

Technische Universität Dresden

**Meßtechnische Untersuchungen zur  
Analyse nichtstationärer Signale für die  
Anpassung mehrkanaliger Hörgeräte**

**Hannes Seidler**

von der Fakultät Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieurs**

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Freyer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frühauf

Prof. Dr.-Ing. Fastl

Dr.-Ing. Haubold

Tag der Einreichung: 12.10.1999

Tag der Verteidigung: 29.06.2000

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Ziel der Arbeit und Lösungsansatz	5
3	Kenngrößen natürlicher Klangbilder	8
3.1	Signalcharakterisierung	8
3.1.1	Natürliche Klangbilder - akustische, zufällige Signale	8
3.1.2	Spezielle signalanalytische Eigenschaften von Sprache	10
3.2	Analyseverfahren	15
3.2.1	Untersuchungen im Frequenzbereich	15
3.2.2	Verfahren im Zeitbereich	19
3.2.3	Analyse psychoakustischer Eigenschaften	21
3.3	Einfluß von Hörschäden und Hörgeräten auf die Bewertung von Klangbildern	24
3.3.1	Wirkung von Hörschäden auf Frequenz-, Pegel- und Zeitverlauf des wahrgenommenen Signals	24
3.3.2	Hörgerätekonzepte und Einstellparameter	27
3.4	Konsequenzen für die Auswahl von Analysekenngößen	33
4	Meßsystem zur Signalanalyse von natürlichen Klangbildern	35
4.1	Kalibrierung des Signalweges	35
4.2	Untersuchungen im Spektrum	39
4.2.1	Terzanalyse	39
4.2.2	Ableitung spektraler Signalparameter aus der Pegelhäufigkeitsverteilung	42
4.2.2.1	Effektivwert / Schalldruckpegel	42
4.2.2.2	Pegelhäufigkeitsverteilung	44
4.2.2.3	Quantilpegel / Überschreitungspegel	45
4.2.2.4	Mittelungspegel	47
4.2.3	Ergebnisse	51
4.3	Untersuchung der Zeitstruktur	54
4.3.1	Bildung der Enveloppe mit selbsthaltendem Maximalwertdetektor	54
4.3.2	Abgeleitete Größen zur Signaldynamik	56
4.3.3	Ergebnisse	58
4.4	Untersuchung der Lautheit	60
5	Auswertung der Meßdaten	63
5.1	Gruppenbildung durch statistische Bewertung der Analysedaten	63
5.1.1	Merkmalsbestimmung unter Verwendung von Mittelungs- und Überschreitungspegeln	63
5.1.2	Methoden der Klassifizierung	67
5.1.3	Merkmalsauswahl durch Faktorenanalyse	68
5.1.4	Klassierung durch Clusteranalyse	75
5.2	Parameterstreuungen in den inhaltlichen Klangbildgruppen	81
5.3	Gruppierung der Klangbilder nach signalanalytischen Kriterien	82
5.3.1	Gruppierende Parameter	82
5.3.2	Beschreibung der Gruppen	85
5.3.3	Zusammenhang inhaltlicher und signalanalytischer Gruppen	86

5.4 Klangbild-Wissensbasis zur Hörgeräteanpassung .....	88
5.5 Weiterführende Untersuchungen .....	91
6 Zusammenfassung .....	94
7 Literaturverzeichnis .....	96
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole .....	102
Anhang .....	103

## 1 Einleitung

Die Fähigkeit des Hörens erlaubt es, akustische Reize aus der Umgebung wahrzunehmen und zu verarbeiten. Die Leistungen des Gehörs beziehen sich dabei vor allem auf

- die Wahrnehmung von Sprache,
- die Kontrolle der eigenen Sprachlautproduktion und
- die Wahrnehmung des akustischen Umgebungsraumes [Wed-82b].

Sprachliche Kommunikation ist die Basis des täglichen Informationsaustausches und sichert die Kontakte und den Bezug zum sozialen Umfeld.

Um so schwerer wiegt eine Minderung des Hörvermögens. Häufig wird sie erst bei Sprachverständnisproblemen bewußt wahrgenommen. Die Umgebung reflektiert diesen Hörverlust meist als Behinderung. Daraus resultiert, daß die Betroffenen meist weniger unter der eigentlichen Schwerhörigkeit leiden als vielmehr unter den meist einschneidenden Lebenserschwernissen und Konflikten ([Ric-90], [Eit-90]).

Der Einsatz von Hörgeräten ermöglicht in vielen Fällen eine Besserung dieses Zustandes. Die derzeit verfügbare Technik ist in der Lage, verschiedenen Hörstörungen gerecht zu werden.

Konventionelle Geräte beschränken sich oft auf die breitbandige Verstärkung der akustischen Signale, ergänzt durch Filter zur Beeinflussung des Hochton- oder Tieftoneempfindens. Zur Anpassung dieser Geräte an den Hörschaden werden Verfahren angewendet, die auf den Erfahrungen umfangreicher Feldtests aufbauen. Seit *Carhart* 1946 eine Methode zur Geräteauswahl veröffentlicht hat [Car-46], ist man bestrebt, Berechnungsvorschriften zur Voreinstellung unter Berücksichtigung der Hörschwelle, ihrer Frequenzabhängigkeit und in jüngerer Zeit auch des Lautheitsausgleiches aufzustellen. Beispiele dafür sind die in ständiger Entwicklung befindlichen Verfahren wie POGO [Can-83], NAL [Byr-86], die Methoden nach *Berger* [Ber-85] und *Keller* [Kel-80] oder die Hörflächenskalierung [Kol-97].

Die Grenzen dieser Vorgehensweise liegen

1. in der unzureichenden Berücksichtigung individueller Hörgewohnheiten und Erwartungen,
2. in der fehlenden Aktivierung des Hörgeschädigten während der Anpassung und
3. in der eingeschränkten Eignung für nichtlinear verstärkende Geräte (vgl. [Kil-95]).

Moderne, digital arbeitende Hörgeräte bieten eine Vielzahl von einstellbaren Parametern. Sie sind auf der Grundlage vorgegebener oder auch frei implementierbarer Algorithmen beispielsweise in der Lage, eine sehr detaillierte Klangbeeinflussung vorzunehmen, auf die Dynamik des Signals zu wirken, die räumliche Wahrnehmung zu beeinflussen und störende Geräusche zu unterdrücken. Die Vorgehensweise für die Adaption derartiger Geräte an den speziellen Hörschaden und das resultierende Empfinden des Schwerhörigen sind meist produktspezifisch. Zudem fällt es schwer, die Komplexität von Alltagssituationen im Studio des Hörgeräteakustikers nachzubilden. Inkompatible Programmierereinheiten und Softwaresysteme verzögern neben technischen Schwierigkeiten und den steigenden Gerätekosten zusätzlich die breite Einführung dieser leistungsfähigen Technik.

Angesichts der Tatsache, daß in Deutschland ein Drittel aller Hörgeräteträger mit der Versorgung unzufrieden sind [Sto-95], ist es angebracht, den Anpassvorgang in den Mittelpunkt wissenschaftlicher Arbeiten zu stellen, um bessere Lösungen zu finden.

Hauptziel gegenwärtiger Untersuchungen zu diesem Thema ist die Entwicklung von Anpaßverfahren, die der technischen Hörgeräteentwicklung gerecht werden, produktunabhängig arbeiten und eine hohe Akzeptanz beim Kunden sichern. Die Verwendung alltagsüblicher Geräusche, die den Problemhörbereichen entsprechen, wird zunehmend praktiziert und von den Anwendern gefordert (vgl. [Ses-96]). *Fedke et al.* beschreiben ein Verfahren, das natürliche Klangbilder als Testsignale sowohl zur Voreinstellung als auch zur Anpassung des gewählten Hörgerätes heranzieht [Fed-90]. Damit wird der Anpaßvorgang für den Hörgeräteträger inhaltlich leicht nachvollziehbar und bewirkt die Ausbildung einer positiven Grundhaltung zum Gerät.

Diese komplexe Herangehensweise erfordert eine Objektivierung der Einflußgrößen auf den Anpaßvorgang. Die Algorithmierung des Verfahrens erfordert analytische Größenbeschreibungen unter Verwendung von Methoden der Meßwertverarbeitung. Der zu versorgende Hörschaden, die natürlichen Klangbilder und die Eigenschaften der Hörgeräte müssen weitgehend bekannt sein, um gezielt auf die Empfindungen und Wünsche des Hörgeschädigten eingehen zu können.

## 2 Ziel der Arbeit und Lösungsansatz

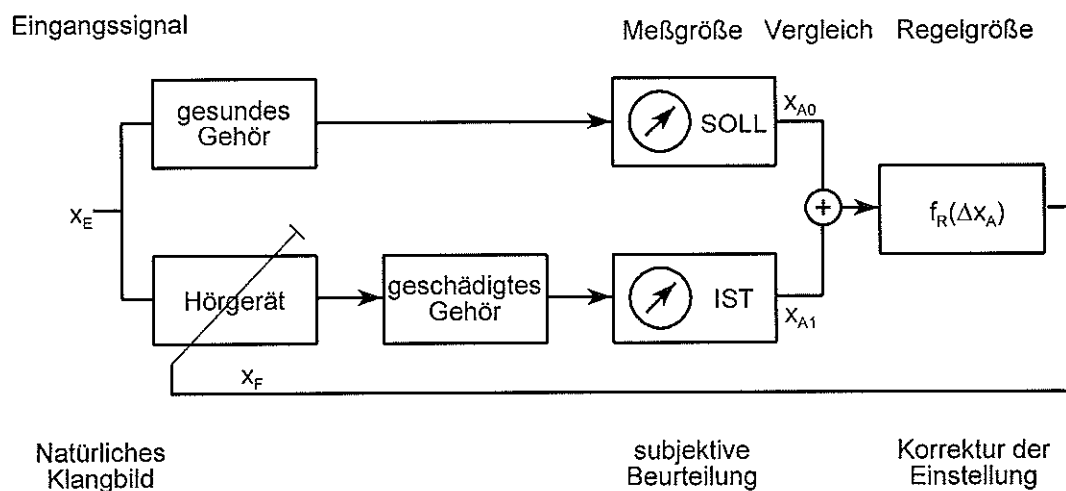
Die grundsätzliche Vorgehensweise einer Hörgeräteanpassung veranschaulicht Bild 2-1. Sie ist mit einer Funktionsprüfung elektronischer Baugruppen nach der Abgleichmethode vergleichbar. Ein geeignetes Eingangssignal  $x_E$  beeinflusst nach Verarbeitung durch ein Hörgerät und das Gehör die Meßgröße  $x_A$ :

$$x_{A0} = f_0(x_E) \quad (2.1)$$

$$x_{A1} = f_1(x_E, x_F) \quad (2.2)$$

Aus dem Vergleich von (2.2) mit den Werten für eine normalhörende Person (2.1) ergibt sich der Fehlerausgleich in Form einer Einstellkorrektur  $x_F$ :

$$x_F = f_R(x_{A1} - x_{A0}) \quad (2.3)$$



**Bild 2-1** Prinzip einer Hörgeräteanpassung mit Bezug zum Verfahren nach A-Life

Ist man bestrebt, die gesamte Signalverarbeitung vom freien Schallfeld bis zur Wahrnehmung zu erfassen, stellen subjektive Beurteilungen die Meßgrößen  $x_{A0}$  und  $x_{A1}$  dar. Die Auswahl der Eingangssignale  $x_E$  als Testsignale für die beschriebene Anordnung muß

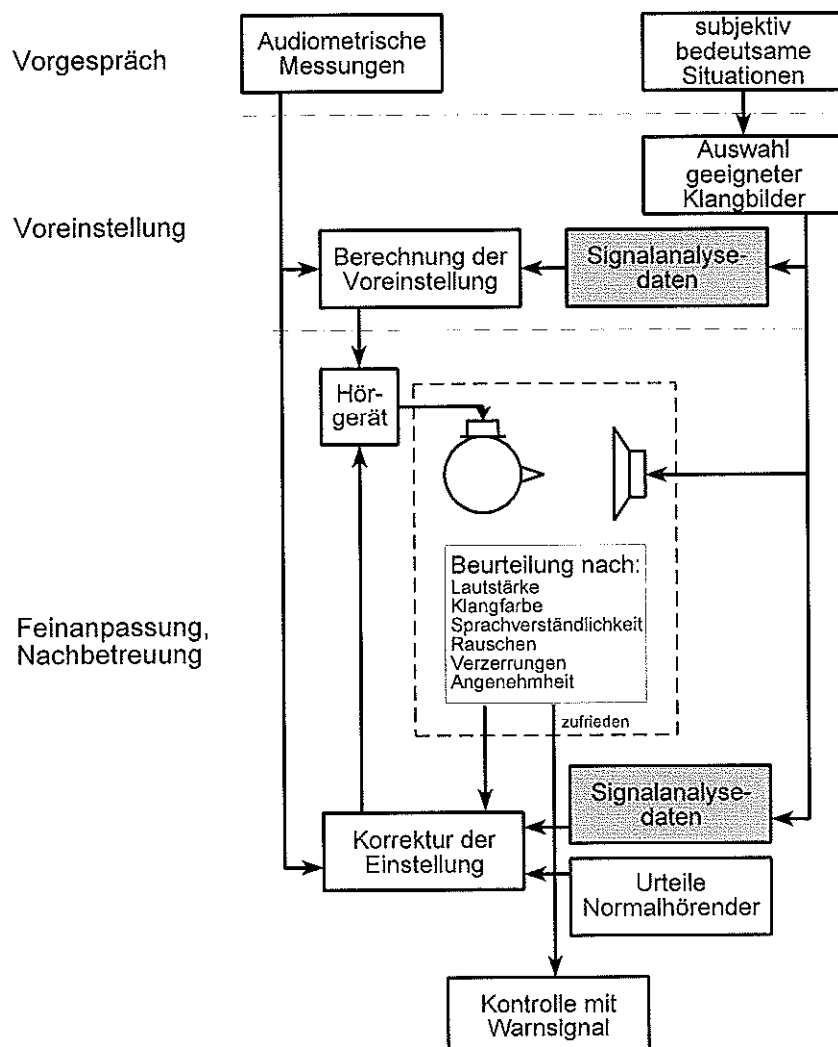
- abhängig vom Hörschaden sein,
- einen großen Einfluß auf die Meßgrößen haben und
- in ihrer Menge beschränkt sein.

Meßtechnisch entspricht das den Forderungen nach Fehlertoleranz und Meßbarkeit. Die Kenntnis der Signaleigenschaften und eine gezielte Auswahl sind daher wesentliche Bausteine zu einer erfolgreichen Anpassung.

Die gesamte Hörgeräteversorgung gilt dann als gelungen, wenn

- A. alltägliche und informationstragende Hörereignisse dem Menschen wieder zugänglich gemacht werden,
- B. die Hörerfahrungen und -gewohnheiten Berücksichtigung finden und
- C. der Schwerhörige das Gerät als Hilfe annimmt und sich zu seiner Hörschädigung bekennt.

Die Integration natürlicher Klangbilder in den Anpaßprozeß eröffnet Möglichkeiten, sowohl die Einseitigkeit synthetischer Signale und Sprachdiskriminationstests als auch die Vorbehalte gegenüber Hörgeräten beheben zu helfen.



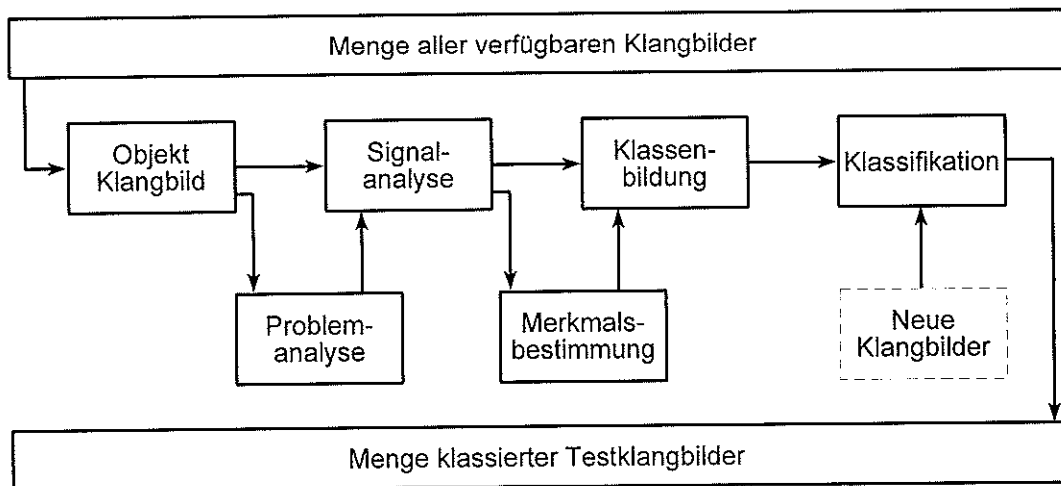
*Bild 2-2 Vorgehensweise einer Hörgeräteanpassung nach A-Life*

Unter dem Begriff der natürlichen Klangbilder sollen Signale verstanden werden, die ihrem Inhalt und subjektiven Parametern nach für Alltagssituationen des Menschen typisch sind und

leicht beurteilt werden können. Derartig komplexe Signale finden Anwendung im als "A-Life" bezeichneten Verfahren (vgl. [Fed-90], [Fud-95], [Hau-96]) zur Anpassung von Hörgeräten an die gestörte akustische Wahrnehmung eines Hörgeschädigten.

In Bild 2-2 wird die Vorgehensweise skizziert, die der Struktur von Bild 2-1 vergleichbar ist. Die wichtigsten Lebensbereiche des Schwerhörigen aber auch die problematischen Situationen bestimmen die Klangbildauswahl. Unter Berücksichtigung der Signaleigenschaften wird das Verarbeitungssystem (Hörgerät) auf Basis der audiologischen Daten voreingestellt. Es schließt sich ein Approximationsverfahren an, das je nach Beurteilung der Wahrnehmung durch den Hörgeschädigten im Vergleich zu Normalhörenden in einem Abgleichverfahren die Parameter des Verarbeitungssystems beeinflusst bzw. neue Klangbilder wählt. Die Charakteristika der Signale haben dabei ständig Einfluß auf die ermittelten Vorgaben. Auf diese Weise ist unter den gegebenen Bedingungen eine optimale Adaption des Hörgerätes realisierbar.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine an das Einsatzgebiet adaptierte Signalanalyse natürlicher Klangbilder vorzunehmen, um zu verwertbaren Kenntnissen über deren spektrale Zusammensetzung und Dynamikstruktur zu gelangen. Unter Berücksichtigung der speziellen Bedingungen in der Hörgeräteversorgung sind signalcharakterisierende Parameter herauszuarbeiten und zu untersuchen. Dabei wird Wert gelegt auf eine Relevanz der gewonnenen Größen für die Zusammenhänge zwischen Signal und Verarbeitungssystem ohne dabei die Bedeutung für die subjektive Wahrnehmung zu vernachlässigen. Das Analyseverfahren soll geeignet sein, ein breites Spektrum alltäglicher akustischer Situationen analytisch zu beschreiben. Typische Vertreter der wichtigsten Lebensbereiche und Klangbilder für spezielle Anpassaufgaben sind anhand ihrer charakteristischen Parameter vorzuschlagen.



**Bild 2-3** Prinzip der Analyse natürlicher Klangbilder

Die gewählte Lösungsstrategie veranschaulicht Bild 2-3. In der Problemanalyse werden die Randbedingungen der Analyse festgelegt und die Zusammenhänge zwischen Geräteeigenschaften, Hörschäden, Schallsignalen und meßbaren Größen berücksichtigt (Kapitel 3). Die Signalanalyse (Kapitel 4) untersucht alle bereitgestellten Objekte (Klangbilder) im Hinblick auf die ausgewählten Eigenschaften. In der Phase der Merkmalsbestimmung werden sowohl neue Größen auf der Basis der vorliegenden Daten generiert als auch einzelne Merkmale aus den Daten ausgewählt. Dieser Abschnitt der Datenanalyse ist wesentlich für den Erfolg der folgenden Klassenbildung. Der Aufbau einer Klassifikation ermöglicht letztendlich die Zuordnung bekannter und neuer Objekte in die gefundene Gruppenstruktur (Kapitel 5).



### 3 Kenngrößen natürlicher Klangbilder

Signalanalysen dienen der Erkennung und Beschreibung von Objekten. Sie sind nicht in der Lage, alle Eigenschaften dieser Objekte zu ermitteln. Vielmehr müssen die Merkmale im Vordergrund stehen, die für den jeweiligen Zweck signifikant sind.

Die Objekte der vorliegenden Betrachtungen sind natürliche Klangbilder, die nachfolgend anhand ihrer Eigenschaften beschrieben werden. Im Hinblick auf das gewünschte Ziel müssen innerhalb der vorbereitenden Problemanalyse die von der Signalanalyse erwarteten Parameter festgelegt werden. Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich deshalb mit einer Untersuchung bisheriger Verfahren und Methoden der Analyse und beschreibt die durch die Hörgerätetechnik und Merkmale der Schwerhörigkeit gegebenen Randbedingungen, bevor die Aufgabenstellung an die Signalanalyse formuliert wird.

#### 3.1 Signalcharakterisierung

##### 3.1.1 Natürliche Klangbilder - akustische, zufällige Signale

Die Untersuchungsobjekte der hier betrachteten Signalanalyse sind Schalldruck-Zeit-Funktionen, die aus der Umwelt auf das Gehör einwirken und gleichzeitig Informationsträger darstellen. Diese Zeitfunktionen  $\varphi$  sind als Abbildungen einer Zeitmenge  $T$  in ein Alphabet  $X$  zu verstehen:

$$\varphi: T \rightarrow X \quad (3.1)$$

Beide Mengen stellen Teilmengen der reellen Zahlen dar, d. h.

$$T \subset \mathbb{R}, X \subset \mathbb{R}. \quad (3.2)$$

Es wird durch die Abbildung  $\varphi$  jedem Zeitpunkt  $t$  ein Wert  $x \in X$  zugeordnet. Das Alphabet  $X$  wird hier durch die physikalische Größe Schalldruck  $p$  gebildet.

Die für die Untersuchungen notwendige weitere Transformation in die elektrische Spannung  $u$

$$f: p \rightarrow u \quad \text{mit } p \subset \mathbb{R}, u \subset \mathbb{R} \quad (3.3)$$

soll im betrachteten Anwendungsfall als linear angenommen werden. Sie stellt eine eindeutige Abbildung dar und genügt der Bedingung:

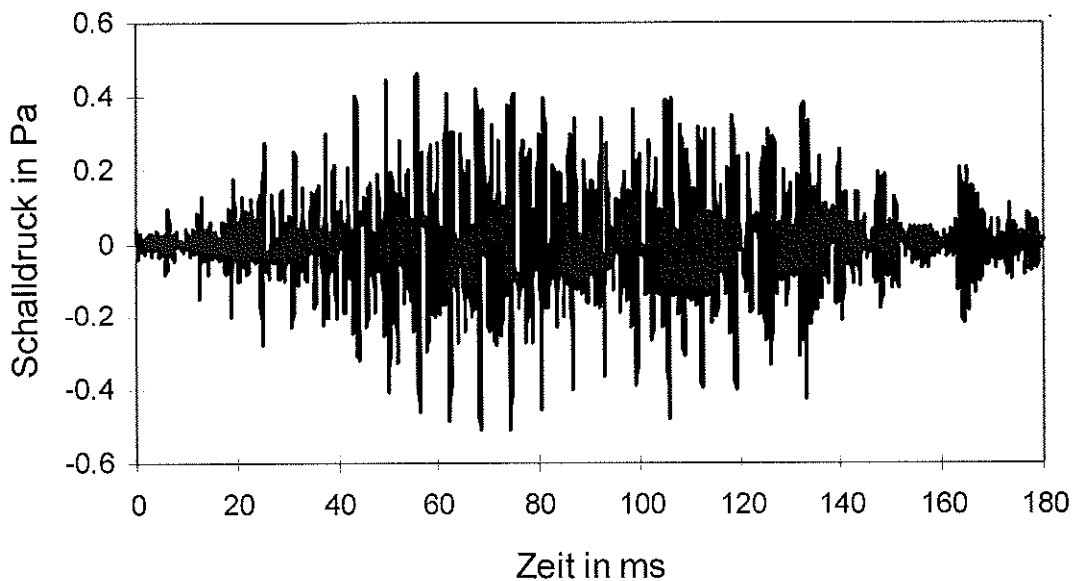
$$u = f(p) = k \cdot p \quad \text{mit } k = \text{const} \quad (3.4)$$

Die gute Linearität der zur Transformation verwendeten Mikrofone rechtfertigt diesen Zusammenhang.

Bild 3-1 zeigt ein Beispiel für die untersuchten Signale. Sie sind, da physikalischer Natur, stetig, d. h. es existieren die Grenzwerte

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f(t \pm \varepsilon) = f(t) \quad (3.5)$$

und sie genügen den Rechengesetzen der Signaloperationen [Wun-85].



*Bild 3-1 Schalldruck-Zeit-Verlauf aus dem Signal "Gespräch im Bus"*

Grundsätzlich lassen sich alle Signale in eine der folgenden Gruppen einordnen:

- periodische Zeitfunktionen,
- Zufallsfunktionen, die sowohl stationär als auch nichtstationär sein können und
- einmalige Vorgänge.

Die aus der Entstehung von Schallsignalen resultierenden multiplen Überlagerungen von Schallquellen (z. B. Unterhaltung bei Straßenlärm) erfordern für die betrachteten Signale die Einordnung in die Gruppe der Zufallsfunktionen. Deren herausragendes Merkmal ist das völlig unregelmäßige Schwanken der Zeitfunktion. Zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t = (-\infty, +\infty)$  kann auf der Basis des vorangegangenen Zeitverlaufs des Signals der Momentanwert eines zukünftigen Zeitpunktes nicht vorherbestimmt werden. Solche Funktionen sind durch spektrale Zerlegung und eine Hüllkurve nur eingeschränkt zu beschreiben.

Um eine Zufallsfunktion statt nichtstationär als stationär zu bestimmen, müssen für den zeitlichen Mittelwert und die Autokorrelationsfunktion gelten [Kra-70]:

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt \quad \bar{x} \neq f(t) \quad (3.6)$$

$$\psi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt \quad \psi(\tau) \neq f(t) \quad (3.7)$$

In den meisten Fällen sind die Bedingungen (3.6) und (3.7) über einen hinreichend langen Zeitraum ( $2T > 200$  ms [Zwi-67]) gegeben. Die Untersuchungen können sich deshalb vereinfachend auf die Merkmale quasistationärer Zufallsfunktionen beschränken und benutzen Methoden der statistischen Signalbeschreibung.

Es wird die Wahrscheinlichkeit betrachtet, mit der eine bestimmte Amplitude im Verlauf der untersuchten Zufallsfunktion auftritt. Bestimmt man sie für eine Vielzahl von Amplitudenintervallen, so formuliert diese meßtechnisch ermittelte Häufigkeitsverteilung eine erste Beschreibung des Signals. Die resultierenden Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen sind wichtige statistische Werkzeuge zur Signalanalyse und stellen die Berechnungsgrundlage für die später untersuchten Parameter dar.

Die Signale der zu untersuchenden natürlichen Klangbilder sind

- stetig,
- quasistationär zufällig und
- durch Amplitudenverteilungsfunktionen und abgeleitete Größen beschreibbar.

Diese Eigenschaften werden bei der Signalanalyse durch Wahl der Meßverfahren und Meßgrößen berücksichtigt.

### **3.1.2 Spezielle signalanalytische Eigenschaften von Sprache**

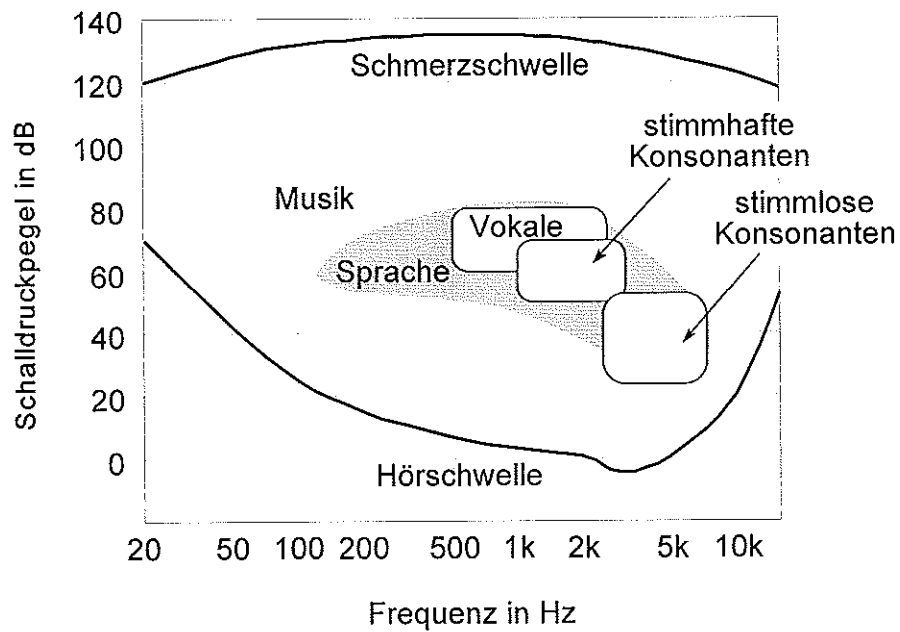
Die Sprache spielt im Bereich der akustischen Wahrnehmung eine herausragende Rolle. Das Ohr des Normalhörenden und die Verarbeitung im Gehirn besitzen eine hohe Leistungsfähigkeit, um die komplizierte Signalstruktur zu entschlüsseln und außerdem von Fremdgeräuschen zu trennen.

Gerade für den Schwerhörigen stellt akustisch nicht verstandene Sprache ein großes Problem dar. Überanstrengung, soziale Isolierung und psychische Schäden sind nicht selten Folgen einer solchen Störung [Eit-90]. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieser Abschnitt gesondert mit den Eigenschaften und der Struktur menschlicher Sprache, soweit sie für die Hörgeräteanpassung von Bedeutung sind.

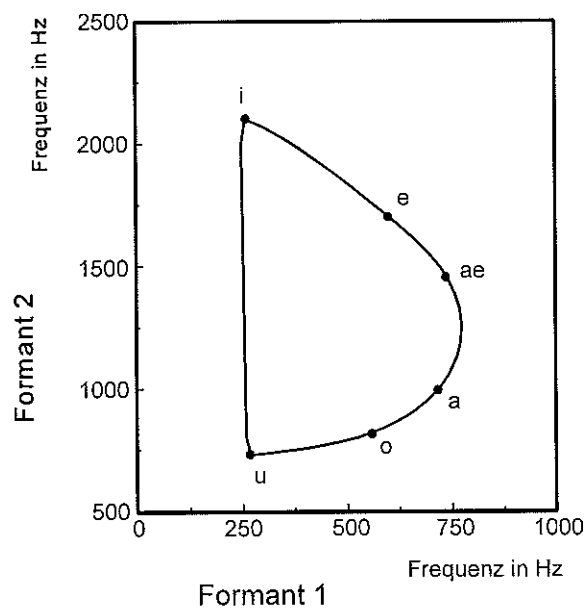
Bild 3-2 vermittelt einen Eindruck vom Frequenz- und Pegelumfang normaler Sprache, untergliedert in Hüllkurvenanteile und Beiträge von Vokalen und Konsonanten. Die Darstellung wird ergänzt durch die Signalfläche von Musik.

#### *Vokale*

Die wesentlichen Komponenten der Vokale liegen im Bereich zwischen 500 Hz und 2100 Hz und liefern hohe Schallpegel. Untersucht man die Spektralstruktur näher, zeigt es sich, daß Frequenzanteile existieren, die unabhängig vom Sprecher und spezifisch für den gewählten Vokal auftreten. Sie werden Formanten genannt und sind ebenfalls bei Flüstersprache zu beobachten.



**Bild 3-2** Hörfeld für Sprache und Musik [Rei-68]



**Bild 3-3** Vokaldreieck zur Beschreibung der Lage von Vokalformanten [Rei-68]

Für die Erkennung des Vokals spielen die ersten zwei Formanten eine entscheidende Rolle [Rei-68]. Die Zuordnung dieser typischen Frequenzanteile zu den Vokalen ist in Bild 3-3 sicht-

bar. Wird z. B. aufgrund einer Hochtonschwerhörigkeit bei dem Vokal "i" der zweite Formant bei etwa 2100 Hz nicht mehr wahrgenommen, so wird der Laut oft als "u" interpretiert. Die Erkennbarkeit der Silbe oder des Wortes wird somit erschwert und durch andere Erkennungsmerkmale und höhere geistige Verarbeitungsleistung (Erschließung aus dem Kontext) nur teilweise kompensiert [Hoh-90]. Die Zeitdauer eines Vokals bewegt sich innerhalb eines gesprochenen Wortes bei 200 ms bis 300 ms.

### *Konsonanten*

Die Konsonanten sind mit 70 ms bis 80 ms wesentlich kürzer. Zusätzlich liegt der Pegel bei stimmhaften Konsonanten (n, m, r, l, ng) 10 dB tiefer als der bei Vokalen. Verschlußlaute (b, p, t, g, k) bzw. Zischlaute (s, f, ch, sch) sind sogar 20 dB bis 30 dB darunter zu finden. Dennoch unterstützen sie die Vokalverständlichkeit wesentlich [Rei-68].

Die Konsonanten enthalten ebenfalls Formanten, die aber wesentlich schwächer ausgeprägt sind. Charakteristisch ist meist der Übergang zu benachbarten Lauten. Explosivlaute (p, t, k) z. B. weisen einen impulsartigen Lauteinsatz auf, der erkannt werden muß.

### *Pausen*

Eine große Bedeutung besitzen die Pausen (Gaps) vor oder nach einem Konsonanten. Ihre Längen haben einen hohen Einfluß auf die wahrgenommene Silbe [Wed-82b]. Verringert sich nur das Zeitauflösungsvermögen des Gehörs in bezug auf die Pausendetektion, so ist bereits eine systematische Verschlechterung des Sprachverständnisses zu beobachten [Wes-95].

### *Spektrum*

Der Klang der Stimme wird nicht wie bei Musikinstrumenten vorzugsweise durch den Oberwellengehalt hervorgerufen. Vielmehr spielen individuell unterschiedlich ausgeprägte Spektrallinien und Hüllkurvenverläufe eine wesentliche Rolle [Kli-88]. *Kollmeier* beobachtet sogar, daß weibliche Stimmen im Störgeräusch besser verständlich sind [Kol-93].

Bei Untersuchung des Langzeitspektrums unterschiedlicher Sprecher ergibt sich ein mittleres Amplitudenspektrum nach Bild 3-4. Ein entsprechend gefiltertes Rauschsignal wird nach CCITT G. 227 als sprachsimulierendes Rauschen verwendet [CCITT]. Es dient auch im Anpaßverfahren mit natürlichen Klangbildern der Kalibrierung des Anpaßplatzes und der Simulationseinrichtung (vgl. Abschnitt 4.1). *Fastl* bestätigt, daß das CCITT-Geräusch in den Höhen gut mit den Klangspektren verschiedener Sprachen übereinstimmt, kritisiert aber die beobachtete Abweichung im tiefen Frequenzbereich [Fas-93]. Ein Grund dafür scheint zu sein, daß dieses Signal für die drahtgebundene Nachrichtenübertragung (Telefon) synthetisiert wurde. Das bedeutet für den vorgesehenen Anwendungsfall dennoch keine Einschränkung, da der nutzbare Frequenzgang von Hörgeräten i. a. erst bei 200 Hz beginnt.

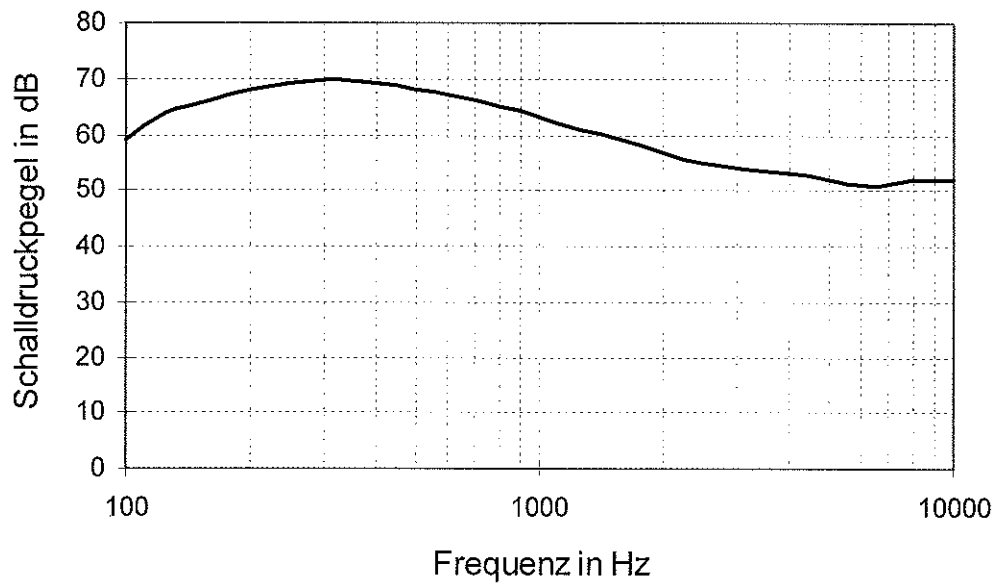


Bild 3-4 Langzeitspektrum von Sprache [Kli-88]

Interessant für die Hörgerätetechnik ist eine Untersuchung von *Fletcher* (in [Rei-68] S. 404) zur Silbenverständlichkeit in Abhängigkeit von der eingestellten Bandbreite. Bild 3-5a gibt den Zusammenhang grafisch wieder.

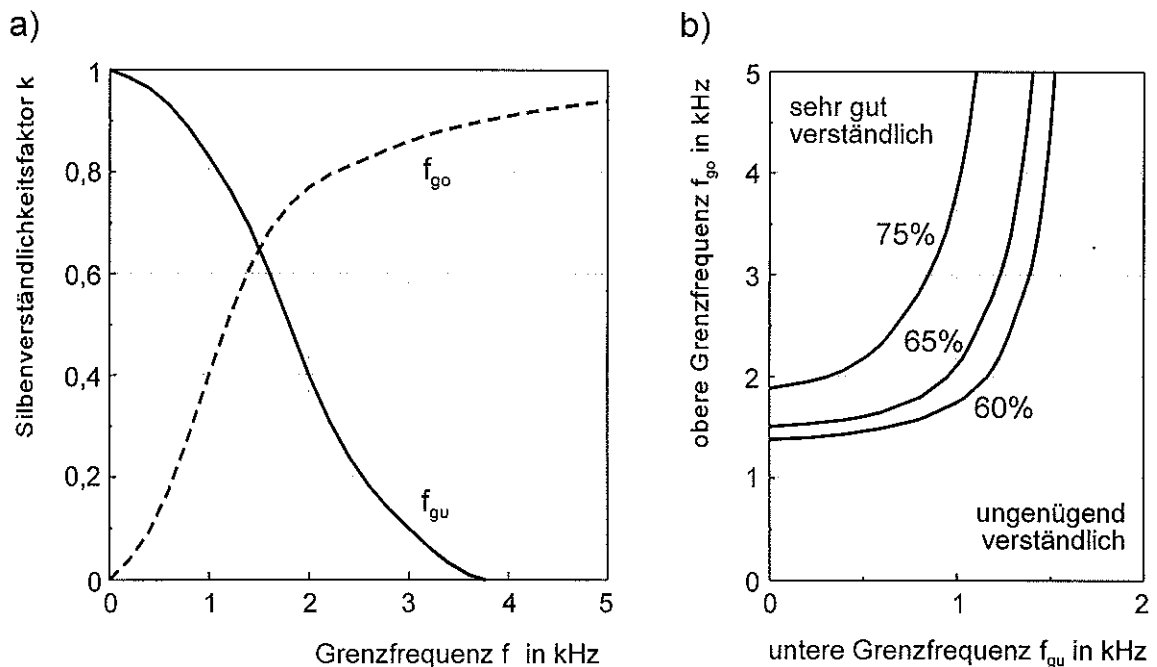


Bild 3-5 Silbenverständlichkeitsfaktor in Abhängigkeit von der übertragenen oberen ( $f_{go}$ ) und unteren Grenzfrequenz ( $f_{gu}$ ) (nach Fletcher aus [Rei-68])  
 a) unabhängige Kennlinien zur Wirkung von Tief- und Hochpaß  
 b) Kombination der Grenzfrequenzen zu einem Bandpaß mit dem Silbenverständlichkeitsfaktor  $k$  als Parameter

Es wird erkennbar, daß eine merkbare Verschlechterung der Verständlichkeit erst bei Absinken der oberen Grenzfrequenz unter 2400 Hz beobachtet wird. Die untere Grenzfrequenz sollte demgegenüber unter 1 kHz liegen. [Rei-68] bewertet elektroakustische Übertragungsanlagen für Sprache im Freien und in Innenräumen hinsichtlich der Silbenverständlichkeit folgendermaßen:

- |               |                   |
|---------------|-------------------|
| $k \geq 75\%$ | - sehr gut,       |
| $k \geq 65\%$ | - ausreichend und |
| $k < 60\%$    | - ungenügend.     |

Daraus läßt sich ableiten, daß der Frequenzbereich von 1 kHz bis 2 kHz eine tragende Rolle bei der Spracherkennung spielt. Dieser Bereich ist durch einen starken Kurvenanstieg der Silbenverständlichkeit geprägt und sichert zumindest ein ausreichendes Sprachverständnis, normales Hörvermögen vorausgesetzt. Eine vollständige Silbenerkennung ist selbst bei idealen Bedingungen nicht gegeben. Sie nähert sich nur asymptotisch 96 % an.

Bild 3-5b stellt die Grenzfrequenzen des notwendig zu übertragenen Spektrums in Abhängigkeit vom Silbenverständnis dar. Sehr gut bewertet werden beispielsweise Bandpässe mit  $f_{\text{gu}} = 0,8 \text{ kHz} / f_{\text{go}} = 3 \text{ kHz}$  oder  $f_{\text{gu}} = 1 \text{ kHz} / f_{\text{go}} = 4 \text{ kHz}$ . Für eine optimale Hörgeräteanpassung lassen sich daraus nur Schlußfolgerungen in Bezug auf das erforderliche Frequenzband für eine Sprachübertragung ziehen. Sowohl der Klang von Stimmen als auch andere Schallquellen der Umwelt (Stör- und Nutzsignale) müssen weitere Bewertungen erfahren.

Resultierend aus den Eigenschaften von Sprache muß die Signalanalyse berücksichtigen:

- vollständiges Einschließen des Sprachfrequenzbereiches,
- gesonderte Betrachtung des Frequenzbandes von 1 kHz bis 2 kHz,
- Untersuchung der Signalzeitstruktur,
- Unterdrückung kurzer Sprachpausen,
- Erfassung des Pegelumfanges und der Pegelschwankungen und
- Ablehnung der Annahme einer Gleichverteilung der Schalldruckpegel.

Die große Bedeutung der menschlichen Sprache in der akustischen Wahrnehmung unterstreicht die genannten Forderungen.

### 3.2 Analyseverfahren

Eine Beschreibung von Signalen ist aufgrund der Vielzahl von Möglichkeiten immer problemorientiert und umfaßt i.a. die Modellierung aus:

- Kenngrößen der transformierten Funktion,
- Kenngrößen der Zeitfunktion,
- statistische Parameter und
- syntaktische Regeln.

Die syntaktische Beschreibung, vergleichbar einem grammatischen Regelwerk für eine Folge von Elementen, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Alle im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Signaleigenschaften benötigen diese Regeln nicht. Die Analyse beschränkt sich daher auf die ersten drei Kenngrößengruppen.

Wie bereits gezeigt, lassen sich im Zeit- oder transformierten Bereich Aussagen für zufällige Signale mit statistischen Methoden treffen. Zusätzlich finden Signalbeschreibungsalgorithmen Anwendung, die auf der Basis subjektiver Empfindungen entstanden sind und unter dem Begriff Psychoakustik zusammengefaßt werden.

#### 3.2.1 Untersuchungen im Frequenzbereich

Zahlreiche Analyseverfahren basieren auf der Zerlegung des untersuchten Signals in spektrale Anteile. Zu diesem Zweck wird die Zeitfunktion  $x(t)$  in einen gegebenen Funktionsraum transformiert. Diese Abbildung kann als Reihenentwicklung der Funktion  $x(t)$  dargestellt werden:

$$x(t) = a_1 \varphi_1(t) + a_2 \varphi_2(t) + a_3 \varphi_3(t) + \dots = \sum_m a_m \varphi_m(t) \quad (3.8)$$

Für die Aufbaufunktionen  $\varphi_m(t)$  gibt es vielfältige Ansätze, die unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden wie z. B. Sprungfunktionen, Rechteckfunktionen (Walshtransformation), Potenzfunktionen (Taylorreihe), Exponentialfunktionen oder auch harmonische Funktionen. Zur Bestimmung der Koeffizienten  $a_m$  wird meist die Minimierung des quadratischen Fehlers  $QF$  von der Summe der mit  $a_m$  multiplizierten Aufbaufunktionen zur Originalfunktion  $x(t)$  angesetzt:

$$QF = \int_T |x(t) - \sum_m a_m \varphi_m(t)|^2 dt \rightarrow \text{Min} \quad (3.9)$$

Für analoge Systeme weist eine Analyse nach harmonischen Funktionen (sin, cos), die FOURIER-Transformation, besondere Vorteile auf:

- Viele akustische Signale entstehen durch die Überlagerung harmonischer Signale.
- In einem beliebigen linearen System rufen harmonische Eingangsgrößen immer harmonische Vorgänge derselben Frequenz hervor. Die Übertragungseigenschaften dieser Systeme (z. B. Hörgerät ohne Kompression) lassen sich deshalb besonders leicht beschreiben.



Beim Einsetzen harmonischer Funktionen in (3.8) ergibt sich:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (3.10)$$

Unter Verwendung der komplexen Darstellung und mit dem Übergang auf unendlich lange Zeitfenster gewinnt man die Koeffizienten  $\underline{X}(\omega)$  der FOURIER-Transformation:

$$\underline{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.11)$$

Die diskrete FOURIER-Transformation mit ihrer Sonderform der Schnellen FOURIER-Transformation (FFT = fast fourier transform) eignet sich für die Analyse zeitdiskretisierter Signale. Neben zahlreichen Untersuchungen von Sprachsignalen sind z. B. in [Dün-90], [Ban-91] und [Fed-90] Signaldiagnosen zu finden, die sich dieses Werkzeugs bedienen. [Dün-90] benutzt die Amplitudenspektren und darin enthaltene Pegelunterschiede, um die Klangqualität von Violinen objektiv bestimmen zu können. [Lan-94] entwickelt das Verfahren dahingehend weiter, daß er die Spektren jedes spielbaren Tones in Grundton- und Oberwellenbänder aufteilt. Die Darstellung als 3D-Diagramm liefert einen guten Eindruck vom erwarteten Klang des Instrumentes.

Leistungsspektren und Sonagramme (Spektrum-Zeit-Verlauf) zieht [Ban-91] zur Charakterisierung von indianischen Trommeln heran. Mittelungs- und Maximalwertspektren sind die Basis der Berechnungen und Anpaßalgorithmen in [Fed-90] und [Noa-93].

In der Maschinendiagnostik bedient man sich häufig der Cepstrumanalyse, um periodische Schwankungen wichtiger Spektralanteile zu detektieren und eine Zustands- oder Schadensanalyse abzuleiten. Ähnliche Verfahren auf Basis der FFT setzt [Kot-83] zum Auffinden periodischer Signale in rauschbehafteten Signalen ein.

*Terhardt* schlägt die FOURIER-t-Transformation (FTT = fourier time transform) zu einer Frequenzanalyse vor, die dem Hörempfinden besser angepaßt ist [Ter-85]. Die FOURIER-Transformation (3.11) verändert sich durch Einfügen eines "natürlichen" Gewichtungsfaktors  $e^{-a(t-\tau)}$  wie folgt:

$$\underline{X}(\omega, t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) e^{-a(t-\tau)} e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3.12)$$

Außerdem wird die obere Grenze des Integrals zeitvariabel. Indem die Größe  $a$  frequenzabhängig vereinbart wird, ist es möglich, eine Analyse in verschiedenen Frequenzabständen je nach dem Auflösungsvermögen des Ohres zu realisieren. Im allgemeinen sind aber im Vorfeld einer gerätetechnischen Versorgung des geschädigten Ohres subjektiv relevante Bestimmungsgrößen wie z. B. die Frequenzauflösung nicht bekannt, so daß man mit Einschränkungen auf die bekannten Informationen über Normalhörende zurückgreifen muß.

Wenngleich die genannten Verfahren zur spektralen Signalzerlegung im Rahmen einer Analyse in vielen Fällen zum Erfolg führen, wird die Eignung bei zufälligen Signalen stark einge-

schränkt. Dazu kommt die oft nichtlineare Übertragungscharakteristik von Hörgeräten (vgl. Abschnitt 3.3), welche die o. g. Vorteile der Darstellung aus harmonischen Funktionen nicht zur Wirkung kommen läßt.

Die folgenden Leistungskriterien waren bei der Wahl des spektralen Analyseverfahrens ausschlaggebend:

a. Berücksichtigung des (eingeschränkten) **Hörfrequenzbereiches**

Der gesamte wahrnehmbare Frequenzumfang von 20 Hz bis 20 kHz ist für eine Hörgeräteversorgung nicht von Bedeutung. Zum einen engt der zu versorgende Hörschaden diesen Bereich bereits deutlich ein. Zum anderen unterliegen die verwendeten Geräte technischen Beschränkungen, die es bisher nicht erlauben, Frequenzen tiefer als 200 Hz und höher als 6 kHz aufzunehmen oder verstärkt wiederzugeben. Mit Blick auf zukünftige Entwicklungen wird der Frequenzbereich mit 200 Hz bis 10 kHz festgelegt.

b. Konzentration auf **wenige Frequenzkanäle**

Für die systematische Untersuchung der umfangreichen Klangbibliothek sind Beschränkungen in der Auflösung der Analyse unumgänglich. In Anlehnung an die Gehöreigenschaften ist die Aufteilung des gegebenen Frequenzbereiches in mehrere Bänder vorzunehmen, die annähernd gleiche relative Bandbreiten besitzen. Die Verwendung der psychoakustisch motivierten, gehörbezogenen Frequenzgruppen wurde zugunsten von Terzbändern verworfen. Die Frequenzgruppen bieten in der an objektiven Kriterien interessierten Analyse keine Vorteile. Sie sind für die Verarbeitung in Hörgeräten derzeit ohne Bedeutung. Dagegen liefert eine Terzanalyse Ergebnisse, die sich mit anderen Resultaten leicht vergleichen lassen und Bezug auf genormte und geläufige Größen in der Akustik nehmen. Darüber hinaus existieren eine Vielzahl von Meßgeräten, die eine solche Zerlegung des Hörfrequenzbereiches erlauben.

c. Ausreichende **spektrale Auflösung** besonders bei tiefen Frequenzen

Diese Auflösung ist beim Einsatz von Terzfilterbaugruppen gegeben. Erfolgt die spektrale Untersuchung aber auf Grundlage einer FFT, die äquidistante Frequenzlinien liefert, so sind im angenommen tiefsten Terzband von 200 Hz mit 45 Hz Bandbreite mindestens drei Spektrallinien für die energetische Addition vonnöten. Die spektrale Auflösung muß demnach  $f_{min} \leq 15$  Hz betragen. Daraus folgt ein Analysezeitfenster von

$$T \geq 1/f_{min} = 67 \text{ ms}$$

und mit einer Abtastfrequenz von  $f_A = 44,1$  kHz ergibt sich die minimale Zahl der Abtastwerte mit

$$N = T \cdot f_A \approx 3000.$$

Wird eine 4096-Punkte-FFT angenommen, so hätte das Zeitfenster eine Länge von

$$T = N / f_A \approx 93 \text{ ms}.$$

d. Gute **Zeitauflösung** zur Erfassung von Modulationssignalen

Für zeitlich schwankende Vorgänge ist die weitgehende Erhaltung von Modulationssignalen als Informationsträger von Bedeutung, damit nachfolgende Analyseroutinen diese Eigen-

schaften erfassen können. Eine Verarbeitung von Modulationsfrequenzen  $< 80$  Hz ist im Hinblick auf die folgende Forderung (e) sinnvoll.

Dies widerspricht bei Verwendung der FFT den Ergebnissen aus der Forderung (c). Unter Beachtung des Aliasing-Effektes für die Modulationsfrequenzen wäre eine Zeitfensterlänge

$$T = 1/(2 \cdot f_{M,\max}) = 6,2 \text{ ms}$$

erforderlich.

Bei einer Terzfilterbank wird dagegen die Übertragung der Modulationsfrequenzen nur durch das Einschwingverhalten der verwendeten Filter und den Effektivwertalgorithmus begrenzt.

#### e. Unterdrückung sprachtypischer Pausen

Bei der Untersuchung von Sprachklangbildern werden Pegelschwankungen während kurzer Pausen ( $\approx 10$  bis  $12$  ms) insbesondere vor und nach Konsonanten nicht beachtet. Eine Erfassung der Modulationsfrequenzen oberhalb  $80$  Hz wird deshalb nicht gewünscht. Dagegen spielt der Verlauf der Hüllkurve über längere Zeiträume eine große Rolle.

#### f. Statistische Erfassung der Pegelschwankungen

Die Untersuchung zufälliger Signale erfordert eine statistische Beschreibung der Pegelschwankungen innerhalb der Frequenzbänder. Basis derartiger Berechnungen ist die Amplitudendichtefunktion  $p(x)$ . Aus ihr lassen sich wichtige Kenngrößen ableiten. Dabei ist zu beachten, daß zur Berechnung grundsätzlich nur Stichproben (d. h. endliche Mengen) aus der Realisierung des Schallsignals vorliegen.

#### g. Berechnung breitbandiger Pegelgrößen

Für den Vergleich der Klangbilder untereinander und eine Einordnung unabhängig von den spektralen Eigenschaften müssen Größen zur Verfügung gestellt werden, die den gesamten Frequenzbereich erfassen. In Anlehnung an bekannte akustische Größen wird der äquivalente Dauerschallpegel als zeitliches Mittel bevorzugt.

Wegen der genannten Kriterien wurde eine Terzfilterbank gewählt, denn

- sie liefert im vorgegebenen Frequenzbereich die notwendigen Informationen,
- sichert eine ausreichende Zeitauflösung in jedem Terzkanal und
- ermöglicht zusammen mit einer spektralen Kurzzeit-Effektivwertberechnung eine erhebliche Datenreduktion

Diese Faktoren waren ausschlaggebend für die Implementierung des Algorithmus auf einem PC bei Verwendung des Signalanalysewerkzeuges DIA (Gesellschaft für Strukturanalyse, Aachen).

Auf eine zusätzliche Zeitbewertung bei der Pegelbildung wurde bewußt verzichtet. Mit einer minimalen Terzbandbreite von  $45$  Hz ist ohnehin nur die "slow"-Bewertung (Zeitkonstante  $1$  s) zu realisieren, während bei "fast"- ( $125$  ms) und "Impuls"-Bewertung (Anstiegszeitkonstante  $35$  ms) größere Abweichungen im tieffrequenten Bereich zu erwarten sind. Außerdem ist die Technik eines Hörgerätes auf keine der zeitlichen Bewertungen eingestellt und geht von physikalischen und schaltungstechnischen Gegebenheiten aus.

Die A-Bewertung für einen den Hörempfindungen angepaßten Frequenzgang ist dagegen vorgesehen. Arbeiten von *Attia* [Att-91] und *Noack* [Noa-93] bestätigen, daß für viele Schall-

ereignisse der  $L_A$ -Pegel hinreichend genau die Lautstärkeempfindung widerspiegelt. Die berechnete Lautheit ist dagegen stark vom Verfahren abhängig. Dennoch wird sie in dieser Arbeit als Vertreter psychoakustischer Größen verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Die Untersuchungen im Frequenzbereich sollen deshalb verwenden:

- eine Terzfilterbank mit Mittenfrequenzen von  $f_M = 200$  Hz bis  $f_M = 10$  kHz,
- den gleitenden Kurzzeit-Effektivwert,
- zusätzlich drei Frequenzbänder für die Beschreibung der tiefen, mittleren und hohen Frequenzen,
- Amplitudenstatistiken zur Beschreibung der Pegelschwankungen,
- den äquivalenten Dauerschallpegel als zeitliches Mittel und
- den A-bewerteten Dauerschalldruckpegel und die Lautheit als empfindungsbezogene Größen.

Diese Rahmenbedingungen werden im Abschnitt 4.2 umgesetzt.

### 3.2.2 Verfahren im Zeitbereich

Eine Frequenzanalyse eignet sich zur Untersuchung der spektralen Zusammensetzung von Signalen, läßt aber nur begrenzte Aussagen zur Beschreibung der Signaländerungen und der Dynamik zu. Diese Aufgaben bleiben einer Analyse im Zeitbereich vorbehalten.

In [Rei-68] wird die Bedeutung der Ein- und Ausschwingvorgänge für die Signalidentifizierung und das Klangempfinden untersucht und hervorgehoben. Schneidet man diese Vorgänge aus dem Schalldruck-Zeit-Verlauf heraus und bietet, unter Vernachlässigung der Einschwingvorgänge von Wiedergabeeinrichtung und Ohr, nur den stationären Klang kurzzeitig dar, so treten erhebliche Fehldeutungen des Schallereignisses auf: Flöte und Waldhorn z. B. sind nicht mehr unterscheidbar und Sprachlaute werden als Silben wahrgenommen. Gerade für Sprache sind die Lautübergänge von wesentlicher Bedeutung für das Verstehen der Konsonanten und Wörter. Änderungen im Einschwingvorgang werden bis zu einer Auflösung von 0,25 ms erkannt. Kurzzeitigen Lautstärkeänderungen ab 1 ms kann das Ohr folgen. *Reichardt* fordert deshalb von elektroakustischen Übertragungselementen eine Einschwingzeit von  $\leq 1$  ms, wenn keine Beeinträchtigungen des Klangbildes auftreten sollen [Rei-68].

Änderungen des Ausschwingvorgangs sind für das Hören weniger kritisch. Das Abklingen enthält i. a. mehr Informationen über die Schallanordnung und den Raum als über das Signal selbst. Dennoch ist die Kenntnis dieses Parameters für eine verzerrungsarme Übertragung und Bearbeitung notwendig.

Die Analyseverfahren im Zeitbereich sind in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung stark verschieden. Periodische Signale lassen sich durch Autokorrelationsfunktionen und Nulldurchgänge der Zeitfunktion gut beschreiben [Bru-85]. Die in dieser Arbeit verwendeten Signale weisen jedoch selten eine Periodizität auf und sind den Signalen früherer Untersuchungen von Musik und Sprache vergleichbar. In Veröffentlichungen sind zwei Kategorien möglicher Verfahrenswege zu erkennen:

### 1. *Gehörbezogene Analyse (Ohrsimulation)*

Sie orientiert auf eine wahrnehmungsgetreue Untersuchungsmethode. Die mechanisch-biologischen Teilfunktionen des Ohres werden in den elektrischen Bereich transformiert und mit geeigneten Filterschaltungen nachgebildet (vgl. [Dau-98], [Sot-93], [Mün-93], [Jac-91]). Ziel der Modellierung ist immer die hohe Korrelation mit psychoakustischen Bewertungen.

Die Bestimmung von Modulationen, insbesondere im Sprachsignal, bildet einen Schwerpunkt der Arbeiten, denn das Ohr ist in der Lage, Modulationen unabhängig voneinander in verschiedenen Frequenzkanälen zu erkennen. Zur Nachbildung der Wahrnehmung einer Amplitudenmodulation wird nach einer Frequenzgruppenfilterung häufig mit festem 20 ms-Tiefpaß [Ver-94] oder einer Modulationsfilterbank ([Dan-95], [Püs-94]) gearbeitet.

Eine andere Methode formuliert das Overlapp-Add-Verfahren zur Beeinflussung der Modulationstiefe ([Lew-83], [Lan-84]). Innerhalb von 21 frequenzgruppenbreiten Kanälen werden die Intensitäten zu Teillautheiten zusammengefaßt und so tiefpaßgefiltert, daß Modulationsfrequenzen von 80 Hz noch aufzulösen sind.

### 2. *Signalbezogene Analyse (analytische Beschreibung)*

Hier liegt der Schwerpunkt auf der Bestimmung der Hüllkurve für die nachfolgende Datenreduktion bzw. zu Steuerungsaufgaben.

Ein Verfahren zur Codierung stereofoner Signale, bei dem die Hüllkurvenschwankungen oberhalb 1,6 kHz von Bedeutung sind, ist in [Sil-93] zu finden. An eine Frequenzgruppenfilterbank schließen sich eine Einweggleichrichtung und ein Tiefpaß mit 800 Hz Grenzfrequenz an.

Auf der Berechnung des Kurzzeiteffektivwertes (5 ms Fensterbreite) mit folgendem Tiefpaß 8. Ordnung ( $f_g=30$  Hz) basiert eine Hüllkurvenbildung zur Modellierung von Fahrzeugrollgeräuschen. Die subjektiv empfundene Qualität solcher Geräusche läßt sich bei gezielter Veränderung der Hüllkurve bestimmen ([Rec-93], [Rec-94]). Auffällige tonale Signalanteile werden gefiltert und einer Hilberttransformation unterzogen, um zu Aussagen über die Einhüllende und die bestimmenden Modulationsfrequenzen zu gelangen.

Vielfältig sind die Arbeiten zur Detektion von Sprachsignalen. Für nahezu ungestörte Sprache entwirft *Cartinhour* [Car-92] ein Verfahren mit Hilberttransformation, um den Formfaktor und damit den Dynamikumfang des elektrischen Signals zu verringern.

Andere Algorithmen basieren auf der Erkennung der Sprachmodulationen. Dazu müssen der bandpaßgefilterte (90-300 Hz) und gleichgerichtete Pegel ebenso wie die überlagerte Modulation (1-20 Hz) vorgegebene Schwellwerte mindestens 60 ms lang überschreiten. Ein weiteres Verfahren [Ost-97] begrenzt das Signal auf 1,5 kHz und bestimmt die Hüllkurven über eine spezielle Tiefpaßfilterung. Die gewonnenen terzbreiten Modulationsspektren zeigen bis 16 Hz eine hohe Sensitivität für Sprachsignale, während die Frequenzen bis 64 Hz Störgeräuschen zugeordnet werden.

Die vorliegende Untersuchungsaufgabe ordnet sich in die Gruppe der signalbezogenen Analysen ein, da aus den gesuchten Kennwerten Einstellvorschriften für Hörgeräte abgeleitet werden sollen. Es ist deshalb notwendig, Sprachmerkmale einzubeziehen. Das gewählte Verfahren muß folgende Aufgaben erfüllen:

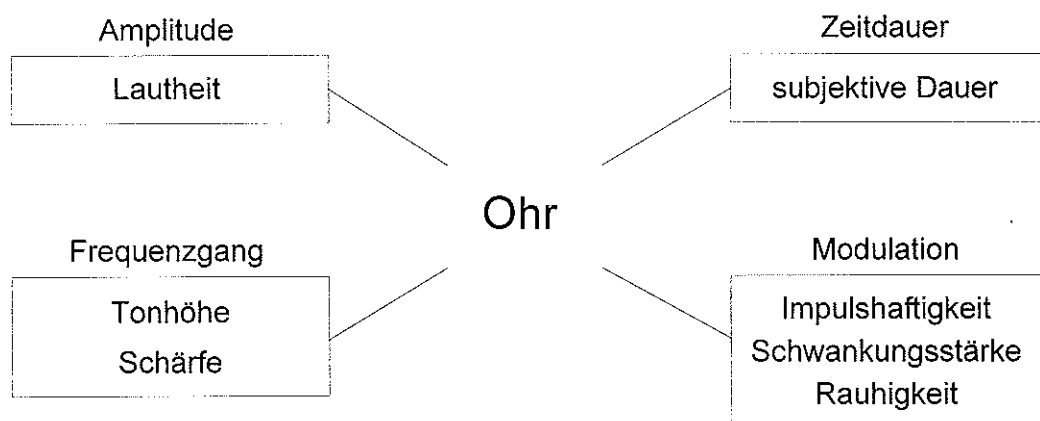
- signalbezogene Hüllkurvenbildung mit Unterdrückung kurzzeitiger Pausen (<10 ms) und Berücksichtigung von schnellen Pegeländerungen (>1 ms),
- getrennte Untersuchung von Anstiegs- und Abfallflanken,
- Ableitung von Parametern zur Signalstruktur (Impulssignale / stationäre Signale),
- Ableitung von Größen zur Dynamik,
- Beschränkung auf wenige Frequenzkanäle in Abhängigkeit vom Hörerätetyp.

Die Umsetzung der genannten Forderungen stellt Abschnitt 4.3 dar.

### 3.2.3 Analyse psychoakustischer Eigenschaften

Für das tiefere Verständnis der bei akustischer Wahrnehmung ablaufenden Vorgänge ist die Beschreibung von Schallsignalen durch bewertete Schallpegelgrößen unzureichend. Subjektiv erfaßte Klangeindrücke lassen sich nur verbal beschreiben und sind häufig nicht mit formalisierenden Bewertungen zu erklären. Deshalb wurden auf der Basis von umfangreichen Messungen und Untersuchungen spezielle psychoakustische Größen entwickelt, mit denen versucht wird, Klangeindrücke meßbar zu machen und sie durch einen Zahlenwert zu repräsentieren.

Die Psychoakustik beschäftigt sich mit der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen physikalisch gemessenen Schallreizen und den hervorgerufenen Hörempfindungen [Fas-82]. Für eine Einführung in die Problematik sind [Zwi-82] und [Fas-82] geeignet. Die z. Z. gebräuchlichen Verfahren und Modelle zählt Bild 3-6 auf.



*Bild 3-6 Psychoakustische Parameter und deren physikalische Grundgrößen*

#### 1. Lautheit

Eine weitverbreitete und die bisher einzige genormte psychoakustische Empfindungsgröße ist die Lautheit nach Zwicker [DIN631]. Sie ermöglicht es, auf Basis objektiver Meßwerte stationäre Geräusche in ihrer Rangfolge hinsichtlich der subjektiv wahrgenommenen Lautheit einzuordnen.

Die Differenzierbarkeit und Reproduzierbarkeit empfundener Lautstärke ist selbst bei ungeübten Personen sehr gut. Außerdem wurde beobachtet, daß besonders bei Industrielärm die subjektive Wahrnehmung und der gemessene A-bewertete (d. h. bereits gehörbezogene)

Schalldruckpegel erheblich voneinander abweichen und objektive Messungen in Frage stellen. Diese Verfahren berücksichtigen nicht, daß Schallanteile durch Überlagerung von energiereichen Komponenten nicht hörbar sein können. Dieser als Verdeckung bezeichnete Effekt tritt sowohl im spektralen Bereich (z. B. starke tiefe Töne überdecken schwache hohe Töne) als auch im Zeitbereich auf (schwache Signale werden durch direkt vor- oder nachgelagerte starke Signale verdeckt).

## 2. *Tonhöhe*

Mit dem Begriff der Tonhöhe wird beschrieben, wie hoch oder tief ein einzelner Ton, ein harmonisches oder ein disharmonisches Geräusch subjektiv empfunden wird. Die Empfindung ist nicht nur von einer dominierenden Frequenz nichtlinear abhängig sondern beispielsweise auch von Änderungen des Signalpegels. Demgegenüber wirken sich bei harmonischen Geräuschen eine fehlende Grundwelle und Harmonische niederer Ordnung kaum auf die Wahrnehmung der Tonhöhe aus [Zwi-90].

Die Untersuchungen konzentrieren sich gegenwärtig auf die Erfassung und Modellierung der Tonhöhe bei komplexen Tönen ([Hut-98], [Sch-98]).

## 3. *Schärfe*

Die Schärfe beschreibt die Klangfarbe als Verhältnis von hohen und tiefen Frequenzanteilen in bezug auf einen Ankerschall (Vergleichsschall). Die Berechnungen basieren auf dem Verfahren nach *Bismarck* [Bis-71] und wurden u. a. in [Vog-74], [Aur-84], [Kab-93] und [Kab-94] verbessert und mit experimentellen Meßreihen den im allgemeinen Sprachgebrauch verwendeten kategorialen Beurteilungen angenähert.

## 4. *Rauhigkeit*

Schnelle Signalschwankungen zwischen 10 Hz und 100 Hz erfaßt die Empfindungsgröße Rauhigkeit. Sie erreicht die höchste Empfindlichkeit bei Modulationen von 70 Hz. Als "rauh" wahrgenommene Schalle beeinflussen den Wohlklang negativ.

Das Verfahren wird bei [Ter-74], [Vog-74], [Aur-84], [Zwi-90] beschrieben und in [Dan-92], [Dan-93] bzw. [Sot-94] überarbeitet und subjektiven Bewertungen angenähert. Die Rauhigkeit eignet sich gut zur Charakterisierung technischer Geräuscherzeuger (z. B. Automotoren [Zol-92], Elektromotoren [Kot-83]) oder zur aufwandsarmen Diagnose von Herzfehlern [Fas-82].

## 5. *Schwankungsstärke*

Langsame Modulationen bis 10 Hz beschreibt das Funktionsmodell der Schwankungsstärke. Es weist eine Bandpaßcharakteristik mit einem Maximum bei 4 Hz auf. Einen Modellentwurf der Schwankungsstärke von Sinustönen gibt *Terhardt* [Ter-68], ergänzt durch Berechnungsalgorithmen und Experimente [Sch-78].

### 6. *Impulshaftigkeit*

Die Impulshaftigkeit ist ein Maß für die Wahrnehmung stochastischer oder periodisch wiederkehrender Ereignisse mit großer Dynamik. Das Empfindungsmaximum liegt bei 5 Hz bis 10 Hz Impulsfolgefrequenz. Sie unterscheidet sich deutlich von der Impulshaltigkeit bzw. dem Impulszuschlag, die im Rahmen objektiver Pegelmessungen die erhöhte Störwirkung impulshaltiger Geräusche berücksichtigen [DIN645].

Unter Verwendung von 9 synthetischen und 12 realen Schallen ermittelt [Hel-93] ein Funktionsschema zur Berechnung der Impulshaftigkeit und empfiehlt die Einbindung in Klassifizierungsverfahren für industrielle Geräusche. *Sottek* untersucht in Testreihen die Einflüsse von Impulsform, -höhe, und -frequenz [Sot-95]. Er findet in der Verwendung eines neuen Gehörmodells eine gute Annäherung an die Ergebnisse.

### 7. *Subjektive Dauer*

Empfindungen, welche die Wahrnehmung kurzer Schallereignisse und damit das Rhythmusgefühl beeinflussen, lassen sich mit der subjektiven Dauer modellieren. Es wird berücksichtigt, daß z. B. die Verdopplung der subjektiven Impulsdauer einen mehr als doppelt so langen Schallimpuls erfordert [Zwi-70]. Ein auf Mithörschwellen basierendes Modell stellt [Fas-75] vor.

Gemäß der Zielstellung dieser Arbeit spielen die psychoakustischen Merkmale im beschriebenen Umfang für die objektive Klangbildanalyse eine untergeordnete Rolle. Es wird nur das Verfahren zur Lautheitsberechnung berücksichtigt, da:

- der Algorithmus normiert ist,
- auf langjährigen Erfahrungen basiert,
- umfangreiche Meßreihen das Verfahren stützen,
- die Lautheit sehr gut zu skalieren ist (vgl. Methode der Hörflächenskalierung zur Erfassung des überschwelligen Hörvermögens) und
- die Vergleichbarkeit mit Ergebnissen anderer Autoren gewährleistet ist.

Während psychoakustische Größen für die objektive Signalbeschreibung entbehrlich sind, gewinnen sie bei der subjektiven Formulierung der Klangbildwahrnehmung sowohl durch normalhörende als auch durch schwerhörende Personen an Bedeutung. Aus der Differenz der Aussagen lassen sich Angaben zur Feineinstellung des Hörgerätes ableiten. Dabei ist die Kenntnis psychoakustischer Charakteristika der verwendeten Klangbilder zukünftig vorteilhaft.

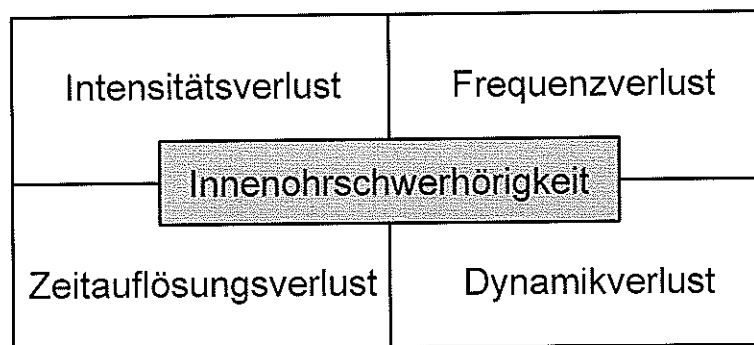


### 3.3 Einfluß von Hörschäden und Hörgeräten auf die Bewertung von Klangbildern

#### 3.3.1 Wirkung von Hörschäden auf Frequenz-, Pegel- und Zeitverlauf des wahrgenommenen Signals

Hörschäden haben vielfältige Ursachen und Erscheinungsformen. Bewußt wahrgenommen werden sie i. a. erst dann, wenn eine deutliche Beeinträchtigung von Sprachverstehen und Klangempfinden zu verzeichnen ist. *Kinkel* unterscheidet als häufigste Formen die Alters-, Lärm- und degenerative Schwerhörigkeit [Kin-92].

Unter Vernachlässigung anderer Hörschäden sollen im nachfolgenden vor allem die Einflüsse der Innenohrschwerhörigkeit auf die Wahrnehmung betrachtet werden. Diese Art der Schwerhörigkeit ist mit medizinischen Mitteln gegenwärtig nicht zu bessern oder zu beheben. Daher bietet die Hörgeräteversorgung die einzige Möglichkeit der Rehabilitation. Immerhin 95% aller versorgten Kunden weisen eine reine Innenohrschwerhörigkeit auf oder zeigen eine kombinierte Schädigung mit Mittelohrkomponente [Kel-80].

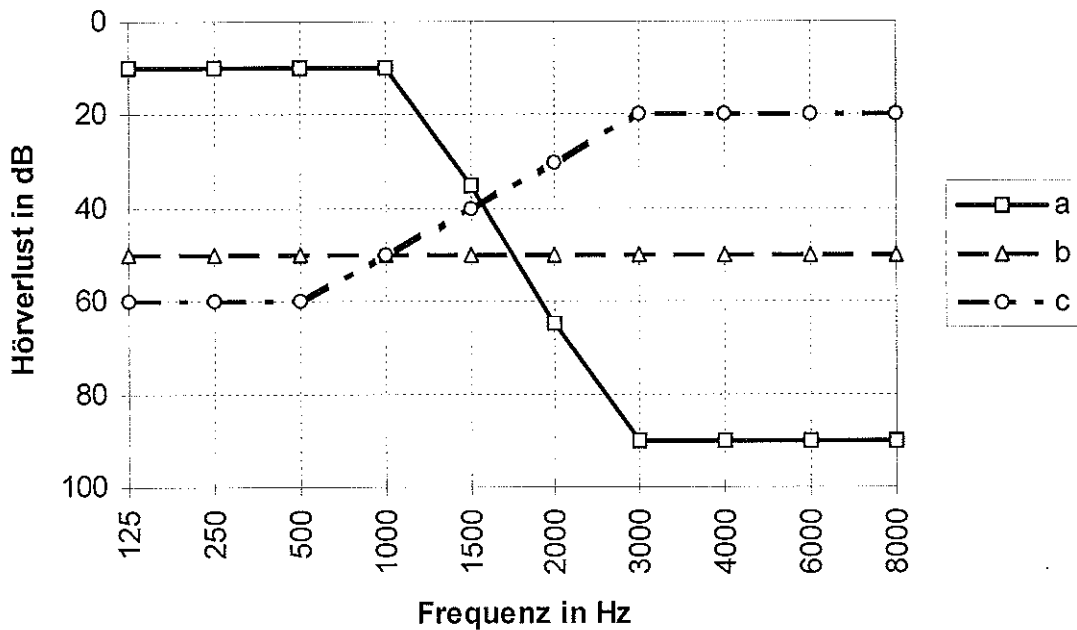


*Bild 3-7 Auswirkungen einer Hörstörung [Kel-90]*

Das Erscheinungsbild der Hörstörungen durch Innenohrschäden ist nach *Keller* [Kel-90] in vier Kategorien (Bild 3-7) eingeteilt:

#### 1. *Intensitätsverlust*

Die akustischen Reize werden leiser als gewöhnlich wahrgenommen. Das führt dazu, daß viele Signale gar nicht gehört werden oder den Bereich des angenehmen Hörens selten erreichen. Die Hörschwellenaudiometrie bietet Möglichkeiten, die Verschiebung der Hörschwelle zu erfassen, wie in Bild 3-8 dargestellt, und Rückschlüsse auf die Art der Hörstörung zu ziehen.



**Bild 3-8** *Typische Audiogramme nach [Die-94]*  
 a) Basochochleäre Innenohrschwerhörigkeit mit starkem Hochtonabfall  
 b) Panchochleäre Innenohrschwerhörigkeit  
 c) Elastische Versteifung bei Mittelohrschwerhörigkeit

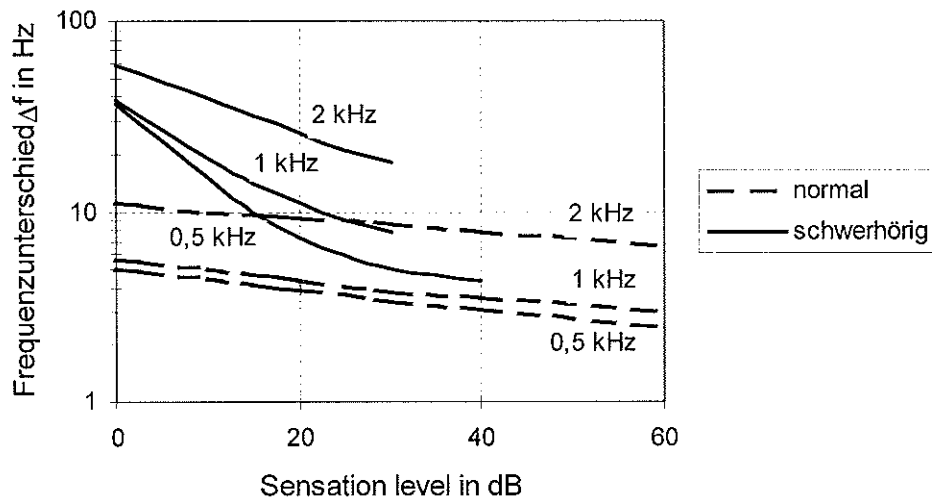
## 2. Frequenzverlust

Das Klangempfinden ist durch eine deutliche Abweichung geprägt. Sehr häufig ist ein starker Hochtonverlust (vgl. Bild 3-8a) feststellbar, der die Spracherkennung erheblich beeinträchtigt. Darüber hinaus ist eine Verringerung des Vermögens zur Tonhöhenunterscheidung zu beobachten. Bild 3-9 verdeutlicht dieses Phänomen. Der Abstand benachbarter Frequenzen, die gerade noch zu unterscheiden sind, vergrößert sich. Dadurch ändert sich auch die Verdeckung von Teiltönen durch Signalanteile hoher Leistung im Vergleich zum Normalhörenden.

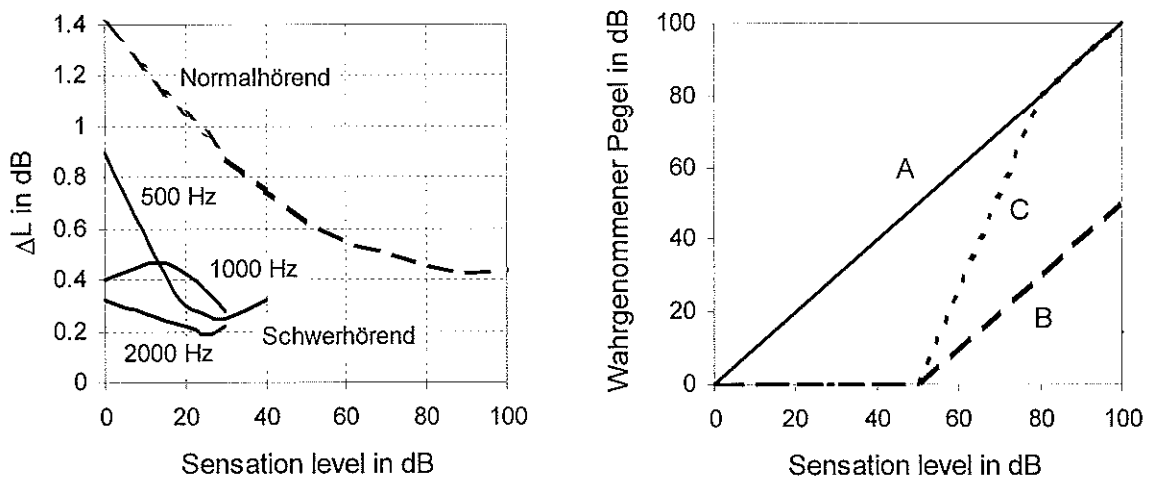
## 3. Zeitaufhebungsverlust

Der empfundene Zeitverlauf wird durch eine verschlechterte zeitliche Auflösung gestört und verändert die Wahrnehmbarkeit für stark zeitlich strukturierte Signale (Sprache) erheblich. Die akustische Wahrnehmung benötigt mehr Zeit als beim Normalhörenden, um nach starken akustischen Reizen wieder empfindlich zu reagieren. Seinen Ausdruck findet diese Tatsache beispielsweise in der häufig geäußerten Bitte des Hörgeschädigten, langsamer zu sprechen.

Wedel konnte in Untersuchungen [Wed-82] feststellen, daß ein geringer Abfall der Zeitaufhebung bei symmetrischem (d. h. beide Ohren gleich betreffenden) Hochtonverlust eintritt, und andererseits eine deutliche Verschlechterung bei unsymmetrischem und besonders bei symmetrischem, breitbandigem Hörverlust zu beobachten ist.



**Bild 3-9** Frequenzunterschiedsschwellen nach [Hau-88] für einen Normalhörenden und einen Schwerhörigen in Abhängigkeit vom Sensation level und der Frequenz



**Bild 3-10** a) Pegelunterschiedsschwellen nach [Hau-88] für Normalhörende und einen Schwerhörigen in Abhängigkeit vom Sensation level und der Frequenz  
 b) Wahrnehmungskennlinien für  
 A Normalhörende  
 B recruitmentfreien Hörschaden  
 C Hörverlust mit Recruitment  
 (Sensation level ist der Schalldruckpegel bezogen auf die Normal-Hörschwelle)

#### 4. *Dynamikverlust*

Während das Hörvermögen für leise Schalle verloren gegangen ist, bleibt die Empfindlichkeit für laute Signale bestehen. Der wahrnehmbare Dynamikumfang verringert sich. Diese Beobachtung hat zum Begriff des Recruitment geführt [Fow-37]. Unter Recruitment versteht man einen pathologischen Lautheitsausgleich, der sich folgendermaßen äußert: Bei hohen Pegeln zeigen Normalhörende und Schwerhörige gleiche Hörempfindungen während bei verringerten Pegeln ein wesentlich stärkerer Lautheitsanstieg bei den Hörgeschädigten zu verzeichnen ist. Bild 3-10 illustriert diesen als Verringerung der Pegelunterschiedsschwellen erkennbaren Effekt und stellt verschiedene Formen des Recruitment dem Normalhörenden und der recruitmentfreien Schädigung gegenüber.

Typische Kennzeichen für einen Innenohrschaden mit Recruitment sind:

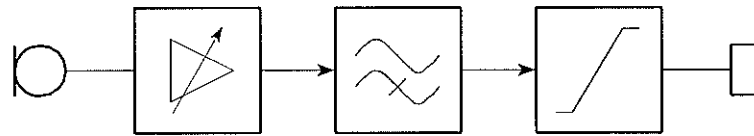
- Die Hörschwelle ist (frequenzabhängig) verschoben.
- Der Lautheitseindruck zwischen Hörschwelle und Lautheitsausgleich ist geringer als beim Normalhörenden, die Empfindlichkeit für Lautstärkeänderungen ist jedoch erhöht.
- Pegel oberhalb des Lautheitsausgleiches werden i. a. dem normalen Hörvermögen entsprechend wahrgenommen. Durch Überrecruitment kann dennoch eine erhöhte Empfindlichkeit vorliegen.
- Der Lautheitsausgleich ist stark frequenzabhängig.

Die aufgeführten Erscheinungsbilder beeinflussen sich gegenseitig und sind außerdem von der physischen Verfassung abhängig. *Festen* und *Plomp* [Fes-83] finden bei Untersuchungen an Hörgeschädigten solche Zusammenhänge heraus. Bei vorliegendem Intensitätsverlust stellen sich gleichzeitig eine Verschlechterung des Sprachverständnisses in Ruhe und eine Veränderung der zeitlichen Vor- und Nachverdeckung ein. Die gestörte Frequenzauflösung scheint außerdem einen Verlust des Sprachverständnisses im Störlärm hervorzurufen.

### 3.3.2 Hörerätekonzepte und Einstellparameter

Die Betrachtungen zu diesem Thema beziehen sich insbesondere auf mehrkanalige, digital programmierbare oder volldigitale Geräte. Sie stellen höchste Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Strategie des Anpaßverfahrens. Einkanalige, analog arbeitende Geräte weisen oft ähnliche signalverarbeitende Strukturen auf, allerdings bei Einschränkung auf maximal drei einstellbare Parameter.

Auf die Berücksichtigung der Höreräteformen mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen sowie der für HdO- (Hinter-dem-Ohr) Geräte notwendigen Zusatzteile (Ohrpaßstück, Hörschlauch, Winkelstück) wird in der vorliegenden Darstellung verzichtet. Ausführliche Beschreibungen sind in [Güt-78] enthalten. Die bewußte Nutzung dieser Bauteile zur Anpassung ist vom konkreten Einsatzfall abhängig und schwer meßbar. Meist wird die Funktion des Hörgerätes frequenzselektiv unterstützt. Diese akustische Verstärkung oder Dämpfung läßt sich in der Wirkungsweise auf elektrische Filterbaugruppen zurückführen und stellt deshalb keine gesonderten Anforderungen an die Signalanalyse. Im folgenden werden nur solche Hörerätebaugruppen behandelt, deren Parameter einstellbar ausgelegt sein können.



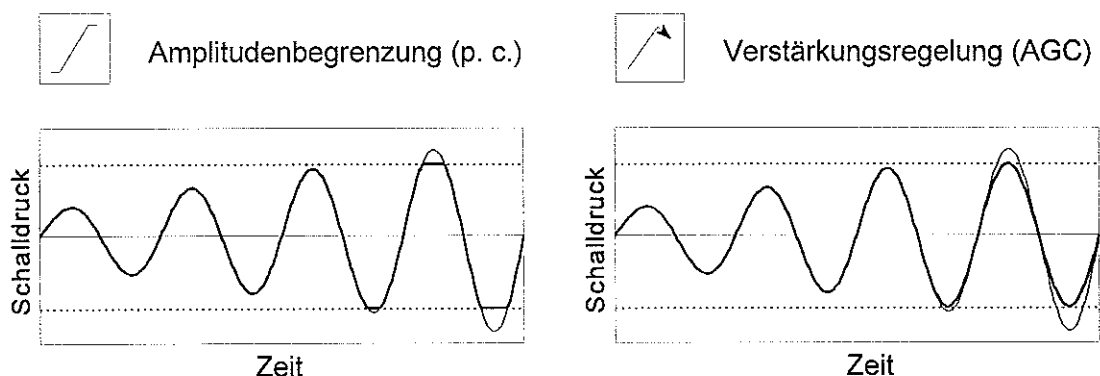
**Bild 3-11** Aufbau eines einkanaligen Hörgerätes

Einkanalige Hörgeräte enthalten, wie in Bild 3-11 dargestellt, neben Mikrofonkapsel und Hörer auch Verstärkerstufen, Begrenzerschaltungen und frequenzbeeinflussende Baugruppen. Diese Geräte finden Verwendung, wenn gleichmäßiger Hörverlust oder ein deutlicher Schalleitungsschaden vorliegen. Die Grenzfrequenz der verwendeten Filter, die Verstärkung und eine evtl. vorhandene Kompression sind meist mechanisch einstellbar ausgeführt.

Das auf den Bereich von etwa 200 Hz bis 6 kHz begrenzte Frequenzübertragungsvermögen von Hörgeräten ist hauptsächlich ein Ergebnis der physikalischen Grenzen von Mikrofon und Hörer. Außerhalb liegende Frequenzen sind zwar für den Normalhörenden wichtig (Stimmenidentifizierung, Musikinstrumentenerkennung, Betriebsgeräusche von Maschinen und Fahrzeugen), aber durch den Hörgeschädigten oft nicht mehr wahrnehmbar. Die Sprachverständlichkeit wird dennoch kaum beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.1.2).

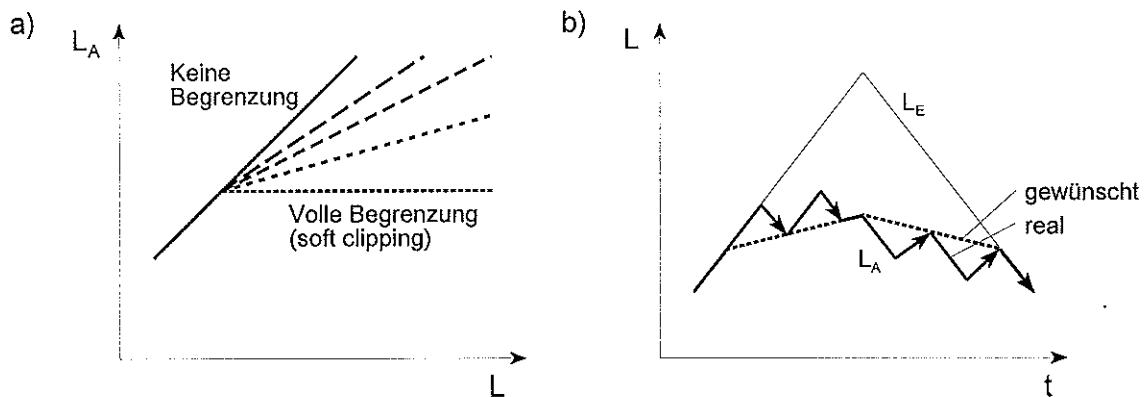
Die Signalverstärkung ist einstellbar und bei automatischen Systemen zusätzlich vom Signal beeinflusst. Die Frequenzabhängigkeit kann vernachlässigt werden, die maximale Aussteuerbarkeit dagegen nicht, da zu hohe Eingangspegel den Verstärker in der Sättigung arbeiten lassen und eine deutlich wahrnehmbare Verzerrung des Signals bewirken.

Begrenzerschaltungen sichern, daß die Unbehaglichkeitsschwelle nicht überschritten wird unabhängig von eingestellter Verstärkung und vom Eingangsschalldruckpegel. Eine p.c.(peak clipping = Spitzenbegrenzung)-Schaltung stellt die einfachste Lösung dar. Sie begrenzt die Signalamplitude ohne Zeitverzögerung und bewirkt eine hohe Verzerrung (Bild 3-12).



**Bild 3-12** Begrenzerschaltungen und ihre Wirkung auf Sinussignale

Baugruppen zur automatischen Verstärkungsregelung (AGC = automatic gain control) reduzieren die Verstärkung in Abhängigkeit vom Signalpegel. Dieses verzerrungsarme Verfahren (vgl. Bild 3-12) weist besondere Eigenschaften auf. Die Regelkennlinie (Bild 3-13a) wird durch den Regeleinsatzpunkt und die Kompression, d. h. das Verhältnis von Eingangspegeldifferenz zur Ausgangspegeldifferenz, bestimmt. Sehr hohe Kompressionsfaktoren lösen eine reine Begrenzung des maximalen Ausgangspegels aus. Kleinere Werte dagegen realisieren eine stetige Verringerung der Verstärkung bei wachsendem Eingangsschalldruckpegel.



**Bild 3-13** Statische (a) und dynamische (b) Regelkennlinien einer AGC

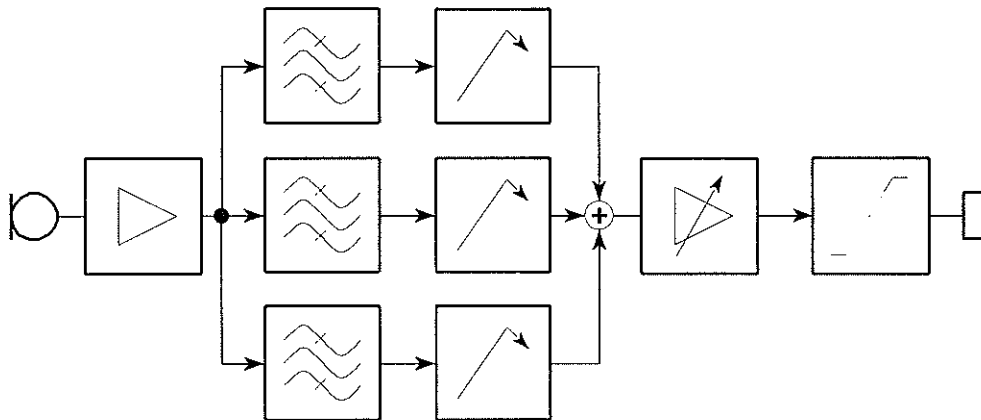
Das dynamische Verhalten einer AGC-Schaltung (Bild 3-13 b) ist durch Ein- und Ausschwingvorgänge geprägt. Die jeweiligen Verzögerungszeiten sind i. a. nicht identisch und müssen abhängig vom Frequenzbereich und von den verarbeiteten Signalen gewählt werden.

Klangblenden dienen der Anpassung des Frequenzganges des Hörgerätes an die Hörschwelle, die gewünschte Störunterdrückung und die erwartete Klangempfindung. Sie sind als Hoch- oder Tiefpässe, in einigen Fällen als Bandpässe und Bandsperren ausgelegt. Einfache Ausführungen sind zuschaltbar bzw. durch den Akustiker oder den Schwerhörigen in der Grenzfrequenz einstellbar. Systeme mit automatischer Beeinflussung erlauben die Anpassung des Filters an den aktuellen (evtl. gefilterten) Signalpegel.

Den typischen Aufbau eines mehrkanaligen Hörgerätes zeigt Bild 3-14. Das Haupteinsatzgebiet liegt in der Versorgung von starken Hochtonverlusten, bei stark eingengter Restdynamik und bei Problemen mit der akustischen Rückkopplung.

Mehrkanalgeräte bestehen aus ähnlichen Baugruppen wie Einkanal-Hörgeräte. Aufgrund der teilweise parallelen Struktur sind Einstellungen in mehreren Frequenzbereichen nahezu unabhängig voneinander möglich. Die Bandbreite der Bereiche ist einstellbar und damit im Sinne einer Optimierung der Anpassung beeinflussbar.

Einer möglichst guten spektralen Auflösung der Einstellungen durch viele Frequenzkanäle, vergleichbar einem Equalizer, stehen technische Probleme gegenüber. Zum einen überlappen sich die Phasengänge der verwendeten Filter bei den Übernahmefrequenzen, was zu Störungen in der Klangwahrnehmung führen kann. Zum anderen fehlen Strategien, eine große Vielzahl von Frequenzkanälen im Rahmen der Hörgeräteanpassung geeignet einzustellen. Meist werden deshalb nur 2-4 Kanäle bei analogen Schaltungen oder 10-14 Kanäle in digitalen Systemen verwendet.



**Bild 3-14** Aufbau eines mehrkanaligen Hörgerätes

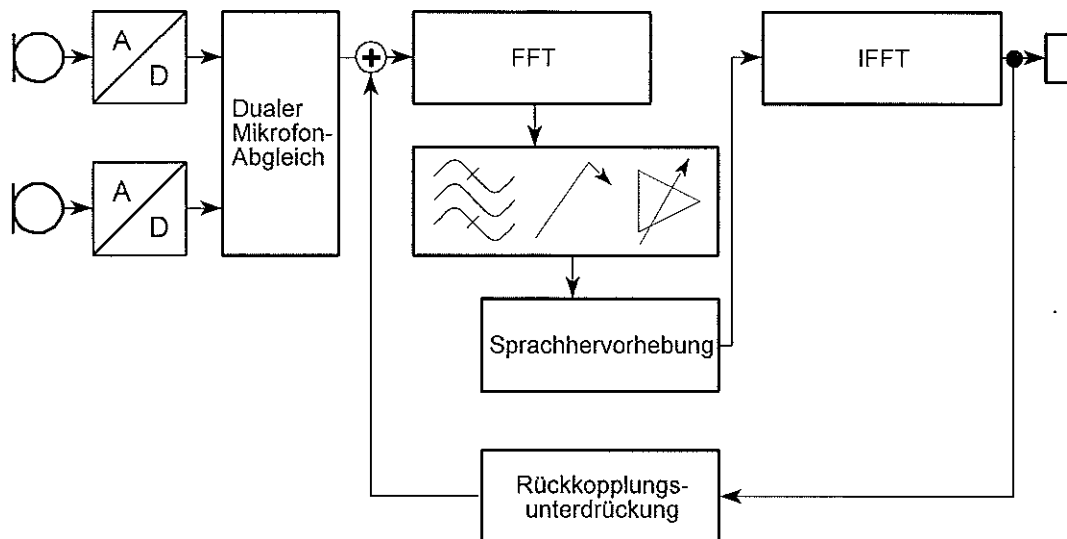
Mehrprogrammgeräte sind zusätzlich durch einen Speicher für verschiedene Einstellungen der Funktionsgruppen ergänzt, der auf Knopfdruck andere Parametersätze liefert. Sie ermöglichen die komfortable Anpassung an verschiedene akustische Situationen. Sie werden dann vorteilhaft eingesetzt, wenn diese unterschiedlichen Alltagssituationen für den Schwerhörigen eine hohe Bedeutung haben.

Ein Hörgerät nach Bild 3-14 kann in seinem Übertragungsverhalten bereits mit 18 einstellbaren Parametern beeinflusst werden. Tabelle 3-1 erläutert deren Wirkungsweise in der gesamten Signalverarbeitung.

**Tabelle 3-1** Einstellparameter eines Mehrkanal-Hörgerätes und deren Wirkung

Parameter	Baugruppe	Wirkung
Übernahmefrequenzen $f_n$	Filterbank	Aufteilung des übertragenen Frequenzbereiches auf die vorhandenen Filter in Abhängigkeit von Hörverlust und Klangwahrnehmung
kanalspezifische Verstärkung $v_n$	Verstärker	frequenzspezifische Anhebung des Ausgangspegels
Regeleinsatzpunkt $L_R$	Dynamikkompressor	Trennung der Verstärkungskennlinie in einen linearen Bereich und den Bereich der pegelabhängigen Verstärkung
Kompressionsfaktor $k$	Dynamikkompressor	Stärke der Kompression zwischen linear (1:1) und Begrenzung (ca. 1:10)
Regelzeitkonstanten $t_{an}, t_{ab}$	Dynamikkompressor	Geschwindigkeit der Verstärkungsänderung nach einem Pegelsprung (Anstieg und Abfall)
Einsatzpunkt $L_{PC}$	Begrenzer	Festlegung der maximalen Signalamplitude

Eine neue Qualität in der Versorgung wird durch die Verfügbarkeit volldigitaler Hörgeräte wie z. B. DigiFokus (Oticon), senso digital (Widex) oder BT 5 (ReSound) erreicht. Mehrkanalige nichtlineare Signalverarbeitung, Störsignalunterdrückung, Kontrolle der Rückkopplung etc. (Bild 3-15) werden zu Software-Modulen in einem zukünftig frei programmierbaren Grundsystem und problemlos implementierbar.



**Bild 3-15** Funktionsschema des volldigitalen Hörgerätes "BT 5" (ReSound)

Dabei ist es vorgesehen, daß beispielsweise  $k = 180$  beeinflussbare Betriebsparameter ("senso digital" von Widex) die akustischen Geräteeigenschaften bestimmen. Die sich nur aus der Variation der Parametereinstellungen ergebende Vielfalt ist technisch nicht zu beherrschen. Bereits bei einer Auflösung von  $n = 2$  Stufen ergeben sich

$$V_{n,w}^{(k)} = n^k = 2^{180} \approx 10^{54} \quad (3.13)$$

Einstellvarianten. Eine solche Anzahl verspricht zwar gute Möglichkeiten der Optimierung, praktisch nutzbar und sinnvoll sind jedoch nur wenige Einstellungen. Darüber hinaus sind viele Parameteränderungen meßtechnisch nicht mehr zu erfassen, da äußere Störungen, stark nicht-lineare Übertragungscharakteristiken der Geräte und die verwendeten Eingangssignale wesentliche Schranken darstellen.

Die resultierenden Einschränkungen und die Absicherung eines angemessenen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses fordern geeignete Anpaßstrategien. Gerade moderne Hörgeräte sind aufgrund ihrer fortschrittlichen Technik in der Lage, sich den in [Hoh-90] formulierten Anforderungen zu stellen:



- Verbesserung der Sprachverständlichkeit,
- angenehmer Klang bei Sprache und Musik,
- Anpassung der Sprachsignale an die jeweilige Dynamik in den audiologisch wichtigen Frequenzbereichen,
- Hervorhebung der Nutzsignale,
- Minderung des Einflusses von Umgebungsgeräuschen auf die Sprachverständlichkeit,
- einfache und zielsichere Handhabung bei der Anpassung,
- hohe Flexibilität bei der Nachanpassung aufgrund einer Veränderung der Hörfähigkeit,
- Kontrollmöglichkeiten für die Einhaltung der Betriebsbedingungen.

Diese Ziele zu erreichen, liegt in der Verantwortung der Hörgeräteanpassung und ist abhängig vom verfügbaren Wissen und einer effektiven Vorgehensweise.

### 3.4 Konsequenzen für die Auswahl von Analysekenngößen

Die vorangegangenen Abschnitte haben das Problemfeld der vorzunehmenden Analyse umrissen und Randbedingungen festgelegt. Die Zahl der zu untersuchenden Parameter muß deutlich eingeschränkt werden, da es in dieser Arbeit nicht um eine umfassende Signalbeschreibung geht, sondern eine angepaßte Lösung angestrebt wird. Im Vordergrund stehen datenreduzierende und automatisierbare Analysen, deren Ergebnisse vom Anpassalgorithmus übernommen werden können, um optimierte, signalabhängige Einstellungen der Hörgeräte zu erhalten.

Der Ablauf führt von der Zeit- und Wertdiskretisierung der Signale über die Ermittlung des Schalldruckpegels zu den gesuchten Größen, verwendet also eine indirekte Meßmethode. Die Zielgrößen werden mit Hilfe einer numerischen Meßkette nach der Ausschlagmethode gebildet.

Ein erheblicher Teil der Analysegrößen soll für drei ausgewählte Frequenzbereiche innerhalb des Hörfrequenzbereiches ermittelt werden. Das mittlere Frequenzband enthält die Anteile von Sprache, die für eine ausreichende Silbenverständlichkeit erforderlich sind (vgl. Abschnitt 3.1.2). Das tiefe Band repräsentiert hauptsächlich den bei Sprache unerwünschten Störlärm. Für die Beeinflussung der Klangfarbe und Deutlichkeit spielen die hohen Frequenzen eine besondere Rolle.

Unter Berücksichtigung des eingeschränkten Übertragungsbereiches von Hörgeräten und in Anlehnung an marktübliche Technik werden folgende Bereiche gewählt:

Band I:	180 ... 700 Hz	(Tiefen)
Band II:	700 ... 1800 Hz	(Mitten)
Band III:	1,8 ... 11,2 kHz	(Höhen)

In Auswertung der bisher aufgestellten Forderungen sind folgende Bedingungen für die Signalanalyse festgelegt:

- Frequenzbereich 200 Hz bis 10 kHz
- Verwendung einer Terzfilterbank
- gesonderte Betrachtung der Frequenzbänder I, II, III
- Bestimmung von Kennwerten für das breitbandige Signal
- Kurzzeiteffektivwertbildung mit gleitendem Zeitfenster
- Hüllkurvendetektor mit Unterdrückung kurzzeitiger Pausen (< 10 ms) in den 3 Bändern
- Amplitudenstatistiken
- Berechnung von Überschreitungspegeln und Mittelungspegeln
- Signalfankenstatistiken, getrennt für Anstiege und Abfälle
- Erfassung des Pegelumfanges und der Pegelschwankungen
- Lautheitsalgorithmus mit zeitlicher Mittelung

Tabelle 3-2 stellt die Zuordnung von beeinflussbaren Hörgeräteparametern und gesuchten Meßgrößen her. Sie bezieht sich ausschließlich auf die Parameter der verwendeten akustischen Testsignale und vernachlässigt deshalb die kundenspezifischen Daten (Hörschwelle, Unbehaglichkeitsschwelle, Ergebnisse einer Hörfeldskalierung etc.). Die Bestimmung der hier genannten Größen steht im Mittelpunkt der folgenden Signalanalyse.

**Tabelle 3-2** Zuordnung von Hörgeräte-Einstellparametern, beeinflussten Hörstörungskomponenten und erforderlichen Meßgrößen

Hörgeräteparameter	wesentliche Hörstörungskomponente	Meßgrößen		
		in Terzen	3-kanalig	breitbandig
Übernahmefrequenzen $f_n$ zwischen den Kanälen	Intensitätsverlust, Frequenzverlust	Mittelungspegel, Medianpegel		
kanalspezifische Verstärkung $v_n$ / Gesamtverstärkung $v$	Intensitätsverlust, Frequenzverlust	Mittelungspegel, Überschreitungspegel	Mittelungspegel, Überschreitungspegel	Lautheit, A-bewerteter Schalldruckpegel
Regeleinsatzpunkt $L_R$	Dynamikverlust, Frequenzverlust	Überschreitungspegel	Überschreitungspegel, Gradienten-Häufigkeitsverteilung	Überschreitungspegel
Kompressionsfaktor $k$	Dynamikverlust	Mittelungspegel, Überschreitungspegel	Überschreitungspegel, Pegeldifferenzen	Überschreitungspegel
Regelzeitkonstanten $t_{an}$ , $t_{ab}$ für Dynamikkompressoren	Dynamikverlust, Zeitauflösungsverlust		Hüllkurvenflankendauer, Gradienten-Häufigkeitsverteilung, Impulsdauer, Signalpausenlängen	
Einsatzpunkt $L_{PC}$ für Begrenzer	Dynamikverlust	Überschreitungspegel	Überschreitungspegel	Überschreitungspegel

Aus Tabelle 3-2 geht hervor, daß eine gehörbezogene Frequenzbewertung nur für das Gesamtsignal in Form des A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegels ( $L_{Aeq}$ ) geplant ist und die Verwendung der Lautheit  $N$  vorgesehen wird. Beide Werte dienen dem Vergleich mit bisherigen Messungen und den subjektiven Lautheitsempfindungen eines Normalhörenden, können aber nicht zur Berechnung von Einstellparametern herangezogen werden. Detaillierte Aussagen sind ohne die Kenntnis des speziellen Hörschadens ohnehin noch nicht möglich, da sich von Normalhörenden abweichende zeitliche und spektrale Überdeckungen nachweisen lassen [Fes-83] und die Hörschwelle in jedem Fall stark verändert ist.

Für die Geräteeinstellungen sind die physikalisch gegebenen (gefilterten) Schalldrücke und Schalldruckpegel maßgebend.

## 4 Meßsystem zur Signalanalyse von natürlichen Klangbildern

### 4.1 Kalibrierung des Signalweges

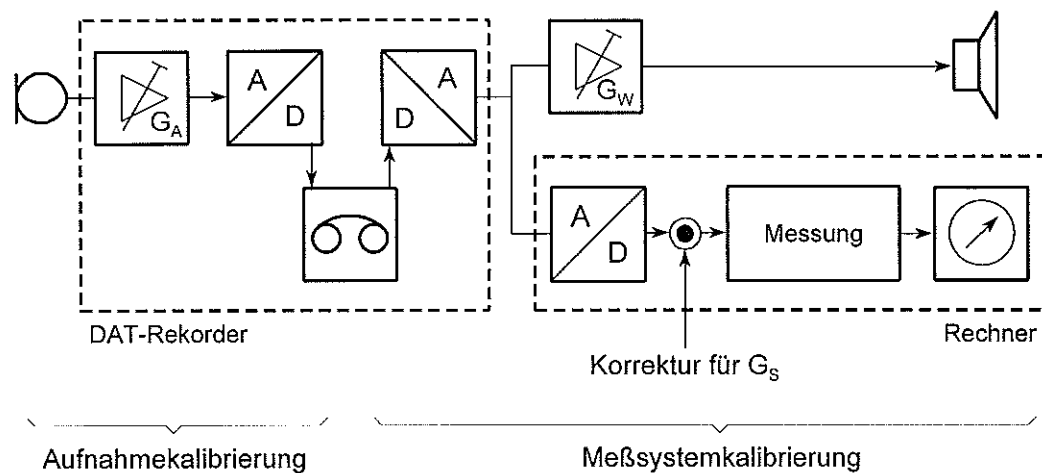
Bevor die Untersuchungen der Klangbilder beginnen, muß sichergestellt werden, daß trotz Signalaufzeichnung und -verarbeitung die natürlichen Schallpegelverhältnisse wiederhergestellt und analysiert werden können. Dazu sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen:

1. Die Pegelverhältnisse der Schallsignale untereinander müssen gewährleistet sein.

Durch eine stabile, fest eingestellte Aufnahme-, Meß- und Wiedergabeanordnung kann die geforderte Stabilität erreicht werden. Zufällige (Drift-) Fehler werden durch eine weitgehend digitale Signalverarbeitung minimiert.

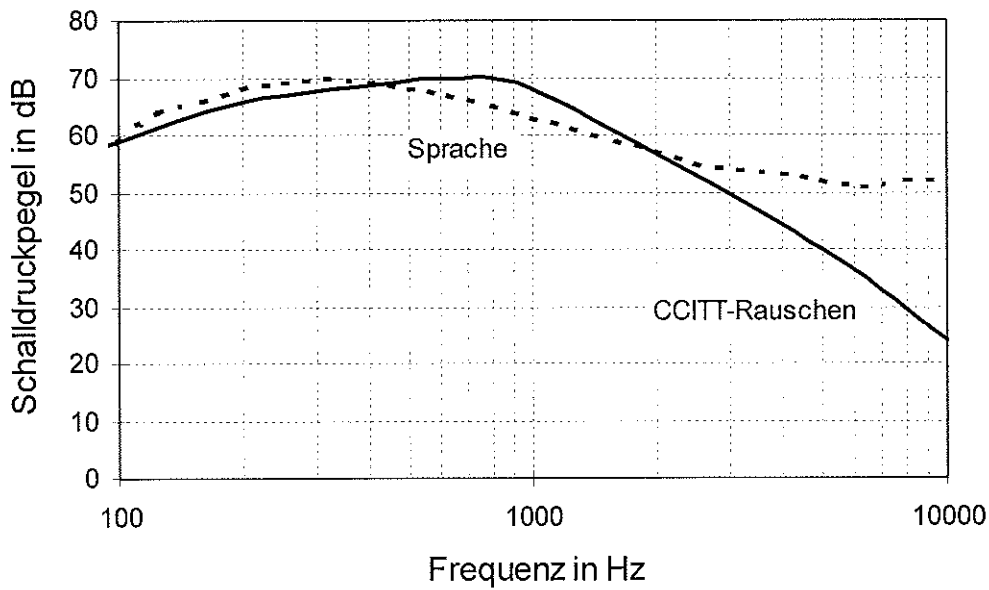
2. Das Schallpegelniveau der Originalsituation muß leicht wieder herstellbar sein.

Diesem Zweck dient ein Kalibriersignal, das verarbeitet wird wie ein übliches Klangbild, aber bekannte Eigenschaften besitzt. Für die Signalanalyse und die Wiedergabe werden die einstellbaren Bausteine der Signalkette (Bild 4-1) so beeinflusst, daß bestimmte Eigenschaften, insbesondere der Schalldruckpegel, wieder erreicht werden.



**Bild 4-1** Aufbau der Verarbeitungskette für die Schallsignale und die Aufteilung der Kalibrierungsarbeiten

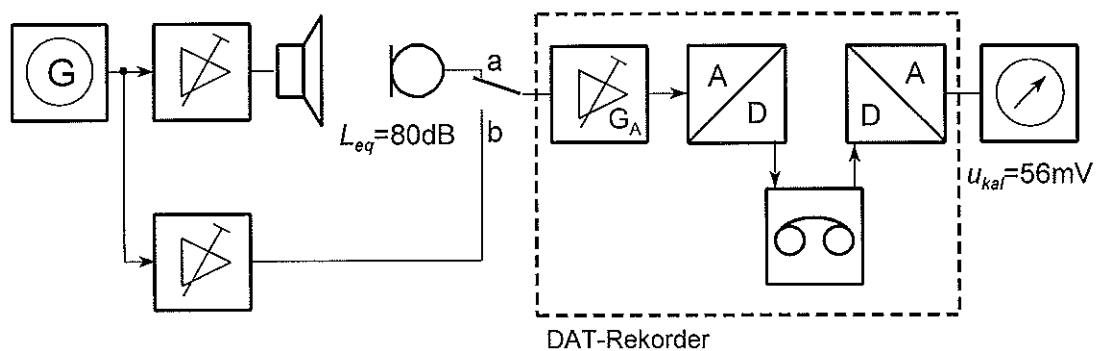
Als synthetisches Kalibriersignal wird das sprachsimulierende Rauschen nach CCITT G.227 [CCITT] verwendet. Den Frequenz-Amplitudengang dieses Signals zeigt Bild 4-2. Es liegt nahe dem mittleren Spektrum von Sprache und füllt einen wichtigen Teil des Hörspektrums aus. Darüber hinaus fallen systembedingte Dämpfungen in den Übertragungskennlinien der elektroakustischen Wandler (Mikrofon, Lautsprecher) bei sehr tiefen und sehr hohen Frequenzen kaum ins Gewicht.



**Bild 4-2** Frequenz-Amplitudengang von CCITT-Rauschen nach [CCITT] und von Sprache (Langzeitspektrum) [Kli-88]

Ziel der Kalibrierung ist es, beim Einmessen der Wiedergabeanlagen bzw. der Signalanalyse den mittleren Schalldruckpegel auf  $L_{eq} = 80$  dB einzustellen.

Zuerst sei jedoch die Aufnahmekalibrierung betrachtet. Die verwendete Anordnung stellt Bild 4-3 dar.



**Bild 4-3** Blockschaltung der Aufnahmekalibrierung  
 a) Generierung des akustischen Kalibriersignals aus CCITT-Rauschen mit Abgleich der Aufnahmeverstärkung  $G_A$   
 b) Aufzeichnung des elektrischen Kalibriersignals

Es wird festgelegt, daß die Aussteuerungsgrenze des zur Signalaufzeichnung verwendeten DAT (digital audio tape)-Recorders mit  $\hat{u}_{DAT} = 2,5 \text{ V}$  bei einem Schalldruckpegel von  $L_{max} = 110 \text{ dB}$  erreicht wird. Für die Aufzeichnung eines CCITT-Rauschens mit  $L_{eq} = 80 \text{ dB}$  muß dann folgender Effektivwert  $\tilde{u}_{Kal}$  der zu messenden Spannung anliegen [Noa-93]:

$$L_p = 20 \lg \frac{\tilde{u}}{\tilde{u}_0} \text{ dB} = 20 \lg \frac{\hat{u}}{\sqrt{2} \tilde{u}_0} \text{ dB} \quad \text{für } u = \hat{u} \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$L_{max} = 20 \lg \frac{\hat{u}_{DAT}}{\sqrt{2} \tilde{u}_0} \text{ dB} \quad L_{eq} = 20 \lg \frac{\tilde{u}_{Kal}}{\tilde{u}_0} \text{ dB} \quad (4.2)$$

$$\tilde{u}_{Kal} = \frac{\hat{u}_{DAT}}{\sqrt{2}} 10^{\frac{L_{eq} - L_{max}}{20 \text{ dB}}} \approx 56 \text{ mV} \quad (4.3)$$

Zuerst wird das Kalibriersignal über Lautsprecher abgestrahlt, mit einem Schallpegelmesser auf  $L_{Kal} = 80 \text{ dB}$  eingestellt und der Eingangsverstärker des Recorders gemäß (4.3) justiert und fixiert. Bei dieser Einstellung wird anschließend das Rauschsignal elektrisch mit einem solchen Pegel eingespeist und aufgezeichnet, daß dieselbe Signalspannung  $\tilde{u}_{Kal}$  erreicht wird. Mit der eingestellten Aufnahmeanordnung werden alle Klangbilder aufgezeichnet und einschließlich des CCITT-Rauschens auf CD (compact disc) archiviert.

Für die Kalibrierung des Meßsystems wird das gespeicherte Rauschen verwendet. Die Übertragungskette besteht aus:

- DAT-Recorder SONY DC 10 ( $\hat{u}_A = \pm 2,5 \text{ V}$ ,  $f_A = 44,1 \text{ kHz}$ ),
- AD-Wandler 16 bit Loughborough Sound Images DSP 56001 ( $\hat{u}_E = \pm 3 \text{ V}$ ),
- Verarbeitungssysteme: Hypersignal (Hyperception Inc., Dallas TX, USA), DIA (Gesellschaft für Strukturanalyse GfS mbH, Aachen)

Wenn angestrebt wird, daß gilt

$$L_{Norm} = 94 \text{ dB} \quad \text{bei} \quad p_{eff} = 1 \text{ Pa} \triangleq u_{eff} = 1 \text{ V} \quad (4.4)$$

berechnet sich der resultierende Korrekturfaktor  $G_S$  aus dem Zahlenwort des Wandlers  $n_E$  und der erforderlichen Spannung für die spätere Signalanalyse  $\tilde{u}_{SA}$  zu:

$$\tilde{u}_{SA} = G_S n_E = G_S \frac{\tilde{u}_{DAT}}{\tilde{u}_E} 2^{15} \quad (4.5)$$

Ausgehend von (4.1) und den Aussteuerungsgrenzen

$$\tilde{u}_{DAT}(L_{\max}) = \frac{\hat{u}_{DAT}}{\sqrt{2}} = \frac{2,5 V}{\sqrt{2}} \quad \tilde{u}_E = \frac{\hat{u}_E}{\sqrt{2}} = \frac{3 V}{\sqrt{2}} \quad \tilde{u}_{SA}(L_{Norm}) = 1 V \quad (4.6)$$

erhält man  $G_S$ :

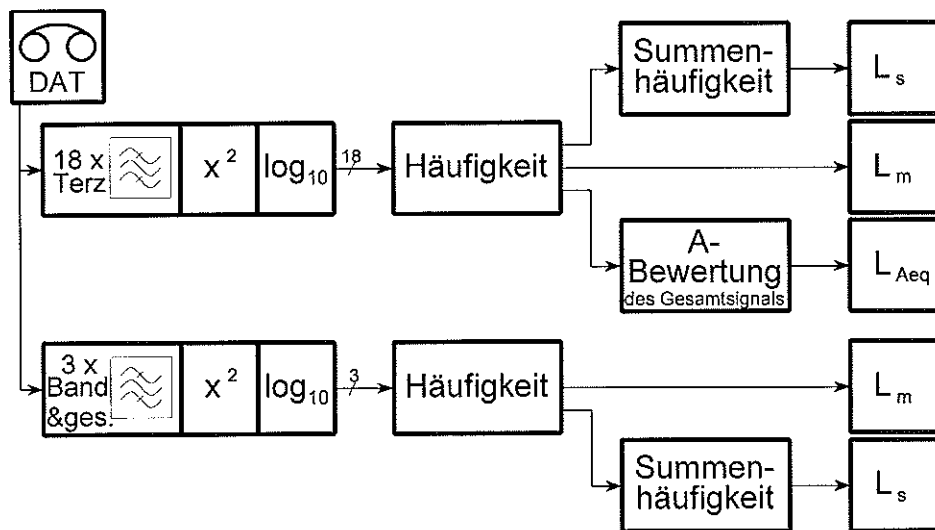
$$G_S = \frac{\tilde{u}_{SA}(L_{Norm})}{\tilde{u}_{DAT}(L_{Norm})} \frac{\tilde{u}_E}{2^{15}} = \frac{\tilde{u}_{SA}(L_{Norm})}{\tilde{u}_{DAT}(L_{\max})} 10^{\frac{L_{\max} - L_{Norm}}{20dB}} \frac{\tilde{u}_E}{2^{15}} \quad (4.7)$$

$$G_S \approx \frac{7,57 V}{2^{15}}$$

Ein Zeitausschnitt von 4,5 s aus dem Kalibriersignal wird der in diesem Kapitel beschriebenen Analyse unterworfen und liefert einen mittleren Schalldruckpegel des Gesamtsignals von  $L_{eq} = 80$  dB. Bei Abweichungen lassen sich die während der Aufnahme oder Wiedergabe auftretenden linearen systematischen Fehler mit einem modifizierten Korrekturfaktor  $G_S$  ausgleichen.

## 4.2 Untersuchungen im Spektrum

Das Schema der Signalverarbeitung im Frequenzbereich ist aus Bild 4-4 ersichtlich ([Sei-93], [Sei-96]).



**Bild 4-4** Funktionsschema der Signalanalyse im Frequenzbereich für die Berechnung der Überschreitungspegel  $L_s$ , Mittelungspegel  $L_m$  und äquivalenten Dauerschalldruckpegel  $L_{Aeq}$

Nach Durchlaufen einer Terzfilterbank werden der Kurzzeiteffektivwert des Schalldruckes und der entsprechende Schalldruckpegel gebildet. Eine Häufigkeitsverteilung ist die Basis zur Berechnung der Überschreitungspegel  $L_s$  aus der Summenhäufigkeit, der Mittelungspegel  $L_M$  und des frequenzbewerteten äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{Aeq}$ . Ähnlich ist der Ablauf für die drei gesondert untersuchten Frequenzbereiche Tiefen, Mitten und Höhen.

### 4.2.1 Terzanalyse

Für die spektrale Signalzerlegung kommt folgende digitale Terzfilterbank zum Einsatz:

- Frequenzbereich von 200 Hz bis 10 kHz (Mittenfrequenz)
- Terzfilter nach DIN EN 61260 mit Kennfrequenzen entsprechend Tabelle 4-1

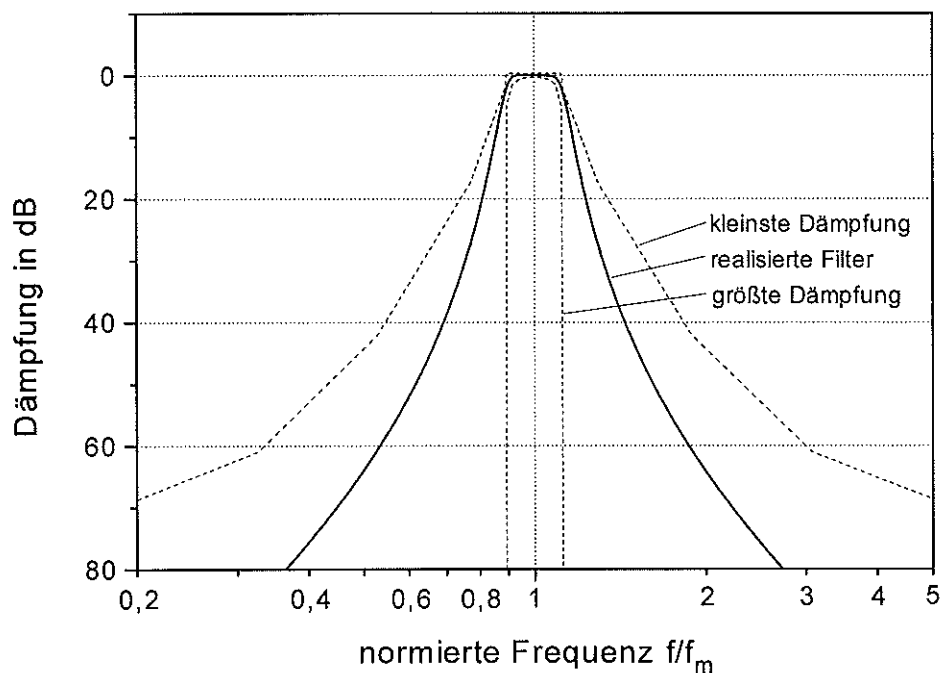


**Tabelle 4-1** Kennfrequenzen der verwendeten Terzfilter (DIN EN 61260) $f_m$  Nenn-Bandmittenfrequenz $f_1$  untere Grenzfrequenz $f_2$  obere Grenzfrequenz

$f_m$ in Hz	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
$f_1$ in Hz	178	224	281	354	447	562	708	891	1122
$f_2$ in Hz	224	281	354	447	562	708	891	1122	1412

$f_m$ in Hz	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$f_1$ in Hz	1412	1777	2238	2818	3548	4467	5622	7079	8912
$f_2$ in Hz	1777	2238	2818	3548	4467	5622	7079	8912	11220

Die Filterbank besteht aus digitalen Butterworth-Filtern 4. Ordnung. Die im Durchlaßbereich flache Dämpfungskurve (Bild 4-5) dieses Filtertyps kommt den vorliegenden Anforderungen entgegen. Die sich nichtlinear mit der Frequenz ändernde Phase hat für die nachfolgenden Analyseschritte keine Bedeutung. Alle berechneten Größen basieren ausschließlich auf Effektivwerten. Die Mittelungspegel können nach dem Satz von *Parseval* zu Gruppen zusammengefaßt werden und ergeben wegen der Überschneidung der Filter an der 3-dB-Grenzfrequenz nahezu keine Abweichungen zum Eingangssignal (vgl. unten angegebene Parameter nach DIN).



**Bild 4-5** Toleranzschema für Terzfilter der Klasse 0 nach DIN EN 61260 Anhang B mit Dämpfungskurve der verwendeten Butterworthfilter 4. Ordnung

Bild 4-5 stellt das zulässige Toleranzschema der Filterdämpfung dar, ergänzt durch den Dämpfungsverlauf der gewählten Filterrealisierung, welche die Vorgaben für Terzfilter der Filterklasse 0 erfüllt. Die Filterdämpfung  $A$  wird allgemein bestimmt durch

$$A = L_{\text{Filter in}} - L_{\text{Filter aus}} = 10 \lg \frac{\tilde{P}_{\text{Filter in}}}{\tilde{P}_{\text{Filter aus}}} \quad (4.8)$$

und die relative Dämpfung  $\Delta A$  leitet sich ab zu:

$$\Delta A\left(\frac{f}{f_m}\right) = A\left(\frac{f}{f_m}\right) - A_{\text{ref}} \quad (4.9)$$

Wegen  $A(1) = 0$  dB für alle  $f_m$  wird festgelegt, daß die Referenzdämpfung  $A_{\text{ref}} = 0$  dB beträgt.

Die Norm DIN EN 61260 schreibt darüber hinaus die Angabe weiterer Parameter vor:

#### *Integrierte Filterantwort*

Die integrierte Filterantwort stellt ein Maß für die Qualität der Filterrealisierung insbesondere bezüglich der Flanken dar. Sie berechnet sich aus der normierten effektiven Bandbreite  $B_e$  und der normierten Referenzbandbreite  $B_r$  nach folgender Gleichung:

$$\Delta B = 10 \lg \frac{B_e}{B_r} \text{ dB} = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} 10^{-\frac{1}{10 \text{ dB}} \Delta A\left(\frac{f}{f_m}\right)} d\left(\frac{f}{f_m}\right)}{\frac{f_2 - f_1}{f_m}} \text{ dB} \quad (4.10)$$

#### *Summierung von Ausgangssignalen*

Bei der Summierung von Ausgangssignalen wird die Güte des Übergangs von einem Bandfilter zum nächsten eingeschätzt:

$$\left| L_{\text{Filter in}}(f) - A_{\text{ref}} - 10 \lg \left( 10^{\frac{L_{\text{Filter1 aus}}(f)}{10 \text{ dB}}} + 10^{\frac{L_{\text{Filter2 aus}}(f)}{10 \text{ dB}}} \right) \right| \leq \varepsilon_A \quad f = [f_{m1}, f_{m2}] \quad (4.11)$$

Für die eingesetzten Terzfilter vereinfacht sich (4.11) für benachbarte Bandfilter mit den Mittenfrequenzen  $f_{m1}$  und  $f_{m2}$ :

$$\left| 10 \lg \left( 10^{-\frac{\Delta A(f/f_{m1})}{10 \text{ dB}}} + 10^{-\frac{\Delta A(f/f_{m2})}{10 \text{ dB}}} \right) \right| \leq \varepsilon_A \quad f = [f_{m1}, f_{m2}] \quad (4.12)$$

### Ebener Frequenzgang

Ein ebener Frequenzgang wird dann angenommen, wenn innerhalb eines bestimmten Frequenzbereiches ( $f = [f_u, f_o]$ ) die Abweichungen von der relativen Dämpfung eine Fehlerschranke von  $\pm \varepsilon$  nicht überschritten wird:

$$|A(f) - A_{ref}| \leq \varepsilon_F \quad f = [f_u, f_o] \quad (4.13)$$

Das realisierte Terzfilter genügt unter Berücksichtigung der im folgenden aufgeführten Kennwerte, außer der Echtzeitverarbeitung, den Bedingungen der Filterklasse 1 und ist mit den Ergebnissen entsprechender Bandfilter vergleichbar:

Referenzdämpfung:	$A_{ref} = 0$ dB
Integrierte Filterantwort:	$\Delta B = 0,3$ dB
Echtzeitverarbeitung:	Nein
Anti-Aliasing-Filter:	realisiert durch DAT-Recorder Sony DC 10
Summierung von Ausgangssignalen:	$\varepsilon_A = \pm 1$ dB
Ebener Frequenzgang:	$f_u = 190$ Hz, $f_o = 10,7$ kHz bei $\varepsilon_F = \pm 0,3$ dB
Maximales Eingangssignal:	$L_{in, max} = 110$ dB

## 4.2.2 Ableitung spektraler Signalparameter aus der Pegelhäufigkeitsverteilung

### 4.2.2.1 Effektivwert / Schalldruckpegel

Vor der statistischen Bewertung der Signalverläufe erfolgt die Bildung des Kurzzeiteffektivwertes und des korrespondierenden Schalldruckpegels. Der Effektivwert des Schalldruckes ist definiert als:

$$\tilde{p}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T p^2(t) dt \quad (4.14)$$

Bei der Wahl zwischen Kurzzeit- und Langzeiteffektivwert, d. h. unterschiedlichen Integrationszeiten, müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden:

- Lange Integrationszeit

Unvollständige Signalperioden innerhalb des untersuchten Zeitfensters haben nahezu keinen Einfluß auf das Meßergebnis. Langsame Änderungen der Hüllkurve werden wiedergegeben, wenn die Integrationszeit nicht auf das gesamte Zeitsignal ausgedehnt wird.

- Kurze Integrationszeit

Amplitudenmodulationen des gefilterten Signales können gut berücksichtigt werden. Dafür besteht die Gefahr, daß der Effektivwert durch die Einbeziehung unvollständiger Signalperioden in das Integrationsfenster stark fehlerbehaftet ist.

Für eine Kurzzeitintegration wird ein relativer Fehler von 1% bei der Effektivwertberechnung mit Gleichung (4.14) zugelassen:

$$0,99\tilde{p} \leq \sqrt{\frac{p_{\max}^2}{T_i} \int_0^{T_i} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt} = \sqrt{\frac{p_{\max}^2}{T_i} \left[\frac{T_i}{2} - \frac{T}{8\pi} \sin\left(\frac{4\pi}{T}T_i\right)\right]} \quad (4.15)$$

Unter der Annahme, daß die Sinusfunktion höchstens 1 wird, läßt sich die minimale Integrationszeit  $T_i$  aus (4.15) bestimmen:

$$0,99 \frac{p_{\max}}{\sqrt{2}} \leq \sqrt{\frac{p_{\max}^2}{2} \left[1 - \frac{T}{4\pi T_i}\right]}$$

$$T_i \geq 3,99 T \quad (4.16)$$

Die Integrationszeit  $T$  wurde deshalb auf  $T = 4/f_1$ , d. h. die vierfache Periodendauer der unteren Grenzfrequenz  $f_1$  des Terzfilters festgelegt. Damit ist ein geeigneter Kompromiß zwischen guter Zeitauflösung des Effektivwert-Zeit-Verlaufes und möglichst geringem Fehler bei der Effektivwertberechnung durch die Einbeziehung unvollständiger Signalperioden in das Integrationsfenster gefunden.

Unter Berücksichtigung der Zeitdiskretisierung mit der Abtastfrequenz  $f_s$  und der Integrationszeit aus (4.16) kann (4.14) folgendermaßen aus den Abtastwerten bestimmt werden:

$$\tilde{p}(n) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=n-m}^n p^2(i)} \quad \text{mit } m = 4 \frac{f_s}{f_1} \quad (4.17)$$

$f_s$  Abtastfrequenz

$f_1$  untere Grenzfrequenz

$n$  Nummer des Abtastwertes,  $n \in \mathbb{N}$

Der Schalldruckpegel ergibt sich aus der Logarithmierung unter Verwendung des Bezugsschalldruckpegels  $p_0$  gemäß:

$$L_p(n) = 20 \lg \frac{\tilde{p}(n)}{p_0} \text{ dB} \quad \text{mit } p_0 = 20 \mu \text{Pa} \quad (4.18)$$

#### 4.2.2.2 Pegelhäufigkeitsverteilung

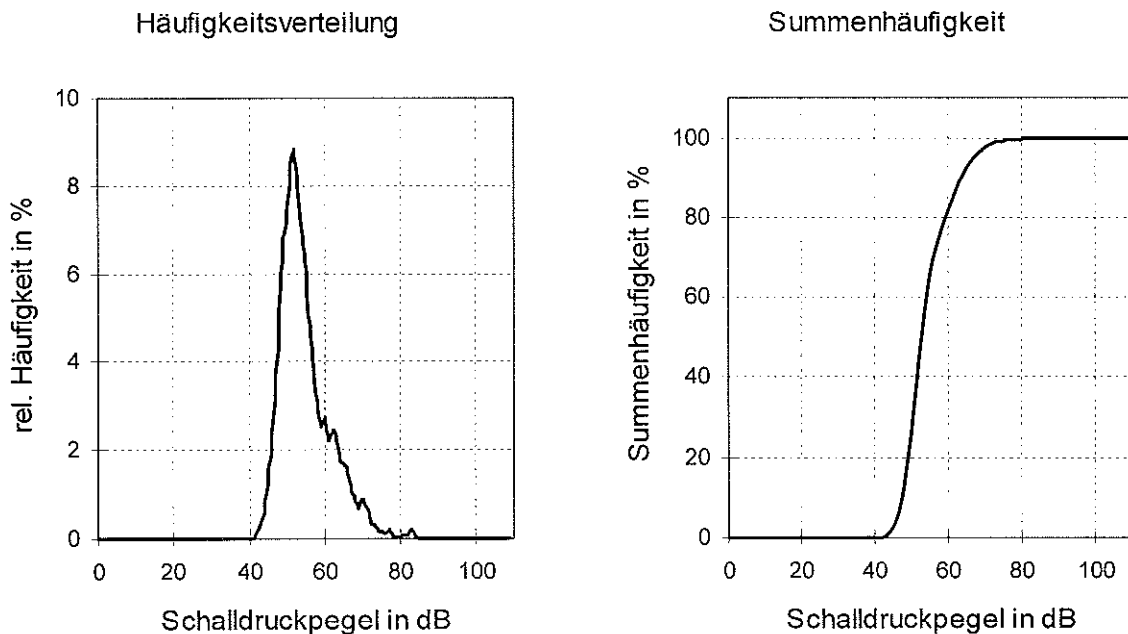
Statistische Parameter lassen sich sowohl direkt aus Stichproben als auch aus deren Häufigkeitsverteilung ableiten. Letztere bietet den Vorteil einer erheblichen Datenreduktion bei großem Stichprobenumfang, stellt aber i.a. eine Verschlechterung der Amplitudenauflösung dar.

Für diese Arbeit wurde zur Klassierung das Stichprobenverfahren nach DIN 45667 [DIN667] verwendet. Der Momentanwert des Schalldruckpegels  $L_p$  wird in äquidistanten Zeitabständen ermittelt und klassenweise gezählt. Die gesamte Beobachtungsdauer ist genau so groß wie der gewählte Zeitausschnitt des Klangbildes (d. h. 4,5 s, 3 s oder 1,1 s).

Die nach [Sac-88] aufgrund der Datenmenge empfohlene Klassenbreite  $b$  von

$$b \leq \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{\sqrt{n}+1} = \frac{110}{\sqrt{44100 \cdot 4,5} + 1} \approx 0,24 \quad (4.19)$$

wurde auf  $b = 0,1$  verringert und die Klassenzahl  $k = 1100$  gewählt. Eine Klassenbreite von 0,1 dB ist für die vorgesehenen Untersuchungen völlig ausreichend, hält andererseits aber auch die Verschlechterung der Amplitudenauflösung in Grenzen. Der resultierende Klassierungsbereich von 0 dB bis 110 dB überstreicht fast den gesamten Hörbereich des Menschen und überläßt notwendige Reduzierungen den nachfolgenden Algorithmen. Ein Histogramm (oder auch Pegelhäufigkeitskurve genannt) bei Verwendung der relativen Häufigkeiten nach (4.20) zeigt Bild 4-6a am Beispiel des Klangbildes "Gespräch im Bus".



**Bild 4-6** Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit des Schalldruckpegels im Terzband  $f_m = 2$  kHz des Klangbildes "Gespräch im Bus"

Gut erkennbar ist, daß Schalldruckpegel von  $L_p = 50$  dB ... 55 dB sehr oft auftreten, vereinzelte Spitzenwerte sind aber noch bei  $L_p = 80$  dB zu erkennen. Der Dynamikumfang läßt sich bereits aus der Verteilungsfunktion abschätzen. Aus der Kurvenform resultiert die Vermutung, daß es sich in diesem Fall um eine rechtsschiefe Verteilung handelt, d. h. keine Normalverteilung.

Es erhebt sich die Frage, ob die Häufigkeitsverteilung eines natürlichen Klangbildes auch aus der Summation der Verteilungen einzelner Ereignisse herleitbar ist. Ausschließlich im Fall von zeitlich aufeinanderfolgenden Ereignissen ist diese Vorgehensweise möglich. Verlaufen die Vorgänge innerhalb desselben Zeitfensters, addieren sich die Teilleistungen und führen zu einer völlig anderen Häufigkeitsverteilung, da der Zeitbezug in dieser Darstellungsform nicht mehr enthalten ist.

Aus der Häufigkeitsverteilung  $h_j$  läßt sich die Summenhäufigkeit  $H(x_j)$  berechnen. Es gilt:

$$h_j = \frac{n_j}{n} \quad \text{mit } j = [1, k] \quad (4.20)$$

$n_j$  Anzahl der Beobachtungen in der j-ten Klasse  
 $n$  Umfang der Stichprobe  
 $k$  Klassenanzahl

und somit:

$$H(x_i) = \sum_{j=1}^i h_j \quad (4.21)$$

$x_i$  Klassenobergrenze

Bild 4-6b enthält die resultierende Kurve für das Klangbildbeispiel. Die Summenhäufigkeit erleichtert Aussagen zu Pegelüberschreitungen oder Grenzwerten, wie sie im folgenden betrachtet werden.

#### 4.2.2.3 Quantilpegel / Überschreitungspegel

Bei zeitlich schwankenden Signalen interessiert oft, wieviele Ereignisse eine bestimmte Wahrscheinlichkeit  $p$  nicht erreichen oder überschreiten. Dieses p-Quantil ergibt sich aus:

$$H(x_p) = p \quad (4.22)$$

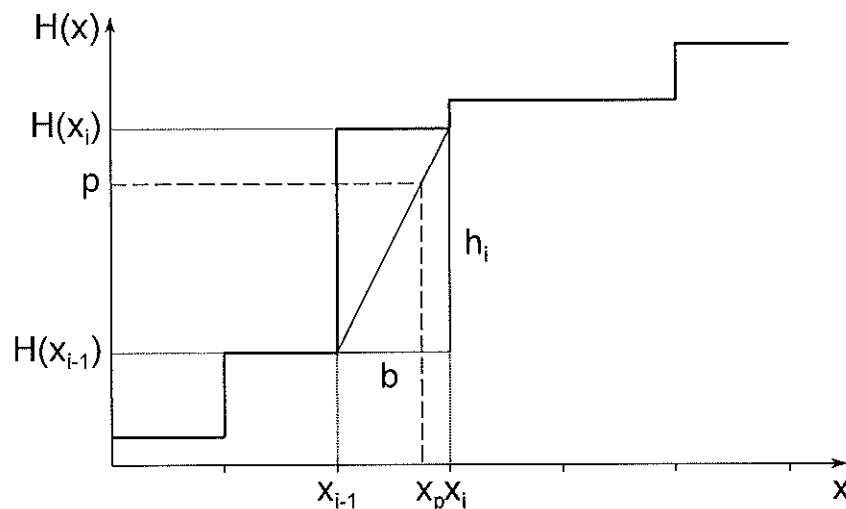
und läßt sich näherungsweise durch (4.23) berechnen:

$$x_p = x_{i-1} + \frac{p - H(x_{i-1})}{h_i} b \quad (4.23)$$

Diese lineare Interpolation zwischen den Klassenobergrenzen  $x_{i-1}$  und  $x_i$  veranschaulicht Bild 4-7. Da die Klassenbreite mit  $b = 0,1$  dB festgelegt und die Auflösung ausreichend ist, wurde vereinfachend vereinbart:

$$x_p: \quad H(x_{p-1}) < p \leq H(x_p) \quad (4.24)$$

Wird der Datensatz nur in 100 gleich große Teile unterteilt, spricht man statt von Quantilen häufig von Perzentilen. Das Perzentil  $x_p$  (mit  $p = r/100$ ,  $r \in \mathbb{N}$ ,  $r = (0,100)$ ) ist der Wert einer stetigen Verteilungsfunktion, bei dem die Wahrscheinlichkeit für einen kleineren Wert genau  $p$  und die Wahrscheinlichkeit für einen größeren Wert  $1-p$  beträgt.



**Bild 4-7** Näherungsweise Bestimmung des  $p$ -Quantils durch lineare Interpolation

Der Median  $x_{Median}$  (oder Zentralwert) ist mit dem Perzentil  $x_{0,5}$  identisch. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß die Hälfte aller Stichproben unter diesem Wert und die andere Hälfte darüber liegen. In Bezug auf einzelne Extremwerte ist der Median im Gegensatz zum Mittelwert relativ unempfindlich, d.h. robust. Für das in Bild 4-2 angegebene Beispiel beträgt der Median  $x_{Median} = 53$  dB.

Die in der Akustik geläufigen Überschreitungspegel  $L_s$  entsprechen bei Stichproben mit äquidistanten Zeitabständen den Perzentilen, unterscheiden sich aber in der Zählweise. Der Über-

schreitungspiegel  $L_s$  ist genau der Pegel, der in  $s$  Prozent der Beobachtungsdauer überschritten wird. Es gilt für eine Häufigkeitsverteilung der Schalldruckpegel nach dem Stichprobenverfahren:

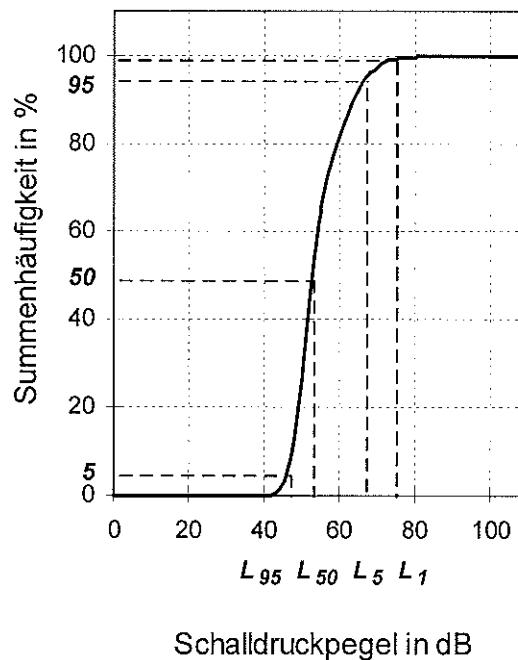
$$L_s = x_r \quad \text{mit } r = 1 - \frac{s}{100}, \quad s \in \mathbb{N}, \quad s = (0, 100) \quad (4.25)$$

Für die Dynamikabschätzung eines Schallsignals werden die Überschreitungspiegel

- $L_{95} = x_{0,05}$  zur Bestimmung des unteren Pegelniveaus,
- $L_{50} = x_{0,50}$  für die Festlegung eines mittleren Schalldruckpegels und
- $L_5 = x_{0,95}$  als obere typische Grenze der Pegelschwankungen ermittelt.

Der Überschreitungspiegel  $L_1 = x_{0,99}$  dient der robusten Bestimmung des Spitzenwertes. Diese Festlegung wird gestützt durch die Beobachtung, daß Pegelspitzen, die in weniger als 1% der Beobachtungsdauer auftreten, die subjektive Beurteilung nicht deutlich beeinflussen.

Bild 4-8 demonstriert die Bestimmung der Überschreitungspiegel aus der Summenhäufigkeitsverteilung für das Beispiel aus Bild 4-6.



**Bild 4-8** Summenhäufigkeitsverteilung mit Angabe wichtiger Überschreitungspiegel

#### 4.2.2.4 Mittelungspegel

Ausgangspunkt für die Berechnung des gemittelten Immissionspegels eines Schallereignisses ist der Langzeit-Effektivwert (4.14) über dem betrachteten Zeitraum. Beim Übergang zu Schalldruckpegeln und endlichem Zeitfenster ergibt sich:



$$\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \quad (4.26)$$

$$L_m = 10 \lg \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] dB \quad (4.27)$$

Liegen bereits zeitdiskretisierte, nichtklassierte Schalldruckpegel gebildet aus Kurzzeit-Effektivwerten vor, so folgt:

$$L_m = 10 \lg \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10dB} dt \right] dB \quad (4.28)$$

$$L_m = 10 \lg \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot 10^{L_i/10dB} \right] dB \quad \text{mit } T = n \cdot \Delta t \quad (4.29)$$

$$L_m = 10 \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10dB} \right] dB \quad (4.30)$$

Wird der Mittelungspegel für zeitlich veränderliche Signale über dem gesamten hörbaren Frequenzbereich gebildet, erhält man den **äquivalenten Dauerschallpegel**  $L_{eq}$  [DIN641]:

$$L_{eq} = \frac{10q}{3} \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{3L_i}{10dB \cdot q}} \right] dB \quad (4.31)$$

q Halbierungsparameter (q = 3)  
n Zahl der äquidistanten Meßwerte

Der äquivalente Dauerschallpegel ist eine Größe zur Beschreibung der Gehörbelastung. Der Halbierungsparameter gibt an, um wieviel der Pegel gesenkt werden muß, damit bei doppelter Einwirkzeit eine gleiche Gehörbelastung auftritt. Er wird meist zu  $q = 3$  gewählt und man erhält  $L_m = L_{eq}$ .

Die hier beschriebene Signalanalyse berechnet die Terzmittelungspegel näherungsweise aus klassierten Werten bei Verwendung absoluter und relativer Häufigkeiten ((4.32) bzw. (4.33)):

$$L_{m,terz} = 10 \lg \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i 10^{L_i/10dB} \right] dB \quad \text{mit } n = \sum_{i=1}^k n_i \quad (4.32)$$

$$L_{m,terz} = 10 \lg \left[ \sum_{i=1}^k h_i 10^{L_i/10 \text{ dB}} \right] \text{ dB} \quad \text{mit} \quad h_i = \frac{n_i}{n} \quad (4.33)$$

- k Klassenzahl
- $n_i$  absolute Häufigkeit
- $h_i$  relative Häufigkeit
- n Zahl der äquidistanten Meßwerte

Über energetische Summation der Terzmittelungspegel aus (4.18) nach dem Satz von Parseval [Bes-89] gelangt man zum  $L_{eq}$  des Gesamtsignals:

$$L_{eq} = L_{m,ges} = 10 \lg \left[ \sum_{j=1}^l 10^{L_{m,terz_j}/10 \text{ dB}} \right] \text{ dB} \quad \text{bei} \quad q=3 \quad (4.34)$$

$$L_{eq} = 10 \lg \left[ \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^k h_{ij} 10^{L_{ij}/10 \text{ dB}} \right] \text{ dB} \quad (4.36)$$

$$L_{eq} = 10 \lg \left[ \sum_{j=1}^l 10^{\lg \left[ \sum_{i=1}^k h_{ij} 10^{L_{ij}/10 \text{ dB}} \right]} \right] \text{ dB} \quad (4.35)$$

- $h_{ij}$  Häufigkeit in einer Klasse
- i Laufindex Pegelklasse
- j Laufindex Terzen
- l Anzahl der Terzpegel
- $L_{ij}$  mittlerer Pegel der Klasse i in der j-ten Terz

Unter Einbeziehung der A-Bewertungskurve (Tab. 4-2, Bild 4-9) berechnet sich der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel  $L_{Aeq}$  entsprechend:

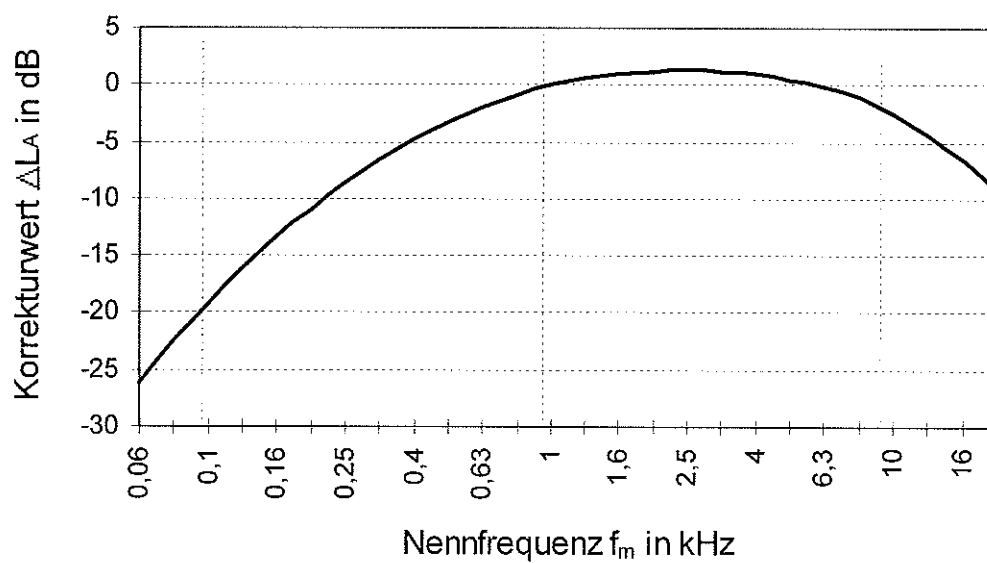
$$L_{Aeq} = 10 \lg \left[ \sum_{j=1}^l 10^{\frac{L_{m,terz_j} + \Delta L_{A_j}}{10 \text{ dB}}} \right] \text{ dB} \quad \text{bei} \quad q=3 \quad (4.37)$$

- i Laufindex Pegelklasse
- j Laufindex Terzen
- l Anzahl der Terzpegel
- $\Delta L_A$  Korrekturfaktor für die A-Bewertung

**Tabelle 4-2** Korrekturfaktoren der A-Bewertungskurve nach [DIN651]

$f_m$ in Hz	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
$\Delta L_A$ in dB	-10,9	-8,6	-6,6	-4,8	-3,3	-1,9	-0,8	0	0,6

$f_m$ in Hz	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
$\Delta L_A$ in dB	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	0,5	-0,1	-1,1	-2,5

**Bild 4-9** Frequenzgang der standardisierten Frequenzbewertungskurve A [DIN651]

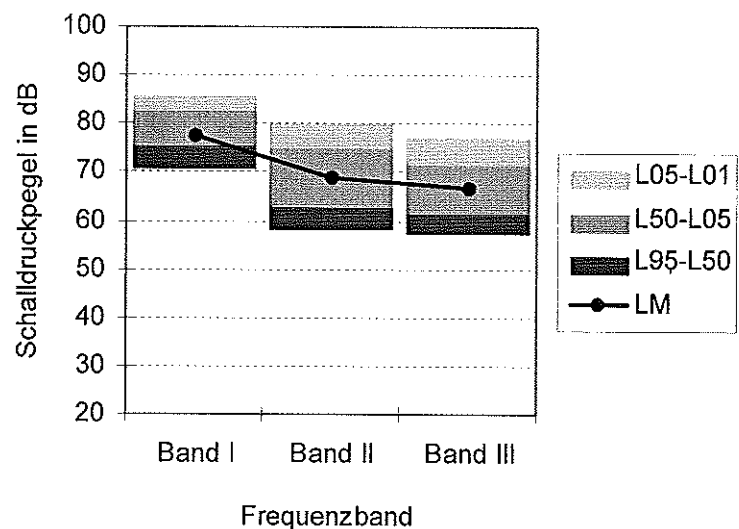
### 4.2.3 Ergebnisse

Die vorgestellten Berechnungen und Analyseschritte wurden vollständig als Makrosprache in dem Softwarepaket DIA (Gesellschaft für Strukturanalyse GfS mbH, Aachen) implementiert und für alle Klangbilder der vorhandenen Bibliothek abgearbeitet.

Gesamt signal 0,2 - 11,2 kHz

Parameter der Frequenzbänder I-III

Größe	Pegel in dB
$L_{01}$	86,6
$L_{05}$	83,6
$L_{50}$	75,2
$L_{95}$	71,8
$L_{eq}$	78,4
$L_{Aeq}$	75,3



Parameter der Terzkanäle

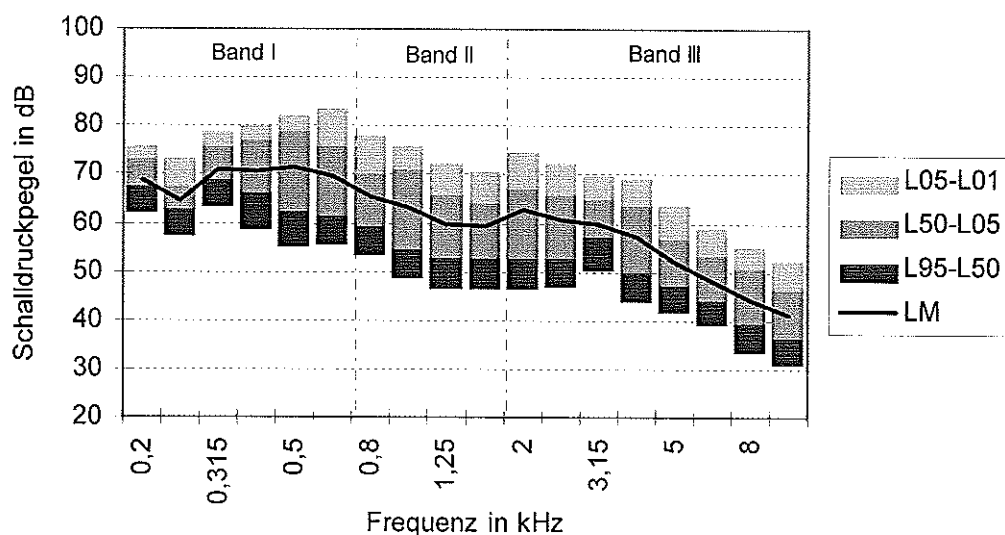


Bild 4-10 Ergebnisse der Signalanalyse im Frequenzbereich am Klangbild "Gespräch im Bus"

Die Ergebnisse der Berechnungen sollen am Beispiel des Klangbildes "Gespräch im Bus" verdeutlicht werden [Sei-96]. Das Geräusch wurde bereits an anderer Stelle verwendet, weil es Merkmale wie Klangfarbe und Dynamik anschaulich widerspiegelt und außerdem gestörte Sprache enthält.

Aus dem Diagramm in Bild 4-10 sind die Überschreitungspegel und der Mittelungspegel in jeder Terz ablesbar. Die Angaben für die drei Frequenzbänder sind im unteren Balkendiagramm erkennbar und die zusätzlich beigefügte Tabelle (Bild 4-10 a) enthält die Kenndaten für das gesamte Signal. Diese Angaben sind zweckmäßig, um die Einstellung ein- und mehrkanaliger Hörgeräte zu ermöglichen.

Das Klangbild "Gespräch im Bus" zeigt deutlich einen hohen Anteil von Schalldruckpegeln bei tiefen Frequenzen (Fahrgeräusche des Busses). Bei mittleren Frequenzen weichen Mittelungspegel und 50%-Überschreitungspegel erheblich voneinander ab. Das ist als Kennzeichen für impulshaltige / pausenhaltige Signalanteile (Sprache) zu interpretieren. Der Dynamikumfang liegt bei 10 dB bis 20 dB, ablesbar aus der Differenz zwischen 95%- und 5%-Überschreitungspegel. Das Klangbild ist somit geeignet, zur Anpassung der Geräteeinstellungen für Sprache im Störlärm zu dienen und um die Wirkungen einer möglichen Dynamikkompression bei mittleren bis hohen Pegeln zu prüfen.

Zum Vergleich stellt Bild 4-11 die Terzanalysedaten für das Klangbild "Geschirrkloppern" dar. Deutlich sichtbar ist die starke Dynamik in allen Frequenzbereichen, die bis zu 80 dB beträgt. Die hohe Differenz von Mittelungspegel und 50% Überschreitungspegel weist auf impulsförmigen Signalverlauf hin. Darüber hinaus fällt auf, daß nur ein schwacher Abfall der Pegel zu hohen Frequenzen hin zu verzeichnen ist.

Das "Geschirrkloppern" aus dem akustischen Alltag ist Anlaß dafür, daß Hörgeschädigte bereits im Wohnbereich oft über erhebliche Probleme mit ihrem Hörgerät klagen. Das Geräusch wird unangenehm (manchmal auch schmerzhaft) laut und vergleichsweise schrill wahrgenommen. Außerdem stört es bei regelnder Dynamikkompression oft die Verständlichkeit eines parallelen Gespräches. Dieses Problem wird angesichts dieser Signalanalyseergebnisse und der Kenntnis über die bisher begrenzten Möglichkeiten der Gerätetechnik verständlich.

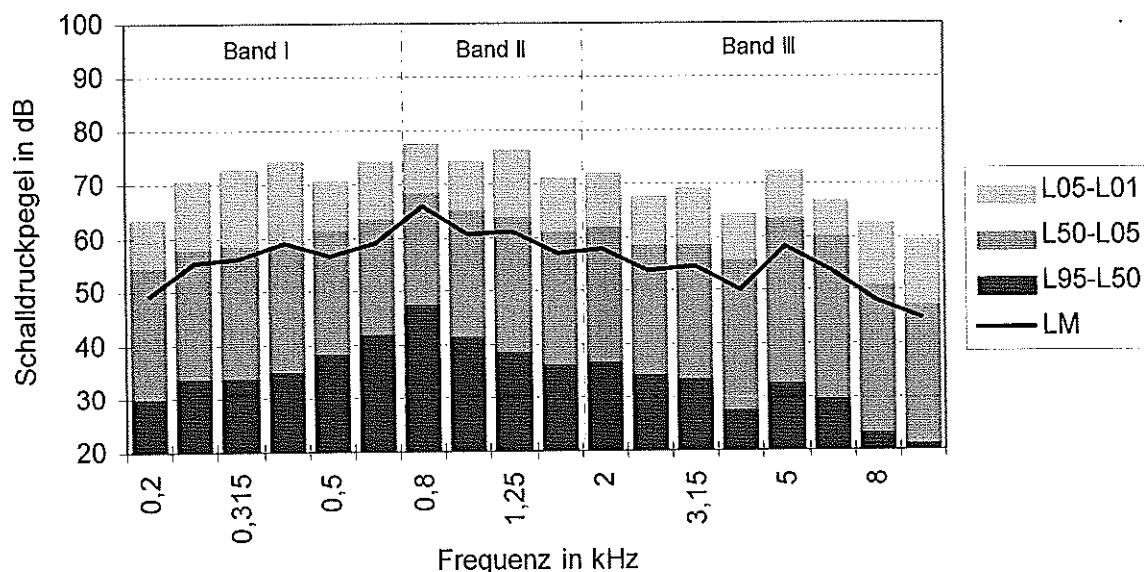
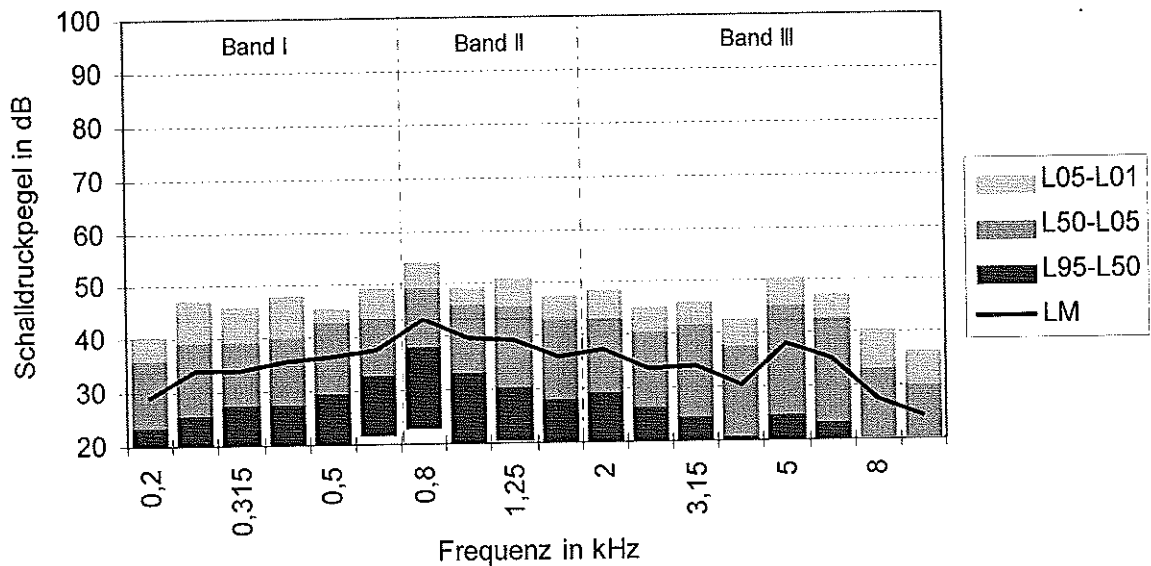


Bild 4-11 Pegelkurven des Klangbildes "Geschirrkloppern"



**Bild 4-12** Pegelkurven des Klangbildes "Geschirrkloppern" nach einer Komprimierung

Um die Wirkung von signalverarbeitenden Baugruppen zur Beeinflussung der Dynamik auf die Überschreitungspegel zu demonstrieren, wird das Klangbild "Geschirrkloppern" (Bild 4-11) vor seiner Analyse einer Dynamikkompression mit folgenden Kennwerten unterzogen:

- Regeleinsatzschwelle 45 dB,
- Kompression 2:1,
- Ein- und Ausschwingzeit 2 ms,
- Gleitendes Zeitfenster von 2 ms, in dem der Effektivwert zur Steuerung der Begrenzung gebildet wird.

Bild 4-12 liefert das berechnete Analyseergebnis:

1. Der  $L_{95}$  wird kaum beeinflusst. Die vereinzelt sichtbaren Anhebungen (Terzbänder 630 Hz, 800 Hz und 1250 Hz) sind auf die Wirkung der dynamischen Regelkennlinie einer Kompression (vgl. Bild 3-13) zurückzuführen.
2. Der 5%- und der 1%-Überschreitungspegel zeigen dagegen eine deutliche Absenkung. Auch der Mittelungspegel fällt spürbar ab.
3. Aus der Höhe der Balken innerhalb jeder Terz läßt sich die Kompressionswirkung erkennen. Das durch die Kurven eingeschlossene Geräuschfeld wird von durchschnittlich 60 dB Breite (Bild 4-11) auf etwa 30 dB Dynamikumfang (Bild 4-12) gestaucht.

Diese Darlegungen zeigen, daß die entworfene Signalanalyse geeignet ist, wesentliche Eigenschaften natürlicher Klangbilder wie Pegelniveau, Frequenzgang, Dynamikumfang und Impulshaltigkeit quantitativ zu charakterisieren. Wie Kapitel 5 beweisen wird, lassen sich daraus aussagekräftige Parameter ableiten, die eine objektive Klassierung der Signale erlauben. Im Vergleich zu anderen Verfahren der Überschreitungspegelbestimmung reagiert der in dieser Arbeit vorgeschlagene Algorithmus empfindlich auf die signalverändernde Wirkung üblicher, in Hörgeräten eingesetzter Kompressionssysteme.

Eine Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse aller Klangbilder ist im Anhang C enthalten.

## 4.3 Untersuchung der Zeitstruktur

### 4.3.1 Bildung der Enveloppe mit selbsthaltendem Maximalwertdetektor

Die Vielzahl der in der Literatur und in Vorbereitung der vorliegenden Analysen verwendeten Verfahren lassen sich auf bekannte Algorithmen oder Schaltungen zurückführen (vgl. [Sei-93], [Sei-94]):

- Tiefpaßfilterung
- gleitende Effektivwertberechnung
- Extremwertverfolgung
- Ermittlung des spektralen Kurzzeiteffektivwertes
- Einbeziehung der Hilbertransformation
- selbsthaltender Maximalwertdetektor

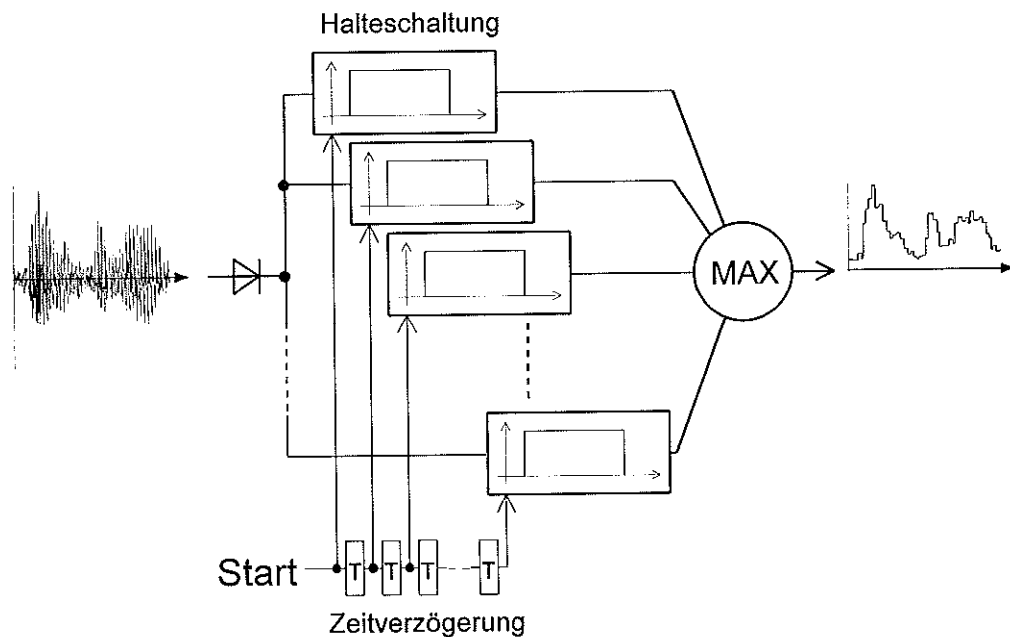
Die meisten Verfahren zur Ermittlung der Hüllkurve nutzen aufgrund der einfachen technischen Realisierbarkeit die signalglättenden Eigenschaften von Tiefpässen. Die Festlegung der optimalen Grenzfrequenz bereitet dabei Probleme. Einer möglichst geringen Welligkeit der Hüllkurve, realisierbar durch eine große Zeitkonstante, steht die Forderung nach guter Verfolgung von Pegelsprüngen gegenüber. Außerdem sollen Grundfrequenzen von 60 Hz bis 80 Hz und kurze Lautbildungspausen des Sprachsignals unterdrückt werden, da sie keine subjektiv wahrnehmbaren Veränderungen des Gesamt-Schalldruckpegels aufgrund von Verdeckungseffekten hervorrufen.

Wie Voruntersuchungen gezeigt haben, läßt sich gerade bei der Analyse impulshaltiger Signale und im Hinblick auf die gesuchten Signalparameter mit den Tiefpaß-Verfahren kein geeigneter Kompromiß erzielen [Sei-94]. Ebenso können die Extremwertverfolgung und die Hilbertransformation diesen Forderungen nicht gerecht werden. Im folgenden wird deshalb nur auf das letzte Verfahren eingegangen, das insbesondere bei Sprachsignalen seine Vorzüge zeigt. Der selbsthaltende Maximalwertdetektor nutzt die Methode der Verfolgung von Maximalwerten, verbessert aber deren Wirkung hinsichtlich der Flankenbestimmung.

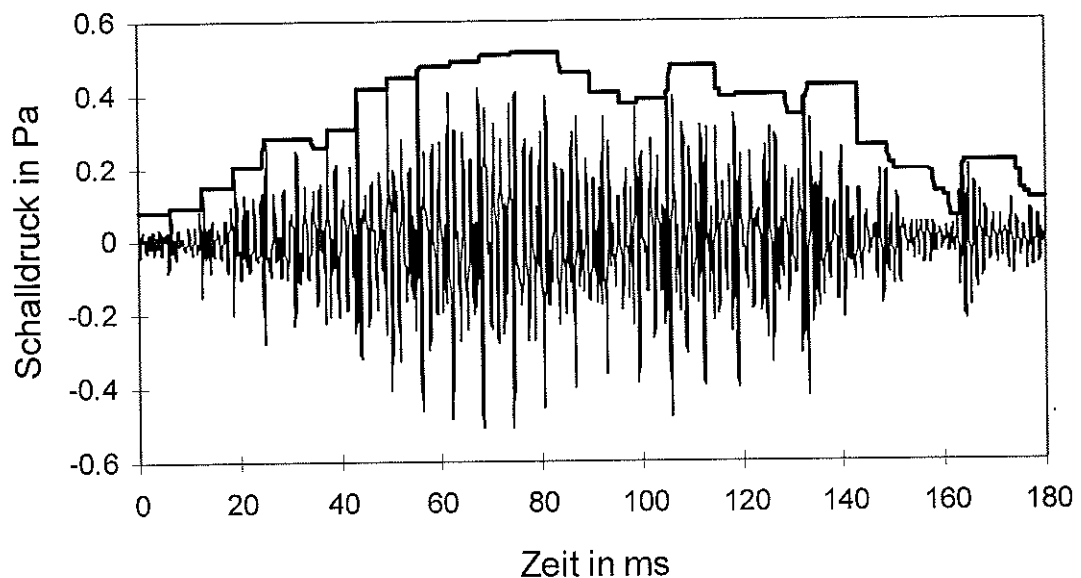
Das Funktionsschema ist in Bild 4-13 dargestellt. Folgendes Prinzip wird angewendet: Nach Gleichrichtung des Eingangssignals wird innerhalb eines wählbaren Zeitfensters der Extremwert ermittelt. Die Länge des Zeitfensters wird nach einer Empfehlung von [Wol-86] im Zusammenhang mit der Untersuchung des Sprachverständnisses bei Recruitment zu 10 ms gewählt. Nach Ablauf dieser Zeit wird der Detektor zurückgesetzt und startet wieder die Ermittlung des Extremwertes im neuen Zeitfenster.

Die zeitliche Auflösung der Hüllkurve wird durch den Aufbau mehrerer parallel arbeitender Detektoren verbessert, ohne dabei die Unterdrückung der Sprachgrundfrequenz zu vernachlässigen. Die Zeitfenster der  $n$  Stufen sind gegeneinander um  $\tau$  ( $\tau = 1$  ms,  $n = 10$ ) verschoben. Damit starten auch die Extremwertbestimmungen um  $\tau$  versetzt. Von den momentanen Ergebnissen aller Stufen wird der Maximalwert bestimmt, der jetzt den aktuellen Wert der Hüllkurve darstellt.

Der resultierende Verlauf der Hüllkurve bei vorgegebenem Eingangssignal ist Bild 4-14 zu entnehmen. Auf der Basis dieser Hüllkurve sind Signalparameter für den Zeitverlauf berechenbar und lassen sich hinsichtlich ihrer Häufigkeitsverteilung untersuchen.



*Bild 4-13 Funktionsschema des selbsthaltenden Maximalwertdetektors*



*Bild 4-14 Berechneter Hüllkurvenverlauf des Verfahrens nach Bild 4-13 für das Klangbild "Gespräch im Bus"*

Das Verfahren birgt eine Besonderheit: Die abfallenden Flanken der Hüllkurve sind gegenüber den ansteigenden um die Dauer des Zeitfensters (10 ms) systematisch verschoben. Auf diese Weise werden kurze Pausen unterdrückt. Bei der Bestimmung der Dauer längerer Pausen ist der Betrag von 10 ms zu addieren und die berechnete Länge von Impulsen ist um 10 ms zu vermindern.



Die beschriebene Methode wurde bei allen Untersuchungen der Zeitstruktur eingesetzt. Sie erfüllt die gestellten Erwartungen (Abschnitt 3.2.2) und zeigt folgende Eigenschaften:

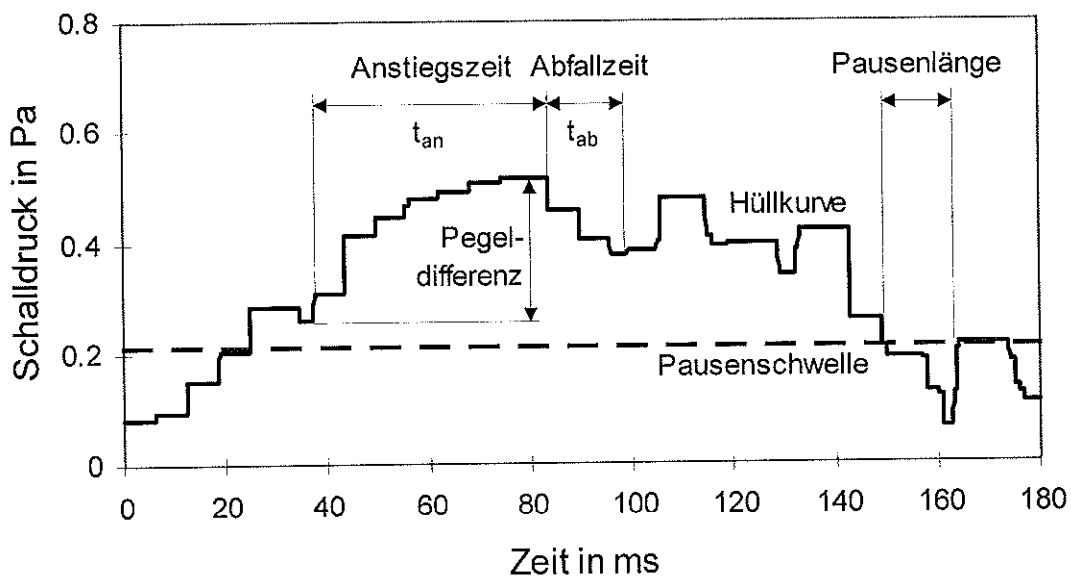
- Maximalwertdetektor innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters von  $t_Z = 10$  ms
- Unterdrückung kurzer Signalpausen von  $t < t_Z$  (vgl. Abschnitt 3.1.2)
- systematische Pausenverkürzung um  $t_Z$
- Annäherung an steigende und fallende Flanken der Hüllkurve mit einer zeitlichen Auflösung von  $\tau = 1$  ms
- hohe Datenreduktion (Abtastfrequenz der Hüllkurve  $f_A = 1$  kHz)

#### 4.3.2 Abgeleitete Größen zur Signaldynamik

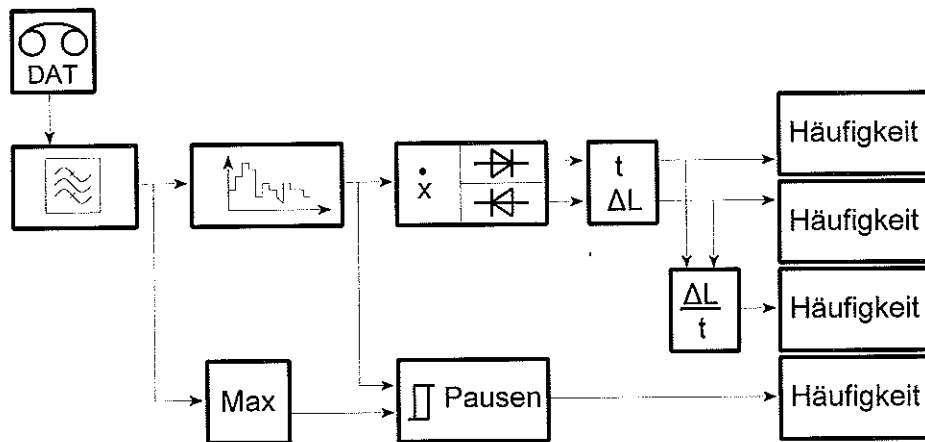
Bei der Charakterisierung der zeitlichen Struktur natürlicher Klangbilder sind die Unterschiede impulshaltiger und kontinuierlicher Signale ebenso herauszuarbeiten wie die Anforderungen an die Schaltungstechnik im Hörgerät. Kennzeichnend dafür sind besonders die Signalflanken (Dauer, Gradient, Häufigkeit) und die zu beobachtenden Signalpausen bzw. -impulse (Dauer, Häufigkeit).

Im Hinblick auf die häufig dreikanalige Struktur von Hörgeräten und die gut unterscheidbare Einteilung wahrgenommener Tonhöhen in Tiefen / Mitten / Höhen werden die Analysen im Zeitbereich in drei getrennten Frequenzkanälen (siehe Abschnitt 3.4) durchgeführt.

Die analysierten Parameter stellt Bild 4-15, das gewählte Funktionsschema Bild 4-16 dar.



*Bild 4-15 Durch Zeitanalyse bestimmte Signalparameter*



*Bild 4-16 Funktionsschema der Signalanalyse im Zeitbereich für ein Frequenzband*

Im Hinblick auf die Signalverarbeitung im Hörgerät, speziell für Kompressionssysteme, sind die Signalfanken von Bedeutung, die durch eine starke Pegeländerung gekennzeichnet sind. Sowohl langsam ansteigende als auch schnell zunehmende Signalpegel sind von Interesse, da sie durch die Regelzeiten der Kompression unterschiedlich beeinflusst werden. Darüber hinaus ist die Flankenhäufigkeit zu untersuchen. Sie bestimmt mit, ob eine Dynamikregelung im dynamischen oder statischen Betrieb arbeitet.

Ausgehend vom ermittelten Hüllkurvenverlauf werden diese Berechnungen vorgenommen:

- ▶ Signalanstiegs- und Abfallzeiten ( $t_{an}$ ,  $t_{ab}$ ) und die Pegeldifferenz  $\Delta L$ ,
- ▶ Häufigkeitsverteilung dieser Wertepaare nach dem Stichprobenverfahren [DIN667] mit Pegeldifferenzen  $\Delta L$  in  $k = 16$  Klassen von 0 dB bis 40 dB und Klassenbreite  $b = 2,5$  dB
- ▶ Häufigkeitsverteilung der Flankenzeitdauer in  $k = 400$  Klassen von 0 ms bis 200 ms und Klassenbreite  $b = 5$  ms
- ▶ mittlere Anstiegsgeschwindigkeit =  $t_{an} / \Delta L$

Die Darstellung erfolgt getrennt für Anstiege und Abfälle als mittlere Anstiegsgeschwindigkeit aller Elemente einer Klasse über der Zeitdauer der jeweiligen Flanke. Damit sollen Aussagen über die Impulshaltigkeit von Klangbildern präzisiert werden und es können Rückschlüsse auf die Wirksamkeit von Dynamikkompressoren gezogen werden.

Nach Festlegung der Pausenschwelle bei einem Pegel von  $L_{max}$  (-10 dB) lassen sich Signalpausen und Impulse in dem gewählten Zeitausschnitt des natürlichen Klangbildes erkennen, berechnen und statistisch erfassen.

### 4.3.3 Ergebnisse

Der vorgestellte selbsthaltende Maximalwertdetektor wurde als eigenständiges Programm mit Standard-C erstellt und sichert die Datenein- und -ausgabe über ASCII-Dateien ab. Sonstige Komponenten der Zeitstrukturuntersuchungen (Filter, statistische Auswertungen) sind wieder als Makrosprache in dem Softwarepaket DIA (Gesellschaft für Strukturanalyse GfS mbH, Aachen) implementiert. Am Beispiel der Untersuchung des mittleren Frequenzbandes aus dem Klangbild "Gespräch im Bus" stellt Bild 4-17 die Ergebnisse dar.

In der Verteilung der Pausen und Impulse fallen mehrere Pegelspitzen mit einer Dauer von 20 ms bis 100 ms auf, die wahrscheinlich aufgrund der Vokalbildung in der Sprache entstehen. Die hohe Zahl sehr kurzer Impulse bis 10 ms ist mit der Gegenwart von Konsonanten insbesondere von Explosivlauten zu erklären. Aufgrund den gewählten Hüllkurvendetektors sind erwartungsgemäß Pausen mit einer Dauer bis 10 ms nicht zu erkennen. Die häufigen langen Pausen bestätigen, daß bei dem nahezu stationären Hintergrundgeräusch (Bus) die Sprechpausen hervortreten. Insgesamt stehen den häufigen, geringen Pegeländerungen wenige langandauernde Flanken gegenüber.

Die Dynamik der Sprache, ablesbar aus dem Diagramm zur Verteilung der Schalldruckpegeldifferenzen in Bild 4-17, wird durch das Störgeräusch (fahrender Bus) auf 8 dB eingengt. Nur vereinzelt sind Pegeländerungen von 20 dB und mehr zu beobachten.

Der Zeitverlauf in diesem Klangbildausschnitt (Analysefenster: 4,5 s) weist eine große Anzahl kurzer Signalflanken auf. Sie erreichen zwar im Mittel eine beachtliche Anstiegsgeschwindigkeit von 1,6 dB/ms bzw. 2,3 dB/ms, spielen aber für Dynamikregelsysteme keine Rolle. Bedeutsamer sind die seltenen langen Anstiege und Abfälle, die bei einer Dauer von rund 65 ms auch 0,35 dB/ms Anstiegsgeschwindigkeit zeigen.

Aus den genannten Beobachtungen sind für dieses Klangbild Anforderungen an die Einstellung der Signalverarbeitung im Hörgerät ableitbar: Unter Einbeziehung der Pausenhäufigkeiten ist es angebracht, bei dem zu wählenden Kompressionsystem eine langsame Regelung zu bevorzugen. Damit werden kurze Sprachmodulationen kaum beeinflußt, die Lautstärke der Darbietung durch das Hörgerät aber langfristig den Umgebungsgeräuschen angepaßt.

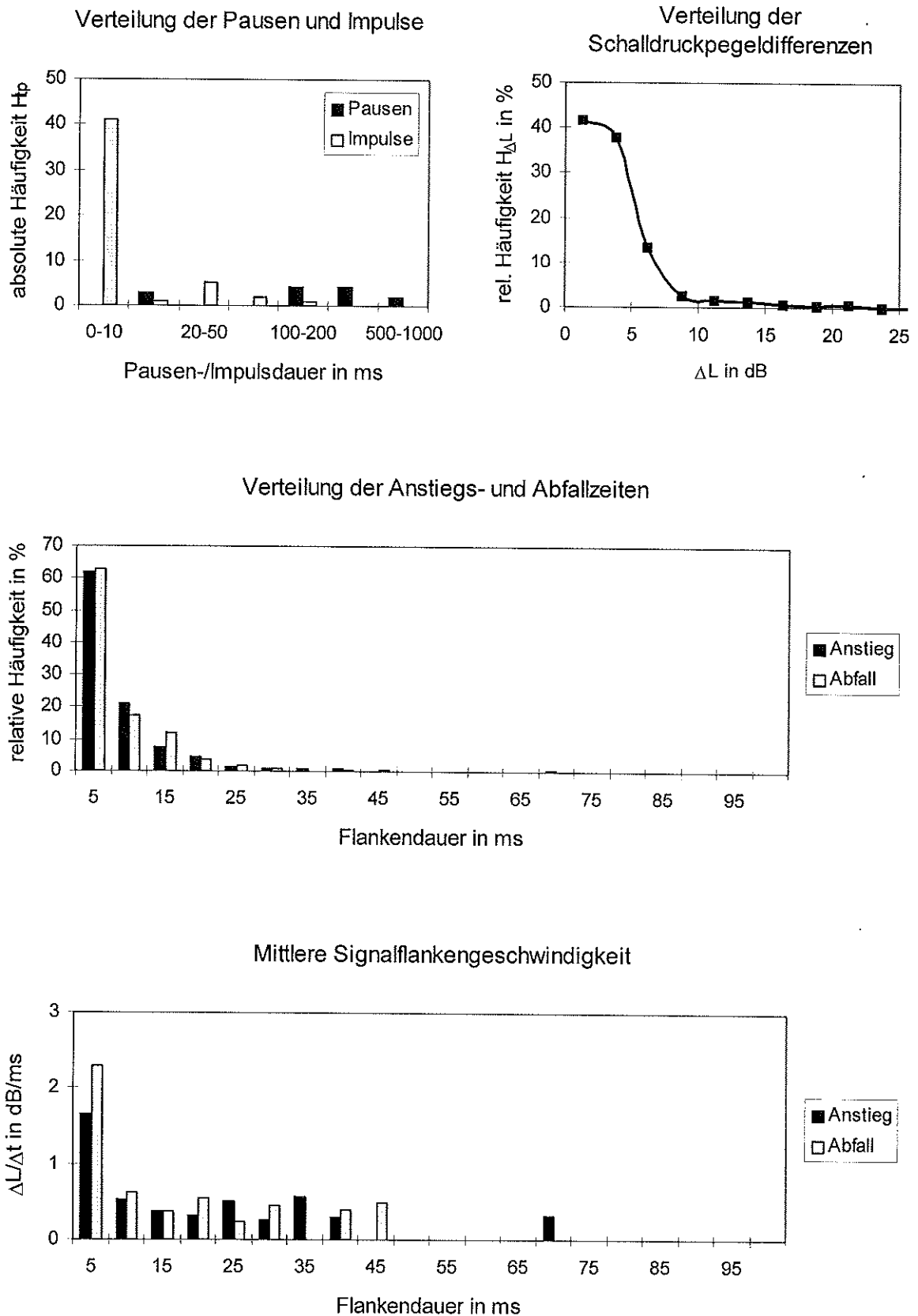


Bild 4-17 Ergebnisse der Zeitstrukturuntersuchung im Frequenzbereich von 0,71 kHz bis 1,8 kHz eines Ausschnittes aus dem Klangbild "Gespräch im Bus"

#### 4.4 Untersuchung der Lautheit

Von den bekannten Verfahren zur Lautheitsberechnung (Stevens, Niese, Zwicker) wurde auf das Verfahren nach *Zwicker* zurückgegriffen. Wie im Abschnitt 3.2.3 erläutert, spielen dabei der überschaubare Programmieraufwand und die Verfügbarkeit von Algorithmus und Vergleichsmessungen eine entscheidende Rolle.

Das realisierte Funktionsschema gibt Bild 4-18 wieder. Abgesehen vom A-D-Wandler am Eingang sind alle Komponenten als Software erstellt. Das Programm wurde komplett in Standard-C formuliert und kam als lauffähige DOS-Version zum Einsatz, welche die Datenein- und -ausgabe über ASCII-Dateien absichert. Der Algorithmus, der zum Momentanwert der Lautheit führt, basiert auf den Festlegungen in DIN 45631 [DIN631].

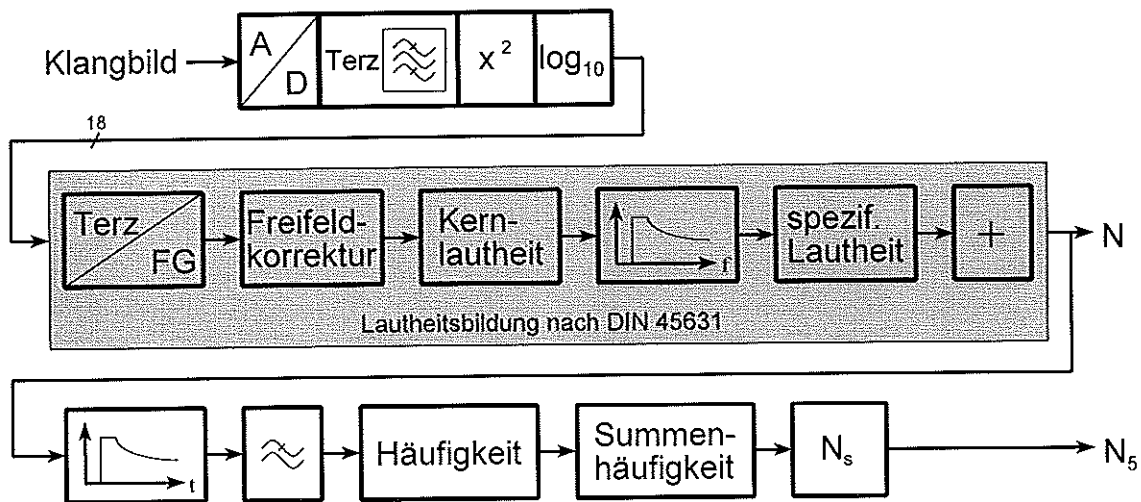


Bild 4-18 Funktionsschema der Lautheitsberechnung

Das Eingangssignal wird nach der Digitalisierung in Terzbändern gefiltert. Die anschließende Effektivwertbildung enthält das Quadrieren und Filtern mit einem Tiefpaß erster Ordnung und einer Zeitkonstanten  $\tau = 2$  ms bzw. einer Grenzfrequenz von rund 80 Hz. Nach der Logarithmierung erfolgt die Bewertung entsprechend den Kurven gleicher Lautstärke und die Zusammenfassung der tiefen Terzpegel zu Frequenzgruppenpegeln. Aus der unterschiedlichen Wirksamkeit des freien oder des diffusen Schallfeldes auf die Wahrnehmung der Lautstärke resultiert die anschließende Frequenzgangkorrektur bei diffusem Schalleinfall. Die Korrektur wurde zwar vorgesehen aber nicht genutzt, da die meisten Klangbilder im Freien aufgenommen wurden und der kleine Abstand zu den Lautsprechern die Wirkung des diffusen Schallfeldes im Abhörraum vermindert.

Der für jede Frequenzgruppe berechnete Schalldruckpegel wird als Kernlautheit bezeichnet. Die spezifische Lautheit hebt sich davon durch die Berücksichtigung der spektralen Verdeckung ab. Durch geeignete Wahl des Terzfilter-Amplitudenganges im Übertragungsbereich ist die Vorverdeckung gesichert. Die spektrale Nachverdeckung, in [DIN613] grafisch konstruiert, wird durch Geraden in den Frequenzgruppen approximiert. Mit gewichteter Mittelung der spezifischen Lautheiten gelangt man zur momentanen Lautheit.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, daß die gesamte Lautheitsberechnung einschließlich vorgelagerter Filterung gemäß den Festlegungen aus Abschnitt 3.4 nur den Frequenzbereich von 200 Hz bis 10 kHz berücksichtigt. Es mußte wegen unzureichender Modellvorstellungen zur Lautheitsempfindung Schwerhöriger auf ein genormtes Modell für Normalhörende zurückgegriffen werden, aber unter Berücksichtigung der bei der Benutzung von Hörgeräten stark eingeschränkten Bandbreite.

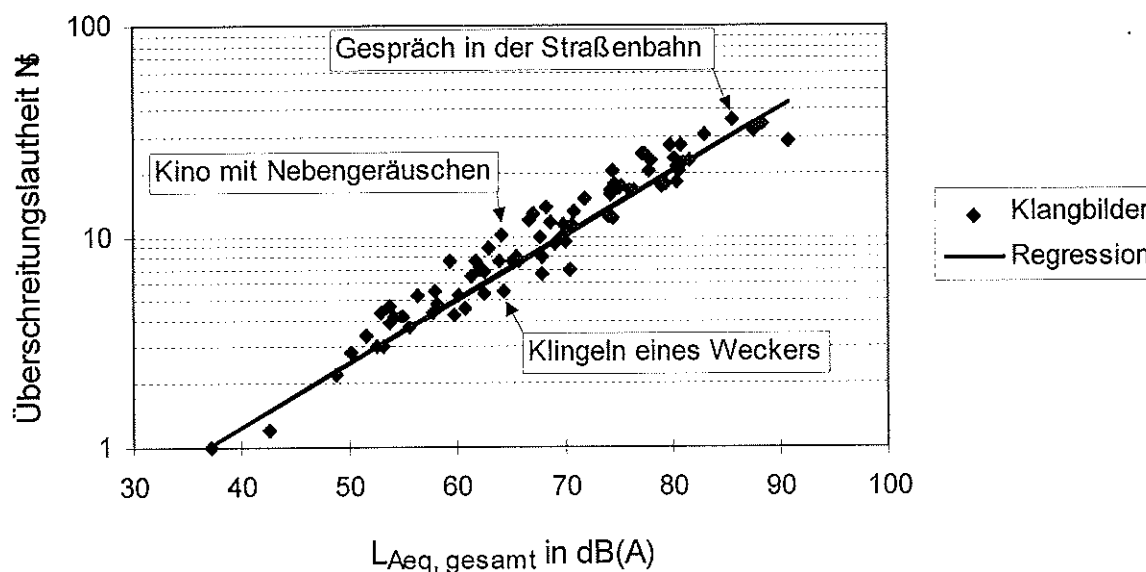
Der Algorithmus nach DIN 45631 liefert nur für stationäre und eingeschwungene Signale Lautheiten, welche in subjektiven Tests nachvollzogen werden können. Natürliche Situationen unterliegen jedoch starken zeitlichen Schwankungen des Schalldruckpegels, die insbesondere bei Signallängen unter 200 ms und großen Sprüngen der abfallenden Flanke abweichende subjektive Lautheitsempfindungen hervorrufen. Schalldruckpegel-Differenzen bis zu 20 dB können bei 5 ms und 200 ms langen Impulspaaren auftreten, wenn sie gleich laut wahrgenommen werden [Flo-96].

Die Berücksichtigung der zeitlichen Verdeckungseffekte beruht in dieser Arbeit auf den Untersuchungen in [Vog-74]. Vogel empfiehlt eine Halteschaltung einzusetzen, die einem Anstieg der Momentanlautheit trägheitslos folgt und sonst eine Zeitkonstante von  $\tau = 35$  ms realisiert. Sie wird durch einen nachfolgenden Tiefpaß ergänzt. Die Frequenzabhängigkeit der Nachverdeckung [Lan-91] wurde vernachlässigt, da man davon ausgehen kann, daß sie bereits 30 ms nach Ende des Maskierers keine Auswirkungen mehr hat.

Die Bemessung der Filter zur Implementierung des Verfahrens und der Korrekturwerte gemäß DIN ist in [Wei-93] enthalten.

Von allen untersuchten natürlichen Klangbildern steht die Häufigkeitsverteilung der Lautheits-Zeit-Funktion zur Verfügung, unter Vernachlässigung der ersten 100 ms (Einschwingverhalten). Aus der daraus abgeleiteten Verteilungsdichtefunktion wurden die mittlere Lautheit  $N$  und die Überschreitungslautheit  $N_5$  ähnlich (4.33) ermittelt, die im Anhang C für alle Klangbilder vorliegen. Vergleichbare Untersuchungen bestätigen die Eignung der 5%-Überschreitungslautheit zur Beschreibung der empfundenen Lautheit quasistationärer Signale (vgl. [Kal-94], [Wid-95]). Die berechneten Werte reichen von  $N_5 = 0,7$  sone (Klangbild "Atmosphäre am See") bis  $N_5 = 35,5$  sone ("Gespräch in der Straßenbahn").

Den Zusammenhang zwischen A-bewertetem äquivalentem Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  und der Überschreitungslautheit  $N_5$  stellt Bild 4-19 dar. Die gefundene Regressionskurve bestätigt die bekannte nichtlineare Verbindung von beiden Größen. Für die nachfolgenden Untersuchungen liegt es deshalb nahe, bei der Parameterreduzierung die hohe Korrelation beider Größen zu nutzen. Die vereinzelt auftretenden deutlichen Abweichungen lassen sich aus den Signaleigenschaften und dem Rechenverfahren erklären.



**Bild 4-19** Überschreitungslautheit über dem A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel für alle untersuchten Klangbilder mit Regressionskurve

Das Klangbild “Kino mit Nebengeräuschen” wird z. B. als doppelt so laut bestimmt wie das “Klingeln eines mechanischen Weckers”, obwohl beide einen  $L_{Aeq} \approx 64$  dB aufweisen. Es fällt auf, daß die “Kino”-Situation durch eine gute Dynamik (Sprache) und einen starken tieffrequenten Anteil (Raumklang, Wiedergabeanlage) gekennzeichnet ist, während der “Wecker” ein sehr enges Geräuschfeld aufweist und besonders in den Höhen große Schalldruckpegel liefert. Im A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel ist eine Mittelung bereits enthalten, welche die Schwankungen des Signals ausgleicht. Zusätzlich senkt die A-Bewertung Tiefen und Höhen deutlich ab (siehe Bild 4-9). Deshalb werden die Unterschiede zwischen den Klangbildern im  $L_{Aeq}$  nicht deutlich.

Die Überschreitungslautheit  $N_5$  dagegen erfaßt gerade die subjektiv empfundenen starken, kurzzeitigen Pegelsprünge und reagiert auf eine große Dynamik im Signal. Die im Verfahren der Lautheitsberechnung verwendeten Frequenzkorrekturwerte bewirken darüber hinaus eine deutliche Bevorzugung tiefer Frequenzen. Somit wird das “Kino”-Geräusch mit einer größeren Überschreitungslautheit belegt.

Ähnliche Effekte wurden bereits von *Hellmann* [Hel-87] beobachtet, insbesondere dann, wenn ausgeprägt tonale Anteile in einem rauschähnlichen Grundsignal auftreten. Dennoch bleiben die Ähnlichkeiten zwischen beiden Größen, dem A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel und der 5%-Überschreitungslautheit, für die untersuchte Klangbibliothek bestehen.

## 5 Auswertung der Meßdaten

### 5.1 Gruppenbildung durch statistische Bewertung der Analysedaten

Die Vielzahl objektiver Signalanalyseparameter der natürlichen Klangbilder soll gemäß der Zielstellung interpretierbar und nutzbar aufgearbeitet werden. Folgende Schwerpunkte sind deshalb bei Anwendung statistischer Werkzeuge zu beachten:

1. Herausarbeiten von Klangbildeigenschaften zur Bildung von Gruppen signalanalytisch ähnlicher Klangbilder für allgemeine und spezielle Anpaßaufgaben,
2. Erleichterung der Einordnung neuer Klangbilder in die vorhandene Gruppenstruktur unter Benutzung der vorgeschlagenen Signalanalyseergebnisse,
3. Reduzierung der Analyseergebnisse auf wenige aussagekräftige Parameter auch im Hinblick auf die Verringerung der Eingangsdaten für eine Klassierung.

In diesem Kapitel notwendigen Berechnungen und statistische Analysen wurden unter Verwendung des Programmes WinStat (Version 3.0 der Kalmia Company, Inc., Cambridge, Massachusetts USA) realisiert. Faktoren- und Clusteranalyse sind Bestandteil dieser Software, doch hinsichtlich ihrer Parameter vom Nutzer geeignet zu konfigurieren. Vor- und nachgelagerte Berechnungen sind ähnlich einer Tabellenkalkulation aufgebaut und im Rahmen dieser Arbeit implementiert worden.

#### 5.1.1 Merkmalsbestimmung unter Verwendung von Mittelungs- und Überschreitungspegeln

Bevor auf die verschiedenen Methoden der Klassifizierung eingegangen wird, müssen die aus der Signalanalyse vorliegenden Daten in ihren Eigenschaften untersucht werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen

- nominalen,
- ordinalen,
- intervallskalierten und
- verhältnisskalierten Variablen.

Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht zu den Merkmalen dieser Variablen und liefert einige Beispiele. Es soll erwähnt werden, daß binäre Variablen, oft Ergebnisse vergleichender Hörtests, zu den nominalen Variablen zählen und deshalb nicht weiter erwähnt werden. Alle in dieser Arbeit aus der Signalanalyse gewonnenen Daten weisen die Eigenschaften intervallskalierter oder verhältnisskalierter Variablen auf. Zusammengefaßt unter dem Oberbegriff der *metrischen Daten* sind sie Ausgangspunkt für die Anwendung der meisten statistischen Methoden.

Besonderer Wert muß auf die geeignete Auswahl der Daten für die weitere Verarbeitung gelegt werden. Parameter, die signifikanten Schwankungen der Objekteigenschaften folgen, müssen deutlich bevorzugt werden. Ebenso sollten die gewählten Variablen gut interpretierbar sein und eine Korrelation mit subjektiven Wahrnehmungen aufweisen.



**Tabelle 5-1** Einteilung von Variablen nach [Sac-88]

Variablentyp	Merkmale	Beispiele
nominal	Klassifizierung qualitativer Merkmalsausprägungen $A=B$ ; $A \neq B$	Telefonnummer, Postleitzahl
ordinal (topologisch)	Merkmalsausprägung anordbar $A=B$ ; $A \neq B$ ; $A > B > C$	Schulnoten, Güteklassen
intervallskaliert	Skala mit konstanten Abständen und willkürlichem Nullpunkt $A=B$ ; $A \neq B$ ; $A > B > C$ ; $d=A-B$	Temperatur in °C, Kalenderdatum
verhältnisskaliert	Skala mit echtem Nullpunkt, Multiplikation und Division zugelassen $A=B$ ; $A \neq B$ ; $A > B > C$ ; $d=A-B$ ; $c=A/B$	Fläche, Alter, Spannung

Die folgenden Untersuchungen befassen sich mit der Definition solcher Kenngrößen, die es erlauben, Klangbilder mit wenigen Daten charakteristisch zu beschreiben. Die 18 ausgewählten Größen basieren auf den Ergebnissen der im letzten Kapitel beschriebenen Frequenzbereichsanalyse und der Lautheitsbestimmung und sind von ihnen abgeleitet.

#### *A-bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel $L_{Aeq}$*

Diese Größe trifft wesentliche Aussagen über das Pegelniveau des Gesamtsignals im gewählten Analysezeitfenster unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Wahrnehmung.

#### *5% Überschreitungslautheit $N_5$*

Die Überschreitungslautheit liefert eine Aussage zur Lautheitswahrnehmung insbesondere bei dynamischen Signalen (vgl. Abschnitt 4.4).

#### *Normierte Tonalität $T_{\%}$*

Für die Bewertung natürlicher Klangbilder ist ein objektives Maß für die Tonalität des Signals nützlich. Der Einsatz des Tonzuschlages  $K_T$  aus der DIN 45681 [DIN681] ist nicht möglich, da dort die Signale in Form von Schmalbandspektren innerhalb von Frequenzgruppen untersucht werden. Die vorliegende Datenbasis läßt diese Verfahrensweise nicht zu.

Das hier gewählte Prinzip basiert darauf, daß die Differenz aus dem äquivalenten Dauerschallpegel des Gesamtsignals und dem Mittelungspegel jeder Terz gebildet wird. Die minimale berechnete Differenz kennzeichnet das Terzband mit dem größten Pegel. Sie ist um so kleiner, je größer der Pegelunterschied des Terzbandes zu den anderen Bändern ist:

$$T = \text{MIN} (L_{eq} - L_{mTerz}) \quad (5.1)$$

Die minimale Differenz  $T$  nähert sich dem Wert 0 dB, wenn ein stark tonales Signal vorliegt, und erreicht höchstens 12,5 dB bei gleichem Mittelungspegel in allen 18 Terzen. Zum besseren Vergleich läßt sich folgende Normalisierung einführen:

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{T}{10 \lg 18}\right) \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Eine berechnete Tonalität ab 65% weist auf ein tonales Klangbild hin, Werte um 90% kennzeichnen stark tonale Signale.

*Mittelungspegel  $L_{m,T}$ ,  $L_{m,M}$ ,  $L_{m,H}$  für Band 1, 2, 3 (Tiefen, Mitten, Höhen)*

Diese Parameter enthalten Aussagen zum mittleren Schalldruckpegel in den drei gut unterscheidbaren Frequenzbereichen mit den Grenzfrequenzen gemäß Abschnitt 3.4.

*5% Überschreitungspegel  $L_{5,T}$ ,  $L_{5,M}$ ,  $L_{5,H}$  für Band 1, 2, 3 (Tiefen, Mitten, Höhen)*

Von den berechneten Absolutwerten der Überschreitungspegel werden nur diese direkt weiterverwendet. Sie liefern Informationen zum oberen Pegelniveau bei dynamischen Signalen.

*Interquantilbereich  $I_{90,T}$ ,  $I_{90,M}$ ,  $I_{90,H}$  für Band 1, 2, 3 (Tiefen, Mitten, Höhen)*

Der Interquantilbereich  $I_{90}$  gibt die Differenz zwischen 5% Überschreitungspegel und 95% Überschreitungspegel an:

$$I_{90} = L_5 - L_{95} \quad (5.3)$$

Er ist ein Maß für die Dynamik des Schalldruckpegels im betrachteten Analysezeitfenster.

*Mittelwertedifferenz  $M_T$ ,  $M_M$ ,  $M_H$  für Band 1, 2, 3 (Tiefen, Mitten, Höhen)*

Aus der Differenz des Mittelungspegels und dem 50% Überschreitungspegel (Median) ergibt sich die frequenzbandspezifische Mittelwertedifferenz  $M$ :

$$M = L_m - L_{50} \quad (5.4)$$

Die Robustheit des Medians steht hier der Empfindlichkeit des Mittelungspegels für kurze Signalerhöhungen gegenüber. Für statische Signale liefern beide Eingangsgrößen denselben Wert. Die Mittelwertedifferenz  $M$  kann deshalb als Größe zur Erfassung der Impulshaltigkeit dienen.

*Mittelwertabweichung  $A_T, A_M, A_H$  für Band 1, 2, 3 (Tiefen, Mitten, Höhen)*

Um den Klangeinfluß der drei Frequenzbereiche zu beschreiben, werden die Mittelwertabweichungen eingeführt. Sie geben die Abweichung des Mittelungspegels  $L_m$  eines Bandes zum arithmetischen Mittelwert aller drei Mittelungspegel an:

$$A = L_m - \left( \frac{L_{m,T} + L_{m,M} + L_{m,H}}{3} \right) \quad (5.5)$$

Hohe Werte für die Mittelwertabweichung  $A$  deuten auf hohe Pegel im untersuchten Frequenzband hin. Es ist zu beachten, daß in dieser Berechnung bewußt auf die arithmetische Mittelung zurückgegriffen wird. Ist ein Kanal im Vergleich zu den beiden anderen deutlich niedriger im Pegel, so werden mit dieser Methode leichter interpretierbare Ergebnisse gewonnen als bei Verwendung der logarithmischen Mittelung.

**Tabelle 5-2** *Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung für ausgewählte Parameter (D - maximale Distanz zur Normalverteilung, P - Wahrscheinlichkeit der Abweichung)*

Variable	D	P
$L_{Aeq}$	0,08	0,66
$N_5$	0,14	0,06
$T_{\%}$	0,07	0,83
T: $L_5$	0,06	0,89
M: $L_5$	0,09	0,54
H: $L_5$	0,06	0,90
T: $L_m$	0,06	0,93
M: $L_m$	0,09	0,53
H: $L_m$	0,05	0,99
T: $l_{90}$	0,14	0,08
M: $l_{90}$	0,12	0,19
H: $l_{90}$	0,11	0,22
T: M	0,21	0,00
M: M	0,18	0,01
H: M	0,19	0,01
T: A	0,09	0,53
M: A	0,08	0,60
H: A	0,14	0,06

Die vorgeschlagenen Größen sollen für eine Klangbildstatistik verwendet werden. Im Hinblick auf die verwendbaren Werkzeuge ist zu entscheiden, ob diese Größen normalverteilt sind. Der Kolmogorov-Smirnov-Test berechnet die maximale Abweichung der Daten zu der Kurve der Normalverteilung unter Berücksichtigung der Tatsache, daß zufällige Stichproben vorliegen sollen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-2 zu finden.

Im Ergebnis der Untersuchung zeigt sich, daß beispielsweise die normierte Tonalität  $T_{\%}$  eine maximale Abweichung  $D = 7\%$  von der angenommenen Normalverteilung mit einer Wahrscheinlichkeit  $P = 83\%$  aufweist. Es kann also davon ausgegangen werden, daß

- mehrere Größen (z. B.  $L_{Aeq}$ ,  $T_{\%}$ ,  $L_{5,T}$ ,  $L_{5,H}$ ) annähernd normalverteilt sind,
- bei einer Vielzahl von Parametern die Wahrscheinlichkeiten aber sehr niedrig liegen und die Vermutung einer Normalverteilung abgelehnt werden muß.

Für die folgenden Untersuchungen wird deshalb nicht vorausgesetzt, daß die gewählten Eingangsdaten normalverteilt sind.

### 5.1.2 Methoden der Klassifizierung

Liegen von vielen Objekten oder Individuen mehrere gleichberechtigte Aussagen, Zustände, Kategorien etc. vor, so ist man bei systematischen Untersuchungen bestrebt, die inneren Zusammenhänge der gewonnenen Datenbasis aufzudecken. Hierzu dienen multivariate Methoden der Statistik (Bild 5-1). Sie werden grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilt:

- *Dependente Methoden* versuchen die Zusammenhänge zu beschreiben, die zwischen einer (oder mehreren) als abhängig betrachteten Variablen und den anderen, unabhängigen Variablen bestehen (z.B. multiple Regression).
- *Interdependente Methoden* fassen dagegen alle Variablen als gleichberechtigt auf. Die sogenannten R-Techniken untersuchen die Zusammenhänge zwischen den Variablen. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beschriebenen Objekte sind Untersuchungsgegenstand der Q-Techniken.

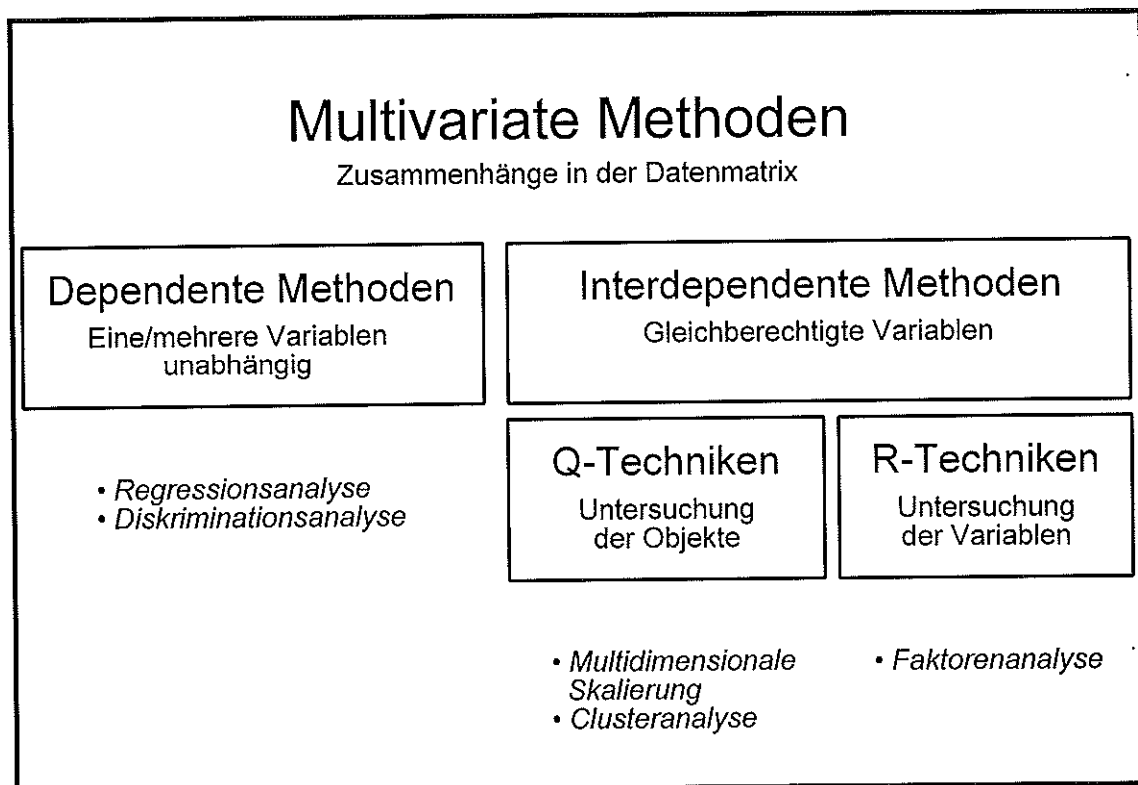
Die wichtigsten Vertreter interdependenter Methoden sind [Spä-75]:

#### a) Faktorenanalyse

Ausgehend von der Korrelationsmatrix der i. a. metrischen Variablen wird versucht, wenige, häufig orthogonale Faktoren zu finden, die eine bessere Interpretation der Daten ermöglichen und eine leichtere Beschreibung der Objekte erlauben. Diese Faktoren sind meist nicht direkt zu messen oder anders zu bestimmen, enthalten aber in konzentrierter Form die Zusammenhänge der Eingangsdaten.

#### b) Multidimensionale Skalierung

Eine nichtmetrische oder gemischte Ähnlichkeitsmatrix ist die Eingangsgröße dieses Verfahrens. Sie beschreibt ausschließlich die Unterschiede zwischen den Objekten. Es wird versucht, möglichst wenige interpretierbare Variablen (Dimensionen) zu finden, mit deren Hilfe die Abstände der gefundenen Objekte den gegebenen Abständen aus der Ähnlichkeitsmatrix nahekommen.



**Bild 5-1** Übersicht der Klassifizierungsmethoden mit mehreren Variablen

### c) Clusteranalyse

Die anhand metrischer Variablen beschriebenen Objekte oder Individuen werden zu Gruppen zusammengefaßt, die ähnliche Eigenschaften oder Verwandtschaft aufweisen.

Zur Untersuchung der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Daten werden nachfolgend die Faktoren- und die Clusteranalyse näher betrachtet. Sie lassen für die hier diskutierte Aufgabe aufgrund ihrer Zielstellung und Eignung für die vorliegenden Datenmengen die besten Ergebnisse erwarten.

### 5.1.3 Merkmalsauswahl durch Faktorenanalyse

#### *Verfahrensweise*

Die Faktorenanalyse soll helfen, Zusammenhänge zwischen Variablen, die verschiedene Objekte beschreiben, aufzudecken. Dabei wird ausgehend von der gegebenen Datenmatrix versucht, eine Basis von neuen, linear unabhängigen Faktoren zu finden, die eine konzentrierte Beschreibung aller Variablen ermöglichen.

Die Faktoren sind i. a. nicht direkt zu bestimmen. Das Verfahren geht von der These aus, daß sich jede der  $m$  Merkmalsvariablen  $x_p$ , die am  $j$ -ten Objekt beobachtet wurden, linear aus den  $s$  Faktoren  $f_s$  ermitteln läßt:

$$x_{ij} = a_{i1}f_{1j} + a_{i2}f_{2j} + \dots + a_{ip}f_{pj} \dots + a_{is}f_{sj} \quad (5.6)$$

Wenn  $s \geq m$ , kann die Gesamtvarianz der Merkmalsvariablen erklärt werden, nachdem die Koeffizienten  $a$ , die in der Faktorenanalyse als Ladungen bezeichnet werden, bestimmt sind.

Diese vollständige Faktorenlösung ist jedoch meist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Vielmehr wird eine reduzierte Faktorenlösung angestrebt, die eine Konzentration der korrelierenden Daten auf wenige Faktoren zuläßt aber nur geringen Informationsverlust erfordert. Das ist möglich, da die Faktoren unterschiedlich hohe Einflüsse auf die Merkmalsvariablen haben. Die Bestimmung von Faktoren mit einem hohen Beitrag zur Gesamtvarianz und deren Ladung auf die Eingangsvariablen sind das Ziel der Faktorenanalyse.

Voraussetzung ist die Verwendung metrischer Daten. Es muß gelten, daß  $n \geq m$  und [Web-74] empfiehlt:

$$n \geq 3m, \quad n > 60 \quad (5.7)$$

- n Zahl der Objekte
- m Zahl der Variablen

Diese Voraussetzungen können hier als erfüllt betrachtet werden ( $n = 85, m = 18$ ). In anderen Fällen sind die Ergebnisse aus der zufälligen Objektstichprobe nicht zu verallgemeinern und lassen keine sicheren Rückschlüsse für neue Objekte zu.

Für die Berechnungen wurde in dieser Arbeit die *Hauptkomponentenmethode* gewählt. Die Hauptkomponenten werden hier als lineare Funktion der beobachteten Variablen ausgedrückt. Sie stellen das neue Koordinatensystem nach der linearen Transformation im Variablenraum dar. Wegen der unbegrenzten Zahl von Lösungsmöglichkeiten wird als einschränkende Randbedingung vorgegeben, daß die erste Hauptkomponente ein Maximum der Gesamtvarianz aller Merkmale erfassen soll. Nach Extraktion dieser Komponente soll die zweite Hauptkomponente ein Maximum der nun verbleibenden Restvarianz enthalten usw. Die letzte gewählte Komponente soll wenigstens noch so viel erfassen, wie eine der Eingangsvariablen selbst (Eigenwert  $\geq 1$ ).

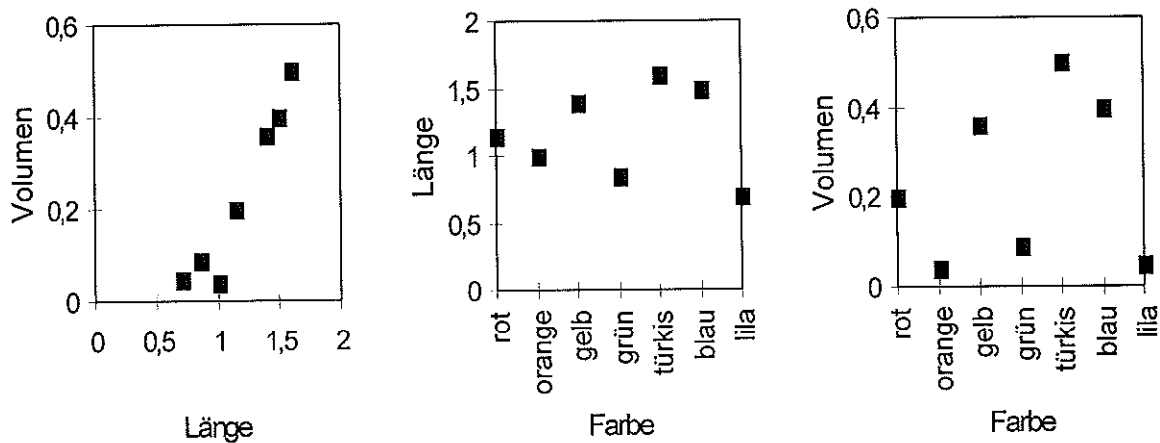
Der grafischen Veranschaulichung wegen soll folgender Sachverhalt angenommen werden:  $n$  Objekte sind durch  $m$  Messungen charakterisiert. Die Meßgrößen sind nicht als unabhängig voneinander anzunehmen. Die Objekte werden als Punkte in einem  $m$ -dimensionalen Raum, dessen Achsen die Meßgrößen bilden, eingetragen. Nun wird eine Gerade (erste Hauptachse) so durch den Raum gelegt, daß möglichst viele Punkte in der Nähe liegen (beispielsweise mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Eine zweite senkrecht dazu liegende Gerade findet ihre Lage nach derselben Vorgabe. Erwartungsgemäß liegen die Punkte nun im Mittel weiter entfernt, die erfaßte Varianz der Merkmale ist kleiner als bei der ersten Achse.

Mit dieser Vorgehensweise lassen sich  $m$  Achsen bestimmen, die den vorgegebenen Variablenraum vollständig, nur mit anderen Koordinaten, beschreiben. Bedingt durch die gegenseitigen Abhängigkeiten der ursprünglichen Meßgrößen werden wenige neue Achsen (Faktoren) genügen, um die Punktwolke der Objekte weitgehend zu erfassen.

Die im neu erzeugten Variablenraum liegenden Variablen werden nun zwar nahezu vollständig durch die neuen Faktoren beschreibbar. Doch die Interpretierbarkeit der Faktoren, das eigentliche Kriterium für den Erfolg des Verfahrens, ist durch nur mäßig hohe Ladungen oft kaum gegeben. Wünschenswert wäre eine zusätzliche Drehung des Koordinatensystems, daß möglichst viele ursprüngliche Variablen direkt in Nähe einer Achse liegen und somit durch nur einen Faktor beschrieben werden müssen (= hoher Ladung auf diesen Faktor). Da nur das Koordinatensystem gedreht wird, nicht aber die Lage der Variablen verändert wird, bleibt deren Korrelation untereinander erhalten.

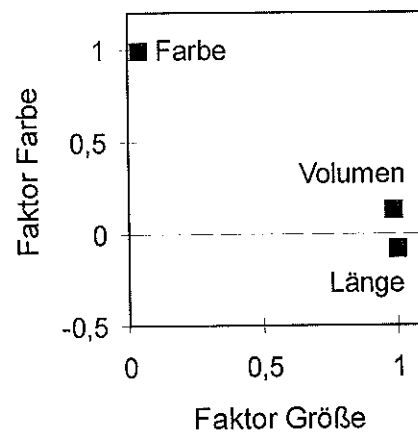
Als ein numerisches Verfahren für solche Orthogonalrotationen wird die Varimax-Methode nach *Kaiser* [Web-74] in dieser Arbeit verwendet. Sie verfolgt das Ziel, bei der Rotation eine maximale Einfachheit der Ladungen herzustellen, d. h. möglichst nur Ladungen nahe 0 oder 1 zu bewirken.

Relationen der gemessenen Größen Länge, Volumen und Farbe zueinander



Resultierende Faktorladungen

	Faktoren		Kommunalität
	1	2	
Länge	<b>0,99</b>	-0,07	0,98
Volumen	<b>0,98</b>	0,14	0,98
Farbe	0,03	<b>0,99</b>	0,99
Quadratsumme	1,95	1,02	2,97
Varianzbetrag in %	65,16	34,09	99,25



**Bild 5-2** Einsatz der Faktorenanalyse am Beispiel der Charakterisierung von Ballons

Diese Beschreibung soll durch ein einfaches Beispiel unterstützt werden (Bild 5-2): An  $n = 7$  Ballons werden  $m = 3$  Messungen der Länge in der Hauptachse, des Volumens und der Farbe der hauptsächlich reflektieren Lichtfrequenzen vorgenommen. Es ist leicht erkennbar, daß Länge und Volumen aufgrund der ähnlichen Körperformen stark miteinander korrelieren. Ein Zusammenhang von Farbe und Körpermaßen ist jedoch nicht festzustellen. Zu diesem Ergebnis gelangt auch die Faktorenanalyse. Sie faßt Länge und Volumen zum Faktor 1 zusammen, der als Größe des Ballons interpretiert werden kann. Die Farbe bildet allein den zweiten Faktor. Somit lassen sich Ballons für nachfolgende Untersuchungen ausreichend durch zwei Größen beschreiben: den Faktor Größe und den Faktor Farbe.

### Ergebnisse

Die Eingangsdaten für die Faktorenanalyse wurden im Abschnitt 5.1.1 diskutiert. Gegenstand der Untersuchung sind 85 Objekte. Diese Anzahl ergibt sich aus den 73 Klangbildern, wobei einige davon, wegen ihrer inhaltlichen Vielfalt, mit mehr als einem analysierten Zeitfenster vertreten sind. Die Bedingung (5.7) ( $n \geq 3m$ ,  $n > 60$ ) als Voraussetzung zur Anwendung der Faktorenanalyse ist mit den gegebenen  $m = 18$  Variablen und  $n = 85$  Objekten erfüllt.

Die Ergebnisse enthält Tabelle 5-3. Alle Faktorenladungen  $< 0,15$  gelten als Nullladungen und sind hier zur Verbesserung der Übersichtlichkeit vernachlässigt. Die vollständigen Tabellen sind im Anhang E zu finden. Die Kommunalität  $h_i^2$  oder auch Bindungssumme ist ein Maß dafür, wie groß die Varianz eines Parameters ist, die durch die gewählten Faktoren erfaßt wird.

$$h_i^2 = \sum_{p=1}^s a_{ip}^2 \quad (5.8)$$

Da es sich hier um keine vollständige Faktorenlösung handelt ( $s < m$ ), sind einige  $h_i^2 < 1$ . Aus der Angabe des Varianzbeitrages  $s_p^2$  nach (5.9) läßt sich ablesen, welchen Anteil jeder Faktor zur Bestimmung der Eingangsvariablen liefert:

$$s_p^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ip}^2 \quad (5.9)$$

Die Faktorenanalyse bestimmt zunächst 6 frei gewählte Faktoren, welche gemäß dem festgelegten Verfahren mögliche Hauptachsen im Variablenraum darstellen. Es ist zu erkennen, daß 4 Faktoren ausreichen, um fast 90% der Varianz abzudecken. Die ergänzenden zwei Faktoren besitzen bereits Eigenwerte (= Quadratsumme) kleiner als eins, sind aber nützlich bei der Erklärung von Variablen, die nicht oder kaum mit anderen korrelieren.

Die Varimax-Rotation nach *Kaiser* einschließlich der oben erwähnten Normierung verbessert die Zuordnung und damit die Interpretierbarkeit der Faktoren, insbesondere der Faktoren 3 bis 5 (Tabelle 5-4).



Tabelle 5-3 Unrotierte Faktorladungen

	Faktoren						Kommunalität
	1	2	3	4	5	6	
L <sub>Aeq</sub>	<b>0,95</b>	-0,22					0,99
N <sub>5</sub>	<b>0,92</b>						0,90
T: L <sub>m,T</sub>	<b>0,91</b>		-0,33				1,00
M: L <sub>m,M</sub>	<b>0,96</b>						0,99
H: L <sub>m,H</sub>	<b>0,83</b>	-0,27	0,49				1,00
T: L <sub>5,T</sub>	<b>0,92</b>		-0,34				0,99
M: L <sub>5,M</sub>	<b>0,97</b>			0,21			0,99
H: L <sub>5,H</sub>	<b>0,83</b>		0,51				0,99
T: I <sub>90,T</sub>		<b>0,91</b>				-0,24	0,92
M: I <sub>90,M</sub>	0,24	<b>0,92</b>					0,94
H: I <sub>90,H</sub>	0,24	<b>0,85</b>	0,31				0,92
T: M <sub>T</sub>		<b>0,88</b>				-0,29	0,90
M: M <sub>M</sub>	0,20	<b>0,90</b>					0,87
H: M <sub>H</sub>		<b>0,78</b>	0,38			0,39	0,95
T: A <sub>T</sub>			<b>-0,87</b>	-0,41	0,21		1,00
M: A <sub>M</sub>	0,21	0,25	-0,44	<b>0,73</b>	-0,40		0,99
H: A <sub>H</sub>	-0,21		<b>0,96</b>				1,00
T%				<b>-0,70</b>	-0,67		0,99
Quadratsumme	7,03	4,91	2,89	1,35	0,79	0,36	17,33
Varianzbeitrag in %	39,06	27,28	16,03	7,50	4,37	2,02	96,26

Tabelle 5-4 Rotierte Faktorladungen aus Tabelle 5-3

	Faktoren						Kommunalität
	1	2	3	4	5	6	
L <sub>Aeq</sub> in dB	<b>0,98</b>						0,99
N <sub>5</sub> in sone	<b>0,95</b>						0,90
T: L <sub>m,T</sub>	<b>0,88</b>		0,46				1,00
M: L <sub>m,M</sub>	<b>0,95</b>			0,29			0,99
H: L <sub>m,H</sub>	<b>0,91</b>		-0,37				1,00
T: L <sub>5,T</sub>	<b>0,87</b>		0,48				0,99
M: L <sub>5,M</sub>	<b>0,93</b>			0,31			0,99
H: L <sub>5,H</sub>	<b>0,91</b>		-0,37				0,99
T: I <sub>90,T</sub>		<b>0,93</b>					0,92
M: I <sub>90,M</sub>		<b>0,93</b>		0,27			0,94
H: I <sub>90,H</sub>		<b>0,89</b>				0,31	0,92
T: M <sub>T</sub>		<b>0,91</b>				-0,23	0,90
M: M <sub>M</sub>		<b>0,92</b>					0,87
H: M <sub>H</sub>		<b>0,81</b>				0,50	0,95
T: A <sub>T</sub>			<b>0,99</b>				1,00
M: A <sub>M</sub>				<b>0,96</b>			0,99
H: A <sub>H</sub>			<b>-0,91</b>	-0,41			1,00
T%					<b>0,97</b>		0,99
Quadratsumme	6,86	4,89	2,67	1,45	1,03	0,44	17,33
Varianzbeitrag in %	38,08	27,15	14,84	8,04	5,73	2,42	96,26

Die Tabelle enthält alle Werte außer den Nullladungen. Beträge oberhalb 0,7 sind fett dargestellt, um ihre Bedeutung hervorzuheben. Die Einflüsse der Variablen auf die Faktoren treten gegenüber der unrotierten Lösung klarer hervor. Der Versuch, den aus der Analyse gewonnenen Faktoren eine physikalische Interpretation zuzuordnen, führt zu folgendem Resultat:

#### Faktor 1: *Lautstärke*

Alle Energiegrößen des untersuchten Signals einschließlich der Überschreitungslautheit sind hoch auf diesen Faktor geladen. Die Zusammenhänge der 5%-Überschreitungspegel mit den Mittelungspegeln und dem äquivalenten Dauerschallpegel sind zu groß, um Unterschiede erkennen zu lassen.

#### Faktor 2: *Dynamik*

In dem gewählten Stichprobenumfang liegen nur geringe Differenzen sowohl zwischen dem Interquantilbereich  $I_{90}$  und der Mittelwertdifferenz  $M$  als auch zwischen den Frequenzbereichen vor. In der Tendenz äußert sich die Dynamik der Signale in beiden Größen und trägt breitbandigen Charakter.

#### Faktor 3: *Tiefenbetonung*

Auf diesen Faktor sind die Mittelwertabweichungen  $A_T$  und  $A_H$  für tiefe und hohe Frequenzen sehr hoch geladen. Die Ladungen der Größen  $L_m$  und  $L_5$  lassen auf einen geringen Einfluß der Lautstärke schließen. Das negative Vorzeichen aller Variablen für den hohen Frequenzbereich weist auf den gegenläufigen Einfluß hin. Bei überwiegend tiefem Klangcharakter des Klangbildes werden dementsprechend weniger Höhen beobachtet.

#### Faktor 4: *Mittenbetonung*

Aufgrund einer weitgehenden Unabhängigkeit der Mittelwertabweichung  $A_M$  für den mittleren Frequenzbereich wird ein gesonderter Faktor extrahiert. Erwartungsgemäß sind auch hier geringe Ladungen der Energiegrößen wie beim Faktor 3 erkennbar. Zusätzlich muß ein leicht gegenläufiger Einfluß der Mittelwertabweichung in den Höhen ( $A_H$ ) festgestellt werden. Häufig auftretende Klangbilder mit einer Mittenbetonung zeigen offensichtlich die Tendenz zu abgeschwächten hohen Spektralanteilen. Dagegen ist dieser Zusammenhang für die Tiefen nicht zutreffend.

#### Faktor 5: *Tonalität*

Dieser Faktor wird ausschließlich von der normierten Tonalität  $T_{\%}$  geladen.

#### Faktor 6: *Höhendynamik*

Die nach Extraktion des 5. Faktors verbliebenen Varianzen werden dem Faktor 6 zugeordnet, soweit die beschriebenen Größen miteinander korrelieren. Insbesondere die Kenngrößen der Dynamik im hohen Frequenzbereich lassen sich nicht allein mit Faktor 2 beschreiben und finden jetzt ihren Niederschlag. Dieser Umstand führt in weiteren Untersuchungen dazu, daß diese Kenngrößen gesondert behandelt werden. Der Faktor 6 dagegen wird vernachlässigt.

### Verwendung der Ergebnisse

Die Faktorenanalyse liefert die wesentlichen Faktoren zur Signalbeschreibung:

1. Lautstärke,
2. Dynamik,
3. Tiefenbetonung,
4. Mittenbetonung und
5. Tonalität.

Im Gegensatz zur geläufigen Verfahrensweise, aus den Eingangsgrößen die gewonnenen Werte der Faktoren für jedes Objekt neu zu berechnen, wird hier ein anderer Weg beschritten:

Die leicht berechenbaren objektiven Meßgrößen aus Kapitel 4 (Primärdaten der Signalanalyse) sollen Basis weiterer Untersuchungen bleiben, gerade im Hinblick auf eine problemlose Erweiterung der Klangbibliothek. Die Ergebnisse der Faktorenanalyse werden deshalb genutzt, um aus den von Primärdaten abgeleiteten Parametern (vgl. Abschnitt 5.1.1) geeignete Vertreter der gewonnenen Faktoren zu bestimmen.

Der Faktor "Lautstärke" wird sehr gut durch den A-bewerteten äquivalenten Dauerschalldruckpegel  $L_{Aeq}$  und die 5%-Überschreitungslautheit  $N_5$  vertreten (Tabelle 4-5). Beide Größen haben außerdem keinen Einfluß auf die anderen Faktoren. Wegen der leichteren Berechenbarkeit wird jedoch der  $L_{Aeq}$  bevorzugt.

Um die *dynamischen Eigenschaften* der untersuchten Klangbilder hinreichend in die folgenden Untersuchungen einzubeziehen, werden die Faktoren 2 und 6 repräsentiert durch die Interquantilbereiche  $I_{90,M}$ ,  $I_{90,H}$  nach Gleichung (5.3) und die Mittelwertdifferenzen  $M_M$ ,  $M_H$  gemäß Gleichung (5.4). Die jeweiligen Größen für den tiefen Frequenzbereich wurden vernachlässigt, da sie zum einen hoch mit den Werten im mittleren Bereich korrelieren und zum anderen für die Empfindung der Dynamik subjektiv weniger bedeutsam sind.

Die *Klangcharakteristik* spielt für die Wahrnehmung und die Anpassung gleichermaßen eine große Rolle. In Auswertung der Faktoren 3 und 4 sollen im folgenden die nach (5.5) berechneten Mittelwertabweichungen  $A_T$ ,  $A_M$  und  $A_H$  verwendet werden, um die Betonung jedes Frequenzbereiches berücksichtigen zu können. Eine Beschränkung auf die Mittelwertabweichung nur für den tiefen oder den hohen Bereich wurde ausgeschlossen, da einige Klangbilder gerade in der Betonung beider Parameter eine eigene, wichtige Charakteristik aufweisen.

Die *Tonalität*  $T\%$ , einziger bestimmender Bestandteil des Faktors 5, wird als letzte Größe in die reduzierte Variablenliste aufgenommen.

Mit der beschriebenen Faktorenanalyse konnte nachgewiesen werden, daß

- einige Signalanalyseergebnisse miteinander korrelieren,
- Klangbildeigenschaften aus der Signalanalyse abzuleiten sind und
- den Eigenschaften charakterisierende Meßgrößen zuzuordnen sind.

Unter der Annahme, daß die beobachteten Zusammenhänge zwischen den signalanalytischen Parametern bei einer vergrößerten Stichprobe weiterbestehen, werden die ausgewählten Parameter zur Einordnung in objektbezogene Klassen herangezogen. Tabelle 5-5 faßt die durch Faktorenanalyse getroffene Auswahl abschließend zusammen.

**Tabelle 5-5** Klangbildeigenschaften und verwendete konzentrierte Parameter aus Gleichung (5.1) bis (5.5)

Eigenschaft	Parameter
Lautstärke	$L_{Aeq}$
Dynamik / Impulshaltigkeit	$I_{90,M}, I_{90,H}, M_M, M_H$
Klangfarbe	$A_T, A_M, A_H$
Tonalität	$T_{\%}$

Es zeigt sich, daß somit prinzipiell auf diese Weise eine Lösung der eingangs definierten Zielstellung erreicht wird. Im folgenden sollen die Klangbilder anhand der ausgewählten konzentrierten Parameter zu Gruppen vereinigt werden.

#### 5.1.4 Klassierung durch Clusteranalyse

##### *Verfahrensweise*

Das Ziel der Clusteranalyse besteht darin, unter Einbeziehung mathematischer Verfahren eine Vielzahl ungeordneter Objekte aufgrund von Ähnlichkeiten zu homogenen und praktisch handhabbaren Klassen (Cluster) zusammenzufassen. Kriterium für eine Gruppierung ist die möglichst geringe Distanz zu ähnlichen Objekten bzw. ein möglichst großer Abstand zu anderen. Basis der Unterscheidungen sind Eigenschaften (mindestens zwei), die an allen Objekten ermittelt wurden. Ausschließlich mathematisch-statistische Kriterien entscheiden über die Zuordnung zu den Gruppen.

Im Ergebnis werden Cluster gebildet, die die Struktur der betrachteten Objektmenge übersichtlicher werden lassen und Zusammenhänge aufdecken. Vereinfachend können danach charakteristische Eigenschaften für bestimmte Objekttypen bestimmt werden, mit denen weitergearbeitet wird.

Eine bestimmte Verteilung der Variablen ist keine Voraussetzung, doch die Variablen sollten vorzugsweise metrisch sein. Für die Clusteranalyse sind erforderlich [Spä-75]:

$$50 \leq n \leq 5000, \quad 2 < m \leq 10 \quad (5.10)$$

- n Zahl der Objekte
- m Zahl der Variablen

Zur Klassierung eignen sich unterschiedliche mathematische Methoden, die im wesentlichen bei der Steuerung der Gruppenbildung andere Wege beschreiten. Außerdem existieren verschiedene Vorschriften zur Berechnung des Abstandes der Gruppen. Ausgangspunkt eines jeden Verfahrens ist dennoch, daß die Ähnlichkeit zweier Objekte numerisch durch ein Maß erfaßbar ist und daß die Ähnlichkeit verschiedener Objektpaare vergleichbar ist. Dieses Prinzip findet sich auch in der Diagnose wieder, z. B. bei der Fehlerdiagnose von Systemen.

Bei der Clusteranalyse auftretende Probleme sind

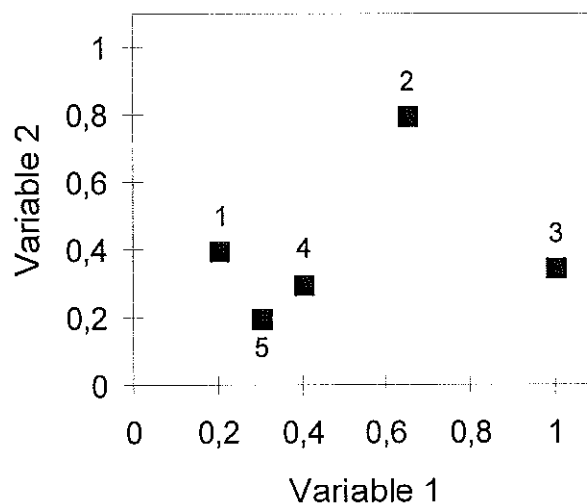
- Wahl des geeigneten Algorithmus,
- unbekannte Anzahl der zu bestimmenden Cluster und
- Auswahl der Variablen und deren Skalierung.

Unterschiedliche Analysen führen auch zu abweichenden Ergebnissen. Nur, wenn die Resultate interpretierbar sind, gilt die gewählte Clusteranalyse als erfolgreich.

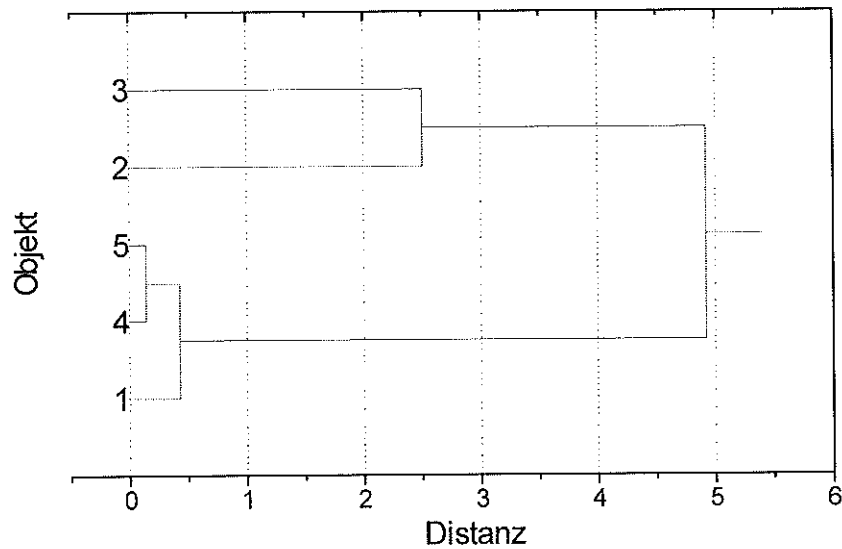
Die Agglomeration als ein hierarchisches Verfahren soll kurz beschrieben werden. Zu Beginn stellt jedes Objekt eine Gruppe für sich dar. In jedem Verfahrenszyklus werden die zwei Gruppen mit dem geringsten Abstand zu einer neuen verschmolzen. Das Verfahren ist beendet, wenn nur noch eine Gruppe existiert, d. h. nach so vielen Schritten, wie es Objekte zu Beginn gab.

Dieser Vorgang läßt sich anschaulich in einem Dendrogramm darstellen (vgl. Bild 5-4). Die zweidimensionale Darstellung des Ergebnisses der Clusteranalyse enthält einen Ordinatenmaßstab, auf dem die Abstände, bei denen Zusammenfassungen stattfinden, abgetragen sind. Aus der Größe des Abstandes zweier Fusionen läßt sich ablesen, wie groß der Abstand zweier Gruppen ist, bevor sie verbunden werden. Die Anzahl waagerechter Linien bei einer angenommenen Distanz entspricht der Clusterzahl. Der Nutzer legt nach Beendigung der Agglomeration mit dem Dendrogramm fest, wieviele Gruppen zur Einteilung der Daten verwendet werden sollen.

Das folgende Beispiel soll die beschriebene Vorgehensweise verdeutlichen. Es wird angenommen, daß 5 Objekte, charakterisiert durch zwei Meßgrößen, gruppiert werden sollen (Bild 5-3). Der Verlauf der Clusterbildung, wiedergegeben durch das Dendrogramm im Bild 5-4, ist folgendermaßen zu beschreiben:



**Bild 5-3** Darstellung der Objekte für eine beispielhafte Clusteranalyse



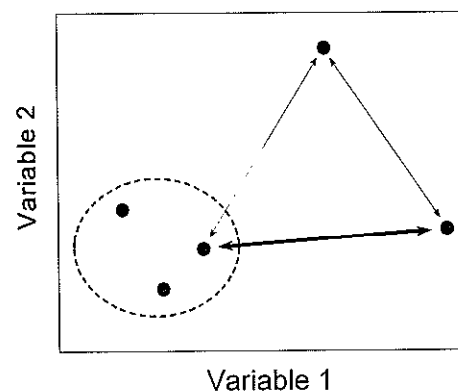
**Bild 5-4** Dendrogramm für die Gruppierung der Objekte aus Bild 5-3

Zuerst werden die naheliegenden Objekte 4 und 5 zu einer Gruppe zusammengefasst. Schon mit geringem Abstand folgt die Neubildung der Gruppe unter Hinzunahme von Objekt 1. Bedingt durch den großen Abstand (gleichbedeutend mit Unähnlichkeit) der anderen Objekte, erfolgt die Clusterung erst bei hohen Distanzen. Je nach Aufgabenstellung kann jetzt festgelegt werden, daß zwei oder auch drei Gruppen im Ergebnis der Clusteranalyse vorliegen sollen.

Während der Zusammenfassung zu Gruppen wird der Abstand zweier Objekte oder Gruppen regelmäßig bestimmt. Für diese Berechnung sind mehrere Methoden möglich. Einige oft verwendete Verfahren sind im folgenden zusammengestellt ([Boc-74], [Spä-75]). Die Grafiken sollen die Vorgehensweise veranschaulichen unter der Annahme, daß 3 Objekte bereits in einer Klasse sind. Die dicke Linie markiert jene Verbindung, die das Minimum erfüllt und die nächste Klassenbildung bewirkt.

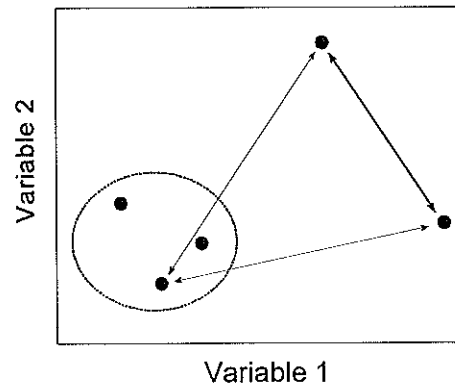
#### Single-Linkage-Methode

Der Abstand der betrachteten Gruppen entspricht dem Abstand der am nächsten liegenden Mitglieder. Es werden solche Gruppen verbunden, die Nachbarobjekte mit minimalem Abstand besitzen. Im Ergebnis entsteht ein sogenannter Minimalbaum.



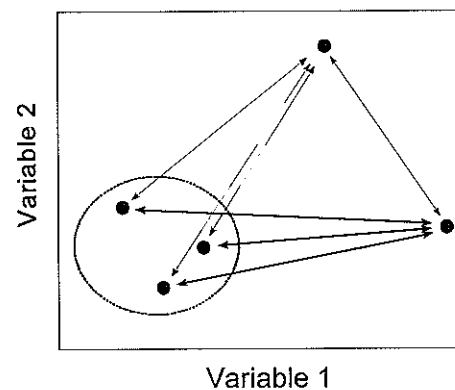
### *Complete-Linkage-Methode*

Aus dem maximalen Abstand zweier Objekte ergibt sich der Abstand der jeweiligen Gruppen. Die beiden Gruppen werden zusammengefaßt, die den kleinsten maximalen Abstand aufweisen.



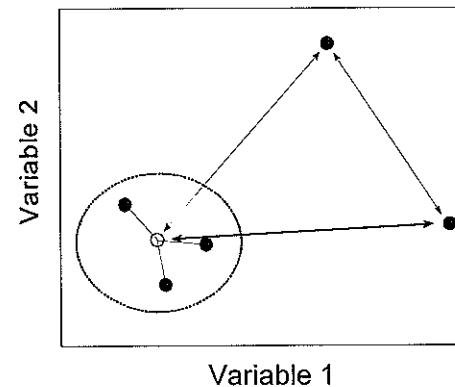
### *Average-Linkage-Methode*

Aus den Abständen der Mitglieder zweier Gruppen wird eine mittlere Distanz ermittelt. Die Gruppen mit minimaler mittlerer Distanz werden verschmolzen.



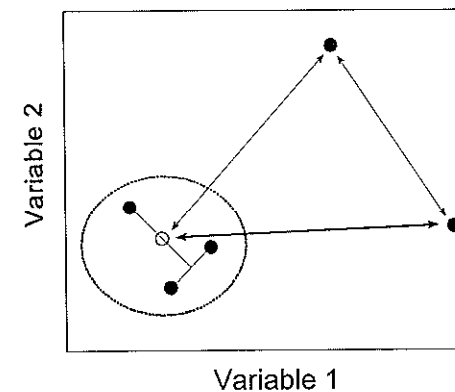
### *Zentroid-Methode*

Jede Gruppe aus Objekten wird durch einen Schwerpunkt repräsentiert, der die Lage aller Gruppenmitglieder berücksichtigt. Die Objekte, deren Schwerpunkte am nächsten liegen, werden verbunden.



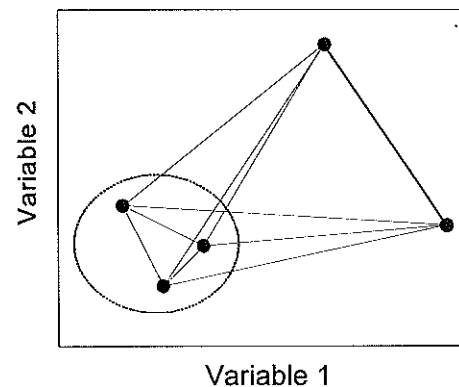
### *Median-Methode*

Der Mittelpunkt einer Gruppe ergibt sich aus dem geometrischen Mittelpunkt der Strecke, die die im letzten Agglomerationschritt zusammengefaßten alten Gruppen verbindet.



### Ward-Methode

Der Abstand zweier Gruppen ist hier proportional zur Änderung der Quadratsummen zwischen den Gruppenmitgliedern, die sich aus der Zusammenfassung ergeben würde. Nach diesem Verfahren werden die Gruppen verbunden, bei denen sich die Varianz innerhalb der Gruppe durch die Zusammenfassung am wenigsten ändert. Es wird erreicht, daß bei jedem Schritt ein nur minimaler Informationsverlust eintritt. Kleine Gruppen werden bei einer Fusion durch Einbeziehung der Objektanzahl in die Abstandsbestimmung bevorzugt.



Für die Untersuchung von Objekten mit metrischen Beschreibungsdaten empfiehlt [Spä-75] die Ward-Methode, bei Anwendung beliebiger Abstandsmatrizen eher die Average-Linkage oder die Complete-Linkage-Methode. Bei umfangreiche Vorarbeiten mit dem Datenmaterial der Signalanalyse wurden die Methoden verglichen und hinsichtlich der Interpretierbarkeit der Ergebnisse bewertet. Es hat sich gezeigt, daß für die vorliegende Aufgabenstellung die Ward-Methode am besten geeignet ist. Ihre Einsatzbedingungen

- Vorgabe metrischer Daten zur Objektbeschreibung und
- bevorzugte Bildung gleich großer Gruppen

entsprechen den gestellten Erwartungen. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der folgenden Ergebnisse mit der Agglomerationsmethode Ward.

### Ergebnisse

Für die Clusteranalyse liegen 85 Objekte vor, von denen die 9 Variablen  $L_{Aeq}$ ,  $I_{90,M}$ ,  $I_{90,H}$ ,  $M_M$ ,  $M_H$ ,  $A_T$ ,  $A_M$ ,  $A_H$  und  $T\%$  (Tab. 5-5) zur Beschreibung der Eigenschaften herangezogen werden. Im Anschluß an die Analyse nach Ward-Methode werden aus dem Dendrogramm als mögliche Clusterzahlen 5, 7 und 12 erkennbar. Bei der Interpretation der Gruppen erweist sich die Aufteilung in 12 Gruppen als vorteilhaft, da die Cluster nicht zu groß werden und die Variationsbreite der Parameter eingeschränkt bleibt. Eine feinere Unterteilung in mehr Gruppen ist zwar möglich, aber nicht mehr übersichtlich. Sie erschwert nur die Interpretation und stellt damit das Ziel der Clusteranalyse in Frage.

Die ermittelten Gruppen werden im Hinblick auf die Änderung einzelner Parameter an den Klassengrenzen als auch unter Beachtung der absoluten Parameterwerte untersucht. Da aus der Faktorenanalyse die Wirkung einzelner Größen und ihre Sensitivität für bestimmte Eigenschaften abgeleitet werden kann, ist jeder Gruppe eine Beschreibung der Charakteristik zuzuordnen.

Die vollständige Gegenüberstellung von Eingangsdaten und Gruppenzuordnung ist im Anhang G für jeden Ausschnitt aus den Klangbildern zu finden. Tabelle 5-6 gibt die ermittelten Ergebnisse der Zuordnung und eine mögliche Interpretation der gebildeten Klassen an.



Diesen Klassen auf der Basis objektiver Meßgrößen stehen Klassierungen aus den Tätigkeitsmerkmalen und Lebensbereichen gegenüber. Der folgende Abschnitt setzt sich deshalb mit den inhaltlich motivierten Klangbildgruppen auseinander und stellt die Beziehungen zu den wichtigsten Parametern der Analyse her.

**Tabelle 5-6** Aus der Clusteranalyse gewonnene Zuordnung der Klangbilder zu Klassen

Cluster	Eigenschaften	Klangbild
1	dynamisch breitbandig	02 Schritte, 08 Besteck, 09 Abspülen, 63 Geschäft/Münzen
2	gering dynamisch breitbandig	03 Aufschließen, 05 Urticken, 10 Eingießen, 12 Mixer, 13 Hände waschen, 14 Duschen, 16 Toilette, 17 Waschmaschine, 44 U-Bahn/Türen, 58 Großmarkt, 63 Geschäft/Börse, 64 Morgenatmosphäre, 65 Am See
3	dynamisch breitbandig tonal	04 Türgong
4	kaum Dynamik breitbandig	06 Staubsauger, 15 Fön, 24 Orchester, 27 Beifall Theater, 39 Straßenbahn (innen), 43 Zug (innen), 47 Bahnhofsdurchsage, 53 Baustelle, 67 ländlicher Hinterhof, 71 Martinshorn / b
5	stark dynamisch tiefen- / mittenbetont	07 Geschirr, 20 Wechselsprechanlage, 22 Telefongespräch, 26 Stadion / Schuß, 50 Gespräch im Auto, 74 Startschuß
6	kaum Dynamik höhenbetont tonal	11 Braten, 44 U-Bahn / Bremsen, 56 Bohren in Holz, 69 Telefonklingel, 72 Mechanischer Wecker, 73 Autohupe
7	gering dynamisch tiefenbetont	18 Fernsehen, 19 Radio, 21 Unterhaltung, 25 Volksfest, 31 Schauspieler, 32 Kino, 33 Kino (gestört), 34 Partygespräch / a, 41 Auto (innen), 48 Gespräch im Bus, 49 Gespräch in Bahn, 55 Hämmern / b, 63 Geschäft / Rede, 68 Vortrag
8	kaum Dynamik tiefenbetont	23 Theaterpublikum, 34 Partygespräch / b, 35 Straßenbahn, 36 Bus/Losfahren, 37 Verkehr, 38 Verkehr an Ampel, 42 Zug, 44 U-Bahn/Hintergrund, 44 U-Bahn/Warnton, 52 Bahnhofshalle, 66 See mit Schiff, 71 Martinshorn / a
9	dynamisch höhenbetont	26 Stadion, 55 Hämmern / a, 57 Sägen von Holz, 60 Schreibmaschine, 61 Drucker, 62 Papier rascheln, 63 Geschäft/Kasse
10	dynamisch tiefen- / mittenbetont	28 Chorgesang, 29 Festansprache, 30 Stadiondurchsage, 45 S-Bahn/Ansage, 51 Straßengespräch, 59 Kindergarten
11	dynamisch höhenbetont tonal	36 Bus/Bremsen, 46 Fahrradklingel
12	kaum Dynamik tiefenbetont tonal	40 Bus (innen), 45 S-Bahn/Ausfahrt, 54 Hobelbank, 70 Sirene

## 5.2 Parameterstreuungen in den inhaltlichen Klangbildgruppen

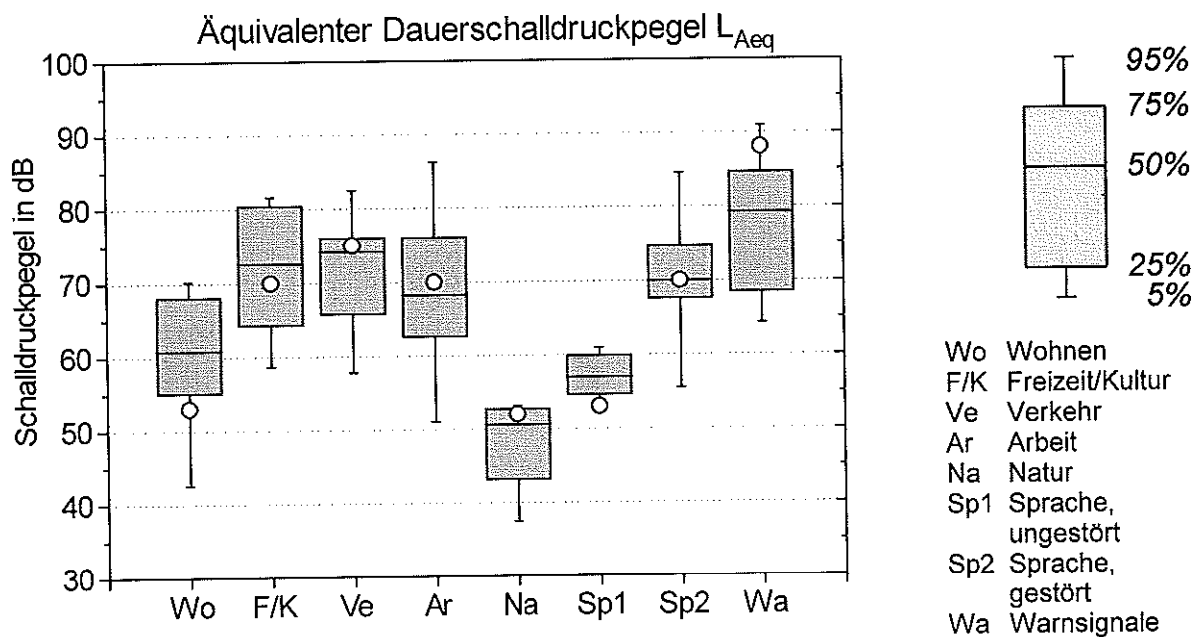
Das Verfahren A-Life zur Hörgeräteanpassung verwendet zur Unterteilung der Klangbibliothek geeignete Klangbildgruppen. Sie sind das Ergebnis umfangreicher Befragungen von Hörgeschädigten zur Bedeutsamkeit und Aussagekraft von Alltagssituationen [Fed-90]. Aus statistischen Untersuchungen ergaben sich 5 Klangbildgruppen:

- Wohnbereich,
- Freizeit- und Kulturbereich,
- Kommunalbereich,
- Arbeitsbereich,
- Natur.

Diese Gruppen wurden wegen der besonderen Bedeutung von Sprache beim Hören und den häufigen Problemen mit sehr lauten Signalen ergänzt:

- Sprache, gestört,
- Sprache, ungestört,
- Warnsignale.

Beim Vergleich mit den signalanalytischen Gruppen muß jetzt die Frage gestellt werden, inwieweit die inhaltlichen Klangbildgruppen durch Unterschiede der Wertebereiche der konzentrierten Analyseparameter gekennzeichnet sind. Bild 5-5 zeigt für alle Gruppen die Verteilung des äquivalenten Schalldruckpegels. Die Häufigkeitsverteilungen aller für die Clusteranalyse in Abschnitt 5.1.4 verwendeten Variablen ist in Anhang F zu finden. Der Balken kennzeichnet den Interquantilbereich und die äußeren senkrechten Linien sind vom 5% und vom 95% Perzentil begrenzt.



**Bild 5-5** Häufigkeitsverteilung mit Angabe ausgewählter Perzentile für den äquivalenten Dauerschalldruckpegel getrennt nach Klangbildgruppen und Markierung der Repräsentanten aus Tabelle 5-10 (offene Kreise)

Bei den Häufigkeitsverteilungen fällt auf, daß alle Parameter deutliche Unterschiede für die Klangbildgruppen aufweisen, außer der Mittelwertabweichung  $A_M$ . Bild 5-5 bestätigt die Erfahrungen bei der Wahrnehmung der Lautstärke: Wohnen, ungestörte Sprache und Natur sind leiser als die übrigen Lebensbereiche. Die meisten der in Abschnitt 5.4 ausgewählten Repräsentanten für die Gruppen liegen auch bezogen auf den  $L_{Aeq}$  in der Nähe des 50%-Gruppenperzentils (entspricht dem Median). Eine vollständige Deckung ist deswegen nicht zu erwarten, weil die gewählten Klangbilder hinsichtlich aller untersuchten Parameter den Repräsentanten ihrer Gruppe darstellen sollen und nicht nur auf den äquivalenten Dauerschallpegel beschränkt sind.

Im Vergleich aller Ergebnisse aus Anhang D zeigt sich, daß die Klangbilder aus der Natur kaum Dynamik und eine nicht allzu ausgeprägte Klangfärbung besitzen. Der Kommunalbereich weist dafür eine typische Anhebung der Tiefen auf und die Arbeitsklangbilder neigen stärker zur Betonung der Höhen.

Vor dem Hintergrund dieses Datenmaterials läßt sich nachvollziehen, daß die Hörgeräteanpassung für eine gegebene Klangbildgruppe unter Verwendung einzelner Klangbilder für die Lautstärke- und Klangfarbenwahrnehmung mit gutem Erfolg durchgeführt werden kann. Die überschaubare Varianz der entsprechenden Analyseparameter erlaubt das Einbeziehen typischer Alltagssituationen in den Anpassvorgang, ohne mit erheblichen Problemen im Einzelfall rechnen zu müssen. Andererseits wird auch deutlich, daß eine Anpassung für alle Lebenssituationen kaum möglich ist. Dazu sind die Unterschiede zwischen den Klangbildgruppen zu groß und die objektive Darstellung des Hörschadens zu komplex (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Ein Verfahren zur Bestimmung von Repräsentanten für die Klangbildgruppen beschreibt Abschnitt 5.4. Im Vorgriff auf die dortigen Ergebnisse sind die Kenngrößen der ausgewählten Klangbilder in den Diagrammen von Bild 5-5 eingezeichnet. In den meisten Fällen ist erkennbar, daß sie typische Parameter innerhalb ihrer Gruppe aufweisen.

### 5.3 Gruppierung der Klangbilder nach signalanalytischen Kriterien

#### 5.3.1 Gruppierende Parameter

Die Analyse in dieser Arbeit liefert speziell auf den Einsatzzweck der Signale zugeschnittene objektive Parameter. Einige ausgewählte bzw. neu berechnete Größen reichen aber bereits aus, um jedes Klangbild hinreichend in seinen wesentlichen Eigenschaften zu beschreiben (vgl. Abschn. 5.1.3):

- Äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$ ,
- Interquantilbereich  $I_{90}$  für mittlere und hohe Frequenzen,
- Mittelwertedifferenz  $M$  für mittlere und hohe Frequenzen,
- Mittelwertabweichung  $A$  für tiefe, mittlere und hohe Frequenzen und
- Normierte Tonalität  $T_{\%}$ .

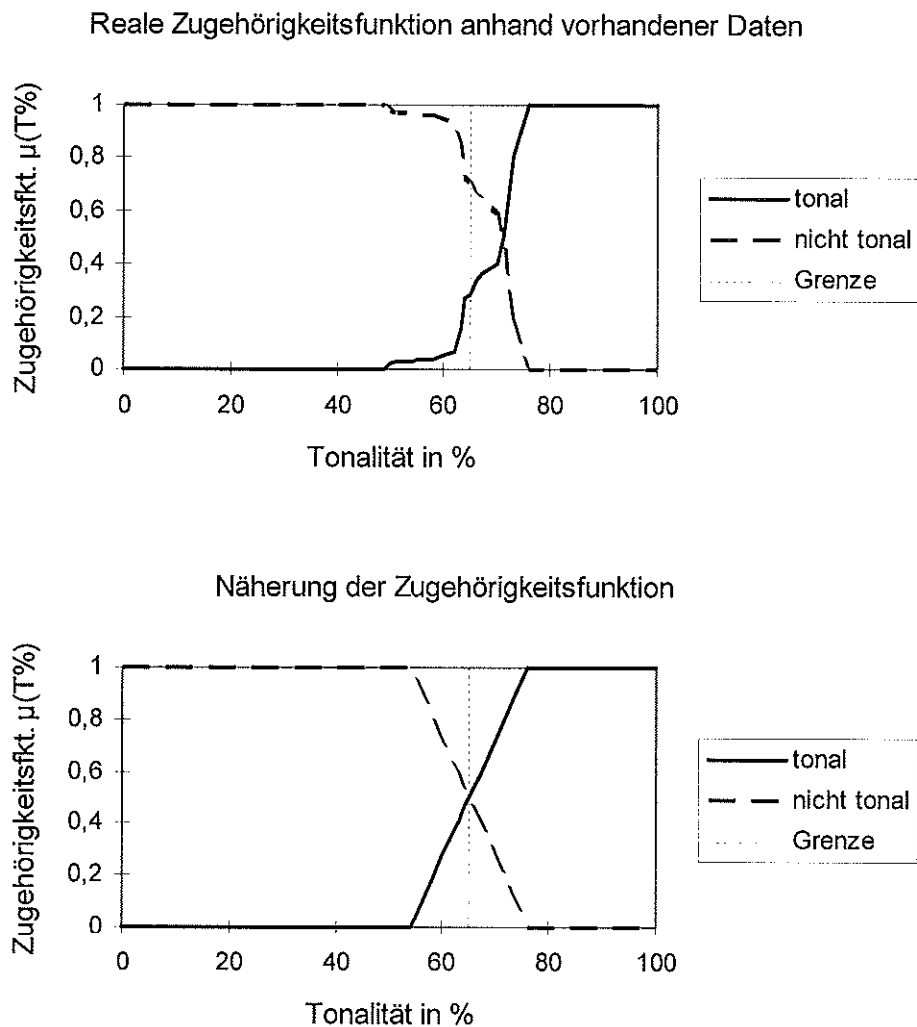
Wird die Klangbibliothek erweitert, soll die Einordnung der neuen Klangbilder in die vorgeschlagene Gruppenstruktur anhand der Signalanalysedaten erfolgen können. Die Parameter sind deshalb auf der Grundlage der Clusteranalyseergebnisse aus Abschnitt 5.1.4 ebenfalls zu

klassieren. Es werden dafür die Übergangsbereiche zwischen den gefundenen Clustern ausgewertet. Tabelle 5-7 enthält die empfohlenen Parameterbereiche für die verbale Eigenschaftsbeschreibung jedes Klangbildes.

*Tabelle 5-7 Parameterklassierung für gegebene Eigenschaften*

	$L_{Aeq} /$ dB	$T_{\%}$	$l_{90,M} /$ dB	$l_{90,H} /$ dB	$M_M /$ dB	$M_H /$ dB	$A_T /$ dB	$A_M /$ dB	$A_H /$ dB
kaum Dynamik			< 10	< 10	< 5	< 5			
gering dynamisch			10..25	10..25	5..10	5..10			
dynamisch			25..40	25..40	10..15	10..15			
stark dynamisch			> 40	> 40	> 15	> 15			
breitbandig							-5..5	-5..5	-5..5
tiefenbetont							> 5	≤ 0	≤ 0
tiefen-/mittenbetont							≥ 0	≥ 0	< -5
höhenbetont							≤ 0	≤ 0	> 5
nicht tonal		< 65%							
tonal		> 65%							
leise	< 60								
mittel	60..70								
laut	70..80								
sehr laut	> 85								

Die festgelegten Grenzen unterliegen einer subjektiven Wertung und sind natürlich fließend. Deshalb bietet sich eine mathematische Formulierung der Zugehörigkeit zu den Eigenschaftsbeschreibungen mit Hilfe von Fuzzy-Logik an. Bild 5-6 veranschaulicht die möglichen Übergänge am Beispiel der Tonalität sowohl auf Basis der berechneten Klasseneinteilung als auch deren lineare Näherung. Die Zugehörigkeitsfunktionen sind unter Verwendung der Klangbibliothek und subjektiven Urteilen zur Wahrnehmung zu bestimmen.



**Bild 5-6** Reale und linear genäherte Zugehörigkeitsfunktionen für die verbale Beschreibung der Tonalität

Im genannten Beispiel wurden alle verwendeten Klangbilder im einmaligen subjektiven Test in tonale und nichttonale eingeteilt. Innerhalb jeder Gruppe bestimmt man dann die Häufigkeitsverteilung bezüglich des objektiv bestimmten Parameters  $T_{\%}$  für die Tonalität nach (4.20) und (4.21) unter der Voraussetzung, daß die Klassenbreite  $b = 1\%$  beträgt. Da die Anzahlen beider Gruppen in die normierte tonale Zugehörigkeitsfunktion  $\mu(T_{\%})$  eingehen, berechnet sie sich wie folgt:

$$\mu_{\text{tonal}}(T_{\%i}) = \frac{n_{\text{tonal}} H_{\text{tonal}}(T_{\%i})}{n_{\text{tonal}} H_{\text{tonal}}(T_{\%i}) + n_{\text{nichttonal}} (1 - H_{\text{nichttonal}}(T_{\%i}))} \quad (5.11)$$

Weil nur zwei Entscheidungen möglich sind, ergibt sich die nichttonale Zugehörigkeitsfunktion aus:

$$\mu_{\text{nichttonal}}(T_{\%i}) = 1 - \mu_{\text{tonal}}(T_{\%i}) \quad (5.12)$$

Die in Tabelle 5-7 und Bild 5-6 festgelegte Grenze von 65% besagt, daß Klangbilder mit diesem Meßwert bei einer Wahrscheinlichkeit von rund 30% der tonalen Gruppe zuzuordnen sind.

Mit diesem Verfahren ist eine zuverlässige und robuste Zuordnung der Klangbilder zu den Eigenschaften zu erwarten. Bei Nutzung von Fuzzy-Clusteralgorithmen kann voraussichtlich auch die Bildung der signalanalytisch motivierten Klangbildgruppen verbessert werden.

Trotzdem wird auf die durchgängige Verwendung der Fuzzy-Logik verzichtet. Zwar würde sie subjektive Empfindungen berücksichtigen, aber es war, wie bereits dargelegt, Aufgabe in dieser Arbeit, Kriterien zur Klassifikation von natürlichen Klangbildern auf Basis objektiver Größen bereitzustellen. Die in Tabelle 5-7 dargestellte einfache Formulierung reicht aus, verbale Eigenschaftsbeschreibungen zu gewinnen.

### 5.3.2 Beschreibung der Gruppen

Anhand der genannten Parameter sind Klangbilder in Klassen zusammenfaßt, die ähnliche Objekte darstellen. Die gefundenen Cluster sind hauptsächlich gekennzeichnet durch:

- Stärke der Dynamik,
- Klangcharakteristik und
- tonale Signalanteile.

Die Unterscheidung nach der Lautstärke spielt entsprechend diesen Ergebnissen eine untergeordnete Rolle. Testsignale, deren Lautstärke die Unbehaglichkeitsschwelle erreicht, sind in der Bibliothek nicht vertreten und würden eher als störend und lästig wahrgenommen werden. In fast allen Gruppen sind deshalb natürliche Klangbilder mit ähnlichen dynamischen und klanglichen Eigenschaften aber unterschiedlicher Lautstärke zu finden.

Aus der Kombination der Eigenschaften ergeben sich insgesamt 64 mögliche Gruppen, von denen einige bisher keine Elemente enthalten. Neben der Tatsache, daß Sprachklangbilder kaum tonale Klangeigenschaften aufweisen, ist zu berücksichtigen, daß die Klangbildauswahl aus inhaltlicher Sicht als repräsentativ angesehen wird. Darüber hinaus ist der Umfang der Klangbibliothek durch Forderungen an die Handhabbarkeit und technische Randbedingungen (z. B. Speichermedien) eingeschränkt. Aus signalanalytischer Sicht ergeben sich dennoch Ansatzpunkte für neu aufzunehmende Klangbilder (siehe Abschnitt 5.5).

Interessant ist die gefundene Zuordnung von Klangbildern mit und ohne Sprache zu den Gruppen. Tabelle 5-8 gibt darüber Aufschluß.

**Tabelle 5-8** Anzahl von Klangbildern mit und ohne Sprache in den gebildeten Gruppen  
(Tabellenangabe: mit Sprache / ohne Sprache)

mit / ohne Sprache	nicht tonal				tonal			
	breit-bandig	tiefen-betont	tiefen-/mitten-betont	höhen-betont	breit-bandig	tiefen-betont	tiefen-/mitten-betont	höhen-betont
kaum Dynamik	1 / 9	1 / 11				0 / 4		0 / 6
gering dynamisch	0 / 13	12 / 2						
dynamisch	0 / 4		6 / 0	1 / 6	0 / 1			0 / 2
stark dynamisch			3 / 3					

Es fällt auf, daß im markierten Bereich von Tabelle 5-8 eine Häufung der Sprachklangbilder auftritt. In der Regel kann man annehmen, daß Klangbilder mit Sprache eine mehr oder weniger ausgeprägte Dynamik aufweisen. Die Klangfärbung wird sowohl von der Stimme als auch den Umgebungsgerauschen deutlich geprägt, erfährt aber oft bei tiefen und mittleren Frequenzen eine Anhebung. Tonale Geräusche enthalten i. a. keine Sprache. Selbst gesungene Sprache, als "Chorgesang" (Klangbild 28) bei den Analysen vertreten, liegt mit einer normierten Tonalität von  $T_{\%} = 71\%$  gerade im Übergangsbereich zur tonalen Wahrnehmung.

### 5.3.3 Zusammenhang inhaltlicher und signalanalytischer Gruppen

Für die Hörgeräteanpassung mit natürlichen Klangbildern ist die inhaltliche Gruppierung der Klangbilder Voraussetzung. Es ist wichtig festzustellen, in welchen Lebensbereichen sich der Kunde bevorzugt aufhält und das Hörgerät benötigt. Für diesen Bereich wird dann versucht, unter den gegebenen Bedingungen ein Optimum bei der Einstellung des Gerätes zu erzielen.

Gerade für den Anpaßvorgang ist es nützlich, die verschiedenen Klangbilder in ihren Eigenschaften zu kennen und gezielt unter Berücksichtigung des Hörschadens und der Hörgewohnheiten einzusetzen. Solche Informationen liefert die Gruppierung der Klangbilder aus Sicht der Signalanalyse. Sowohl für den Prozeß der Voreinstellung als auch den Feinabgleich der Gerätewerte können charakteristische oder speziell geeignete Klangbilder ausgewählt werden. Darüber hinaus werden Mängel und Fehlstellen im Klangbildmaterial sichtbar und ermöglichen eine zielgerichtete Suche.

Die Kombination beider Gruppierungsmethoden unterstützt den Anpaßvorgang erheblich und eröffnet zusätzliche Wege zur bewußten Beeinflussung. Tabelle 5-9 gibt einen Überblick zur Anzahl der Klangbildausschnitte, die innerhalb einer Klangbildgruppe besondere Eigenschaften aufweisen. Die Angaben basieren auf der vereinfachten Parameterklassierung von Abschnitt 5.3.1. Bei Einsatz der erwähnten Fuzzy-Logik sind u. U. geringfügig abweichende Ergebnisse zu erwarten.

Es ist zu beachten, daß einige Klangbilder in zwei Gruppen vertreten sind und damit ein direkter Vergleich zu Tabelle 5-8 nicht möglich ist. Außerdem lassen sich die Schnittmengen mehrerer Eigenschaften nicht ablesen. Dazu müssen die vollständigen Ergebnistabellen in Anhang D und Anhang G verwendet werden.

*Tabelle 5-9 Anzahl der Klangbildausschnitte mit speziellen Eigenschaften je Klangbildgruppe*

Spezielle Eigenschaft		Klangbildgruppe							
		Wohnen	Freizeit/ Kultur	Verkehr	Arbeit	Natur	Sprache ungest.	Sprache gestört	Warn- signale
Sprache	ja	5	9	6	3	-	3	11	-
	nein	16	5	15	13	4	-	-	8
Dynamik	kaum	3	4	12	4	2	-	2	5
	gering	11	5	4	4	2	2	4	1
	dynamisch	-	4	4	7	-	-	3	-
	stark	7	1	1	1	-	1	2	2
Klang	breitbandig	14	3	4	4	3	-	1	4
	tiefenbetont	3	7	11	4	1	2	5	1
	tiefen-/mit- tenbetont	3	4	3	1	-	1	5	-
	höhenbetont	1	-	3	7	-	-	-	3
Tonalität	tonal	2	-	5	2	-	-	-	5
	nicht tonal	19	14	16	14	4	3	11	3
Lautstärke	leise	12	1	2	4	4	3	1	-
	mittel	7	6	6	6	-	-	5	3
	laut	2	7	12	5	-	-	4	3
	sehr laut	-	-	1	1	-	-	1	2

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß diese Tabellen im Anhang die Struktur einer Fehlermatrix  $F$  aufweisen (vgl. [Frü-87]):

$$F = \begin{array}{cccc|c} & T_1 & T_2 & \dots & T_n & \\ \hline & a_{11} & a_{21} & \dots & a_{n1} & f_1 \\ & a_{12} & a_{22} & \dots & a_{n2} & f_2 \\ & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & a_{1m} & a_{2m} & \dots & a_{nm} & f_m \end{array}$$

Die Spalten  $T_n$  stellen die Klangbilder dar und die Fehler  $f_m$  in den Zeilen markieren die Parameter. Die Testreaktionen  $a_{nm}$  bestehen aus den Ergebniswerten der Signalanalyse und der bisherigen statistischen Auswertung. Unter Verwendung von Tabelle 5-7 können den Parameterklassen direkt wahrnehmbare Signalcharakteristika zugeordnet werden. Je nach Aufgabenstellung (Hörschaden, Gerätetechnik etc.) läßt sich so anhand der Fehlermatrix eine Testfolgeoptimierung durchführen.



Beim derzeitigen Stand der Klangbibliothek liegen Aufzeichnungen vor, die innerhalb der Gruppe gut ausgewogen sind. Beispielsweise im Kommunalbereich sind Eigenschaften wie tieffrequente Klangcharakteristik und große Lautstärke der Erwartung entsprechend häufig vertreten. Ähnliches gilt für den Bereich "gestörte Sprache".

Auf der anderen Seite sind starke Verschiebungen z. B. im Arbeitsbereich zugunsten der Darbietungen ohne Sprache erkennbar. Wenngleich in der Natur leise und dynamikarme Geräusche vorherrschen, so sind doch viele andersartige Erscheinungen wichtig und geläufig wie Tierstimmen oder ein Gewitter. Die Tendenz zur Breitbandigkeit im Wohnbereich resultiert wahrscheinlich aus der zu großen Zahl von inhaltlich nicht sehr bedeutsamen Betriebsgeräuschen von Haushaltgeräten (Dusche, Haarfön etc.).

#### 5.4 Klangbild-Wissensbasis zur Hörgeräteanpassung

Um die Auswahl von Klangbildern für die Hörgeräteanpassung zu unterstützen, ist es Ziel dieses Abschnittes, für jede Klangbildgruppe

- einen mittleren Repräsentanten
- ein maximales Klangbild (bezüglich Lautstärke)
- ein minimales Klangbild (bezüglich Lautstärke) und
- spezielle Klangbilder für ausgewählte Signaleigenschaften

zu finden. Ähnlich der Auslegung eines Diagnosesystems sollen fehlerrelevante Testsignale bestimmt werden, die ein bestimmtes Schadensbild hervorrufen können und einzelne Fehler bzw. Signaleigenschaften oder auch ausgewählte Gruppen von ihnen unterscheiden lassen. Hier werden ausschließlich Einzeltests untersucht. Die Testfolgenoptimierung bleibt zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

Unter der Voraussetzung, daß die inhaltliche Bedeutsamkeit eines Klangbildes berücksichtigt wird, lassen sich repräsentative Beispiele aufgrund signalanalytischer Merkmale auswählen. Sprach- und Nichtsprachklangbilder werden unterschieden. Die in Abschnitt 5.3.1 aufgeführten Parameter werden herangezogen und das gesuchte Klangbild so ausgewählt, daß die Summe aller Abweichungen der Werte vom Gruppen-Median minimiert wird:

$$a_i = (\tilde{L}_{eq} - L_{eq,i})^2 + (\tilde{I}_{90,M} - I_{90,M,i})^2 + (\tilde{I}_{90,H} - I_{90,H,i})^2 + (\tilde{M}_M - M_{M,i})^2 + (\tilde{M}_H - M_{H,i})^2 + (\tilde{A}_T - A_{T,i})^2 + (\tilde{A}_M - A_{M,i})^2 + (\tilde{A}_H - A_{H,i})^2 + (\tilde{T}_{\%} - T_{\%,i})^2 \quad (5.13)$$

$$a_j = \text{Min}(a_i) \quad (5.14)$$

Das Klangbild  $j$  mit der geringsten Abweichung  $a$  von (5.14) wird bevorzugt betrachtet, da es i. a. für die Klangbildgruppe typische zeitliche und spektrale Testmuster enthält. Aus der steigenden Anordnung aller berechneten quadratischen Abweichungen läßt sich auch eine Rangfolge der verwendbaren Klangbilder festlegen. Die inhaltliche Bedeutsamkeit entscheidet nun über die Verwendung als Repräsentant für die Gruppe, getrennt nach Sprach- und Nichtsprachklangbildern. Dabei ist nicht allein die Rolle des Klangbildes im menschlichen Leben ausschlaggebend, sondern auch dessen Eignung als Testsignal für die Hörgeräteanpassung. Tabelle 5-10 enthält die Ergebnisse dieser Zuordnung.

*Tabelle 5-10 Repräsentative Klangbilder für die inhaltlich bestimmten Klangbildgruppen*

Klangbildgruppe	Klangbild	
	ohne Sprache	mit Sprache
Wohnen	Geschirr abspülen (9)	Fernsehen (18)
Freizeit / Kultur	Volksfest (25)	Festansprache (29)
Verkehr	Verkehr an einer Ampel (38)	Gespräch im Bus (48)
Arbeit	Sägen von Holz (57)	Kindergarten (59)
Natur	Morgenatmosphäre (64)	-
ungestörte Sprache	-	Vortrag (68)
gestörte Sprache	-	Festansprache (29)
Warnsignale	Martinshorn (71)	-

Die genannten Klangbilder werden für Voreinstellungen und für die Feinanpassung in der jeweiligen Gruppe empfohlen. Sie weichen aufgrund der verbesserten Auswahlmethode häufig von den Vorschlägen aus [Noa-93] ab, da nicht ein mittleres Gruppenspektrum Maßstab des Vergleiches ist.

Im Verlauf der Anpassung des Hörgerätes ist es im Sinne einer Testfolgeoptimierung zweckmäßig, die augenblicklichen Einstellungen mit Klangbildern, die besonders zum Test einer speziellen Eigenschaft geeignet sind, zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Im bisherigen Verfahren werden Situationen aus einer Gruppe mit maximaler und minimaler Lautstärke vorgeschlagen. Auf den vorliegenden Analysedaten aufbauend können Klangbilder auch für weitere Problemfälle z. B. Höhenwahrnehmung oder Dynamikbegrenzung herangezogen werden. Tabelle 5-11 gibt einen Überblick, welche Klangbilder zur Bewertung bestimmter Eigenschaften (selektive Erkennung von Fehlern) besonders geeignet sind. Das Anpaßprogramm kann auf dieser Basis selbständig Vorschläge erarbeiten, wenn das gegenwärtig benutzte Klangbild die Verbesserung der Wahrnehmung dieser Eigenschaft unzureichend unterstützt.

Ein Vergleich zur bisherigen Auswahl von minimalen, repräsentativen und maximalen Klangbildern [Noa-93] zeigt, daß selbst bei ausschließlicher Berücksichtigung der Lautstärke Unterschiede zu den in Tabelle 5-10 und Tabelle 5-11 vorgeschlagenen Klangbildern bestehen. Die Beschränkung auf gemittelte Frequenzspektren als ausschließliches Kriterium für die Einordnung vernachlässigt wesentliche Signaleigenschaften wie beispielsweise die Dynamik völlig. Die möglichen Fehler und Risiken bei der Anpassung des Hörgerätes für die gewünschte Klangbildgruppe sind nicht unerheblich.

Greift man z. B. den Kommunalbereich heraus, so empfiehlt *Noack* die Situation "U-Bahn hält und fährt an" als minimales Klangbild. Das erklärt sich leicht, wenn man weiß, daß gemittelte Frequenzspektren über die gesamte Dauer des Klangbildes Grundlage der Auswahl waren. Lange leise Passagen beeinflussen den Mittelwert zu stark und vernachlässigen den lauten Beginn der Situation (Bremsen der U-Bahn), der den Einsatz als Minimalklangbild eigentlich verbietet.

Hier dagegen wurde das Herannahen eines klingelnden Fahrradfahrers als leises Klangbild auf der Basis von Kurzzeitspektren ermittelt. Zusätzlich ist der Vorteil eines leicht anschwellenden Pegels bei jedem Klingeln gegeben, so daß die Wahrnehmungsschwelle für dieses Warnsignal durch Auszählen einschätzbar ist.

*Tabelle 5-II Klangbilder mit ausgewählten Eigenschaften (Liste der Klangbilder im Anhang A)*

	Klangbildgruppe								Warnsignale
	Wohnen	Freizeit/ Kultur	Verkehr	Arbeit	Natur	Sprache ungestört	Sprache gestört		
Dynamik	kaum	Publikum	Verkehr	Bahnhof	Am Morgen	-	Durchsage	Sirene	
	gering	Kino	Unt. im Bus	Großmarkt	See mit Schiff	Vortrag	Unterhaltung	Martinshorn	
	dynamisch	Fest- ansprache	Straßen- gespräch	Papier	-	-	Fest- ansprache	-	
	stark	Stadion	Unt. im Auto	Geschäft	-	Telefon- gespräch	Wechsel- sprechanlage	Startschuß	
Klang	breitbandig	Beifall	Zug, innen	Großmarkt	Am See	-	Durchsage	Martinshorn	
	tiefenbetont	Partygespr.	Auto, innen	Bahnhof	See mit Schiff	Vortrag	Partygespr.	Startschuß	
	tiefen- /mittenbetont	Chorgesang	Straßen- gespräch	Kindergarten	-	Telefon- gespräch	Stadion- ansage	-	
	höhenbetont	-	Fahrradkling.	Holz bohren	-	-	-	Telefonklingel	
Tonalität	tonal	-	U-Bahn	Hobelbank	-	-	-	Türklingel	
	nicht tonal	Beifall	Verkehr	Großmarkt	Am See	Telefon- gespräch	Durchsage	Martinshorn	
Lautstärke	leise	Theater	Fahrradkling.	Großmarkt	Am See	Vortrag	Unterhaltung	-	
	mittel	Kino	Verkehr	Bahnhof	-	-	Partygespr.	Wecker	
	laut	Blaskapelle	Unt. im Bus	Holz sägen	-	-	Unt. im Auto	Sirene	
	sehr laut	-	Unt. in der Straßenbahn	Hämmern	-	-	Unt. in der Straßenbahn	Autohupe	

Als maximal lautes Klangbild weist Tabelle 5-11 das "Gespräch in der Straßenbahn" aus. Es liefert über einen langen Zeitraum 5 dB bis 10 dB höhere Pegel als das bisher verwendete "Bus hält und fährt an", nimmt im Pegel langsam zu (wichtig für p.c.-Einstellung), hat eine breitbandige Klangcharakteristik und ist über das Sprachverständnis leicht zu kontrollieren.

Den vorliegenden Ergebnisse liegen theoretische Überlegungen zugrunde, die eine optimale Auswahl geeigneter Testklangbilder anhand charakteristischer Eigenschaften erlauben und begründen. Die durch Messung bestimmbarer Eigenschaften sind leicht wiederholbar und auch für neue Testsignale anzuwenden.

Eine vollständige Beschreibung aller Klangbildausschnitte durch die untersuchten Eigenschaften ist im Anhang D zu finden. Anhand dieser Übersicht lassen sich leicht Klangbilder mit speziellen Merkmalen oder auch mit Kombinationen von Merkmalen finden, soweit der Umfang der bisherigen Bibliothek dazu ausreicht.

## 5.5 Weiterführende Untersuchungen

Die vorliegende Signalanalyse hat durch Untersuchungen im Zeit- und Frequenzbereich dazu beigetragen, natürliche Klangbilder, wie sie zur Anpassung von Hörgeräten verwendet werden, anhand weniger objektiver Merkmale zu beschreiben und zu systematisieren. Der Einsatz dieser Kenngrößen reicht von der Vorauswahl geeigneter Klangbilder für eine problemorientierte Anpassung über die geeignete grafische Darstellung von Dynamik, Frequenzgang und Pegelbereich bis zur Nutzung in der Berechnung von Verbesserungen der Hörgeräteeinstellung.

Im Verlauf der Untersuchungen wuchsen darüber hinaus Probleme, deren Lösungen weit über das Ziel dieser Arbeit hinausgehen, die aber einen Anteil liefern zum zukünftig tieferen Verständnis der Zusammenhänge von objektiven Signalparametern, technischen Möglichkeiten der Hörgeräteversorgung und der subjektiven Wahrnehmung.

Die folgenden, ohne Wertigkeit genannten Schwerpunkte sollten Gegenstand weiterer Untersuchungen werden:

### *Spektrale Verdeckung*

Wird ein bekanntes Signal in seinem Amplituden-Frequenzgang verändert, ist die Wirkung auf die subjektive Wahrnehmung meist nicht genau bekannt. Ein Grund ist die spektrale Verdeckung durch tonale Signalkomponenten. Das Verfahren der Lautheitsberechnung nach DIN 45631 berücksichtigt diese Wirkung auf die Geräuschwahrnehmung.

Ähnlich dem Vorschlag in [Web-93], kann deshalb für eine vorgegebene Änderung des Spektrums eine Beeinflussung der Klang- und Lautstärkeempfindung auf der Basis der Änderung der Teillautheiten abgeschätzt werden. Gerade für tonale und deshalb oft lästige Klangbilder verspricht dieser Ansatz, einen zuverlässigen Vorschlag zur Hörgeräteeinstellung zu finden.

### *Spektrale Kurzzeiteffektivwerte*

Die Ermittlung einer gut interpretierbaren Hüllkurve findet in dieser Arbeit eine Lösung im Einsatz des Verfahrens der selbsthaltenden Maximalwertdetektion. Viele Eigenschaften ins-

besondere von Sprachsignalen können damit sehr gut berücksichtigt werden. Andererseits gehen Informationen zu Modulationen bei höheren Frequenzen verloren, die für die Signalverarbeitung im Hörgerät von Bedeutung sein können. Eine Alternative stellt der Einsatz der Kurzzeiteffektivwertberechnung möglicherweise dar. Entscheidend sind aber die frequenzbandabhängigen Parameter für das angenommene Zeitfenster, innerhalb dessen die Berechnung erfolgt.

### *Hüllkurvenstatistik*

Die vorgestellte Hüllkurvenstatistik erfüllt die gestellten Anforderungen an eine objektive Beschreibung der Eigenschaften akustischer Signale. Die gewonnenen Parameter sind unabhängig von der speziellen Schaltungstechnik der signalverarbeitenden Hörgeräte einsetzbar.

Um direkt Vorschläge zur Einstellung der Signalkompressoren ableiten zu können, sind eingehende Untersuchungen zu den komplexen Zusammenhängen von subjektiver Wahrnehmung, Hörgerätetechnik bzw. -algorithmen und der objektiven Signalbeschreibung erforderlich. Erst danach lassen sich überarbeitete statistische Größen aus den vorliegenden Parametern der Hüllkurvenbeschreibung (Signalflankendauer, Pegeldifferenz, Signal- und Pausendauer) finden.

Mögliches Ziel nachfolgender Untersuchungen ist eine Kurvenschar zur Hüllkurvenstatistik ähnlich der bisherigen Überschreitungspegel. Es sind statistische Beschreibungsgrößen für den Zeitverlauf der Hüllkurve zu formulieren, die genügend sensitiv für die Veränderung der Hüllkurve durch Kompressionssysteme sind (vgl.[Sei-98]). Darüber hinaus ist die subjektive Wirksamkeit bei der Änderung dieser Größen nachzuweisen.

### *Signalbeschreibung zum gesamten Zeitausschnitt eines Klangbildes*

Es zeigt sich die Tendenz, daß für die Hörgeräteanpassung komplexe Klangbilder zunehmend Bedeutung erlangen. Sie bestehen aus mehreren Einzelsituationen, die inhaltlich zusammengehören und unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Solche Geräuschkompositionen lassen sich nur ungenügend durch eine Kurzzeitanalyse, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wird, beschreiben. Doch die einfache Verlängerung des Analysefensters reicht zur Lösung des Problems nicht aus, da gerade die speziellen Eigenschaften der Einzelsituationen verloren gehen. Vielmehr muß an dieser Stelle eine bessere Methodik der Beschreibung erarbeitet werden.

### *Subjektive Wahrnehmung (Lautstärke, Tonalität, Klangfarbe, Wichtigkeit)*

Die in dieser Arbeit gewonnenen Merkmale außer der 5%-Überschreitungs-lautheit stellen ausschließlich objektive Meßwerten dar. Die Gruppierung aller Klangbilder führt im Ergebnis zu einer Klassierung der einzelnen Merkmale, denen verbale Attribute zugeordnet wurden (z. B. Dynamik: stark, wenig, kaum dynamisch). Inwieweit diese Zuordnung von subjektiven Wahrnehmungen statistisch abgesichert sind, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Analysen gewesen, muß aber belegt werden. Ansätze zur Klangfarbenwahrnehmung zeichnen sich in [Fri-96] ab. Gleichfalls sind Untersuchungen zur Wahrnehmung der Lautheit [Noa-93] fortzusetzen und zur Tonalität und zur spektralen Wichtung durchzuführen.

### *Verbesserung der Klangbild-Bibliothek*

Sowohl aus der Häufigkeit der Benutzung bestimmter Klangbilder für die Hörgeräteanpassung und ihrer Bedeutsamkeit für den Hörgeschädigten als auch aus den Ergebnissen dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 5.3 mit den Tabellen 5-8 und 5-9) leiten sich Forderungen nach einer Erweiterung und Veränderung der Klangbild-Bibliothek ab. Dabei zeichnen sich neben inhaltlichen vor allem signalanalytische Schwerpunkte ab:

- Ersatz bzw. Erweiterung um Klangbilder, die dem Alltagsanspruch der Auswahl besser gerecht werden (Erfahrungsmuster breiter sozialer Schichten), z.B. im Arbeitsbereich die "Hobelbank" austauschen und ersetzen durch Freisprechtelefon, Vorzimmeranlage, Werkhalle, Tankstelle usw.,
- Problemhörbereiche der Kunden beachten,
- breitere Nutzung komplexer Klangbilder, d. h. inhaltlich zusammenhängender Einzelsituationen innerhalb eines Klangbildes (Einarbeitung tiefer und hoher Stimmen, Warnsignale, entfernte Sprache etc.)
- Ergänzung durch leicht reproduzierbare Klangbilder mit alltagstypischen Geräuschen oder markanten Vergleichsgeräuschen,
- Sprachklangbilder müssen für den Normalhörenden verständlich sein (Probleme bei "Geschäft" und "Bahnhofsdurchsage"),
- Überarbeitung der Sprachsignalklangbilder hinsichtlich Aufnahme- und Wiedergabeabstand und Richtcharakteristik wegen möglichst natürlicher subjektiver Wahrnehmung der Gesprächssituation bei der Wiedergabe,
- größere Auswahl vergleichbarer Sprachklangbilder, um einem Lerneffekt bei der Anpassung entgegenzuwirken,
- räumliche und visuelle Erweiterung der Darbietung,
- Ergänzungen im Wohnbereich: laute Geräusche, tonale Geräusche bei mittleren und hohen Frequenzen, weniger Betriebsgeräusche,
- Freizeit/Kultur: Klangbilder mit tonalen Anteilen, Situationen mit heller Klangcharakteristik, leise Geräusche, spezielle Klangbilder (Rockkonzert, Klassikkonzert, Gespräch in einer Gaststätte),
- Kommunalbereich: leises Klangbild, stark dynamische Situation, inhaltliche Ergänzungen, Komplexbild mit schrillen Signalen (z.B. Autohupe),
- Arbeitsbereich: wesentliche inhaltliche Ergänzungen (Sprache!), ruhige Arbeitsatmosphäre (<60 dB) / laute Arbeitsumgebung, Situation in Büro und Werkhalle, Kombination Sprache und Arbeitslärm, Betriebsgeräusche von Bürogeräten
- Natur: mittlere und laute Klangbilder, tonale Situationen, höhenbetonte Klangfarbe, Tiergeräusche, Gespräch,
- Schrille Signale: Klangbild mit hohem Anteil mittlerer Frequenzen, bremsender Zug,
- Sprache: laute und leise Passagen bei ruhiger Umgebung.

### *Richtungsabhängige Signalparameter*

Die Vorteile einer beidohrigen Hörgeräteversorgung liegen in der verbesserten Störgeräuschunterdrückung und der räumlichen Wahrnehmung. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Hörgeräteanpassung mit natürlichen Klangbildern für die binaurale Versorgung werden ergänzende Anforderungen an die Signalanalyse gestellt. Während sich die bisherige Auswertung eines Mono-Signals bedient, werden zukünftig beide Stereo-Kanäle genutzt werden müssen, um Angaben zur Richtungsbestimmung und zur Unterscheidung von diffusem und gerichtetem Schalleinfall zu gewinnen.

## 6 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Analyse akustischer Signale, die als natürliche Klangbilder Basis eines Verfahrens zur Hörgeräteanpassung sind. Grundidee dieses Verfahrens ist die Verwendung natürlicher akustischer Reize als Testsignale während der gesamten Anpassung: bei der Gerätevorauswahl, der Voreinstellung und der Feinanpassung. Damit werden eine höhere Qualität und Akzeptanz der Hörgeräteversorgung angestrebt.

Für den Einsatz natürlicher Klangbilder über die reine Kontrollfunktion hinaus ist es erforderlich, wesentliche Eigenschaften zu kennen und weitgehend objektiv zu beschreiben. Dieses Kenntnis ist Voraussetzung dafür, daß zur Funktionsprüfung des Systems Hörgerät-Ohr-akustische Wahrnehmung geeignete Testsätze mit fehlerrelevanten Signalpegeln extrahiert werden können und in einem Abgleichverfahren die Hörereinstellung erlauben.

Da die Signale als quasistationär betrachtet werden, lassen sich nur statistische Aussagen über ihre Eigenschaften gewinnen. Unter Beachtung der speziellen Anforderungen bei der Untersuchung von Sprachsignalen und den technischen Möglichkeiten moderner Hörsysteme werden Algorithmen zur Signalanalyse in Frequenz- und Zeitbereich entworfen. Besonderes Augenmerk liegt auf der Interpretierbarkeit der gewählten Signalparameter. Doch auch akustische Grundgrößen und die an der Wahrnehmung des Menschen orientierte Lautheit finden Berücksichtigung.

Gegenstand der Untersuchungen sind 73 ausgewählte natürliche Klangbilder aus dem Alltagsgeschehen, die zur Anpassung von Hörgeräten verwendet werden. Signalausschnitte mit einer Dauer von i. a. 4,5 s gehen in die Analyse ein. Nach Durchlaufen einer Terzfilterbank sind die berechneten Pegelhäufigkeiten Basis der gesuchten Signalparameter, insbesondere von Überschreitungspiegeln. Sie gestatten es, Aussagen zu Lautstärke, Klang, Dynamik und Tonalität jedes Klangbildes zu treffen.

Für eine gezielte Beeinflussung von Dynamikkompressionssystemen werden Auswertungen des Pegel-Zeit-Verlaufes der Hüllkurve des Signals in drei Bändern des Hörfrequenzbereiches vorgenommen. In den Algorithmen finden Anstiegs- und Abfallzeiten, Pegeldifferenzen und Signalpausen Berücksichtigung. Die noch weit verbreitete analoge Schaltungstechnik in Hörgeräten ist hinsichtlich ihrer Wirkung auf die genannten Größen weder einheitlich noch ausreichend von den Produzenten untersucht. Es ist aber zu erwarten, daß gerade im Hinblick auf die Entwicklung digitaler Signalverarbeitungsalgorithmen in Hörgeräten und deren Parameterwahl während des Anpassvorganges eine statistische Aufarbeitung des Hüllkurven-Zeit-Verlaufes notwendig wird.

Unter Verwendung der Faktorenanalyse werden aus den bisher diskutierten und genutzten Kenngrößen Parameter extrahiert, die die untersuchten Klangbilder in wesentlichen Eigenschaften objektiv zu unterscheiden gestatten und beschreiben. Die darauf aufbauende Clusteranalyse liefert die Informationen für die Bildung von Gruppen aus signalanalytischer Sicht, die jeweils ähnliche Klangbilder zusammenfassen. Vor dem Einsatz dieser statistischen Verfahren wurden mögliche Methoden zur Signal- und Objektklassifikation vergleichend untersucht.

Dem gegenüber steht eine inhaltliche Gruppenbildung. Sie berücksichtigt im wesentlichen die Lebensbereiche und akustischen Umgebungen. Aus der Gegenüberstellung beider Strukturen wird in dieser Arbeit eine Wissensbasis entwickelt, die den gezielten Einsatz spezieller natürlicher Testsignale zur Anpassung einzelner technischer Geräteparameter und für ausgewählte Situationen unterstützt. Außerdem werden Repräsentanten der inhaltlichen Gruppenstruktur aus

ihren objektiven, analytischen Eigenschaften heraus ausgewählt. Sie gestatten es, spezielle Anforderungen aus der Umwelt des Hörgeräteträgers zu berücksichtigen.

In der Praxis konnte die Applikationsfähigkeit der Resultate der dargestellten Signalanalyse nachgewiesen werden. Die Mehrzahl der beschriebenen Ergebnisse wurden bereits in den datenverarbeitenden Teil eines Anpaßverfahrens für Hörgeräte bei Verwendung natürlicher Klangbilder (A-Life® 9000) übernommen. In über 60 Studios von Hörgeräteakustikern konnten seit Einführung im Sommer 1996 rund 30.000 Versorgungen nur auf Basis dieses Verfahrens realisiert werden. Die Resultate in [Hau-96] und [Gee-97] bestätigen die Richtigkeit des beschrittenen Weges. Das Anpaßverfahren wird von allen Beteiligten akzeptiert, aktiviert das bewußte und kritische Hören der Kunden, verbessert das Vertrauen in die Ergebnisse der Hörgeräteanpassung und erleichtert dem Akustiker den Umgang mit moderner Hörtechnik. Die Vielzahl von Anfragen zur Methode und den Erfahrungen mit A-Life bestätigen das nationale und internationale Interesse der Industrie, medizinischer Einrichtungen und des Handwerks.

Aus dem Einsatz in der Hörgeräteakustik konnten neue Erkenntnisse hinsichtlich weiterer Anforderungen abgeleitet werden. Das betrifft z. B. die Untersuchung langer (< 120 s) Zeitausschnitte, die Zusammenhänge mit subjektiven Empfindungsgrößen bei Normal- und Schwerhörigen, die Ergänzungen der Klangbibliothek und die verbesserte Erfassung der signalverändernden Wirkung von Kompressionsystemen, alles Aufgaben für die zukünftige Fortsetzung der Forschungsarbeiten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung dieses neuartigen Anpaßverfahrens mit natürlichen Klangbildern dar, welches schwerhörigen Personen mit gut angepaßten Hörgeräten das Leben mit ihrer Kommunikationsstörung erleichtern soll.



## 7 Literaturverzeichnis

- [Att-91] Attia, F. S.: *Lautheit - dB(A) Vergleichsmessungen an technischen Schallsignalen*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1991, S. 529-532
- [Aur-84] Aures, W.: *Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale - Ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse*. Diss., Techn. Univ. München 1984
- [Ban-91] Banerjee, B. M.: *The Acoustical Character of Sounds from Indian Twin Drums*. In: *Acustica* 75(1991), S. 206-208
- [Ber-85] Berger, K. W.: *Ein Verfahren zur Hörgeräte-Vorauswahl*. In: *Audio-Technik* (1985) 34
- [Bes-89] Best, Roland: *Digitale Signalverarbeitung und -simulation*. Aarau: AT Verlag 1989.
- [Bis-71] Bismarck, G. v.: *Extraktion und Messung von Merkmalen der Klangfarbenwahrnehmung stationärer Schalle*. Diss., Techn. Univ. München 1971
- [Boc-74] Bock, H. H.: *Automatische Klassifikation*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 1974
- [Bru-85] Bruns, P./ Phillip, J. E.: *Automatische Grundfrequenzanalyse von Musik und Sprache*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1985, S. 599-602
- [Byr-86] Byrne, O.; Dillion, H.: *The national acoustic laboratories (NAL) new procedure for selecting the gain and frequency-response for a hearing aid*. *Ear and Hearing* 7, S. 257-265
- [Car-46] Carhart, R.: *Selection of hearing aids*. In: *Arch Otolaryngol* 44(1946), S. 1-18.
- [Car-92] Cartinhour, J.: *An interactive time-frequency domain algorithm for reduction of peak-to-rms ratio*. In: *Digital Signal Processing* (1992), S. 236-241
- [Can-83] McCandles, M./Lyregaard, P. E.: *Prescription of gain / output (POGO) for hearing aids*. In: *Hearing Instruments* 34(1983), S. 16-21
- [CCITT] CCITT G.227: *Konventionelles Fernsprechsinal*. ITU Internationale Fernmeldeunion 1988
- [Dan-92] Daniel, P./ Weber, R.: *Berechnete Rauhigkeit von natürlichen und generierten Schallen*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1992, S. 909-912
- [Dan-93] Daniel, P./ Weber, R.: *Zur Modellierung der Psychoakustischen Rauhigkeit*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1993, S. 844-847
- [Dau-95] Dau, T./ Kohlrausch, A.: *Modulationsfilterbank versus Modulationstiefpaß*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1995, S.803-806
- [Dau-98] Dau, T.: *Modell der effektiven Signalverarbeitung im menschlichen Gehör*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1998, S.61f.
- [Die-94] Dieroff, H.-G.: *Lärmschwerhörigkeit*. 3. Aufl. Jena, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag 1994
- [DIN260] DIN EN 61260: *Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven*. Deutsche Fassung der Internationalen Norm IEC 1260, 1995

- [DIN631] DIN 45631: *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum*. Deutsche Norm 1991
- [DIN641] DIN 45641: *Mittelung von Schallpegeln*. Deutsche Norm 1990
- [DIN645] DIN 45645-1: *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen*. Deutsche Norm 1996
- [DIN651] DIN IEC 651: *Schallpegelmesser*. Internationale Norm 1981
- [DIN667] DIN 45667: *Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen*. Deutsche Norm 1969
- [DIN681] DIN 45681: *Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen*. Deutsche Norm 1992
- [Doh-96] Doherty, K. A./ Lutfi, R. A.: *Spectral weights for overall level discrimination in listeners with sensorineural hearing loss*. In: J. Acoust. Soc. America 99(1996) H. 2, S. 1053-1058
- [Dün-90] Dünnwald, H.: *Ein erweitertes Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen*. In: Acustica 71(1990), S. 269-276
- [Eit-90] Eitner, J.: *Zur Psychologie und Soziologie Hörbehinderter*. 1. Aufl. Heidelberg: median 1990
- [Fas-75] Fastl, H.: *Mithörschwelle und subjektive Dauer*. In: Acustica 32(1975), S. 288-290
- [Fas-82] Fastl, H.: *Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern*. Freiburg (Breisgau): Hochschulverlag 1982
- [Fas-93] Fastl, H.: *Zur Verständlichkeit von Ein-/Dreisilbern im Störgeräusch*. 20. Kolloquium audiologisch tätiger Physiker und Ingenieure, Erlangen 1993
- [Fed-90] Fedtke, T./Fuder, G./Hamann, D./Haubold, J./Krüger, U.: *Hörgeräteanpassung mit natürlichen Klangbildern*. Studie, Technische Univ. Dresden 1990
- [Fes-83] Festen, J. M./ Plomp, R.: *Relations between auditory functions in impaired hearing*. In: J. Acoust. Soc. America 73(1983) H. 2, S. 652-662
- [Flo-96] Florentine, M./ Buus, S./ Poulsen, T.: *Temporal integration of loudness as a function of level*. In: J. Acoust. Soc. America 99(1996) H. 3, S. 1633-1644
- [Fow-37] Fowler, E. P.: *Measuring the sensation of loudness*. In: Arch. Otolaryng. 26(1937), S. 514-521
- [Fri-96] Fritzsche, C.: *Untersuchungen zur Klangfarbe bandbegrenzter Audiosignale*. Diplomarbeit, Technische Univ. Dresden 1996
- [Frü-87] Frühauf, U.: *Automatische Meß- und Prüftechnik*. Berlin: Verlag Technik, 1987
- [Fud-95] Fuder, G./ Haubold, J.: *Hörgeräteanpassung mit natürlichen Klangbildern*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1995, S. 939-942
- [Gee-97] *A-Life 9000 - Abschlußbericht zum wissenschaftlichen Modellversuch in Essen, Kreuzeskirchstraße 8*. Bericht der Geers Hörakustik GmbH & Co. KG, Dortmund 1997
- [Güt-78] Güttner, W.: *Hörgerätetechnik*. Stuttgart: Georg-Thieme-Verlag 1978

- [Hau-88] Haubold, J.: *Grundlagen für die Dimensionierung von Hörgeräten zur optimalen Verbesserung des Sprachverständnisses*. Bericht 15/88, Technische Univ. Dresden, Fak. f. Elektrotechnik 1988
- [Hau-96] Haubold, J.: *A-Life 9000 - individuelle Optimierung von Hörsystemen unter Berücksichtigung der akustischen Umwelt*. In: HörBericht 60(1996)
- [Hel-87] Hellmann, R./ Zwicker, E.: *Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness?* In: J. Acoust. Soc. America 82(1987) H. 5, S. 1700-1704
- [Hel-93] Heldmann, K./ Keiper, W.: *Impulserkennung im Tonzeitmuster industrieller Schalle*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1993, S. 804-807
- [Hoh-90] Hohn, W.: *Anpassung von Dreikanaltechnik*. In: Hörakustik (1990) H. 8
- [Hut-98] Huth, Ch./ Schmid, W.: *Zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe mit und ohne Vibrato*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1998, S. 448f.
- [Jac-91] Jacobi, G. et al.: *Modell zur Analyse der Einhüllendenstruktur in Frequenzbändern*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1991, S. 497-500
- [Kab-93] Kabot, E./ Weber, R.: *Kategorial beurteilte Schärfe von künstlichen und natürlichen Schallen*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1993, S. 840-843
- [Kab-94] Kabot, E./ Weber, R.: *Der Einfluß der Bandbreite auf die Schärfeempfindung*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1994, S. 1029-1032
- [Kal-94] Kalivoda, M. T.: *Kennwerte für eine (wirkungsäquivalente) Dauerlautheit*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1994, S. 1097-1100
- [Kel-80] Keller, F. et al.: *Technische Hilfe bei der Rehabilitation Hörgeschädigter*. Berlin/Heidelberg: Springer, 1980
- [Kel-90] Keller, F.: *Audiologie*. Ausbildungskurs für Schweizer Hörgeräte-Akustiker, Stand 1987-1990
- [Kie-85] Kießling, J.: *Anpaßtechnik unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung von Hörhilfen*. FDH, Forschungsauftrag, Nr. 2, 1985
- [Kil-95] Killion, M. C.: *Lautheitsdatenbasis für 'FIG 6' Anpaßziele*. Vortrag. Hörgeräte-Akustiker-Kongreß Hamburg 1995
- [Kin-92] Kinkel, M. et al.: *Binaurales Hören bei Normalhörenden und Schwerhörigen*. In: Audiologische Akustik (1992) H. 1, S. 22-35
- [Kli-88] Klingholz, F.: *Sprachsignalstatistik zur Erfassung der Stimmgüte*. In: ITG-Fachbericht 105, Berlin/Offenbach: VDE-Verlag 1988
- [Kol-93] Kollmeier, B.: *Vergleich einiger sprachaudiometrischer Verfahren*. 20. Kolloquium audiologisch tätiger Physiker und Ingenieure, Erlangen 25./26.2.1993
- [Kol-97] *Hörflächenskalierung - Grundlagen und Anwendung der kategorialen Lautheitskalierung für Hördiagnostik und Hörgeräteversorgung*. Hrsg: Kollmeier, Birger, Heidelberg: Median-Verlag 1997
- [Kot-83] Kotterba, B.: *Eine Methode zur Merkmalsfindung für die Klassifikation von Geräuschen*. Diss., Techn. Univ. Berlin 1983

- [Kra-70] Kraak, W./ Weißing, H.: *Schallpegelmeßtechnik*. Berlin: Verlag Technik 1970
- [Kra-87] Kraak, W.: *Signalanalyse*. Lehrbriefsammlung, Techn. Univ. Dresden 1987
- [Lan-84] Langhans, T.: *Modulationswahrnehmung bei Innenohrschwerhörigkeit und Entwicklung eines Filterverfahrens zur Erhöhung der Sprachverständlichkeit*. Diss., Georg-August-Univ. zu Göttingen 1984
- [Lan-91] Langhans, A.: *Zur Frequenzabhängigkeit der Nachverdeckung*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1991, S. 561-564
- [Lew-83] Lewien, T.: *Filterung von Spracheinhüllenden zur Verständlichkeitsverbesserung bei Innenohrschwerhörigkeit*. Diss., Georg-August-Univ. zu Göttingen 1983
- [Noa-93] Noack, T.: *Natürliche Klangbilder zur Hörgeräteanpassung*. Diplomarbeit, Techn. Univ. Dresden 1993
- [Mün-93] Münkner, S./Püschel, D.: *Ein psychoakustisches Modell zur Simulation von Zeitauflösungsexperimenten*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1993, S. 796-799
- [Püs-94] Püschel, D./ Koch, R.: *Differenzierte Schallanalyse mit einem Verarbeitungsmodell des menschlichen Gehörs*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1994, S. 1069-1072
- [Rec-93] Reckhardt, C. et al.: *Analyse der Geräuschqualität durch Synthese*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1993, S. 860-863
- [Rec-94] Reckhardt, C. et al.: *Interaktive Analyse von Geräuschqualitäten*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1994, S. 1213-1216
- [Rei-68] Reichardt, W.: *Grundlagen der Technischen Akustik*. Leipzig: Akad. Verlagsges. Geest & Portig KG 1968
- [Ric-90] Richtberg, W.: *Was schwerhörig sein bedeutet*. Schriftenreihe für den HNO-Arzt, KIND-Hörgeräte (Hrsg.). 1. Aufl. 1990
- [Sac-88] Sachs, L.: *Statistische Methoden: Planung und Auswertung*. 6. Aufl. Berlin / Heidelberg: Springer 1988
- [Sch-78] Schöne, P.: *Vergleich dreier Funktionsschemata der akustischen Schwankungsstärke*. In: Biol. Cybernetics 29(1978), S. 57-62
- [Sch-98] Schmid, W./ Chalupper, J.: *Spektraltonhöhen komplexer Töne: Psychoakustische Experimente und Berechnung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1998, S. 480f.
- [Sei-93] Seidler, H./ Fuder, G.; Haubold, J.: *Signalanalytische Untersuchungen natürlicher Klangbilder*. Vortrag. 20. Kolloquium audiologisch tätiger Physiker und Ingenieure, Erlangen 25./26.2.1993
- [Sei-94] Seidler, H./ Fuder, G.: *Hüllkurvenbildung des Schalldruck-Zeit-Verlaufs natürlicher Klangbilder zur Hörgeräteanpassung*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1994, S. 1417-1420
- [Sei-96] Seidler, H.: *Signalanalyse natürlicher Klangbilder für die Hörgeräteanpassung*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1996, S. 140f.
- [Sei-98] Seidler, H./ Pietzsch T.: *Analyse von Zeitstrukturen natürlicher Klangbilder*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1998, S. 126f.

- [Ses-96] Sesterhenn, G./ Arold, R./ Boppert, R.: *Zur Wertigkeit des Frequenzganges für die Hörgeräteanpassung*. In: *Audiologische Akustik* 35(1996) H. 4, S.146-155
- [Sil-93] Silzle, A./Theile, G.: *Codierung mehrkanaliger stereofoner Signale auf der Basis der peripheren Hüllkurvenbildung*. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 1993*, S. 924-927
- [Sot-93] Sottek, R.: *Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör*. Diss. RTWH Aachen 1993
- [Sot-94] Sottek, R./Vranken, P./Kaiser, H.-J.: *Anwendung der gehörgerechten Rauigkeitsberechnung*. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 1994*, S. 1201-1204
- [Sot-95] Sottek, R./Vranken, P./Kaiser, H.-J.: *Ein Modell zur Berechnung der Impulshaltigkeit*. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 1995*, S. 791-794
- [Spä-75] Späth, H.: *Cluster-Analyse-Algorithmen zur Objektklassifizierung und Datenreduktion*. München/Wien: R. Oldenbourg 1975
- [Sto-95] Stock, A./Fichtl, E./Heller, O.: *Positive und negative Aspekte des Hörgerätetragens - eine epidemiologische Studie*. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 1995*, S. 195-198
- [Tas-84] *Taschenbuch Akustik*. Hrsg: Fasold, W./Kraak, W./Schirmer, W, Berlin: Verlag Technik 1984
- [Ter-68] Terhardt, E.: *Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke*. In: *Acustica* 20(1968), S. 215-224
- [Ter-74] Terhardt, E.: *On the perception of periodic sound fluctuations (roughness)*. In: *Acustica* 30(1974), S. 201-213
- [Ter-85] Terhardt, E.: *Fourier Transformation of Time Signals: Conceptual Revision*. In: *Acustica* 57(1985) H. 4/5, S. 242-256
- [Ver-94] Verhey, J./ Püschel, D.: *Simulation zeitlicher Verdeckungsexperimente mit einem physiologisch motivierten Haarzellenmodell*. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 1994*, S. 1065-1068
- [Vog-74] Vogel, A.: *Ein gemeinsames Funktionsschema zur Beschreibung der Lautheit und der Rauigkeit*. Diss., Techn. Univ. München 1974
- [Web-74] Weber, E.: *Einführung in die Faktorenanalyse*. 1. Aufl. Jena: Gustav Fischer 1974
- [Web-93] Weber, R.: *Wirkungsanalysen von psychoakustischen Größen mit Beitragsdiagrammen*. In: *Fortschritte der Akustik DAGA 1993*, S. 856-859
- [Wed-82a] Wedel, H. v./Opitz: *Einfluß des zeitlichen Auflösungsvermögens auf Selektionsstörungen des Gehörs*. Opladen: Westdeutscher Verlag 1982
- [Wed-82b] Wedel, H. v.: *Einfluß und Bedeutung der Zeitmusteranalyse für die phonetische Versorgung des Hörorgans*. In: *Audiologische Akustik* (1982) H. 9, S. 150-158
- [Wei-93] Weise, F.: *Signalanalyse für Hörgeräteakustik*. Diplomarb. Techn. Univ. Dresden, 1993
- [Wes-95] Westhofen, Martin: *Welche Hörprobleme sind apparativ zu bewältigen*. Vortrag. Hörgeräte-Akustiker-Kongreß Hamburg 1995

- [Wid-95] Widmann, U.: *Subjektive Beurteilung der Lautheit und der psychoakustischen Lästigkeit von PKW-Geräuschen*. In: Fortschritte der Akustik DAGA 1995, S. 875-878
- [Wol-86] Wolf, A.: *Einfluß der Dynamikkompression verstärkter Schallsignale auf das Sprachverständnis Innenohrschwerhöriger mit Recruitment*. Diss., Techn. Univ. Dresden 1986
- [Wun-85] Wunsch, G./ Schreiber, H.: *Analoge Systeme*. Berlin: Verlag Technik 1985 .
- [Zol-92] Zollner, M.: *Die psychoakustische Rauigkeit - ein neues Qualitätskriterium für KFZ-Motoren*. Informationsmaterial Cortex electronic, 1992
- [Zwi-67] Zwicker, E./ Feldtkeller, R.: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. Stuttgart: Hirzel 1967
- [Zwi-70] Zwicker, E.: *Subjektive und objektive Dauer von Schallimpulsen und Schallpausen*. In: *Acustica* 22(1970), S. 214-218
- [Zwi-82] Zwicker, E.: *Psychoakustik*. Berlin/Heidelberg: Springer 1982
- [Zwi-90] Zwicker, E., Fastl, H.: *Psychoacoustics*. Berlin/Heidelberg: Springer 1990

## Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

A	Filterdämpfung; Mittelwertabweichung (Definition in Abschnitt 5.1.1)
$\Delta A$	relative Dämpfung
$a_n$	Koeffizient
b	Klassenbreite
B	Bandbreite
$\Delta B$	integrierte Filterantwort
f	Frequenz; Funktion
$G_S$	Korrekturfaktor
H	Summenhäufigkeit
$h^2$	Kommunalität, Bindungssumme
$h_j$	Häufigkeitsverteilung
$I_{90}$	Interquantilbereich $I_{90} = L_5 - L_{50}$
i, j	Laufindex
k	Konstante; Silbenverständlichkeitsfaktor; Kompressionsfaktor; Klassenzahl
L	Schalldruckpegel
$L_A$	A-bewerteter Schalldruckpegel
$L_{Aeq}$	A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel
$L_{eq}$	äquivalenter Dauerschalldruckpegel
$L_m$	Mittelungspegel
$L_{PC}$	Einsatzpegel einer Begrenzerschaltung
$L_R$	Regeleinsatzpegel einer AGC
$L_s$	Überschreitungspegel
$\Delta L_A$	Korrekturfaktor für die A-Bewertung
l	Laufindex
M	Mittelwertedifferenz $M = L_m - L_{50}$
m	Zahl der Variablen
N	Lautheit; Anzahl der Abtastwerte
$N_s$	Überschreitungs Lautheit
n	Anzahl; Zahl der Objekte
p	Druck, hier: Schalldruck
QF	quadratischer Fehler
q	Halbierungsparameter (für äquivalenten Dauerschalldruckpegel)
$s^2$	Varianz
T	Zeitmenge; Zeitdauer; Periodendauer
$T_{\%}$	normierte Tonalität (Definition in Abschnitt 5.1.1)
t	Zeit
u	Spannung
V	Variation (Kombinatorik)
v	Verstärkung
$\underline{X}$	Koeffizient der FOURIER-Transformation
x	Meßgröße
$\varepsilon$	Fehlerschranke
$\mu$	Zugehörigkeitsfunktion
$\tau$	Zeitverschiebung
$\varphi, \psi$	Funktionen
$\omega$	Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$

## **Anhang**



**Inhaltsverzeichnis des Anhangs**

- Anhang A Liste der untersuchten Klangbilder
- Anhang B Beschreibung der analysierten Zeitfenster aus den Klangbildern
- Anhang C Signalanalysedaten des Gesamtsignals und der Frequenzkanäle Tiefen, Mitten, Höhen
- Anhang D Konzentrierte Parameter aller Klangbilder nach Abschnitt 5.1.3  
numerische Darstellung / grafische Darstellung
- Anhang E Vollständige Ergebnisse der Faktorenanalyse aus Abschnitt 5.1.3
- Anhang F Häufigkeitsverteilung mit Angabe ausgewählter Perzentile für wesentliche signalanalytische Parameter
- Anhang G Zuordnung von Klangbild-Cluster und Analysedaten

## Anhang A

### Liste der untersuchten Klangbilder

#### Kalibrieren

01 CCITT- Rauschen

#### Wohnbereich

- 02 Schritte im Treppenhaus
- 03 Tür aufschließen und zuschließen
- 04 Türklingel (Ding Dong)
- 05 Ticken von Uhren
- 06 Staubsauger
- 07 Geschirrkloppern
- 08 Besteckklappern
- 09 Abspülen- Geschirr aufräumen
- 10 Flasche öffnen, Eingießen
- 11 Brat- und Brutzelgeräusche (Küche)
- 12 Mixer
- 13 Hände waschen
- 14 Dusche
- 15 Fön
- 16 Toilettenspülung
- 17 Waschmaschine, Schleudern
- 18 Fernsehen ohne Hintergrundgeräusch
- 19 Radio- Verkehrsdurchsage
- 20 Wechselsprechanlage
- 21 Unterhaltung in der Wohnung
- 22 Telefongespräch

#### Freizeit- und Kulturbereich

- 23 Publikumsgeräusche im Theater
- 24 Orchester
- 25 Atmosphäre beim Volksfest
- 26 Atmosphäre im Stadion
- 27 Beifall im Theater
- 28 Chorgesang im Freien
- 29 Ansage im Freien
- 30 Stadionsdurchsage
- 31 Sprecher im Theater
- 32 Kino
- 33 Kino, Nebengeräusche
- 34 Partygespräch

#### Kommunalbereich

- 35 Straßenbahn hält und fährt an
- 36 Bus hält und fährt an
- 37 Verkehrsgeräusche

- 38 Verkehrsgeräusche an einer Ampel
- 39 Straßenbahnnengeräusche
- 40 Businnengeräusche
- 41 Autoinnengeräusche
- 42 Vorbeifahrender Zug
- 43 Zuginnengeräusche
- 44 U- Bahn hält und fährt an
- 45 S- Bahn hält und fährt an
- 46 Fahrradklingel
- 47 Bahnhofsdurchsage
- 48 Unterhaltung im Bus
- 49 Unterhaltung in der Straßenbahn
- 50 Unterhaltung im Auto
- 51 Unterhaltung an der Straße
- 52 Abfertigungsgeräusche auf dem Bahnhof

#### **Arbeitsbereich**

- 53 Atmosphäre auf einer Baustelle
- 54 Hobelbank in einer Tischlerei
- 55 Hämmern
- 56 Bohren in Holz
- 57 Sägen von Holz
- 58 Geräusche im Supermarkt
- 59 Geräusche im Kindergarten
- 60 Mechanische Schreibmaschine
- 61 Computerdrucker
- 62 Papier rascheln
- 63 Atmosphäre im Geschäft

#### **Natur**

- 64 Morgenatmosphäre
- 65 Atmosphäre am See
- 66 Vorbeifahrendes Schiff
- 67 Hinterhofatmosphäre

#### **Sprecher, ungestört**

- 22 Telefongespräch
- 31 Sprecher im Theater
- 68 Vortrag

#### **Sprecher, gestört**

- 20 Wechselsprechanlage
- 21 Unterhaltung in der Wohnung
- 29 Ansage im Freien
- 30 Stadiondurchsage
- 34 Partygespräch
- 47 Bahnhofsdurchsage
- 48 Unterhaltung im Bus
- 49 Unterhaltung in der Straßenbahn

- 
- 50 Unterhaltung im Auto
  - 51 Unterhaltung an der Straße

**Warnsignale**

- 04 Türklingel (Ding Dong)
- 69 Telefonklingel
- 70 Sirene
- 71 Martinshorn
- 72 Mechanischer Wecker
- 73 Autohupe
- 74 Startschuß

## Anhang B

### Beschreibung der analysierten Zeitfenster aus den Klangbildern

- 1 sprachsimulierendes Rauschen
- 2 Treppensteigen direkt vor dem Hörerstandort
- 3 Tür aufschließen, zweimal Füße abstreichen
- 4 Zweitongong zweimal kurz hintereinander
- 5 Pendel und Ticken einer Wanduhr
- 6 Dauergeräusch
- 7 Eierbecher abstellen, Tassen nehmen und abstellen, Untertasse nehmen
- 8 Besteck aus der Spüle in eine Schublade legen
- 9 Gegenstände in eine Schublade legen, Gastherme einschalten
- 10 Mineralwasser eingießen
- 11 Abwaschen unter fließendem Wasser
- 12 Mixen mit Anschlagen an der Gefäßwand
- 13 Hände einseifen und abspülen
- 14 Wasserhahn der Dusche abdrehen, Nachtropfen
- 15 Dauergeräusch
- 16 Dauergeräusch
- 17 Dauergeräusch
- 18 w: "Wir haben einen langen Tag vor uns.", Geige spielt, w: "Gute Nacht, Jim."
- 19 Erkennungsmelodie, w: "Zwei Minuten vor elf. NRS2-Verkehrsservice. Sachsen-Anhalt A2 ..."
- 20 m: "Ja, schönen guten Tag. Deutsche Post. Bin ich da richtig bei Schröder?", w: "Ja?"
- 21 m1: "Dann kann ich ja morgen auch mit Fahrrad zur Arbeit fahren.", m2: "Kanns'te machen."
- 22 m: "Hat geklappt! Na, hervorragend!"
- 23 Publikumsgeräusche, Blasinstrumente im Hintergrund
- 24 tänzerische Passage mit vollem Orchester (viel Blech)
- 25 zweimal Trompete, dann 3 Mal zusammen mit Pauken und anderen Bläsern
- 26a Startschuß
- 26b m: "Das war ein gelungener Startversuch.", währenddessen Beifall
- 27 kräftiger Beifall
- 28 Chor: "Aber die musica, aber die mu..."
- 29 m: "Na, obwohl der Chor, den ich Ihnen jetzt vorstelle, im Jahre 1994 vier ..."
- 30 m: "Auf Bahn 4: Katrin Krabbe, Sportclub Neubrandenburg ..."
- 31 m: "Und nun möchte ich ein kleines Liedchen zum Vortrag bringen."
- 32 m: "Eigentlich nicht, nur in Momenten von Existenzangst, oder um eine schöne Frau zu beeindrucken."
- 33 Lachen des Publikums, m: "Was ..."
- 34a m1: "... jetzt schon.", m2: "Schöne Musik, haben sie recht.", m1: "Herrliche dezente Musik, im Hintergrund..."
- 34b Hintergrundmusik, entfernte Gespräche
- 35 Straßenbahn hält, Fahrwerkgeräusche als rumpeln
- 36a bremsender Bus, Bremsen quietschen
- 36b anfahrender Bus
- 37 mäßig befahrenen Straße, Autovorbeifahrt

- 38 LKW-Vorbeifahrt
- 39 Straßenbahn fährt über Kreuzung, Mitklappern der Sitze
- 40 fahrender Bus (3. Gang)
- 41 Autoinnengeräusche beim Anfahren
- 42 Vorbeifahrt einer Güterzuglok
- 43 Fahrgeräusche, Schienenstöße
- 44a Bremsende U-Bahn, Quietschen und Zischen der Türöffner
- 44b Hintergrundgeräusche auf dem Bahnsteig
- 44c Warnton der U-Bahn vor dem Schließen der Türen
- 44d Klappen der Türen
- 45a m: "Bahnhof Lichtenberg, Zug auf Gleis 1 nach Wartenberg"
- 45b Ausfahrt der S-Bahn
- 46 zweimal Fahrradklingel
- 47 w: "Übergangsreisende zu Nahverkehrszug nach Riesa über Cossebaude 6:11 ..."
- 48 m1: "Und für wen haben sie die schönen Blumen?", m2: "Ich fahr' zum Geburtstag. Kennen sie übrigens auch ..."
- 49 m: "Das nimmt sich nicht viel. Wenn Sie zu Fuß gehen, können sie nach der zweiten Station aussteigen ..."
- 50 m1: "Wo muß ich da lang? Links oder rechts?", m2: "Soviel ich weiß, müssen wir rechts abbiegen."
- 51 m1: "Eisenbahnbrücken. Ja.", m2: "Das ist die Hauptstraße?", m1: "Das ist die Hauptstraße.", m2: "Da bin ich schon mal langgefahren ..."
- 52 Laufgeräusche von Personen, eine Kindergruppe erkennbar
- 53 Jaulen eines Baukrans, Säge im Hintergrund
- 54 arbeitende Hobelmaschine in einer Tischlerei
- 55a Hämmern auf einem Amboß
- 55b m: "Wer? Ihr bekommt alle 'nen Gummihammer." (leise)
- 56 Handbohrmaschine
- 57 Holz mit Fuchsschwanz sägen
- 58 Flaschenklappern, Personen reden, Tastengeräusch der Kasse
- 59 Kind: "Wann gehst du wieder nach Hause?", w: "Gar nicht."
- 60 zügiges Schreiben auf der Maschine
- 61 Nadeldrucker
- 62 Papier wird sortiert
- 63a Kleingeld suchen
- 63b Rasseln des Kassendruckers
- 63c Kleingeld in die Kasse fallen lassen
- 64d m: "Am besten wären 90 Pfennig ..."
- 65 leises Vogelzwitschern und Plätschern von Wasser
- 66 Dröhnen eines entfernten Schiffes, Plätschern von Wasser am Ufer
- 67 Hahn kräht, Vögel zwitschern
- 68 m: "Das ist kein Text aus ..." (sehr langsam)
- 69 mechanische Telefonklingel
- 70 Dauerton einer Betriebssirene
- 71a näher kommende Feuerwehr, Vorbeifahrt eines Autos
- 71b direkte Vorbeifahrt der Feuerwehr mit Sondersignal
- 72 Klingeln eines mechanischen Weckers
- 73 lang anhaltendes Hupen
- 74 Startschuß (ein Mal mit zwei dichten Echos)

## Anhang C

### Signalanalysedaten des Gesamtsignals und der Frequenzkanäle Tiefen, Mitten, Höhen

Klangbild	ges	ges	ges	ges	ges	ges	ges	ges	ges	ges	ges	K1	K1	K1	K1
	L1	L5	L50	L95	Leq	LAeq	N	N5	N50	N95	L1	L5	L50	L95	
01 Rauschen	81,9	81,4	80,0	78,4	80,0	79,1	16,6					78,6	78,0	76,0	73,9
02 Schritte	72,3	68,7	48,7	37,0	61,0	59,4	2,7	7,6	1,8	0,4	70,0	66,2	47,0	34,4	
03 Aufschließen	68,7	62,4	49,3	36,8	56,3	56,3	2,2	5,2	1,9	0,4	62,1	55,0	41,8	31,7	
04 Türgong	78,4	76,0	64,9	20,3	70,4	69,7	4,2	9,9	3,6	0,9	70,0	65,8	57,0	6,4	
05 Uhrlicken	49,0	44,9	31,1	27,5	37,5	37,1	0,3	1,0	0,2	0,0	43,9	41,3	24,7	22,0	
06 Staubsauger	72,7	72,1	70,9	69,8	71,0	70,1	10,3	11,0	10,3	9,6	68,2	67,8	65,9	64,4	
07 Geschirr	83,2	75,2	54,4	30,8	70,8	70,2	3,9	10,6	2,8	0,1	80,0	68,9	47,9	25,2	
08 Besteck	80,5	76,3	51,8	27,5	68,7	68,2	4,4	13,8	2,8	0,0	70,9	66,8	46,5	20,8	
09 Abspülen	78,9	74,6	58,1	43,8	67,2	66,6	4,9	11,9	4,2	0,9	76,0	68,7	51,7	40,3	
10 Eingießen	50,2	47,9	40,9	24,6	42,7	42,6	0,7	1,2	0,7	0,0	42,4	39,2	30,4	14,8	
11 Braten	64,7	63,4	60,1	56,9	60,5	60,8	3,9	4,6	3,9	3,3	47,9	40,7	36,1	32,8	
12 Mixer	79,9	77,0	69,6	66,3	71,8	71,9	10,5	15,1	10,1	8,0	72,4	68,6	62,2	55,6	
13 Hände waschen	79,9	77,0	69,6	66,3	71,8	71,9	3,5	4,4	3,4	2,9	54,3	51,2	44,8	38,9	
14 Duschen	62,7	58,9	55,2	52,4	56,0	55,5	3,2	3,7	3,2	2,7	55,6	54,1	46,4	41,6	
15 Fön	64,5	63,6	62,1	60,2	62,1	62,6	5,2	5,4	5,2	4,9	57,4	56,0	53,0	50,3	
16 Toilette	69,2	66,7	61,2	49,7	62,2	62,1	5,2	7,2	5,4	1,9	66,1	63,2	52,1	40,4	
17 Waschmaschine	58,3	57,7	55,6	53,6	55,8	51,6	3,1	3,4	3,0	2,8	57,7	57,0	54,5	52,0	
18 Fernsehen	65,2	62,3	47,8	44,5	55,3	53,7	2,2	4,7	1,6	1,2	61,7	60,0	42,8	38,6	
19 Radio	66,5	64,3	56,0	45,8	58,5	54,1	2,5	4,2	2,3	1,1	66,5	64,2	54,6	43,0	
20 Wechselsprechanl.	80,9	78,9	60,7	35,3	71,2	69,9	4,7	11,3	4,5	0,4	80,0	77,5	50,0	28,2	
21 Unterhaltung	67,2	64,7	50,5	32,9	57,3	55,0	1,7	4,2	1,5	0,2	66,1	64,1	49,2	26,9	
22 Telefongespräch	75,5	68,4	43,2	26,5	62,6	61,4	2,0	6,5	0,9	0,0	70,9	67,0	34,5	20,6	
23 Theaterpublikum	69,1	68,1	64,4	61,6	64,9	62,6	6,0	6,8	5,9	5,1	68,4	67,2	62,5	59,4	
24 Orchester	87,5	85,9	81,7	76,6	82,3	81,7	18,8	23,0	18,8	14,5	83,9	79,9	75,7	70,2	
25 Volksfest	87,1	84,8	77,2	69,3	79,4	77,3	15,7	24,5	15,2	9,7	85,1	82,3	75,5	66,8	
26 Stadion	89,6	87,1	78,4	64,6	81,2	81,1	16,6	22,6	17,5	7,8	81,4	78,6	71,4	59,6	
27 Beifall	88,9	83,5	78,3	74,4	80,0	80,5	17,0	21,3	16,6	14,5	74,7	73,1	68,2	64,7	
28 Chorgesang	88,4	86,4	79,7	60,4	81,5	80,5	12,7	18,3	13,4	4,5	84,9	81,4	75,2	58,5	
29 Festansprache	83,2	80,5	67,6	54,2	73,5	70,8	7,2	13,1	6,8	2,5	82,6	80,0	66,5	53,0	
30 Stadionsdurchsage	86,2	84,5	69,4	48,6	77,4	76,4	8,4	16,7	8,1	1,5	84,2	80,2	67,5	46,5	
31 Schauspieler	67,6	65,5	56,5	44,2	59,6	57,9	3,1	5,5	2,9	0,8	66,1	62,7	54,8	42,8	
32 Kino	73,5	71,1	63,3	59,5	65,6	61,7	5,2	7,7	5,1	3,6	73,4	70,9	61,8	57,1	
33 Kino, gestört	76,0	72,9	62,5	50,0	67,2	64,2	5,4	10,1	4,9	1,7	75,3	71,9	61,1	48,8	
34 Partygespräch	80,5	77,1	66,8	60,5	70,7	67,7	7,0	10,0	6,8	4,4	80,0	76,9	65,7	59,2	
35 Straßenbahn	84,8	82,2	77,1	71,1	78,2	75,1	13,3	17,0	13,6	8,5	83,9	81,0	75,6	69,9	
36 Bus	88,7	83,7	71,6	68,0	78,2	79,0	12,0	17,5	10,4	8,2	70,0	69,2	67,3	64,5	
37 Verkehr	66,7	65,6	63,2	58,6	63,2	62,2	5,8	7,0	5,9	4,4	63,6	61,6	59,4	55,0	
38 Verkehr an Ampel	76,2	75,1	71,6	69,3	72,3	70,4	5,8	7,0	5,9	4,4	73,0	72,4	69,7	66,6	
39 Straßenbahn,innen	85,4	83,8	78,9	74,8	79,8	78,0	17,7	23,0	17,3	13,4	80,8	79,6	75,9	72,8	
40 Bus, innen	84,0	83,0	81,2	77,1	81,1	74,2	14,4	15,8	14,3	12,7	83,9	82,9	81,1	76,9	

Klangbild	K2	K2	K2	K2	K3	K3	K3	K3	K1	K2	K3
	L1	L5	L50	L95	L1	L5	L50	L95	Lm	Lm	Lm
01 Rauschen	79,9	79,2	76,9	74,4	72,5	71,6	69,0	66,0	76,2	77,1	69,2
02 Schritte	66,5	61,8	40,9	27,3	66,3	60,9	39,0	30,7	58,6	54,6	54,1
03 Aufschließen	63,4	55,3	41,9	28,8	66,0	59,9	45,4	31,4	48,5	50,0	54,1
04 Türgong	76,1	75,1	64,0	8,8	75,1	63,4	45,8	19,8	61,3	69,3	60,5
05 Urticken	43,2	37,0	24,6	19,6	47,2	38,9	27,7	23,2	32,5	30,8	34,2
06 Staubsauger	69,3	68,6	66,9	64,4	68,7	67,7	65,4	63,2	66,1	66,9	65,6
07 Geschirr	81,1	71,3	50,6	25,8	77,9	68,3	44,0	25,6	64,6	68,4	63,4
08 Besteck	70,4	67,2	46,6	19,6	79,8	74,6	48,0	24,1	59,5	59,7	67,5
09 Abspülen	72,8	68,3	51,4	38,0	75,3	69,3	52,5	33,6	62,8	60,8	63,2
10 Eingießen	48,6	45,8	36,6	15,2	47,3	43,7	36,2	22,8	33,6	39,7	38,4
11 Braten	50,4	48,2	44,4	40,9	64,6	63,3	59,9	56,5	37,9	45,1	60,4
12 Mixer	71,6	69,1	60,9	55,9	78,9	75,0	67,7	64,7	64,1	63,5	70,1
13 Hände waschen	58,0	55,2	50,4	46,5	64,3	60,3	53,6	49,7	46,4	51,5	55,8
14 Duschen	53,0	51,8	46,4	40,5	62,3	58,1	52,7	45,3	49,5	47,7	54,0
15 Fön	60,6	59,7	57,5	54,9	62,6	61,5	59,0	56,1	53,4	57,6	59,2
16 Toilette	64,5	60,8	53,8	44,4	65,4	63,2	58,6	46,1	56,2	55,7	59,4
17 Waschmaschine	49,1	47,3	44,4	41,7	49,3	48,4	46,6	44,8	54,8	44,8	46,8
18 Fernsehen	62,1	58,2	39,7	34,3	57,8	54,4	44,5	40,3	52,3	50,0	48,2
19 Radio	56,7	53,6	43,3	30,3	55,7	52,0	38,9	31,0	57,9	47,8	45,2
20 Wechselsprechanl.	79,2	73,9	48,9	28,8	68,7	66,0	47,8	28,2	69,1	66,6	58,7
21 Unterhaltung	62,2	56,9	37,3	22,5	51,0	46,7	36,6	26,2	56,4	49,3	41,0
22 Telefongespräch	72,1	61,8	34,0	18,6	63,6	54,2	33,6	22,9	60,4	58,1	49,4
23 Theaterpublikum	62,5	61,5	58,2	54,2	56,9	55,9	52,2	48,9	63,4	58,6	52,8
24 Orchester	86,8	84,7	78,9	72,0	77,8	75,6	70,8	64,8	76,7	80,4	71,8
25 Volksfest	81,9	79,2	69,6	60,5	78,9	76,6	67,9	60,0	77,5	72,9	70,5
26 Stadion	87,5	84,9	73,9	60,6	87,0	83,0	69,0	53,8	73,8	78,4	75,9
27 Beifall	85,1	80,1	74,8	70,7	86,4	80,9	73,9	69,5	69,3	76,4	76,7
28 Chorgesang	88,1	85,5	75,5	55,6	70,2	67,6	59,6	43,9	76,8	79,5	62,1
29 Festansprache	76,2	72,7	54,9	44,1	69,6	66,8	53,8	40,3	72,6	65,1	60,1
30 Stadionsdurchsage	85,4	82,8	62,6	42,2	70,1	67,9	56,5	36,1	73,7	74,9	61,5
31 Schauspieler	65,4	60,6	43,7	34,6	61,0	57,1	46,8	31,8	57,5	53,4	51,3
32 Kino	65,3	62,4	55,0	50,2	63,5	58,8	47,3	40,7	64,6	57,4	52,9
33 Kino, gestört	68,1	66,3	53,6	39,2	61,9	59,5	49,1	36,3	66,1	59,7	53,4
34 Partygespräch	70,8	65,6	56,2	50,5	64,8	61,4	52,3	44,1	70,1	60,1	55,7
35 Straßenbahn	79,4	77,4	70,1	58,1	68,3	66,2	61,9	52,7	76,8	72,1	62,4
36 Bus	68,9	67,3	64,4	61,5	88,6	83,5	65,8	57,8	67,4	64,8	77,6
37 Verkehr	63,8	62,4	59,1	53,5	61,0	59,1	54,7	50,1	59,4	59,3	55,4
38 Verkehr an Ampel	72,4	70,8	66,0	62,2	69,7	68,0	62,0	58,5	69,9	67,0	63,7
39 Straßenbahn,innen	83,5	80,5	74,0	67,4	77,5	75,4	69,9	64,4	76,6	75,7	71,1
40 Bus, innen	67,4	66,2	62,5	59,5	63,7	62,5	60,0	57,6	81,0	63,1	60,3



Klangbild	ges L1	ges L5	ges L50	ges L95	ges Leq	ges LAeq	ges N	ges N5	ges N50	ges N95	K1 L1	K1 L5	K1 L50	K1 L95
41 Auto, innen	73,0	71,7	66,5	61,2	67,7	62,3	5,1	6,9	5,2	3,2	72,9	71,6	66,3	60,9
42 Zug	85,5	84,6	82,3	77,7	82,3	80,3	20,8	23,6	21,5	16,2	84,2	82,8	80,0	75,6
43 Zug, innen	70,3	69,4	65,8	62,9	66,4	65,7	6,9	7,7	6,8	6,1	68,0	66,3	60,3	57,1
44 U-Bahn	80,2	78,1	72,2	65,9	73,7	74,4	10,0	12,3	10,0	7,8	71,8	69,2	61,8	57,1
45 S-Bahn	85,6	80,7	70,4	63,9	75,1	74,1	8,8	12,5	8,2	6,6	79,8	76,5	67,1	60,2
46 Fahrradklingel	72,2	68,4	48,5	44,2	60,7	59,8	2,2	4,3	1,9	1,1	48,0	46,7	44,0	41,1
47 Bahnhofsdurchsage	77,9	75,8	67,4	62,5	70,1	70,1	7,1	9,4	6,8	5,2	68,5	66,2	60,1	57,0
48 Gespräch im Bus	86,6	83,6	75,7	71,8	78,4	75,3	12,5	17,3	11,8	9,6	85,8	82,7	75,2	70,8
49 Gespräch in Bahn	96,4	94,7	84,0	78,5	88,5	85,7	22,7	35,5	21,7	15,2	96,2	93,9	83,1	76,7
50 Gespräch im Auto	85,4	83,1	70,9	59,2	76,1	74,6	9,1	17,7	8,6	2,9	84,8	79,8	69,5	58,4
51 Straßengespräch	85,5	81,4	70,4	57,8	75,9	74,3	9,2	16,5	8,2	4,3	84,7	79,4	69,4	52,9
52 Bahnhofshalle	69,6	67,8	65,3	62,9	65,6	63,9	6,3	7,6	6,3	5,3	67,7	66,3	62,6	59,8
53 Baustelle	75,2	70,8	62,6	58,8	65,3	65,5	5,9	8,1	5,7	4,3	62,2	61,1	57,9	54,6
54 Hobelbank	91,2	90,6	88,5	85,0	88,6	87,6	28,8	31,7	29,0	26,0	90,5	89,5	86,8	76,8
55 Hämmern	92,2	89,8	72,8	57,0	82,4	83,0	14,8	30,7	12,9	4,3	77,3	74,9	61,6	47,3
56 Bohren in Holz	84,7	83,0	77,3	73,8	78,7	79,4	15,2	17,8	15,2	12,7	65,6	64,5	60,3	55,9
57 Sägen von Holz	83,1	80,7	69,8	60,0	74,6	74,7	10,6	17,2	10,0	6,1	77,2	73,1	64,2	56,2
58 Großmarkt	67,4	63,9	57,1	53,3	59,2	58,2	3,7	4,8	3,5	2,8	64,4	60,6	54,5	49,6
59 Kindergarten	79,1	77,4	69,3	59,4	72,1	70,6	7,8	11,4	7,7	3,7	76,9	74,6	66,0	56,9
60 Schreibmaschine	81,1	74,6	62,1	50,1	68,6	69,1	6,2	9,3	6,1	3,1	58,7	57,1	52,0	42,9
61 Drucker	73,0	71,2	66,9	53,0	67,3	67,9	6,5	8,1	7,2	2,7	62,8	58,6	49,2	44,9
62 Papier rascheln	74,0	67,8	50,4	38,7	62,7	63,0	3,2	8,7	2,4	0,7	60,4	54,3	42,6	30,0
63 Geschäft	78,0	75,8	63,9	53,1	69,1	68,6	7,0	11,7	7,0	3,1	72,3	67,0	56,9	50,1
64 Morgenatmosphäre	59,6	58,0	51,4	49,2	53,1	52,5	2,2	3,0	2,1	1,7	52,2	51,2	48,6	46,3
65 Am See	44,8	42,4	37,4	34,4	38,6	37,5	0,4	0,7	0,4	0,2	44,0	39,4	32,3	28,7
66 See mit Schiff	54,9	54,2	52,6	50,6	52,7	48,7	1,9	2,2	1,9	1,7	53,9	53,3	51,5	49,5
67 ländl. Hinterhof	58,5	56,9	52,2	45,1	52,9	53,1	2,1	3,0	2,2	1,3	49,4	48,1	44,5	41,0
68 Vortrag	65,8	63,8	49,9	34,9	57,2	53,7	1,8	3,9	1,5	0,3	65,5	63,6	48,6	31,7
69 Telefonklingel	73,3	72,2	67,6	56,5	68,3	67,8	5,7	6,7	6,0	2,9	53,1	51,2	46,4	23,1
70 Sirene	83,9	83,8	82,8	81,8	82,8	80,6	19,3	20,3	19,4	18,4	81,8	81,5	80,4	79,3
71 Martinshorn	93,3	92,1	87,7	81,0	88,5	88,5	28,3	33,8	29,1	20,2	90,3	88,6	79,7	73,2
72 Mechan. Wecker	68,4	67,4	64,1	60,7	64,5	64,3	5,0	5,5	5,0	4,7	44,5	43,5	41,7	39,7
73 Autohupe	93,8	92,6	89,5	86,5	89,8	90,9	27,6	28,4	27,6	26,9	77,3	77,2	77,0	75,7
74 Startschuß	95,8	92,4	67,6	46,8	83,6	80,9	11,6	27,0	8,3	1,3	93,5	91,3	65,5	43,9

Klangbild	K2	K2	K2	K2	K3	K3	K3	K3	K1	K2	K3
	L1	L5	L50	L95	L1	L5	L50	L95	Lm	Lm	Lm
41 Auto, innen	57,8	55,7	51,0	44,0	51,8	49,5	43,4	37,5	67,6	51,9	45,6
42 Zug	79,9	78,9	75,3	69,6	80,1	78,2	74,0	68,8	80,1	75,6	74,7
43 Zug, innen	68,0	66,6	63,1	59,1	60,6	59,6	57,1	54,3	61,9	63,6	57,3
44 U-Bahn	61,8	60,8	56,5	51,5	79,9	77,8	71,1	63,9	64,5	57,2	73,1
45 S-Bahn	84,7	78,8	66,4	56,7	64,0	62,1	56,3	51,7	71,1	72,7	57,8
46 Fahrradklingel	47,6	45,9	40,4	36,6	72,2	68,4	44,1	35,6	44,3	41,6	60,6
47 Bahnhofsdurchsage	77,8	75,5	65,5	56,8	65,5	63,3	56,4	47,0	61,6	69,1	58,1
48 Gespräch im Bus	80,3	74,9	62,6	57,9	77,2	71,6	61,6	57,4	77,6	68,7	66,9
49 Gespräch in Bahn	87,7	84,4	73,7	69,9	85,4	83,3	70,6	61,5	87,7	78,3	76,5
50 Gespräch im Auto	81,6	78,8	52,8	42,1	78,1	74,1	60,0	36,4	74,1	70,0	67,5
51 Straßengespräch	79,7	78,4	60,7	49,5	75,6	70,2	59,5	48,1	73,7	71,0	64,4
52 Bahnhofshalle	64,9	64,0	60,0	56,6	65,0	60,5	53,9	49,8	63,2	60,6	55,8
53 Baustelle	74,7	68,3	55,6	51,6	69,8	66,0	56,2	49,4	58,4	62,2	60,2
54 Hobelbank	86,7	85,4	80,9	75,5	84,0	83,2	80,7	77,0	86,6	81,5	80,8
55 Hämmern	85,0	82,6	67,9	52,2	91,3	88,7	70,2	53,8	68,3	75,8	81,2
56 Bohren in Holz	73,5	71,7	67,9	64,4	84,6	82,8	76,5	72,7	61,0	68,5	78,1
57 Sägen von Holz	80,1	77,4	63,7	52,8	79,1	77,6	65,6	52,1	67,1	70,6	70,7
58 Großmarkt	59,3	56,8	49,5	44,4	67,2	56,8	48,5	44,2	56,2	51,5	54,4
59 Kindergarten	78,1	75,6	61,9	51,2	68,9	66,1	56,8	43,7	69,1	68,4	60,2
60 Schreibmaschine	68,8	65,2	54,4	43,2	80,9	74,0	59,9	45,3	52,9	58,5	68,1
61 Drucker	61,8	60,7	56,6	45,2	72,8	70,9	66,2	38,9	52,5	56,9	66,8
62 Papier rascheln	63,0	58,1	43,6	30,5	73,7	66,9	47,7	35,2	48,6	51,5	62,2
63 Geschäft	70,7	68,2	55,9	45,0	77,5	74,5	60,2	44,2	61,1	61,5	67,4
64 Morgenatmosphäre	45,9	45,1	42,6	39,9	59,1	57,2	44,4	37,7	48,9	42,9	50,3
65 Am See	39,2	36,7	30,3	26,1	40,2	38,0	32,8	29,1	34,8	32,1	34,1
66 See mit Schiff	49,0	48,1	45,1	41,3	45,1	39,9	34,6	31,8	51,6	45,4	36,3
67 ländl. Hinterhof	57,9	55,9	50,2	37,8	51,6	49,8	43,6	36,7	45,1	51,1	45,3
68 Vortrag	55,9	53,3	35,7	26,4	50,2	47,4	36,6	27,4	56,8	45,0	41,4
69 Telefonklingel	49,5	48,0	44,6	34,6	73,3	72,2	67,5	56,5	47,1	44,8	68,2
70 Sirene	78,8	78,6	77,6	76,3	75,0	74,7	73,1	71,9	80,5	77,5	73,3
71 Martinshorn	91,7	89,6	83,8	74,3	87,6	86,4	82,7	76,6	82,6	85,0	83,2
72 Mechan. Wecker	51,8	50,9	47,9	44,4	68,4	67,4	64,0	60,3	41,9	48,2	64,4
73 Autohupe	74,9	74,5	72,8	71,4	93,7	92,4	89,1	85,8	76,8	73,0	89,5
74 Startschuß	92,2	83,3	61,5	36,9	85,9	76,5	57,3	32,1	82,1	77,3	72,0

## Anhang D

### Konzentrierte Parameter aller Klangbilder nach Abschnitt 5.1.3 - numerische Darstellung

Gruppe	Klangbild	Sprache	Lautstärke	Dynamik und Impulshaltigkeit				Klangfarbe			Tonalität
			$L_{Aeq}$	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$T_{\%}$
Wohnen	02 Schritte	nein	59	34	30	13	15	2	-1	-1	35
	03 Aufschließen	nein	56	26	28	8	8	-2	0	3	19
	04 Türgong	nein	69	66	43	5	14	-2	5	-3	91
	05 Urticken	nein	37	17	15	6	6	0	-1	1	21
	06 Staubsauger	nein	70	4	4	0	0	0	0	0	54
	07 Geschirr	nein	70	45	42	17	19	0	2	-2	62
	08 Besteck	nein	68	47	50	13	19	-2	-2	5	44
	09 Abspülen	nein	66	30	35	9	10	0	-1	0	47
	10 Eingießen	nein	42	30	20	3	2	-3	2	1	48
	11 Braten	nein	60	7	6	0	0	-9	-2	12	50
	12 Mixer	nein	71	13	10	2	2	-1	-2	4	36
	13 Hände waschen	nein	57	8	10	1	2	-4	0	4	26
	14 Duschen	nein	55	11	12	1	1	0	-2	3	29
	15 Fön	nein	62	4	5	0	0	-3	0	2	67
	16 Toilette	nein	62	16	17	1	0	0	-1	2	28
	17 Waschmaschine	nein	51	5	3	0	0	6	-4	-2	62
	18 Fernsehen	ja	53	23	14	10	3	2	0	-2	46
	19 Radio	ja	54	23	21	4	6	7	-2	-5	64
	20 Wechselsprechanl.	ja	69	45	37	17	10	4	1	-6	52
	21 Unterhaltung	ja	55	34	20	12	4	7	0	-7	70
	22 Telefongespräch	ja	61	43	31	24	15	4	2	-6	71
	Freizeit/ Kultur	23 Theaterpublikum	nein	62	7	7	0	0	5	0	-5
24 Orchester		nein	81	12	10	1	1	0	4	-4	54
25 Volksfest		nein	77	18	16	3	2	3	0	-3	46
26 Stadion / Schuß		nein	74	43	44	16	12	3	1	-4	47
26 Stadion / Wertung		ja	81	24	29	4	6	-2	2	0	47
27 Beifall Theater		nein	80	9	11	1	2	-4	2	2	37
28 Chorgesang		ja	80	29	23	4	2	4	6	-10	71
29 Festansprache		ja	70	28	26	10	6	6	0	-5	58
30 Stadionsdurchsage		ja	76	40	31	12	5	3	4	-8	61
31 Schauspieler		ja	57	26	25	9	4	3	0	-2	36
32 Kino		ja	61	12	18	2	5	6	0	-5	66
33 Kino, gestört		ja	64	27	23	6	4	6	0	-6	41
34 Partygespräch / a	ja	67	15	17	3	3	8	-1	-6	58	
34 Partygespräch / b	ja	65	13	8	2	0	6	0	-6	49	

Gruppe	Klangbild	Sprache	Lautstärke	Dynamik und Impulshaltigkeit				Klangfarbe			Tonalität
			$L_{Aeq}$	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$T_{\%}$
Verkehr	35 Straßenbahn	nein	75	19	13	2	0	6	1	-8	38
	36 Bus / Bremsen	nein	79	5	25	0	11	-2	-5	7	91
	36 Bus / Losfahren	nein	76	6	4	0	0	3	1	-4	39
	37 Verkehr	nein	62	8	9	0	0	1	1	-2	27
	38 Verkehr an Ampel	nein	70	8	9	1	1	3	0	-3	30
	39 Straßenbahn,innen	nein	78	13	11	1	1	2	1	-3	55
	40 Bus, innen	nein	74	6	4	0	0	12	-5	-7	83
	41 Auto, innen	nein	62	11	12	0	2	12	-3	-9	73
	42 Zug	nein	80	9	9	0	0	3	-1	-2	34
	43 Zug, innen	nein	65	7	5	0	0	1	2	-3	52
	44 U-Bahn / Bremsen	nein	74	9	13	0	2	0	-7	8	92
	44 U-Bahn / Hintergr	nein	54	9	6	1	0	3	0	-4	40
	44 U-Bahn / Warnton	nein	60	8	7	0	1	3	3	-7	55
	44 U-Bahn /Türen	nein	67	19	21	2	5	2	0	-2	25
	45 S-Bahn / Ansage	ja	74	22	10	6	1	3	5	-9	63
	45 S-Bahn / Ausfahrt	nein	79	7	7	0	0	12	-5	-7	91
	46 Fahrradklingel	nein	59	9	32	1	16	-4	-7	11	88
	47 Bahnhofsdurchsage	ja	70	18	16	3	1	-1	6	-4	46
	48 Gespräch im Bus	ja	75	17	14	6	5	6	-2	-4	45
	49 Gespräch in Bahn	ja	85	14	21	4	5	6	-2	-4	54
	50 Gespräch im Auto	ja	74	36	37	17	7	3	0	-3	55
51 Straßengespräch	ja	74	28	22	10	4	4	1	-5	50	
Arbeit	52 Bahnhofshalle	nein	63	7	10	0	1	3	0	-4	38
	53 Baustelle	nein	65	16	16	6	4	-1	1	0	65
	54 Hobelbank	nein	87	9	6	0	0	3	-1	-2	76
	55 Hämmern / a	nein	83	30	34	7	11	-6	0	6	39
	55 Hämmern / b	ja	52	24	16	7	4	5	0	-5	52
	56 Bohren in Holz	nein	79	7	10	0	1	-8	0	8	63
	57 Sägen von Holz	nein	74	24	25	6	5	-2	1	1	39
	58 Großmarkt	nein	58	12	12	2	5	2	-2	0	39
	59 Kindergarten	ja	70	24	22	6	3	3	2	-5	48
	60 Schreibmaschine	nein	69	22	28	4	8	-6	-1	8	51
	61 Drucker	nein	67	15	32	0	0	-6	-1	8	58
	62 Papier rascheln	nein	63	27	31	7	14	-5	-2	8	43
	63 Geschäft / Börse	nein	50	14	19	9	8	-1	0	1	40
	63 Geschäft / Kasse	nein	68	23	30	5	7	-2	-1	4	44
	63 Geschäft / Münzen	nein	77	28	35	16	25	-5	0	6	40
63 Geschäft / Rede	ja	62	22	20	7	4	7	-1	-5	60	

Gruppe	Klangbild	Sprache	Lautstärke	Dynamik und Impulshaltigkeit				Klangfarbe			Tonalität
			$L_{Aeq}$	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$T_{\%}$
Natur	64 Morgenatmosphäre	nein	52	5	19	0	5	1	-4	2	58
	65 Am See	nein	37	10	8	1	1	1	-1	0	33
	66 See mit Schiff	nein	48	6	8	0	1	7	1	-8	51
	67 ländl. Hinterhof	nein	53	18	13	0	1	-2	3	-1	65
Sprache, ungestört	22 Telefongespräch	ja	61	43	31	24	15	4	2	-6	71
	31 Schauspieler	ja	57	26	25	9	4	3	0	-2	36
	68 Vortrag	ja	53	26	20	9	4	9	-2	-6	60
Sprache, gestört	20 Wechselsprechanl.	ja	69	45	37	17	10	4	1	-6	52
	21 Unterhaltung	ja	55	34	20	12	4	7	0	-7	70
	29 Festansprache	ja	70	28	26	10	6	6	0	-5	58
	30 Stadiondurchsage	ja	76	40	31	12	5	3	4	-8	61
	34 Partygespräch / a	ja	67	15	17	3	3	8	-1	-6	58
	34 Partygespräch / b	ja	65	13	8	2	0	6	0	-6	49
	47 Bahnhofsdurchsage	ja	70	18	16	3	1	-1	6	-4	46
	48 Gespräch im Bus	ja	75	17	14	6	5	6	-2	-4	45
	49 Gespräch in Bahn	ja	85	14	21	4	5	6	-2	-4	54
	50 Gespräch im Auto	ja	74	36	37	17	7	3	0	-3	55
51 Straßengespräch	ja	74	28	22	10	4	4	1	-5	50	
Warnsignale	04 Türgong	nein	69	66	43	5	14	-2	5	-3	91
	69 Telefonklingel	nein	67	13	15	0	0	-6	-8	14	64
	70 Sirene	nein	80	2	2	0	0	3	0	-3	80
	71 Martinshorn / a	nein	77	11	9	1	1	2	0	-3	35
	71 Martinshorn / b	nein	88	15	9	1	0	-1	1	0	49
	72 Mechan. Wecker	nein	64	6	7	0	0	-9	-3	12	64
	73 Autohupe	nein	90	3	6	0	0	-3	-6	9	82
	74 Startschuß	nein	80	46	44	15	14	5	0	-5	46

## Konzentrierte Parameter aller Klangbilder nach Abschnitt 5.1.3 - grafische Darstellung

Gruppe	Klangbild	Sprache	Lautstärke	Dynamik und Impulshaltigkeit				Klangfarbe			Tonalität
			$L_{Aeq}$	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$T_{\%}$
Wohnen	02 Schritte	nein		•	•	•	•	•	○	○	
	03 Aufschließen	nein		•	•	•	•	○	•	•	
	04 Türgong	nein	•	•	•	•	•	○	•	○	•
	05 Urticken	nein		•	•	•	•	•	○	•	
	06 Staubsauger	nein	•					•	•	•	
	07 Geschirr	nein	•	•	•	•	•	•	•	○	
	08 Besteck	nein	•	•	•	•	•	○	○	•	
	09 Abspülen	nein	•	•	•	•	•	•	○	•	
	10 Eingießen	nein		•	•			○	•	•	
	11 Braten	nein	•					○	○	•	
	12 Mixer	nein	•	•	•			○	○	•	
	13 Hände waschen	nein			•			○	•	•	
	14 Duschen	nein		•	•			•	○	•	
	15 Fön	nein	•					○	•	•	•
	16 Toilette	nein	•	•	•			•	○	•	
	17 Waschmaschine	nein						•	○	○	
	18 Fernsehen	ja		•	•	•		•	•	○	
	19 Radio	ja		•	•		•	•	○	○	
	20 Wechselsprechanl.	ja	•	•	•	•	•	•	•	○	
	21 Unterhaltung	ja		•	•	•		•	•	○	•
	22 Telefongespräch	ja	•	•	•	•	•	•	•	○	•
	Freizeit/ Kultur	23 Theaterpublikum	nein	•					•	•	○
24 Orchester		nein	•	•	•			•	•	○	
25 Volksfest		nein	•	•	•			•	•	○	
26 Stadion / Schuß		nein	•	•	•	•	•	•	•	○	
26 Stadion / Wertung		ja	•	•	•		•	○	•	•	
27 Beifall Theater		nein	•		•			○	•	•	
28 Chorgesang		ja	•	•	•			•	•	○	•
29 Festansprache		ja	•	•	•	•	•	•	•	○	
30 Stadionsdurchsage		ja	•	•	•	•	•	•	•	○	
31 Schauspieler		ja		•	•	•		•	•	○	
32 Kino		ja	•	•	•		•	•	•	○	•
33 Kino, gestört		ja	•	•	•	•		•	•	○	
34 Partygespräch / a		ja	•	•	•			•	○	○	
34 Partygespräch / b	ja	•	•				•	•	○		

Gruppe	Klangbild	Sprache	Lautstärke	Dynamik und Impulshaltigkeit				Klangfarbe			Tonalität
			$L_{Aeq}$	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$T_{\%}$
Verkehr	35 Straßenbahn	nein	●	•	•			●	•	○	
	36 Bus / Bremsen	nein	●		•		•	○	○	●	●
	36 Bus / Losfahren	nein	●					•	•	○	
	37 Verkehr	nein	•					•	•	○	
	38 Verkehr an Ampel	nein	●					•	•	○	
	39 Straßenbahn,innen	nein	●	•	•			•	•	○	
	40 Bus, innen	nein	●					●	○	○	•
	41 Auto, innen	nein	•	•	•			●	○	○	•
	42 Zug	nein	●					•	○	○	
	43 Zug, innen	nein	•					•	•	○	
	44 U-Bahn / Bremsen	nein	●		•			•	○	●	●
	44 U-Bahn / Hintergr	nein	•					•	•	○	
	44 U-Bahn / Warnton	nein	•					•	•	○	
	44 U-Bahn /Türen	nein	•	•	•		•	•	•	○	
	45 S-Bahn / Ansage	ja	●	•	•	•		•	●	○	
	45 S-Bahn / Ausfahrt	nein	●					●	○	○	●
	46 Fahrradklingel	nein	•		•			•	○	●	•
	47 Bahnhofsdurchsage	ja	●	•	•			○	●	○	
	48 Gespräch im Bus	ja	●	•	•	•	•	●	○	○	
	49 Gespräch in Bahn	ja	●	•	•		•	●	○	○	
	50 Gespräch im Auto	ja	●	•	•	●	•	•	•	○	
51 Straßengespräch	ja	●	•	•	•		•	•	○		
Arbeit	52 Bahnhofshalle	nein	•		•			•	•	○	
	53 Baustelle	nein	•	•	•	•		○	•	•	•
	54 Hobelbank	nein	●					•	○	○	•
	55 Hämmern / a	nein	●	•	•	•	•	○	•	●	
	55 Hämmern / b	ja	•	•	•			●	•	○	
	56 Bohren in Holz	nein	●		•			○	•	●	
	57 Sägen von Holz	nein	●	•	•	•	•	○	•	•	
	58 Großmarkt	nein	•	•	•		•	•	○	•	
	59 Kindergarten	ja	●	•	•	•		•	•	○	
	60 Schreibmaschine	nein	•	•	•		•	○	○	●	
	61 Drucker	nein	•	•	•			○	○	●	
	62 Papier rascheln	nein	•	•	•	•	•	○	○	●	
	63 Geschäft / Börse	nein	•	•	•	•	•	○	•	•	
	63 Geschäft / Kasse	nein	•	•	•	•	•	○	○	•	
	63 Geschäft / Münzen	nein	●	•	•	●	•	○	•	●	
63 Geschäft / Rede	ja	•	•	•	•		●	○	○		

Gruppe	Klangbild	Sprache	Lautstärke	Dynamik und Impulshaltigkeit				Klangfarbe			Tonalität
			$L_{Aeq}$	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$T_{\%}$
Natur	64 Morgenatmosphäre	nein			•		•	•	○	•	
	65 Am See	nein		•				•	○	•	
	66 See mit Schiff	nein						●	•	○	
	67 ländl. Hinterhof	nein		•	•			○	•	○	•
Sprache, ungestört	22 Telefongespräch	ja	•	●	•	●	●	•	•	○	•
	31 Schauspieler	ja		•	•	•		•	•	○	
	68 Vortrag	ja		•	•	•		●	○	○	
Sprache, gestört	20 Wechselsprechanl.	ja	•	●	•	●	•	•	•	○	
	21 Unterhaltung	ja		•	•	•		●	•	○	•
	29 Festansprache	ja	•	•	•	•	•	●	•	○	
	30 Stadiondurchsage	ja	•	●	•	•	•	•	•	○	
	34 Partygespräch / a	ja	•	•	•			●	○	○	
	34 Partygespräch / b	ja	•	•				●	•	○	
	47 Bahnhofsdurchsage	ja	•	•	•			○	●	○	
	48 Gespräch im Bus	ja	•	•	•	•	•	●	○	○	
	49 Gespräch in Bahn	ja	●	•	•		•	●	○	○	
	50 Gespräch im Auto	ja	•	•	•	●	•	•	•	○	
51 Straßengespräch	ja	•	•	•	•		•	•	○		
Warnsignale	04 Türgong	nein	•	●	●	•	•	○	●	○	●
	69 Telefonklingel	nein	•	•	•			○	○	●	
	70 Sirene	nein	•					•	•	○	•
	71 Martinshorn / a	nein	•	•				•	•	○	
	71 Martinshorn / b	nein	●	•				○	•	•	
	72 Mechan. Wecker	nein	•					○	○	●	
	73 Autohupe	nein	●					○	○	●	•
	74 Startschuß	nein	•	●	●	●	•	●	•	○	



## Anhang E

### Vollständige Ergebnisse der Faktorenanalyse aus Abschnitt 5.1.3

Unrotierte Faktorladungen (vollständige Fassung von Tabelle 5-3)

	Faktoren						Kommunalität
	1	2	3	4	5	6	
L <sub>Aeq</sub>	<b>0,95</b>	<b>-0,22</b>	0,15	-0,03	-0,06	-0,04	0,99
N <sub>5</sub>	<b>0,92</b>	-0,16	0,11	-0,03	0,12	-0,02	0,90
T: L <sub>m,T</sub>	<b>0,91</b>	-0,15	<b>-0,33</b>	-0,15	0,10	0,03	1,00
M: L <sub>m,M</sub>	<b>0,96</b>	-0,12	-0,09	0,19	-0,08	0,01	0,99
H: L <sub>m,H</sub>	<b>0,83</b>	<b>-0,27</b>	<b>0,49</b>	0,00	0,03	-0,05	1,00
T: L <sub>5,T</sub>	<b>0,92</b>	-0,05	<b>-0,34</b>	-0,14	0,14	0,00	0,99
M: L <sub>5,M</sub>	<b>0,97</b>	-0,03	-0,11	<b>0,21</b>	-0,06	0,03	0,99
H: L <sub>5,H</sub>	<b>0,83</b>	-0,19	<b>0,51</b>	-0,01	0,05	-0,01	0,99
T: I <sub>90,T</sub>	0,18	<b>0,91</b>	-0,02	-0,07	-0,08	<b>-0,24</b>	0,92
M: I <sub>90,M</sub>	<b>0,24</b>	<b>0,92</b>	-0,01	0,08	-0,15	-0,03	0,94
H: I <sub>90,H</sub>	<b>0,24</b>	<b>0,85</b>	<b>0,31</b>	-0,05	-0,02	0,21	0,92
T: M <sub>T</sub>	0,13	<b>0,88</b>	-0,01	-0,10	0,15	<b>-0,29</b>	0,90
M: M <sub>M</sub>	<b>0,20</b>	<b>0,90</b>	-0,01	-0,02	0,12	-0,03	0,87
H: M <sub>H</sub>	0,15	<b>0,78</b>	<b>0,38</b>	-0,14	0,06	<b>0,39</b>	0,95
T: A <sub>T</sub>	0,12	0,05	<b>-0,87</b>	<b>-0,41</b>	<b>0,21</b>	0,07	1,00
M: A <sub>M</sub>	<b>0,21</b>	<b>0,25</b>	<b>-0,44</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,40</b>	0,05	0,99
H: A <sub>H</sub>	<b>-0,21</b>	-0,17	<b>0,96</b>	-0,02	0,02	-0,09	1,00
T <sub>%</sub>	0,19	-0,10	-0,01	<b>-0,70</b>	<b>-0,67</b>	-0,01	0,99
Quadratsumme	7,03	4,91	2,89	1,35	0,79	0,36	17,33
Prozent der Varianz	39,06	27,28	16,03	7,50	4,37	2,02	96,26

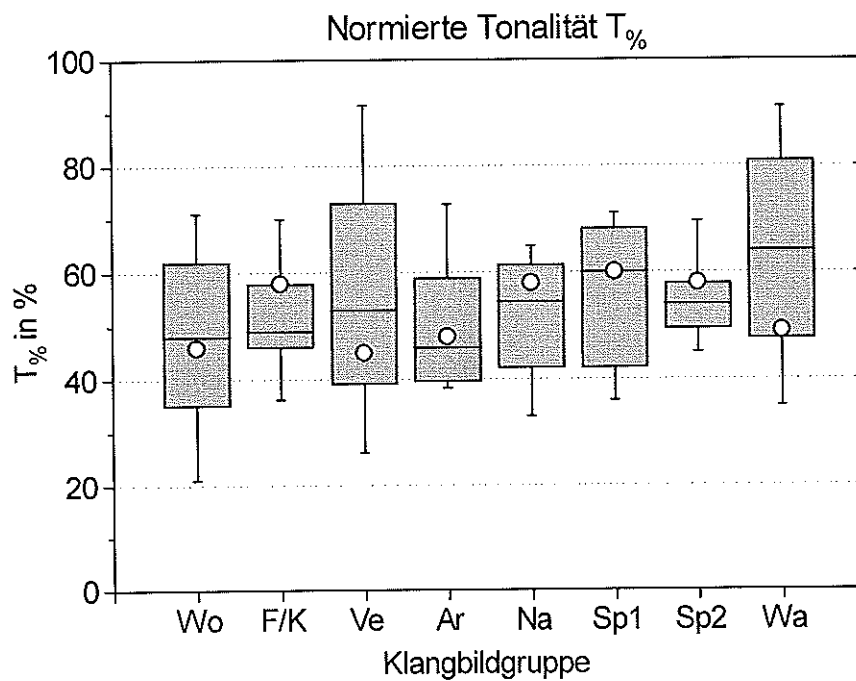
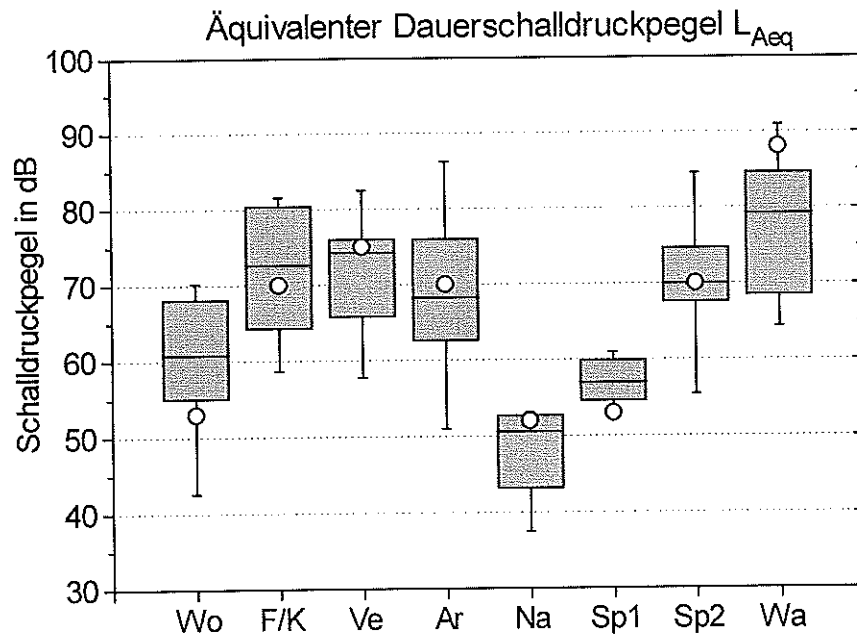
Rotierte Faktorladungen (vollständige Fassung von Tabelle 5-4)

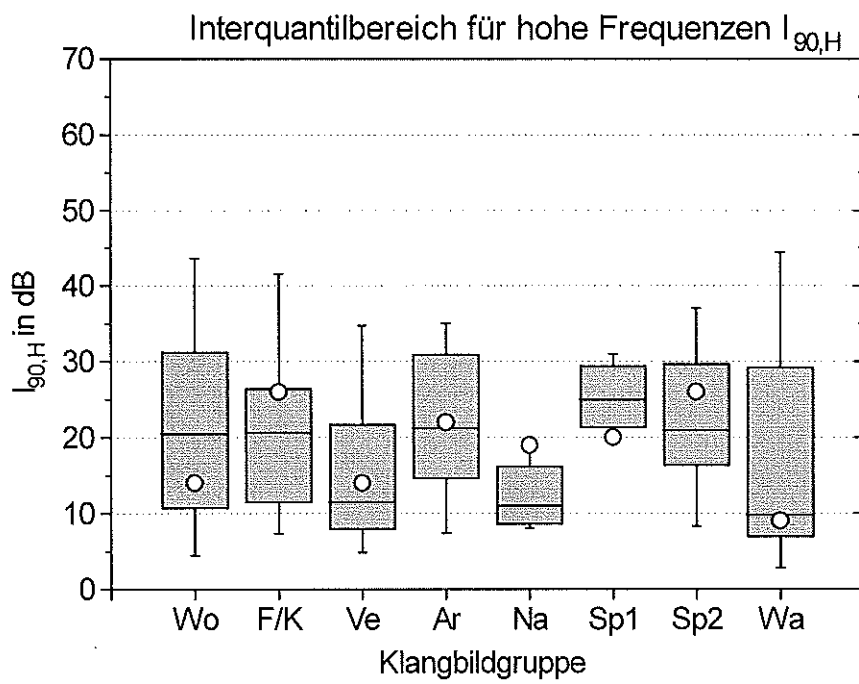
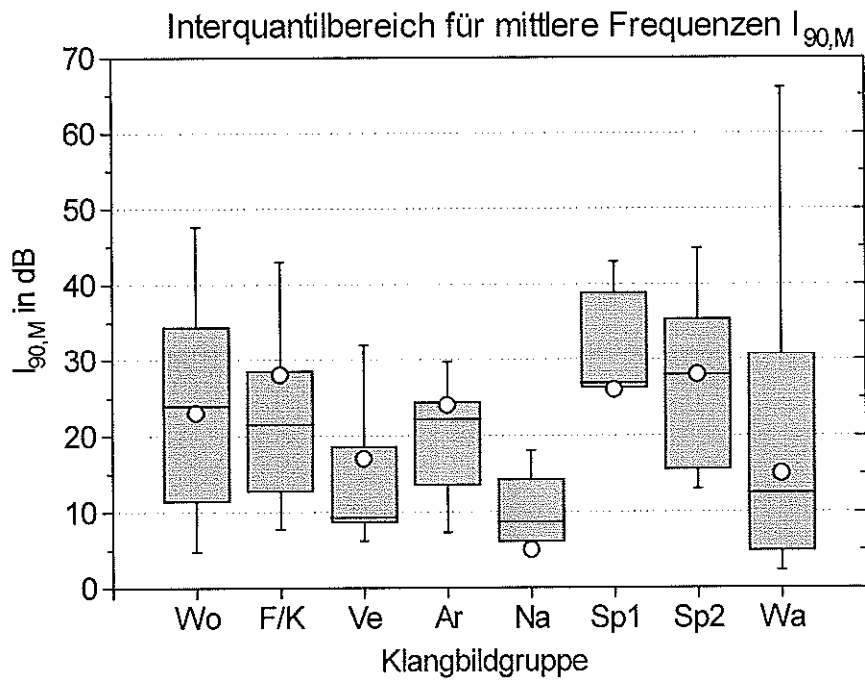
	Faktoren						Kommunalität
	1	2	3	4	5	6	
L <sub>Aeq</sub> in dB	<b>0,98</b>	-0,02	-0,06	0,02	0,13	-0,01	0,99
N <sub>5</sub> in sone	<b>0,95</b>	0,03	0,02	-0,06	0,00	0,00	0,90
T: L <sub>m,T</sub>	<b>0,88</b>	-0,01	<b>0,46</b>	0,02	0,08	-0,01	1,00
M: L <sub>m,M</sub>	<b>0,95</b>	0,03	0,11	<b>0,29</b>	0,02	0,00	0,99
H: L <sub>m,H</sub>	<b>0,91</b>	-0,05	<b>-0,37</b>	-0,14	0,05	0,02	1,00
T: L <sub>5,T</sub>	<b>0,87</b>	0,09	<b>0,48</b>	0,02	0,04	-0,03	0,99
M: L <sub>5,M</sub>	<b>0,93</b>	0,11	0,13	<b>0,31</b>	-0,02	0,02	0,99
H: L <sub>5,H</sub>	<b>0,91</b>	0,02	<b>-0,37</b>	-0,15	0,04	0,06	0,99
T: I <sub>90,T</sub>	-0,01	<b>0,93</b>	0,07	0,11	0,08	-0,18	0,92
M: I <sub>90,M</sub>	0,04	<b>0,93</b>	0,04	<b>0,27</b>	0,05	0,03	0,94
H: I <sub>90,H</sub>	0,09	<b>0,89</b>	-0,17	0,01	0,02	<b>0,31</b>	0,92
T: M <sub>T</sub>	-0,03	<b>0,91</b>	0,11	-0,06	-0,08	<b>-0,23</b>	0,90
M: M <sub>M</sub>	0,03	<b>0,92</b>	0,13	0,04	-0,11	0,03	0,87
H: M <sub>H</sub>	0,03	<b>0,81</b>	-0,18	-0,13	0,01	<b>0,50</b>	0,95
T: A <sub>T</sub>	0,01	0,00	<b>0,99</b>	-0,09	0,08	-0,03	1,00
M: A <sub>M</sub>	0,09	0,15	0,14	<b>0,96</b>	-0,13	-0,02	0,99
H: A <sub>H</sub>	-0,06	-0,08	<b>-0,91</b>	<b>-0,41</b>	0,00	0,04	1,00
T <sub>%</sub>	0,13	-0,02	0,07	-0,12	<b>0,97</b>	0,00	0,99
Quadratsumme	6,86	4,89	2,67	1,45	1,03	0,44	17,33
Prozent der Varianz	38,08	27,15	14,84	8,04	5,73	2,42	96,26

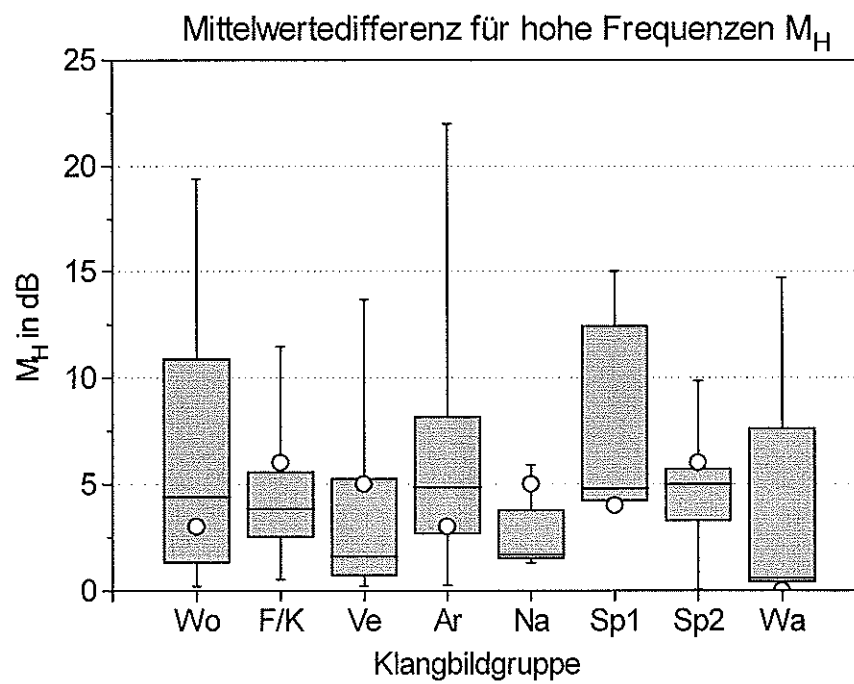
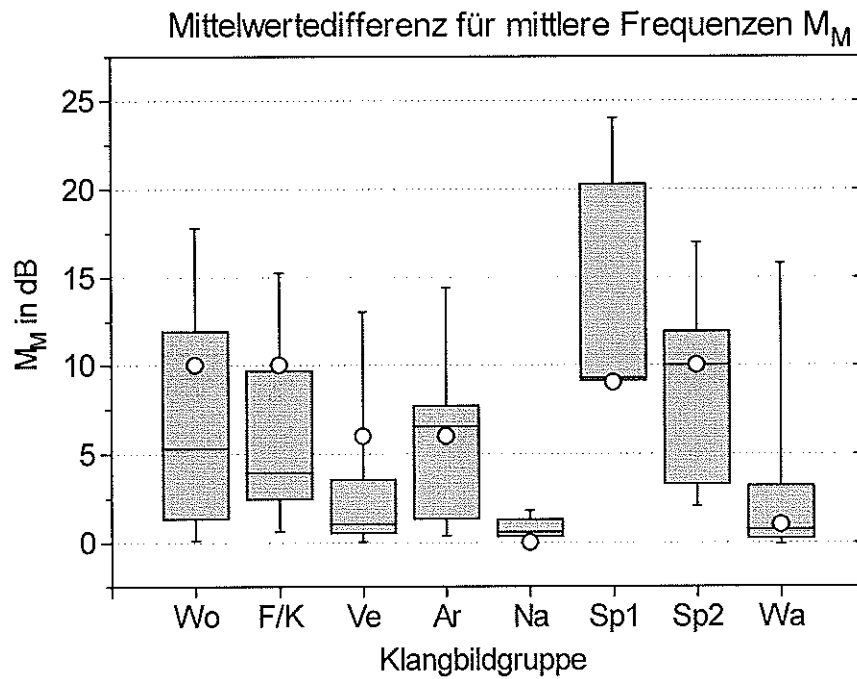
## Anhang F

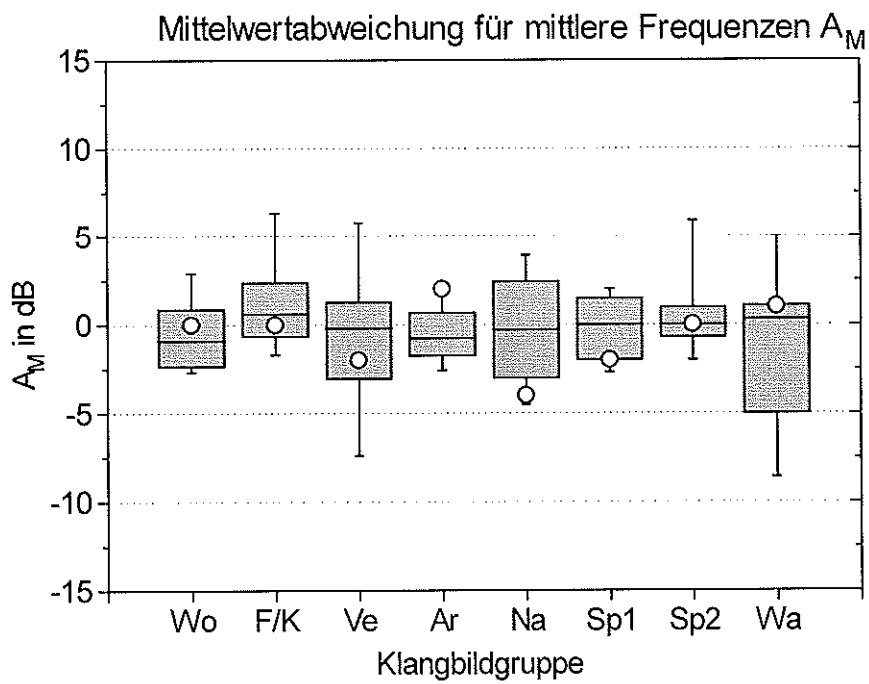
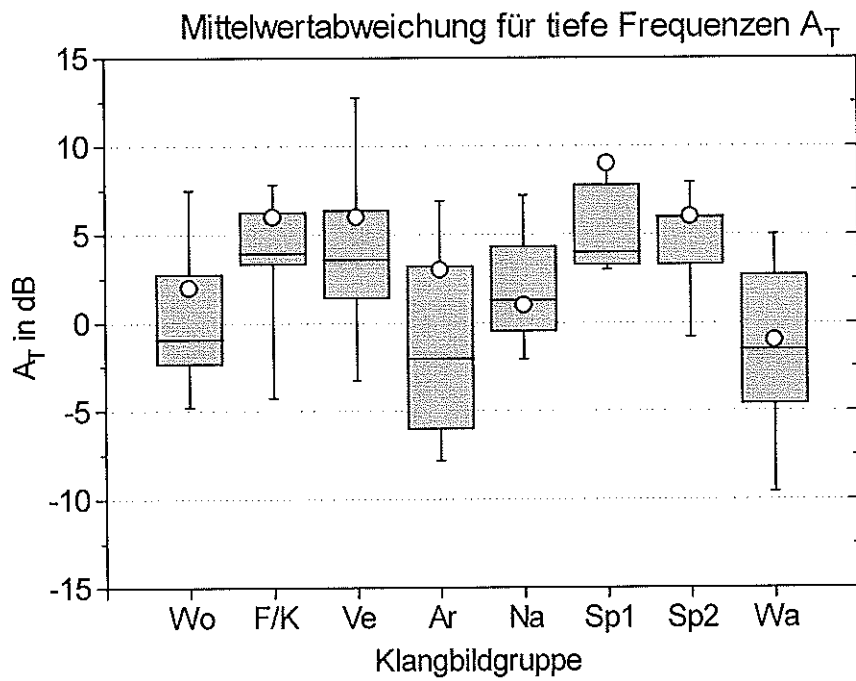
### Häufigkeitsverteilung mit Angabe ausgewählter Perzentile für wesentliche signalanalytische Parameter

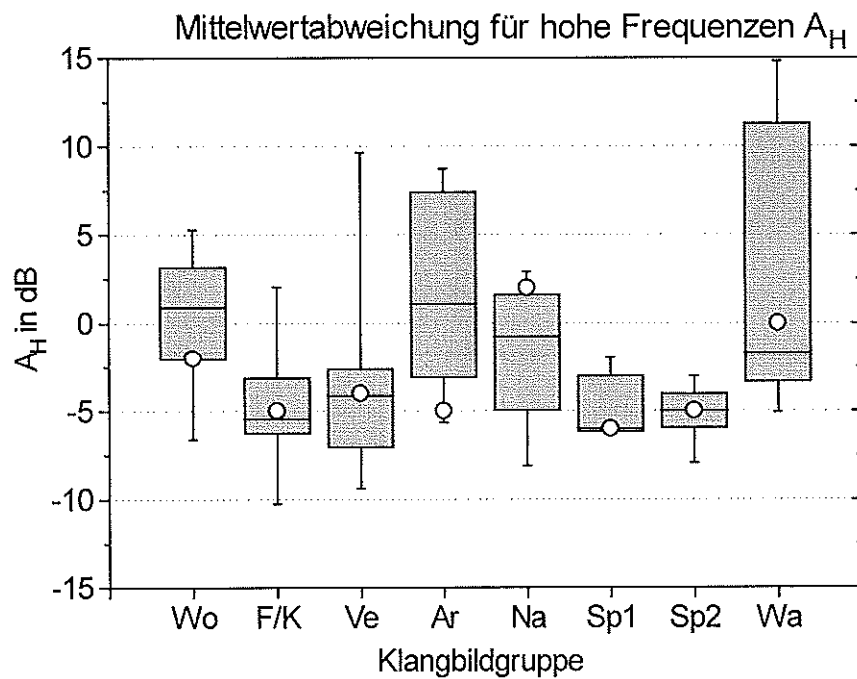
Trennung nach Klangbildgruppen und mit Repräsentanten aus Tabelle 5-10 (offene Kreise)







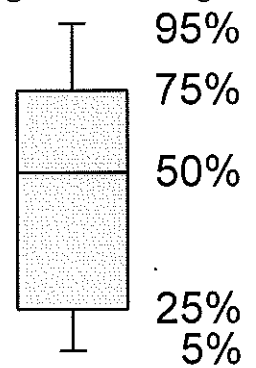




### Bedeutung der Abkürzungen und Symbole

Wo	Wohnen
F/K	Freizeit/Kultur
Ve	Verkehr
Ar	Arbeit
Na	Natur
Sp1	Sprache, ungestört
Sp2	Sprache, gestört
Wa	Warnsignale

Perzentilangaben bei Häufigkeitsverteilungen



## Anhang G

## Zuordnung von Klangbild-Cluster und Analysedaten

Clu- Eigen- schar- fenten	Klangbildname	Klang- bild- gruppe	Spra- che	$I_{90,M}$	$I_{90,H}$	$M_M$	$M_H$	$A_T$	$A_M$	$A_H$	$L_{Aeq}$	$T_{\%}$	Dy- na- mik	Im- pul- se	Fre- quenz- gang	Laut- stärke
1 dynamisch, breitbandig	02 Schritte	Wo	nein	34	30	13	15	2	-1	-1	59	35	D+	I+	000	leise
	09 Abspülen	Wo	nein	30	35	9	10	0	-1	0	66	47	D+	I+	000	mittel
	08 Besteck	Wo	nein	47	50	13	19	-2	-2	5	68	44	D+	I+	000	mittel
	63 Geschäft / Münzen	Ar	nein	28	35	16	25	-5	0	6	77	40	D+	I+	000	laut
2 gering dynamisch, breitbandig	05 Urticken	Wo	nein	17	15	6	6	0	-1	1	37	21	D0	I-	000	leise
	65 Am See	Na	nein	10	8	1	1	1	-1	0	37	33	D0	I-	000	leise
	10 Eingießen	Wo	nein	30	20	3	2	-3	2	1	42	48	D0	I-	000	leise
	63 Geschäft / Börse	Ar	nein	14	19	9	8	-1	0	1	50	40	D0	I-	000	leise
	17 Waschmaschine	Wo	nein	5	3	0	0	6	-4	-2	51	62	D0	I-	000	leise
	64 Morgenatmosphäre	Na	nein	5	19	0	5	1	-4	2	52	58	D0	I-	000	leise
	14 Duschen	Wo	nein	11	12	1	1	0	-2	3	55	29	D0	I-	000	leise
	03 Aufschließen	Wo	nein	26	28	8	8	-2	0	3	56	19	D0	I-	000	leise
	13 Hände waschen	Wo	nein	8	10	1	2	-4	0	4	57	26	D0	I-	000	leise
	58 Großmarkt	Ar	nein	12	12	2	5	2	-2	0	58	39	D0	I-	000	leise
	16 Toilette	Wo	nein	16	17	1	0	0	-1	2	62	28	D0	I-	000	mittel
	44 U-Bahn / Türen	Ve	nein	19	21	2	5	2	0	-2	67	25	D0	I-	000	mittel
3 dynamisch, breitbandig, tonal	12 Mixer	Wo	nein	13	10	2	2	-1	-2	4	71	36	D0	I-	000	laut
	04 Türgong	Wo, Wa	nein	66	43	5	14	-2	5	-3	69	91	D+	I+	000	mittel
4 kaum Dynamik, breitbandig	67 ländl. Hinterhof	Na	nein	18	13	0	1	-2	3	-1	53	65	D-	I-	000	leise
	15 Fön	Wo	nein	4	5	0	0	-3	0	2	62	67	D-	I-	000	mittel
	43 Zug, innen	Ve	nein	7	5	0	0	1	2	-3	65	52	D-	I-	000	mittel
	53 Baustelle	Ar	nein	16	16	6	4	-1	1	0	65	65	D-	I-	000	mittel
	06 Staubsauger	Wo	nein	4	4	0	0	0	0	0	70	54	D-	I-	000	laut
	47 Bahnhofsdurchsage	Ve, Sp2	ja	18	16	3	1	-1	6	-4	70	46	D-	I-	000	mittel
	39 Straßenbahn,innen	Ve	nein	13	11	1	1	2	1	-3	78	55	D-	I-	000	laut
	27 Beifall Theater	F/K	nein	9	11	1	2	-4	2	2	80	37	D-	I-	000	laut
	24 Orchester	F/K	nein	12	10	1	1*	0	4	4	81	54	D-	I-	000	laut
	71 Martinshorn / b	Wa	nein	15	9	1	0	-1	1	0	88	49	D-	I-	000	sehr laut

Clu- Eigen- schar- falten	Klangbildname	Klang- bild- gruppe	Spra- che	I <sub>90M</sub>	I <sub>90H</sub>	M <sub>M</sub>	M <sub>H</sub>	A <sub>T</sub>	A <sub>M</sub>	A <sub>H</sub>	L <sub>Aeq</sub>	T <sub>%</sub>	Dy- na- mik	Im- pul- se	Fre- quenz- gang	Laut- stärke
5 stark dynamisch, tiefen- / mittenbetont	22 Telefongespräch	Wo, Sp1	ja	43	31	24	15	4	2	-6	61	71	D+	I+	00-	leise
	20 Wechselsprechant.	Wo, Sp2	ja	45	37	17	10	4	1	-6	69	52	D+	I+	00-	mittel
	07 Geschirr	Wo	nein	45	42	17	19	0	2	-2	70	62	D+	I+	00-	mittel
	26 Stadion / Schuß	F/K	nein	43	44	16	12	3	1	-4	74	47	D+	I+	00-	laut
	50 Gespräch im Auto	Ve, Sp2	ja	36	37	17	7	3	0	-3	74	55	D+	I+	00-	laut
	74 Startschuß	Wa	nein	46	44	15	14	5	0	-5	80	46	D+	I+	00-	laut
	11 Braten	Wo	nein	7	6	0	0	-9	-2	12	60	50	D-	I-	-+	leise
6 kaum Dynamik, höhenbetont, tonal	72 Mechan. Wecker	Wa	nein	6	7	0	0	-9	-3	12	64	64	D-	I-	-+	mittel
	69 Telefonklingel	Wa	nein	13	15	0	0	-6	-8	14	67	64	D-	I-	-+	mittel
	44 U-Bahn / Bremsen	Ve	nein	9	13	0	2	0	-7	8	74	92	D-	I-	-+	laut
	56 Bohren in Holz	Ar	nein	7	10	0	1	-8	0	8	79	63	D-	I-	-+	laut
	73 Autohupe	Wa	nein	3	6	0	0	-3	-6	9	90	82	D-	I-	-+	sehr laut
	55 Hämmer / b	Ar	ja	24	16	7	4	5	0	-5	52	52	D0	I0	+0-	leise
	18 Fernsehen	Wo	ja	23	14	10	3	2	0	-2	53	46	D0	I0	+0-	leise
7 gering dynamisch, tiefenbetont	68 Vortrag	Sp1	ja	26	20	9	4	9	-2	-6	53	60	D0	I0	+0-	leise
	19 Radio	Wo	ja	23	21	4	6	7	-2	-5	54	64	D0	I0	+0-	leise
	21 Unterhaltung	Wo, Sp2	ja	34	20	12	4	7	0	-7	55	70	D0	I0	+0-	leise
	31 Schauspieler	F/K, Sp1	ja	26	25	9	4	3	0	-2	57	36	D0	I0	+0-	leise
	32 Kino	F/K	ja	12	18	2	5	6	0	-5	61	66	D0	I0	+0-	mittel
	41 Auto, innen	Ve	nein	11	12	0	2	12	-3	-9	62	73	D0	I0	+0-	mittel
	63 Geschäft / Rede	Ar	ja	22	20	7	4	7	-1	-5	62	60	D0	I0	+0-	mittel
	33 Kino, gestört	F/K	ja	27	23	6	4	6	0	-6	64	41	D0	I0	+0-	mittel
	34 Partygespräch / a	F/K, Sp2	ja	15	17	3	3	8	-1	-6	67	58	D0	I0	+0-	mittel
	48 Gespräch im Bus	Ve, Sp2	ja	17	14	6	5	6	-2	-4	75	45	D0	I0	+0-	laut
	25 Volksfest	F/K	nein	18	16	3	2	3	0	-3	77	46	D0	I0	+0-	laut
	49 Gespräch in Bahn	Ve, Sp2	ja	14	21	4	5	6	-2	-4	85	54	D0	I0	+0-	sehr laut
	8 kaum Dynamik, tiefenbetont	66 See mit Schiff	Na	nein	6	8	0	1	7	1	-8	48	51	D-	I-	+0-
44 U-Bahn / Hintergrund		Ve	nein	9	6	1	0	3	0	-4	54	40	D-	I-	+0-	leise
44 U-Bahn / Marmon		Ve	nein	8	7	0	1	3	3	-7	60	55	D-	I-	+0-	leise
23 Theaterpublikum		F/K	nein	7	7	0	0	5	0	-5	62	49	D-	I-	+0-	mittel



Clu- Eigen- ster schaften	Klangbildname	Klang- bild- gruppe	Spra- che	I <sub>90,M</sub>	I <sub>90,H</sub>	M <sub>M</sub>	M <sub>H</sub>	A <sub>T</sub>	A <sub>M</sub>	A <sub>H</sub>	L <sub>Aeq</sub>	T <sub>%</sub>	Dy- na- mik	Im- pul- se gang	Fre- quenz- stär- ke	Laut- stärke	
8 kaum Dynamik, tiefenbetont	37 Verkehr	Ve	nein	8	9	0	0	1	1	-2	62	27	D-	I-	+0-	mittel	
	52 Bahnhofshalle	Ar	nein	7	10	0	1	3	0	-4	63	38	D-	I-	+0-	mittel	
	34 Partygespräch / b	F/K, Sp2	ja	13	8	2	0	6	0	-6	65	49	D-	I-	+0-	mittel	
	38 Verkehr an Ampel	Ve	nein	8	9	1	1	3	0	-3	70	30	D-	I-	+0-	mittel	
	35 Straßenbahn	Ve	nein	19	13	2	0	6	1	-8	75	38	D-	I-	+0-	laut	
	36 Bus / Losfahren	Ve	nein	6	4	0	0	3	1	-4	76	39	D-	I-	+0-	laut	
	71 Martinshorn / a	Wa	nein	11	9	1	1	2	0	-3	77	35	D-	I-	+0-	laut	
	42 Zug	Ve	nein	9	9	0	0	3	-1	-2	80	34	D-	I-	+0-	laut	
	9 dynamisch, höhenbetont	62 Papier rascheln	Ar	nein	27	31	7	14	-5	-2	8	63	43	D+	I0	-0+	leise
		61 Drucker	Ar	nein	15	32	0	0	-6	-1	8	67	58	D+	I0	-0+	mittel
		63 Geschäft / Kasse	Ar	nein	23	30	5	7	-2	-1	4	68	44	D+	I0	-0+	mittel
		60 Schreibmaschine	Ar	nein	22	28	4	8	-6	-1	8	69	51	D+	I0	-0+	mittel
		57 Sägen von Holz	Ar	nein	24	25	6	5	-2	1	1	74	39	D+	I0	-0+	laut
		26 Stadion / Wertung	F/K	ja	24	29	4	6	-2	2	0	81	47	D+	I0	-0+	laut
55 Hämmern / a		Ar	nein	30	34	7	11	-6	0	6	83	39	D+	I0	-0+	laut	
10 dynamisch, tiefen- / mittenbetont	29 Festansprache	F/K, Sp2	ja	28	26	10	6	6	0	-5	70	58	D+	I0	++-	mittel	
	59 Kindergarten	Ar	ja	24	22	6	3	3	2	-5	70	48	D+	I0	++-	laut	
	45 S-Bahn / Ansage	Ve	ja	22	10	6	1	3	5	-9	74	63	D+	I0	++-	laut	
	51 Straßengespräch	Ve, Sp2	ja	28	22	10	4	4	1	-5	74	50	D+	I0	++-	laut	
	30 Stadiondurchsage	F/K, Sp2	ja	40	31	12	5	3	4	-8	76	61	D+	I0	++-	laut	
	28 Chorgesang	F/K	ja	29	23	4	2	4	6	-10	80	71	D+	I0	++-	laut	
11 dynamisch, höhenbetont, tonal	46 Fahrradklingel	Ve	nein	9	32	1	16	-4	-7	11	59	88	D+	I-	--+	leise	
	36 Bus / Bremsen	Ve	nein	5	25	0	11	-2	-5	7	79	91	D+	I-	--+	laut	
12 kaum Dynamik, tiefenbetont, tonal	40 Bus, innen	Ve	nein	6	4	0	0	12	-5	-7	74	83	D-	I-	+0-	laut	
	45 S-Bahn / Ausfahrt	Ve	nein	7	7	0	0	12	-5	-7	79	91	D-	I-	+0-	laut	
	70 Sirene	Wa	nein	2	2	0	0	3	0	-3	80	80	D-	I-	+0-	laut	
	54 Hobelbank	Ar	nein	9	6	0	0	3	-1	-2	87	76	D-	I-	+0-	sehr laut	