdauer des Signals als Integrationszeit herangezogen.

plfun.m

SYNTAX:

plfun (n, var)

- n: Ist der Unterbrechungspunkt
- var: Variable, die dargestellt werden soll; Sie muß mit dem Unterbrechungspunkt korrespondieren.

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion dient zur grafischen Darstellung und Kontrolle der einzelnen Variablen, die bei der Berechnung des Rauigkeitsmodell als Zwischengrößen entstehen. Sie findet Verwendung im Testprogramm RAUHIGKEITSTEST und stellt dort die Grafikroutine dar.

Benötigt globale Variablen:

fs.....Abtastfrequenz

df.....Frequenzauflösung

rauhigkeitstest.m

SYNTAX:

rauhigkeitstest

BESCHREIBUNG:

Rauhigkeitstest ist eine TESTVERSION für das Rauigkeits - Modell zur Bestimmung eines R-Einzahlwertes, der die Rauigkeit eines Testsignals objektiv, dem subjektiven Empfinden nachempfunden, darstellen soll. Die einzelnen Funktionen die zu dieser Berechnung notwendig sind, werden durch Aufruf dieses Programms automatisch ausgeführt. Notwendige Eingaben von der Tastatur, die eine mögliche Wahl zwischen verschiedenen Voreinstellungen, unterschiedlichen Berechnungsschritten oder wahlweiser graphischen Kontrolle der Berechnungsverfahren zulassen, werden detailliert angegeben.

Die Ergebnisgrößen lauten wie folgt:

PAM: mit AM-Filter gewichtete Spektrum des Signals

LAM: Pegel der einzelnen Spektralkomponenten

LAMK: Pegel der kritischen Barkbänder

e: Erregungszeitfunktionen

ff: Filterflanken d. Bänder bzw. Bändergewichtungsfunktionen

m: effektive Modulationsgrade

ho: Gleichanteile der Einhüllenden der Erregungszeitfunktionen

HBP: Spektrum der bandpaßgefilterten Einhüllenden der Erregungszeit- funktionen

kn1: arithmetisch, gewichtete Kreuzkorrelationskoeffizienten

kn2: quadratisch, geometrisch, gewichtete Kreuzkorrelationskoeffizienten

R: *Rauhigkeit-Einzahlwerte (12 Varianten, siehe R-Matrix Anhang A)*

rauhp12.m

SYNTAX:

R=rauhp12(m_i^{*},h₀,k_{n1}, k_{n2}, s)

m_i^{*}: effektive Modulationsgrade der Einhüllenden d. Erregungszeitfunktionen [1*47]
h₀: Gleichanteil der Einhüllenden d. Erregungszeitfunktion [1*47]
k_{n1}: arithmetisch gewichtete Kreuzkorrelationskoeffizienten [1*47]
k_{n2}: quadratisch, geometrisch gewichtete Kreuzkorrelationskoeffizienten [1*47]
s: Art der Superposition (s=1...linear, s=2...quadratisch, s=3...kubisch, etc)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet aus den effektiven Modulationsgraden m_i^{*} der 47 Barkbänder durch „Transformation“ die spezifischen Modulationsparameter r(i) und daraus weiter durch Superposition den Einzahlwert R auf 12 verschiedene Arten.

R ist ein Reihenvektor der Dimension 1 x 12 (Zusammensetzung des R Vektors siehe Aufbau der **R-Matrix**.) Durch den Parameter „s“ können alle beliebigen Superpositionen zum Einzahlwert R berechnet werden. Die verwendeten Trägerfrequenzgewichtungs-funktionen tfg1 und tfg2 müssen als MAT-Files vorliegen wie folgt:

TFG1.MAT mit der Variable tfg1
TFG2.MAT mit der Variable tfg2

Diese MAT.Files werden durch Aufruf von INITFILE angelegt.

rauhp24.m

SYNTAX:

R = rauh24 (m_i^{*}, h₀, k_{n1}, k_{n2})

Beschreibung der Eingabeparameter siehe RAUHP12

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet aus den effektiven Modulationsgraden m_i^{*} der 47 Barkbänder durch „Transformation“ die spezifischen Modulationsparameter r(i) und daraus weiter durch Superposition den Einzahlwert R auf 24 verschiedene Arten. R ist ein Reihenvektor der Dimension 1 x 24 (Zusammensetzung des R Vektors siehe Aufbau der R-Matrix, wobei die ersten 12 Varianten einer linearen Superposition mit [s=1] und die folgenden 12 einer quadratischen Superposition mit [s=2] entsprechen). Die verwendeten Trägerfrequenzgewichtungsfunktionen tfg1 und tfg2 müssen als MAT-Files vorliegen wie folgt:

TFG1.MAT mit der Variable tfg1
TFG2.MAT mit der Variable tfg2

Diese MAT.Files werden durch Aufruf von INITFILE angelegt.

rauschimp.m

SYNTAX:

sig = rauschimp (peff, dura, ti)

peff: effektiver Druckwert [$L_i = 20 \log(\text{peff}/p_0)$] (mit $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$)

dura: zeitliche Länge des Signals (in Sekunden)

ti: Dauer der Einhüllenden (in Sekunden)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion erzeugt ein Rauschimpulssignal sig. Der Impuls wird am Beginn ein- und am Ende ausgeblendet: fade in und fade out sind mit jeweils 1ms voreingestellt.

Benötigt die globale Variable:

fs.....Abtastfrequenz

readname.m

SYNTAX:

buffer = readname ('filename')

filename: Name der TXT-Datei (string), die gelesen werden möchte

BESCHREIBUNG:

Lieft den Inhalt einer TXT-Datei und schreibt deren Eintragungen zeilenweise in einen Puffer buffer.

readF.m

SYNTAX:

F = readfile ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (Extension F) inklusive Pfad

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion wird benutzt, um aus den angelegten Files, welche die Schwankungsstärkewerte im „Floatingpoint-Format“ beinhalten, die entsprechende F Matrix wieder herzustellen. Das Ergebnis wird in eine F Matrix [48*x] gespeichert, wobei "x" ist abhängig von der analysierten Siganallänge ist.

readI.m

SYNTAX:

[T, I, P] = readI ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (Extension I) inklusive Pfad.

BESCHREIBUNG:

Öffnet jene Datei, die durch name selektiert wurde und liefert für die Dateien *.I1 die Vektoren T (Zeitpunkte der Detektionen), I (detektierte Impulse) und P (zeitlicher Pegelverlauf) zurück.

Jedoch für die Dateien *.I2 liefert diese Funktion die Vektoren T (Detektionen; 0 oder 1, zur Bestimmung des Zeitpunktes der Detektion muß die Position im Vektor mit 0.002 multipliziert werden), I (Pegelüberschuß vorne) und P (Pegelüberschuß hinten).

readkal.m

SYNTAX:

[kall, kalr, channels, flag] = readkal ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (string) inklusive Pfad

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion dient zum Lesen der Kalibrierungsfaktoren (kall linker Kalibrierungsfaktor, kalr rechter Kalibrierungsfaktor) aus Soundfiles, die einen erweiterten HEADER mit zusätzlichen INFO-BLOCK besitzen. Weiters wird die Anzahl der vorhandenen Kanäle (channels = 1...Mono, 2...Stereo) und ein Kontrollzeichen (flag = 'valid' oder 'false') für die Gültigkeit der Daten ausgegeben.

readL.m

SYNTAX:

[Nsone, LN, dB_A, S] = readL ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (Extension L) inklusive Pfad

BESCHREIBUNG:

Öffnet die Datei 'name' und liefert die berechneten Vektoren Nsone die Lautheit in sone, LN die Lautstärke in phon, dB(A) A-bewerteter Pegel in dB und S Schärfe in acum zurück.

Die Vektoren besitzen jeweils die Dimension [1*x], wobei „x“ von der Signallänge abhängig ist.

readP.m

SYNTAX:

[TP, OP] = readP ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (Extension P) inklusive Pfad

BESCHREIBUNG:

Öffnet die Datei 'name' und liefert die berechneten Vektoren TP...die Terzpegel in dB [x*28] und OP...die Oktavpegel in dB [x*10] zurück. „x“ ist abhängig von der untersuchten Signallänge.

readpn.m

SYNTAX:

[y, flag] = readpn (Filename, offset, Blocklänge, Kalib.fakt(li), Kalib.fakt(re))

Filename: Name des WAV-Files (STRING)
offset: Startpunkt des Ausschnittes
Blocklänge: Länge des Ausschnittes (in Samples)
Kalib.fakt(li): Kalibrierungsfaktor für den linken Kanal
Kalib.fakt(re): Kalibrierungsfaktor für den rechten Kanal

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion liest aus einem Soundfile `Filename` von einer bestimmten Stelle `offset` eine Anzahl von Samples, die durch den Wert `Blocklänge` angegeben werden. Weiters kann mit `Kalib.fakt(li)` bzw. `Kalib.fakt(re)` eine Kalibrierung (Umrechnung in Druckwerte) durchgeführt werden. Diese Kalibrierungsfaktoren können mit `READKAL` bestimmt werden, falls die Files einen `INFO-HEADER` besitzen, anderenfalls sollte vorher eine Kalibrierfaktorberechnung mittels `WRITEINFO` stattfinden. `y` ist eine Matrix, wobei die erste Zeile dem linken und die zweite Zeile dem rechten Kanal entspricht. `flag` gibt die Gültigkeit ('valid' oder 'false') der Daten an.

readR.m

SYNTAX:

R = readfile ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (Extension R bzw. RNK)
inklusive Pfad

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion wird benutzt, um aus den angelegten Files, welche die R-Einzelwerte (kalibriert und unkalibriert) im „Floatingpoint-Format“ beinhalten, die entsprechende R Matrix [`x*144`] wieder herzustellen. „`x`“ ist abhängig von der untersuchten Signallänge.

readT.m

SYNTAX:

T = readfile ('name')

name: steht für den gewünschten Filenamen (Extension T) inklusive Pfad

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion wird benutzt um aus den angelegten Files, welche die Klanghaftigkeitswerte im „Floatingpoint-Format“ beinhalten, die entsprechende T Matrix [1*x] wieder herzustellen. „x“ ist von der untersuchten Signallänge abhängig.

rmodell.m

SYNTAX:

R = rmodell (fid, channels, kanal, meth, bias, k, l)

fid: File Identifikation

channels: Anzahl der Kanäle (1 = MONO, 2 = STEREO)

kanal: Auswahl des linken ('l'), des rechten ('r') Kanals bzw. ('m') für Mono

meth: Auswahl der Berechnungsmethode mit:

meth=1.....Erregungszeitfunktionen werden mittels absoluter Pegel der spektralen Komponenten berechnet

meth=2.....Erregungszeitfunktionen werden mittels absoluter Pegel der kritischen Bänder berechnet

bias: BYTE-OFFSET, ab dem die Signaldaten beginnen

k: Kalibrierungsfaktor des selektierten Kanals

l: Länge des Soundfiles in Samples, die untersucht werden können

BESCHREIBUNG:

Berechnet für die selektierte Berechnungsmethode die Einzahlwerte R. Die Ausgabe der Funktion ist ähnlich der R-Matrix, eine Matrix mit variabler Anzahl von Zeilen und 72 Spalten (Aufbau siehe R-Matrix). Die 72 Spalten entsprechen den fixen Varianten. Die Anzahl der Zeilen ist abhängig von der Länge des Soundfiles; sie entsprechen der Anzahl der Signalblöcke der Länge N mit dem Versatz HS=4800 Punkte. Die Eingabeparameter beziehen sich zum Großteil auf das zu analysierende Soundfile und sind wie oben spezifiziert. Sie können mit FILEINFO erstellt werden.

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

N.....Blocklänge [1*1]

u.....Energie der Fensterfunktion [1*1]

w.....Fensterfunktion [1*N]

WICHTIG: Das Soundfile muß vor Aufruf dieser Funktion geöffnet werden und im „Lesemodus“ betrieben werden.

roughcalc.m

SYNTAX:

roughcalc

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Automation der Berechnung der R-Matrix, mit kalibrierten Werten, für beliebige Soundfiles. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien, in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions werden automatisch hinzugefügt: _KANAL.R (mit KANAL = 'l' oder 'r' bzw. 'm'). Gelesen werden die Daten mit der Funktion READR.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger - Editor geöffnet werden.

roughcalc1.m

SYNTAX:

roughcalc1

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Automation der Berechnung der R-Matrix, mit unkalibrierten Werten, für beliebige Soundfiles. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien, in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions werden automatisch hinzugefügt: _KANAL.RNK (mit KANAL = 'l' oder 'r' bzw. 'm'). Gelesen werden die Daten mit der Funktion READR.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger - Editor geöffnet werden.

schwankungstest.m

SYNTAX:

schwankungstest

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Untersuchung von Testsignalen hinsichtlich der Schwankungsstärke.

Die Ergebnisgrößen lauten wie folgt:

- e_*: ³⁸ Einhüllende der abtastreduzierten, teilgefilterten Erregungszeitfunktionen
- m*: effektive Modulationsgrade
- h*: Gleichanteile der Einhüllenden der abtastreduzierten, teilgefilterten Erregungszeitfunktionen
- HBP*: Spektrum der bandpaßgefilterten Einhüllenden der abtastreduzierten, teilgefilterten Erregungszeitfkt. (33 bins je Berechnung für die 47 Bänder)
- f_*: spezifischen Teilschwankungsstärken
- F: Schwankungsstärkeeinzahlwerte (48 Varianten)

sfr.m

SYNTAX:

Signal = sfr (fid, kanal , channels, offset, length)

- fid: Fileidentifikation (File muß bereits geöffnet sein)
- kanal: Selektion des linken 'l' bzw. des rechten 'r' Kanals (STEREO) bzw. 'm' für Mono.
- channels: # der vorhandenen Kanäle
- offset: Positionierung des Blockbeginns im File
- length: Länge des zu lesenden Signalausschnittes (Blockes)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion ermöglicht das gezielte Lesen eines Kanals aus einem Soundfile für jeweils einen Blockausschnitt der Länge length und gibt dieses Signal in Form eines Reihenvektors [1*length] aus. Wird fälschlicherweise linker oder rechter Kanal bei einem MONO Soundfile gewählt, so wird dieser Fehler automatisch korrigiert.

³⁸ * steht für Berechnungsmethode 1 bzw. 2 d.h.: Die Variablen lauten e_1 und e_2.

spezfluct.m

SYNTAX:

[f, ka, kg] = spezfluct (h, HBP, m)

- h: sind die Gleichanteile der abtastreduzierten, teilgefilterten Einhüllenden [47*n]; mit n ist eine natürliche, ganze Zahl
- HBP: sind die Spektren der bandpaßgefilterten Einhüllenden [47*33n]; mit n ist eine natürliche, ganze Zahl
- m: stellt die effektiven Modulationsgrade der bandpaßgefilterten Einhüllenden dar [47*n]; mit n ist eine natürliche, ganze Zahl

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion dient zur Berechnung der spezifischen Schwankungsstärken f. Weiters werden die normierten Korrelationsgewichtungen ka (arithmetisch) und kg (quadratisch, geometrisch) berechnet.

f ist eine 3-dimensionale Größe $f = f(x,y,z)$:

x -Komponente: steht für jeweiliges Band (1 bis 47)

y-Komponente: steht für jeweilige Berechnung (abhängig von der Soundfilelänge)

z-Komponente: steht für jeweilige Berechnungsvariante (1 bis 12)

sppegel.m

SYNTAX:

L_{AM} = sppegel (P_{AM}, U)

P_{AM}: ist das außen- und mittelohrgefilterte Spektrum des Signalausschnittes.

U: Energie des verwendeten Fensters.

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet für jede Spektralkomponente eines Spektrums den absoluten Pegel bezüglich des Bezugsschalldruck mit $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ und liefert einen Vektor [1*length(P_{AM})/2] mit den dB Werten der Spektralkomponenten als Ergebnis zurück.

tabber.m

SYNTAX:

tab = tabber (tn, df, M)

tn: Name der Tabelle
df: Interpolationsstützstelle bzw. Frequenzauflösung
M: Blocklänge, für die die Tabelle berechnet werden soll

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion interpoliert Tabellenwerte an bestimmten Stützstellen und erzeugt einen Reihenvektor tab mit definierter Länge M und spiegelsymmetrischem Werteverlauf.

tabellen.m

SYNTAX:

tabellen

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Initialisierung des Arbeitsbereiches für die Rauigkeits- und Schwankungsstärkeberechnung. Alle Tabellen, die für das "allgemeine Modell für Modulationsparameter" verwendet werden, sind hier enthalten. Dieses Script wird durch INITFILE bzw. von den Automationsprogrammen ROUGHCALC, ROUGHCALC1 und FLUCTUATION aufgerufen. Durch Aufruf dieser Datei werden alle interpolierten Tabellen initialisiert und die benötigten Variablen neu berechnet und als MAT-Files gespeichert. Folgende Tabellen sind hier eingetragen:

AM.....Außenmittelohrfilter (Dämpfung)

DRHS100.....Diff. zw. Ruheschwelle und 100 Phonkurve

AURES.....modifizierte Aureskurven

FUGK.....frequenzunabhängige Gewichtungskurve

RRK.....R-Rauigkeits-Kurve

tgf1, tgf2.....Trägergewichtungsfunktionen

tab3.....beinhaltet Verschiebungswerte dk und Blocklängen M

Für Details siehe „Algorithmus für die Rauigkeitsberechnung“ (Höldrich/Pflüger1998a).

Benötigte globale Variablen:

N.....Blocklänge default: 8192
fs.....Abtastfrequenz default: 48000
df.....Frequenzauflösung default: (fs/N)
M1.....Blocklänge1 default: 1024
M2.....Blocklänge2 default: 2048
M3.....Blocklänge3 default: 4096

tbfftg.m

SYNTAX:

$P_{AM} = \text{tbfftg}(\text{Signal}, w, \text{Offset})$

Signal: Folge von absoluten Druckwerten [1*(mind.)N]

w: Fensterfunktion [1*N]

Offset: Position in Signalausschnitt, falls Signal länger als N-Punkte ist

BESCHREIBUNG:

Die Funktion **tbfftg** beinhaltet folgende Punkte:

b schneidet aus dem Signal einen Block der Länge N. **f** fenstert diesen Block mit einer Fensterfunktion. **ft** transformiert diesen gefensterten Block mit der Fouriertransformation und **g** gewichtet das erhaltene Spektrum mit der Außenmittelohr-Gewichtungsfkt. Das Ergebnis wird in Form eines Vektors P_{AM} [1*N] zurückgeliefert. Der Parameter Offset wird für Testzwecke benötigt z.B. Untersuchung unterschiedlicher Phasenlagen, Untersuchung eines speziellen Ausschnittes aus einem Soundfile, etc.

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

AM....Außen-, Mittelohrfilter [1*N]

N.....Blocklänge [1*1]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

terzfilterbank.m

SYNTAX:

$[P, F] = \text{terzfilterbank}(\text{Signal}, F_s, T)$

Signal: zu analysierendes Signal, Folge von absoluten Druckwerten (Dim. 1*x)

Fs: verwendete Abtastfrequenz

T: Integrationsintervall (optional in Sekunden)

BESCHREIBUNG:

Berechnet das Terzbandspektrum des Signals unter Berücksichtigung der Abtastfrequenz. P ist ein Reihenvektor und beinhaltet die Pegel (gemessene Effektivwerte RMS), die für jedes Terzband berechnet werden und wird in dB (bezüglich $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$) angegeben. P ist eine Matrix $[(\text{LENGTH}(\text{Signal})/(T*F_s))*\text{LENGTH}(F)]$, wobei F jener Vektor ist, der die Mittenfrequenzen der Terzbänder enthält (Standard ANSI S1.6-1984). Ist $T = []$, dann wird die Gesamtdauer des Signals als Integrationszeit herangezogen.

terzkomp.m

SYNTAX:

Pout = terzkomp (Pin);

Pin: 28 Terzpegel in dB [28*1]

BESCHREIBUNG:

Das Terzpegelspektrum Pin wird bezüglich dominanter Komponenten untersucht. Sind solche vorhanden, so werden Sie aus dem originalen Terzpegelspektrum entfernt. Das „gereinigte“ Terzpegelspektrum wird als Pout ausgegeben.

testsignal.m

SYNTAX:

SIG = testsig (Fs, dura)

Fs: Abtastfrequenz

dura: zeitliche Länge des Signals (in Sekunden)

BESCHREIBUNG:

Erzeugt ein Testsignal SIG (Folge von absoluten Druckwerten) nach Wahl.

tezeitfkb.m

SYNTAX:

[e, filfla] = tezeitfkb (L_{AM(k)}, L_{AM}, P_{AM})

L_{AM(k)}: absoluter Pegel für jedes kritische Band [1*47]

L_{AM}: absoluter Pegel für jede Spektralkomponente [1*N/2]

P_{AM}: außen- und mittelohrgefiltertes Signalspektrum [1*N]

BESCHREIBUNG:

Berechnung der Erregungszeitfunktion e und Filterflanken filfla unter Zuhilfenahme der absoluten Pegel, die sowohl für jedes kritische Band (L_{AM(k)}) als auch für jede Spektralkomponente (L_{AM}) berechnet wurden. Diese Funktion dient zu Testzwecken. Das Ergebnis sind zwei Matrizen [47*max(M_i)].

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

DHRS100...Differenz zwischen Ruhehörschwelle und 100-Phonkurve [47*1]

tab3.....Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte,
Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung) [47*2]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

tezeitfs.m

SYNTAX:

[e, filfla] = tezeitfs (L_{AM}, P_{AM})

L_{AM}: absoluter Pegel für jede Spektralkomponente [1*N/2]

P_{AM}: außen- und mittelohrgefiltertes Signalspektrum [1*N]

BESCHREIBUNG:

Berechnung der Erregungszeitfunktion e und Filterflanken filfla unter Zuhilfenahme der absoluten Pegel, die für jede Spektralkomponente (L_{AM}) berechnet wurden. Das Ergebnis sind zwei Matrizen [47*max(M_i)].

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

DHRS100...Differenz zwischen Ruhehörschwelle und 100-Phonkurve [47*1]

tab3.....Verschiebungsindizes und Blocklängen (siehe Tabelle 3, k_i und M_i Werte,
Algorithmus zur Rauigkeitsberechnung) [47*2]

df.....Frequenzauflösung [1*1]

tmodell.m

SYNTAX:

T = tmodell (fid, channels, kanal, bias, k, l)

fid: File Identifikation
channels: Anzahl der Kanäle des Soundfiles (1 = MONO, 2 = STEREO)
kanal: Selektierter Kanal zur Analyse ('l' oder 'r' bzw. 'm')
bias: BYTE-OFFSET, ab dem die Signaldaten beginnen
k: Kalibrierungsfaktor bzw. Umrechnungsfaktor für p(n)-Werte.
l: Länge des Soundfiles in Samples

BESCHREIBUNG:

Berechnung der Tonhaltigkeit (Klanghaftigkeit) eines Soundfiles. Die Eingabeparameter beziehen sich zum Großteil auf das zu analysierende Soundfile und sind wie oben spezifiziert. Sie können mit FILEINFO erstellt werden.

Die Funktion benötigt globale Variablen => **INITFILE**.

Benötigte globale Variablen:

N.....Blocklänge [1*1]
fs.....Abtastfrequenz [1*1]
w.....Fensterfunktion [1*N]
u.....Energie der Fensterfunktion [1*1]
FELD..... 'f' Freifeld- oder 'd' Diffusfeldmeßwerte (string) nicht durch INITFILE generiert

tonality.m

SYNTAX:

tonality

BESCHREIBUNG:

Programm zur Automation der Berechnung der Klanghaftigkeit beliebiger Soundfiles. Die zu berechnenden Soundfiles müssen in den TXT-Dateien wav.txt und save.txt eingetragen werden. wav.txt enthält die Namen der zu untersuchenden Dateien und save.txt die Namen jener Dateien, in denen die Ergebnisse gespeichert werden. Die richtigen Extensions werden automatisch hinzugefügt: _KANAL.T (mit KANAL = 'l' oder 'r' bzw. 'm'). Gelesen werden die Daten mit der Funktion READT.

WICHTIG: Vor Aufruf des Programms muß der Debugger-Editor geöffnet werden.

tonalitytest.m

SYNTAX:

tonalitytest

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm dient zur Berechnung der Klanghaftigkeit von Testsignalen nach den Modellansätzen von AURES. Die Klanghaftigkeit wird durch das Verhältnis von Geräuschlautheit zu Gesamtlautheit bestimmt.

Die Ergebnisgrößen lauten wie folgt:

Nges: Gesamtlautheit des Signals
Ngr: Lautheit des Geräuschanteils
K: Klanghaftigkeit bzw. Tonhaltigkeit

tonimp.m

SYNTAX:

sig = tonimp (peff, dura, ti, freq)

peff: Pegel des Sinus (Tones)
dura: zeitliche Länge des Signals (in Sekunden)
ti: Dauer der Einhüllenden (in Sekunden)
freq: Frequenz des Tonimpulses (in Hz)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion erzeugt ein Tonimpulssignal sig. Der Impuls wird am Beginn ein- und am Ende ausgeblendet: fade in und fade out sind mit jeweils 1ms voreingestellt.

Benötigt die globale Variable:
fs.....Abtastfrequenz

tonkomp.m

SYNTAX:

Terzpegel = tonkomp (Signal, W, U)

Signal: Folge von absoluten Druckwerten

W: Fensterfunktion [1*LENGTH(Signal)]

U: Energie der Fensterfunktion

BESCHREIBUNG:

Das Signal wird bezüglich tonaler Komponenten (prominente Spektralpeaks) untersucht. Sind solche vorhanden, dann werden sie vom Signal entfernt und die Ausgangsgröße Terzpegel entsteht. Diese Pegelwerte enthalten keine tonalen Komponenten mehr. Mit W wird die Fensterfunktion definiert; sie muß dieselbe Länge wie das Signal besitzen. Mit U wird die Energie des Fensters spezifiziert. Dieser Wert wird zur Normierung bei der Berechnung der spektralen Pegel herangezogen.

wavesig.m

SYNTAX:

SIG = wavesig (fid, channels, kal, bias, Sflength, kanal, length)

fid: File Identifikation

channels: Anzahl der Kanäle (1=MONO, 2=STEREO)

kal: Kalibrierungsfaktor der zu analysierenden Soundfilespur

bias: BYTE-OFFSET, ab dem die Signaldaten beginnen

Sflength: Länge des Files in Samples, die untersucht werden können

kanal: zu analysierender Kanal 'l' oder 'r' bzw. 'm'

length: Länge des zurückgelieferten Signals in Punkten

BESCHREIBUNG:

Aus dem bestimmten Kanal des selektierten Soundfiles wird ein Block der Länge N=8192 Punkte oder ein benutzerdefinierter Ausschnitt der Länge length gelesen. Dieser wird durch den Kalibrierungsfaktor in absolute Druckwerte umgerechnet und als Signal SIG zurückgeliefert. Die filespezifischen Angaben können mit FILEINFO gefunden werden.

WICHTIG: Das Soundfile muß vor Aufruf dieser Funktion geöffnet werden und im „Lesemodus“ betrieben werden.

window.m

SYNTAX:

[w, U] = window (N, 'wname')

N: legt die Länge des Fensters fest (in Punkten)

wname: Selektiert die Art des Fenstertypus:
wname = 'tukey' (50% Tukey-Fenster)
wname = 'hanningf' (Hanningfenster)

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion generiert die Fensterfunktion w, wobei N die Länge des Fenster [1*N] bestimmt. U ist die Energie des Fensters.

writeinfo.m

SYNTAX:

writeinfo

BESCHREIBUNG:

Dieses Programm berechnet für die Original Soundfiles den Kalibrierungsfaktor für den linken und rechten Kanal (STEREO) bzw. für einen Kanal (MONO) anhand eines Kalibrierungssignals. Diese und weitere Informationen werden in die Header der neuen Soundfiles (siehe MAKEINFO) geschrieben. Für Stereoaufzeichnungen müssen zwei Kalibrierungssignale (Stereosoundfiles), eines für den linken und eines für den rechten Kanal, vorhanden sein. Für Monoaufzeichnungen genügt ein Kalibrierungssignal (Monosoundfile). Die Namen der Soundfiles müssen in der Datei wav.txt angeführt werden und die Namen, unter denen sie gespeichert werden sollen, müssen in der Datei save.txt angeführt werden.

SYNTAX:

[N, LN, S] = zwicker (Terzpegel, Methode)

Terzpegel: 28 Terzpegel in dB, für die unten spezifizierten Mittenfrequenzen

Methode: 'f' für Freifeldmeßwerte oder 'd' für Diffusfeldmeßwerte

BESCHREIBUNG:

Diese Funktion berechnet aus 28 Terzpegeln [28x1] und der Eingabe Methode = 'f' oder 'd' für freies oder diffuses Schallfeld N die Lautheit in sone, LN die Lautstärke in phon und S die Schärfe in acum. Die Terzbänder erstrecken sich von $f_m = 25$ Hz bis $f_m = 12.5$ kHz nach ANSI S1.6 – 1984 Standard Format.