

Die Vorträge



Impulse 1996

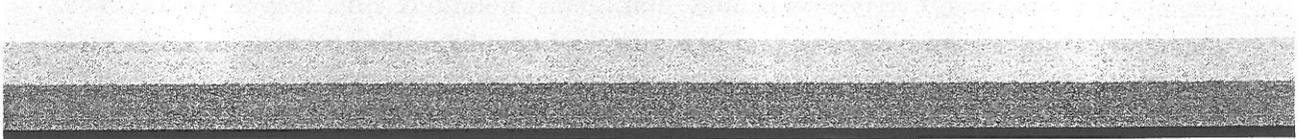
1. Jahrestagung
der Dreve-Otoplastik GmbH
15. Juni 1996,
Holiday Inn Kamen/Unna,
9.30 – 17.00 Uhr



Impulse 1916

**Psychoakustik - Wirkungsprinzipien und die
Bedeutung für die Anpassung von Hörgeräten**

**Dr. K.-J. Berndsen
Logopädie-Institut Acuphon**



Dr. Klaus-Jürgen Berndsen
ISST - UNNA
Wasserstraße 25
59423 Unna
Telef: 02303-68888 o. 89991 Fax: 02303-89886

Die Adaption von Hörgeräten unter Berücksichtigung der Ergebnisse psychoakustischer Forschung

Das Gehör nimmt unter den menschlichen Sinnesorganen eine besondere Stellung ein: Sinnesorgane wie das Auge oder der Tastsinn arbeiten selektiv: Es wird nur das gesehen, was wir anschauen, um nicht zu sehen, verschließen wir die Augen.

Das Gehör hingegen ist nicht abzuschalten, es ist selbst im Schlaf aktiv. Zudem empfängt es Schall aus allen Richtungen und hat eine hohe Sensibilität. Der Dynamikbereich des Ohres, der etwa 114 dB Schalldruck umfaßt, verarbeitet einen äußerst geringen Luftdruckunterschied, etwa so, wie er sich beim Treppensteigen vom Erdgeschoß zur ersten Etage einstellt. Der wahrnehmbare Frequenzbereich ist groß und umfaßt 3 Dekaden. Eine Besonderheit ist auch, daß das Gehör stark nichtlinear empfindet. Auf diese Weise können trotz des großen Wahrnehmungsbereiches auch sehr leise und feine Geräusche noch aufgelöst und erkannt werden.

Eine Auswahl, was gehört werden soll, wird im gewissen Umfang bereits im Innenohr getroffen. Der englische Wissenschaftler Prof. Kemp konnte das Phänomen der otoakustischen Emissionen belegen. Danach nehmen die äußeren Haarzellen in der Hörschnecke nicht nur Schall auf und leiten diesen zum Hörnerv weiter, sondern realisieren selbst Schallemissionen, welche die Hörperzeption beeinflussen. Die eigentliche Bewertung von Sinnesreizen findet im Gehirn des Menschen statt. Reize müssen hier im Hinblick auf Wichtigkeit, Störung, Eliminierung, Weiterverarbeitung etc. bewertet und verarbeitet werden. Störwirkungen und Lästigkeit hängen davon ab, wie stark sie vom Sinnesorgan empfangen werden und inwieweit sie mit Reizmustern übereinstimmen, denen das Gehirn entsprechende Informationen zuweist.

Wenn der Mensch hört, sind daran viele Körperfunktionen beteiligt, vor allem natürlich unsere Sinne, die Verarbeitungsmechanismen des Nervensystems und des Gehirns. Obwohl immer wieder versucht wird aus Messung und Beobachtung anatomischer und physiologischer Gegebenheiten Theorien für das Funktionieren des Gesamtsystems zu konstruieren, werden stets neue Ereignisse beobachtet, die keine bestehende Theorie erfaßt. Die Frage, ob der Mensch überhaupt jemals die Kompliziertheit seines Sinnes und Organsystems begreifen kann, muß nach heutigem Stand, trotz modernster technischer Hilfen zur Informationsspeicherung und -Verarbeitung, eher verneint werden.

Die Sinnesleistung „Hören“ ausschließlich dem Empfänger Ohr, mit seinen Funktionen des Mittel- und Innenohres zuzuweisen und demzufolge Hörstörungen mit Schäden in diesem System zu erklären, ist ebenso unzureichend wie die heutzutage gern gewählte pauschale Zuweisungen einer zentralen Hörstörung. Solche zentralen Verarbeitungsstörungen akustischer Signale im Gehirn können vielfältig sein und sind nicht immer mit verfügbaren diagnostischen Verfahren aufzuspüren. Störungen stellen sich z.B. ein bei der Wahrnehmung zeitlicher Reihenfolgen, der Gleichzeitigkeit oder Dauer von Klängen, der Modulationserfassung, dem Erkennen von Amplituden- und Frequenzübergängen (**Abb. 1**)

Wenn solche Fehlleistungen erfaßbar sind, kann dies bisweilen mit Funktionsschwächen der linken, dominanten“ Gehirnhälfte einhergehen, in der bei Rechtshändern unter anderem das Sprachzentrum liegt. Es wird immer wieder beobachtet, daß Rechtshänder mit schweren Schäden in der linken Hirnhemisphäre Schwierigkeiten haben, Sprache zu verstehen oder zu artikulieren. Roger Sperry und nach ihm einige andere Forscher untersuchten Patienten, denen man aufgrund von lebensbedrohender Epilepsie den Balken, die Verbindung beider Hirnhälften durchtrennt hatte und feststellen konnte, daß aber auch die rechte Hemisphäre zumindest eine elementare Sprache ermöglicht und wenn es darum ging geometrische Probleme zu lösen, die Leistung der linken Hirnhälfte sogar übertroffen wurde.

Auch werden Aufgaben nicht von Gehirnen verschiedener Menschen gleich gelöst und so stellen sich Schädigungen von Regionen im Gehirn oft mit unterschiedliche Auswirkungen dar. Modernen Untersuchungsmethoden, z.B. die Visualisierung von Hirnaktivitäten, nach ins Gehirn injizierten radioaktiv markierter Substanzen, lassen erkennen, unter welchen Reizen die neuronale Aktivität des Gehirns zunimmt. So konnte untersucht werden, daß Patienten die Unterschiede zwischen Tonfolgen herausfinden sollten, diese Aufgabe auf verschiedene Art und Weise lösten. Während einige sich Tonfolgen ins Gedächtnis riefen und dabei die rechte Hemisphäre stärker beteiligten, ordneten andere die Töne einem Notensystem zu, was wiederum zu einer höheren Aktivität der linken Hirnhälfte führte. Wie immer diese Beobachtungen im einzelnen zu interpretieren sein mögen, fest steht, daß akustische Signale auf vielfältige und komplizierte Weise wahrgenommen und von jedem Menschen anders bewertet und verarbeitet werden.

Das Gehör hat sich im Laufe von Jahrmillionen der Menschheitsentwicklung im wesentlichen auf einige typische wichtige ‘Schallereignisse“ eingestellt. Sie sind nicht allein mit Meßverfahren festzulegen, die physikalischen Größen annehmen, da diese kein Maß dafür bieten können, wie ein Geräusch vom Menschen empfunden wird.

Beispiele:

1. Der Schallpegel eines 1 kHz Tones von 60 dB auf 70 dB gesteigert, so entspricht dies einer Verzehnfachung der Schall-Leistung, aber nur einer Verdopplung der wahrgenommen Lautstärke.
2. Zwei gleichlaut empfundene Schalle können in ihrem A-Pegel um 15 dB (A) differieren.
3. Zwei pulsierende Töne ähnlicher Frequenz ergeben ein Klangmuster. Bei wachsendem Frequenzabstand löst sich das Muster auf und wir hören zwei Töne.
4. Lautheitsempfinden von Tönen mit gleicher Amplitude und Frequenz steht im Bereich von 200 ms bis 1000 ms in Abhängigkeit zur zeitlichen Ausdehnung. Je länger der Ton, desto lauter wird er empfunden.
5. Tiefe und hohe Frequenzen werden bei gleichem Schalldruck leiser empfunden als mittlere Frequenzen. Bei höherem Schalldruck nimmt dieser Effekt ab. Die Isophone, Kurven gleicher Lautheit, verflachen (**Abb.2**).

Wahrnehmung von Schallereignissen wird im wesentlichen von physikalischen und psychischen Eigenschaften bestimmt. Während dem physikalischen Bereich lediglich Schallstärke und das -Spektrum zuzuordnen sind, wird die neuronale Erregung durch weitaus mehr Einflußfaktoren bestimmt. Daher wurde der Nachteil von herkömmlichen audiometrischen Verfahren und die Notwendigkeit gehörrichtige Verfahren zu entwickeln schon

sehr früh erkannt. In den 20er Jahren hat Barkhaus eine Methode zur Bestimmung des subjektiven Lautheitseindrucks entwickelt. Er glich einen Geräuschpegel mit einem 1 kHz-Ton so ab, daß sie subjektiv gleich laut waren und leitete dann den Lautstärkenpegel in sones ab. In den dreißiger Jahren stellten Fletcher und Munson fest, daß die Abhängigkeit vom Schallpegel und von der Frequenz sehr stark nichtlinear und durch eine einfache Filtercharakteristik beschreibbar sind. Die Ergebnisse lassen sich in Kurven gleicher Lautstärken, den Hörkurven darstellen.

1956 entwickelte Stevens ein gehörbezogenes Lärmmeßverfahren was auf Oktavmessungen basierte und bildete daraus einen Lautheitindex. Kryter stellte drei Jahre später ein Verfahren vor, das bereits auf einer Terzpegelanalyse basierte, allerdings speziell für Fluglärm gedacht war. 1960 entwickelte Zwicker ein gehörbezogenes Lärmmeßverfahren zur Berechnung der frequenzspezifischen Lautheit und der Summenlautheit. Die „Zwickerlautheit“, gemessen in sones, ist Grundlage der DIN 45631 und der ISO 532B geworden.

Im Laufe dieser Entwicklungen wurden in umfangreichen Hörversuchen hauptsächlich folgende psychoakustische Größen bestimmt (**Abb. 3**) :

1. Die Lautheit: Beschreibt den Lautstärkeneindruck
 2. Schärfe: Beschreibt die Höhenanteile des Geräusches
 3. Schwankungsstärke und
 4. Rauhigkeit: Beschreiben Fluktuation und Modulation
 5. Tonhaltigkeit: Beschreibt tonale Anteile von Geräuschen
-
1. Lautheit: Lautheit ist die Bezeichnung für das Lautstärkeempfinden und die wichtigste psychoakustische Größe. Sie ist abhängig vom Schallpegel, Frequenz, Bandbreite und Zeitdauer des Signals. Die Einheit wird in „sones“ (1 kHz bei 40 dB Schalldruckpegel im ebenen Schallfeld = 1 sone) angegeben als Kurzzeichen wird ein großes N verwendet. Ein zugefügtes großes G bedeutet, daß der Lautheitswert sich aus Frequenzgruppen errechnet. Der hinzugefügte Buchstaben F steht für Freifeld, das D für Diffusfeld.
 2. Schärfe: Schärfe mit der Einheit acum und dem Zeichen S, gibt den Anteil hoher Frequenzen des Geräusches an. Skaliert wird in deziacum. Die Schärfe ist abhängig von der spektralen Zusammensetzung des Geräusches und dem Schallpegel.
 3. Schwankungsstärke: Bezeichnet zeitlich schwankende (amplitudenmodilierte) Geräusche. Wir unterscheiden langsame Modulationen (Schwankungen) und schnelle Modulationen (Rauhigkeit). Schwankungsstärke gibt die langsamen zeitlichen Schwankungen des Schalls an. Das Zeichen ist F, die Einheit vacil. Die Effekte werden als klappern, rattern, schlagen, rumpeln, flattern bezeichnet. Die größte Empfindlichkeit des menschlichen Ohres liegt bei 4 Wiederholungen pro Sekunde. Die Schwankungsstärke ist abhängig von Modulationsfrequenz, Modulationsgrad, Schallpegel und Frequenzpegel. 1 vacil entspricht einem 1 kHz Ton mit 60 dB, Modulationsfrequenz 4 und Modulationsgrad 1
 4. Rauhigkeit: Mit Rauhigkeit, Zeichen R, Einheit Asper, werden schnelle zeitliche Veränderungen im Signal bezeichnet. Die Signalmodulation wird vom Ohr nicht mehr als Einzelereignis sondern als Klangänderung wahrgenommen. Effekte sind dann brummen, krächzen, knirschen, surren etc. Erfäßt werden die Bereiche von ca. 10 Hz bis 250 Hz Modulationsfrequenz. Das menschliche Gehör ist für Modulationsfrequenzen von 70

Hz am empfindlichsten. Die Rauigkeit wird charakterisiert von Modulationsfrequenz, Modulationsgrad, Schallpegel, Frequenzlage und Kreuzkorrelation zu den beiden Nachbarfrequenzgruppen.

5. Tonhaltigkeit : Ein einzelner Ton, der aus einem Tongemisch auch nur geringfügig herausragt, trägt zwar nicht zur Lautheit oder Schalldruckpegel bei, wird aber als störend und lästig empfunden. Der Parameter „Ausgeprägtheit der Tonhöhe“ gibt den tonalen Anteil im Signal an. Das Zeichen ist **AdT**, die Einheit wird in Prozent angegeben. Die Tonhaltigkeit ergibt sich aus der Pegeldifferenz des tonalen Anteils zu den restlichen Geräuschanteilen von Bandbreite und Frequenz.

Unsere Alltagswelt ist bestimmt durch akustische Ereignisse, die das menschliche Gehör aufnimmt und das Gehirn verarbeitet. Sprache und Musik nehmen dabei für den Menschen eine Sonderstellung ein. Sie sind das Ergebnis eines tiefgreifenden und umwälzenden Evolutionsprozesses und konstituierender Bestandteil des menschlichen Sozialsystems.

Bei der Anpassung von Hörhilfen ist die Forderung nach einer Optimierung des Sprachverstehens des Hörgeschädigten, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Klangqualität vorrangige Aufgabe. Dies bedeutet, das Spektrum des Sprachschalls mit einer durchschnittlichen Dynamik von 30 dB soll in den Dynamikbereich des Patienten transformiert werden, ohne dessen Unbehaglichkeitsschwelle zu erreichen.

Obwohl das Hörgerät zunächst nur dem eigentlichen Schallempfangsapparat, dem menschlichen Ohr technische Hilfe sein soll und damit nur Einfluß auf Schallstärke, Schalldiskriminierung und Spektrum nimmt, ergeben sich doch eine Vielzahl von Problemen für diesen Funktionsbereich. Diese dürfen nicht nur der Trennung von Sprach- und Störschall oder den Phänomenen von Recruitment u.ä. zugeordnet werden. Die Schwierigkeit einer Anpassung bestimmt sich vor allem auch aus der Tatsache, daß der Sprachschall durch seine komplizierten und vielfältigen akustischen Elemente eine Besonderheit darstellt, die mit kaum einem anderen Schallereignis zu vergleichen ist. Psychoakustische Prozesse spielen gerade bei der Sprachverarbeitung eine große Rolle und deren Initialisierung steht in enger Abhängigkeit zu den übertragenen Signalen.

Die wesentlichen Eigenschaften des Sprachschalles werden daher im folgenden aufgezeigt werden:

Akustische Grundelemente der Sprache (Abb.4)

- vokale, nasale, frikative, plosive Elemente
- Segmente mit starker Amplitudenmodulation (z.B. r-Laut)
- Typische dynamische Segmente: Plosionsphasen der Verschlusslaute, Zeithüllensprünge beim Übergang von Vokalen zu Konsonanten und umgekehrt
- Frequenz-Zeit-Änderung des Spektrums
- Transientensegmente (typisch für Diphthonge, au , eu), Übergänge zwischen Vokal und Konsonant
- Phasensegmente: Verschlusspausen, Hauchpausen, Pausen an Silben, Worten, Satzgrenzen
- Typischer Zeitverlauf der Intensität
- Die Tonhöhe der stimmhaften Lautphase ist gleitend
- Neben Silbendauer sind auch Laut-, Wort-, Satz- und Textsegmente wesentlich
- Einheit der Schrift, Graphem korrespondiert nicht mit der Silbe. Anders ist dies bei der Musik, wo die Note der Partitur genau einem Ton entspricht

Im Gegensatz dazu ist die Musik von erheblich weniger akustischen Merkmalen bestimmt:

1. Einschwingvorgang als instationäre Phase mit rascher Zeithüllenveränderung, Grundfrequenzänderung, Frequenzzeitänderung des Spektrums, kurze Rauschimpulse
2. Quasistationäre Phase mit zeitlicher Invarianz von Kurzzeitspektren, Grundfrequenz und Intensität
3. Ausschwing- und Übergangsphase mit kontinuierlicher Zeithüllenänderung, Änderung der Oberwellenstruktur und der Grundfrequenz
4. Pause als Abgrenzung zwischen musikalischen Tönen

Betrachten wir die Einstellungsmöglichkeiten der marktüblichen Hörgeräte heute zulassen, so stellen wir fest, daß wir nach wie vor nur im geringen Maße Einfluß darauf nehmen können, daß sich auch psychoakustische Prozesse optimal konstituieren. Eine naturgetreue Wiedergabe von Sprache und Umweltgeräuschen über das Hörgerät ist bis heute nicht möglich. Künftig wird wahrscheinlich die digitale Klangübertragung hier zu einigen Optimierungen führen. Erste Geräte mit dieser Technik stehen bereits zur Verfügung, erfüllen jedoch noch längst nicht die alte Forderung, nämlich so zu hören, wie die Natur es vorgesehen hat.

Zusammenfassung

Industriell hergestellte Hörgeräte verfügen meist über Einstellmöglichkeiten in Bereichen der Lautstärke, des sogen. Peak Clippings, der Feedback Reduction Control, der Hoch-, Tief- Bandpaßeinstellung (Klangblende). Bei AGC (Automatic Gain Control) Geräten zusätzlich über pegelabhängige AGC-Regelungen. Geräte mit voll digitaler Signalverarbeitung erfahren eine computergestützte Anpassung von bis zu 150 Parameter (**Abb. 5**).

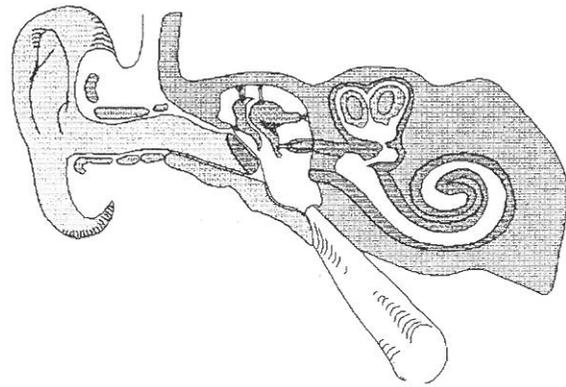
Als Besonderheit stellen die Einstellungen von Hörgeräten mit AGC dar. An Hand von Tonbeispiel haben wir die Funktionen bei unterschiedlichen Release-Zeiten und einem Kompressionsverhältnis von 1:10 hörbar gemacht. Dabei wird deutlich, daß kurze Release-Zeiten den Pumpeffekt begünstigen, der zu einem deutlich schlechterem Sprachverständnis führt.

Einige relevante und mögliche audiometrische Messungen und Einstellungen zur besseren Anpassung von Hörgeräten unter besonderer Berücksichtigung psychoakustischer Effekte, sind in der **Abb. 6** zusammenfassend dargestellt.

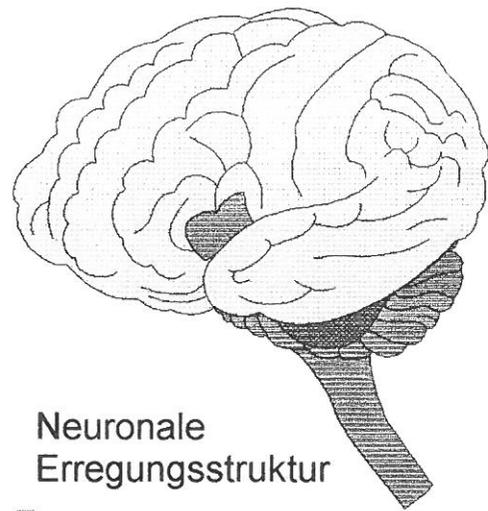
Ich hoffe, daß ich Ihnen mit meinen Ausführungen verdeutlichen konnte, wie groß das Problemfeld einer optimalen Hörgeräteversorgung ist. Wenn ich bei den Zuhörern und Lesern eine Sensibilisierung für Probleme, die Hörgeräteträger berechtigterweise empfinden und dafür was Technik eigentlich in der Unterstützung unseres Sinnessystems leisten kann erreichen konnte, ist damit meine Zielsetzung erreicht.

Schall

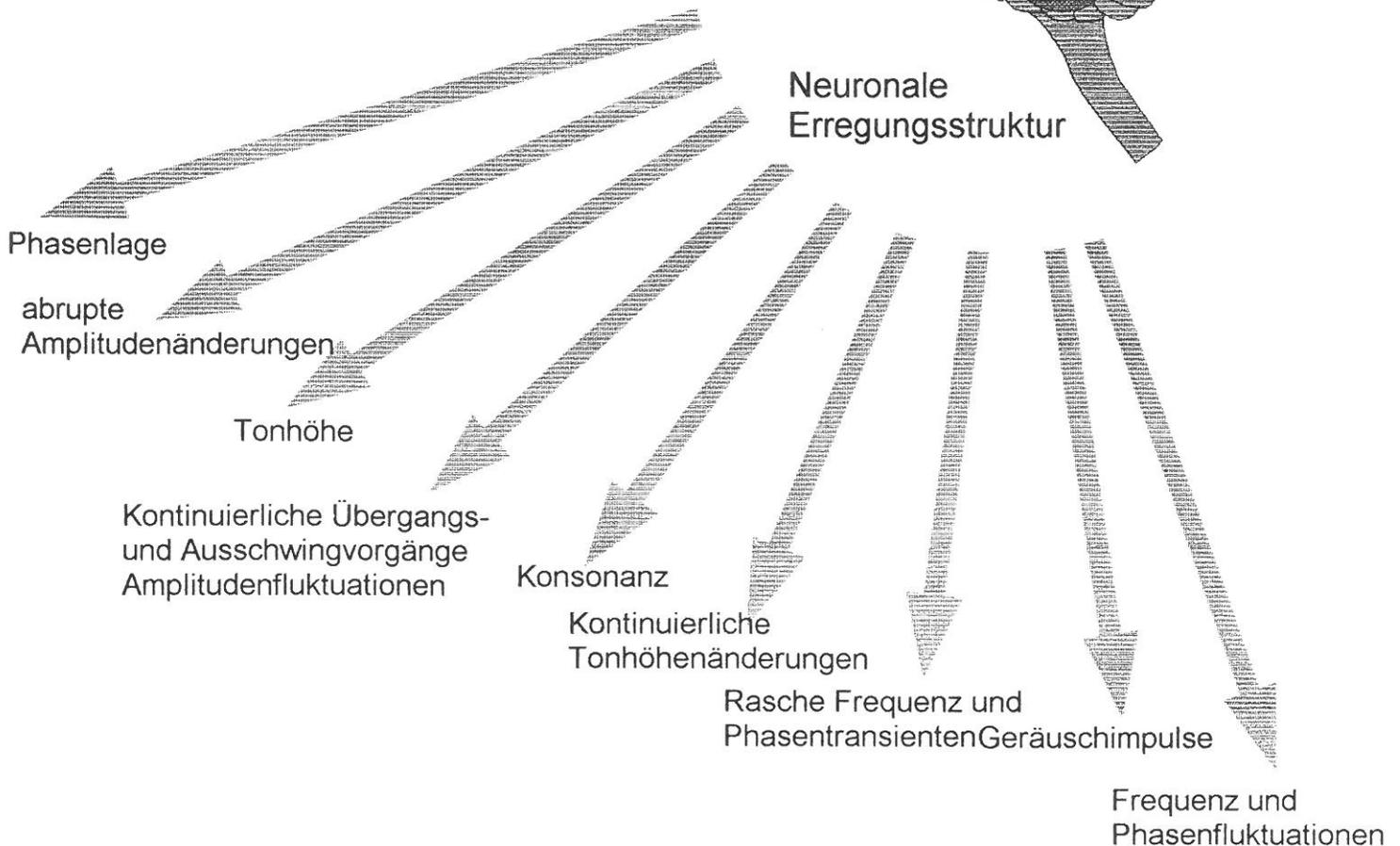
sensorische Analyse



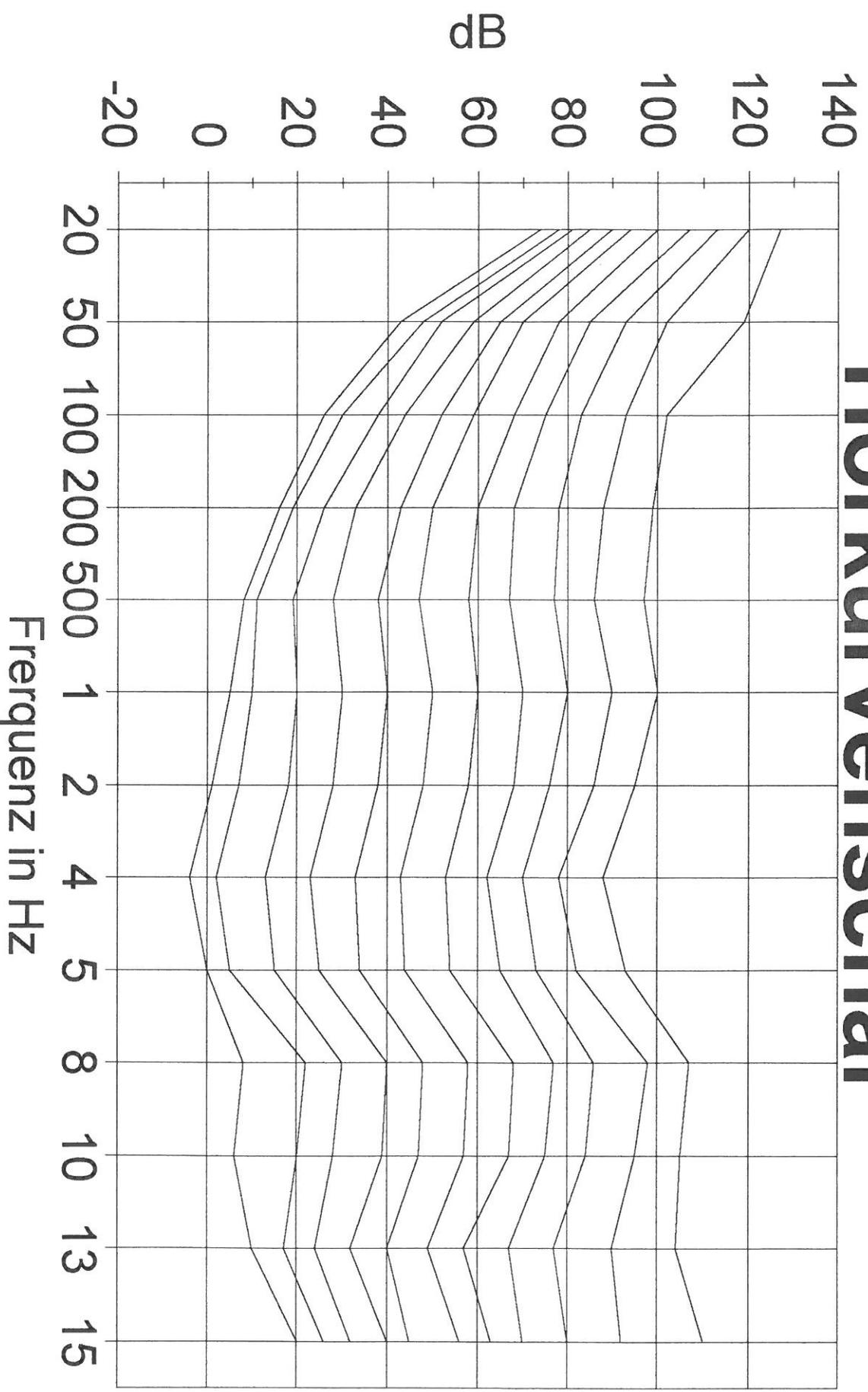
Schallstärke Spektrum



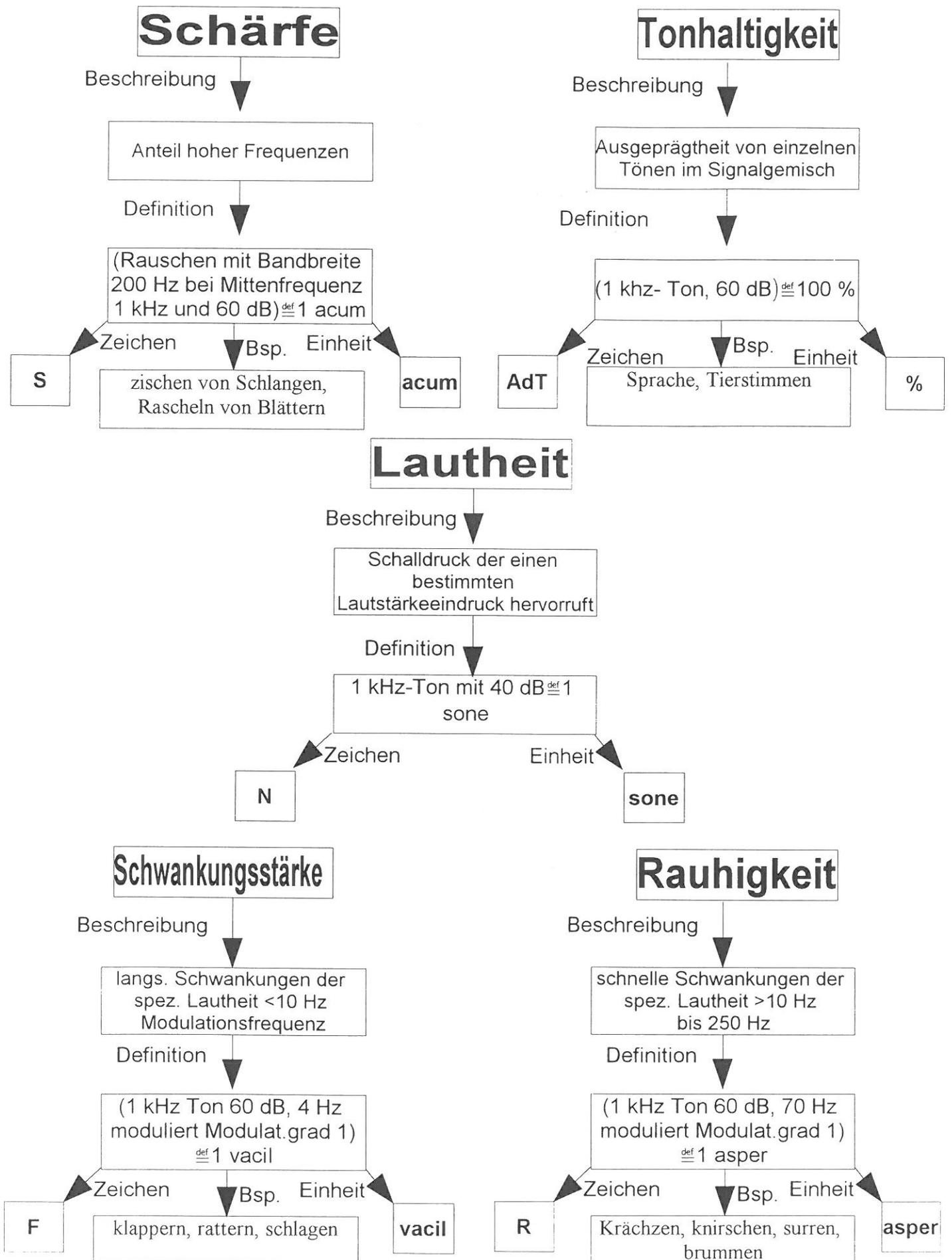
Neuronale Erregungsstruktur



Hörkurvenschar



Psychoakustische Parameter



Grundelemente der Sprache

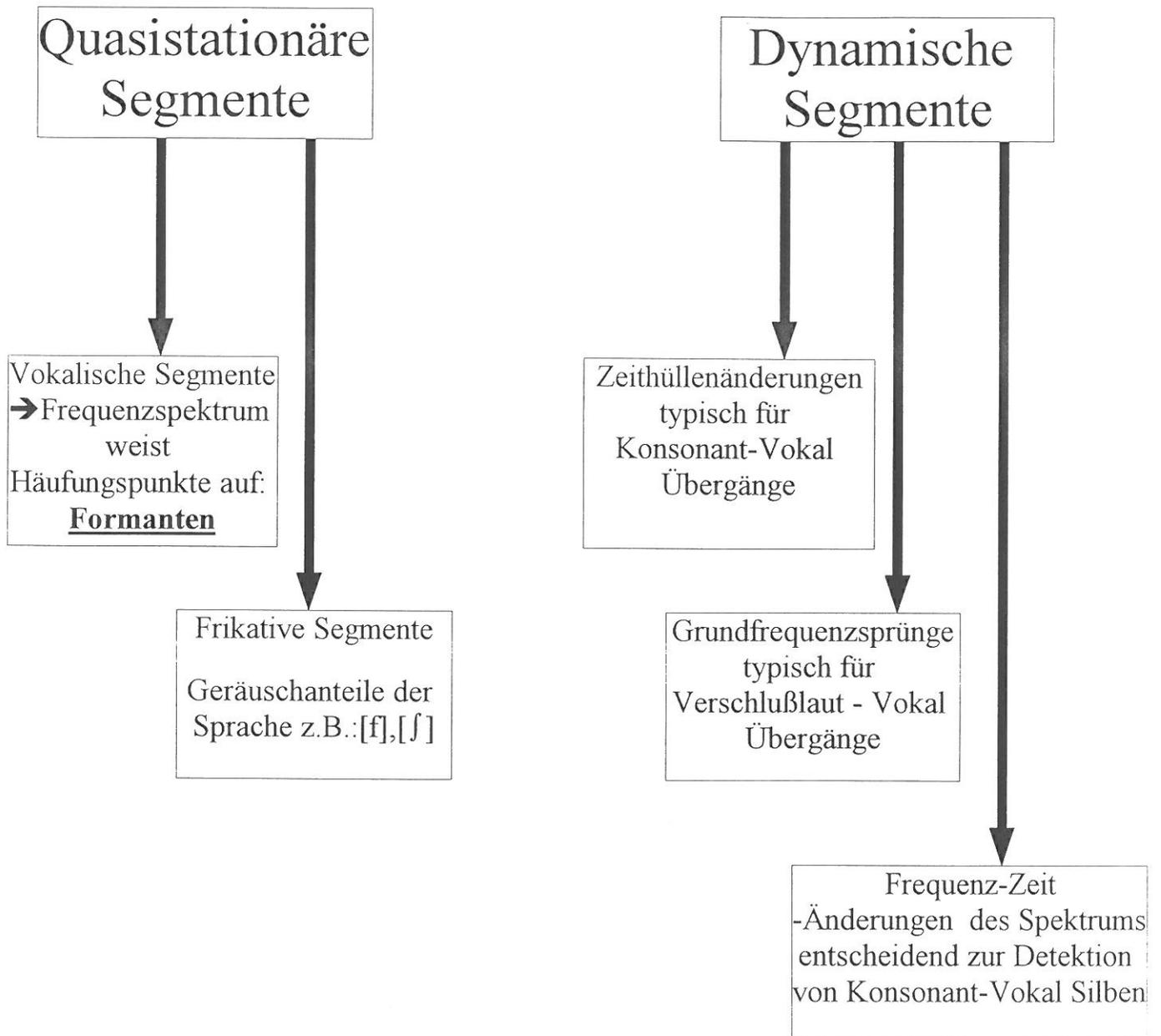
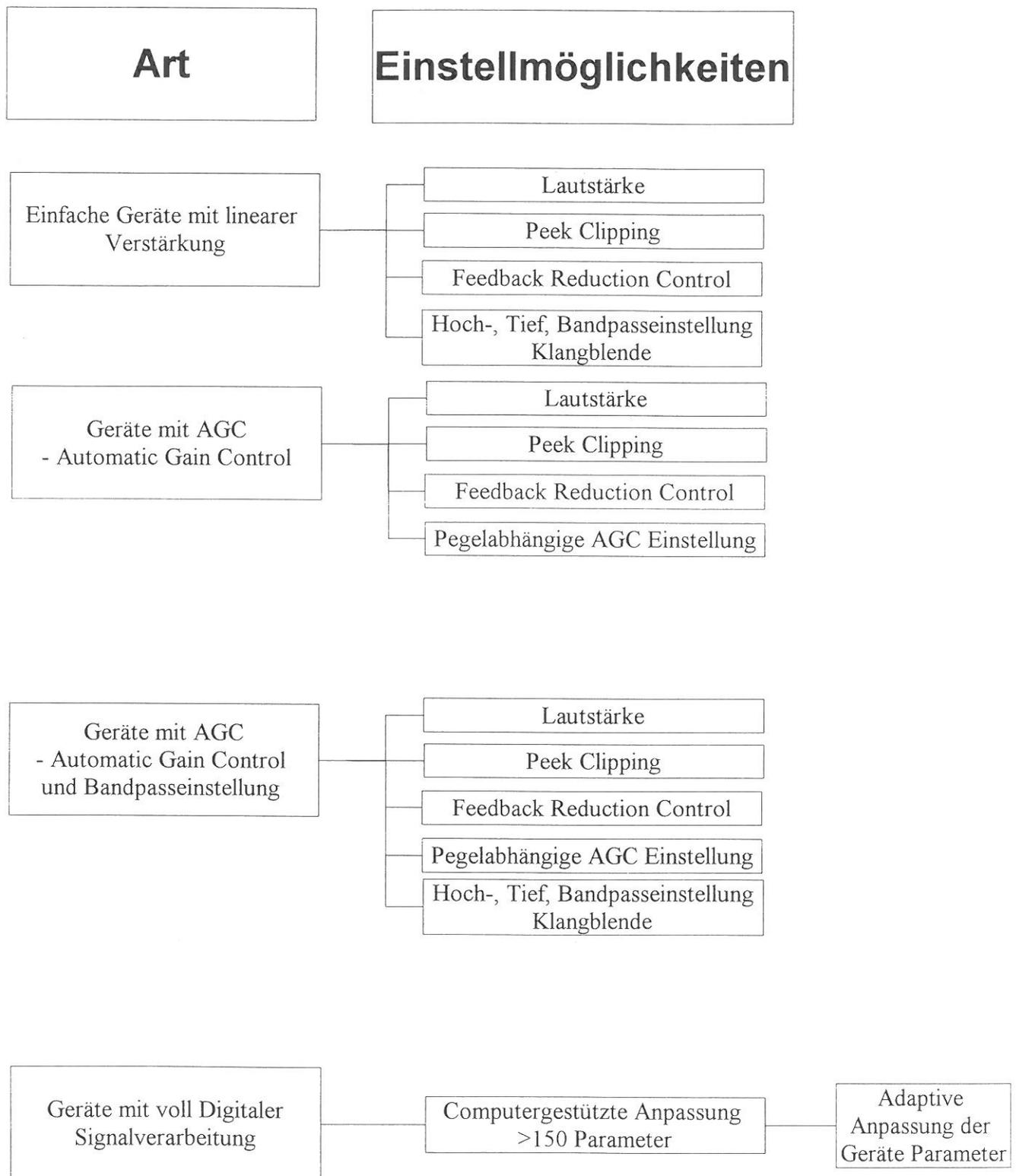


Abb. 4

Einstellmöglichkeiten an Hörgeräten



Berücksichtigung psychoakustischer Parameter bei der Hörgeräteanpassung

Der Sprachbereich (30 - 60 dBSPL) muß im Restdynamikbereich des Patienten abgebildet werden.



Der Restdynamikbereich ist umfassend zu ermitteln durch: Hörschwellenaudiometrie, Hörfeldaudiometrie, Ermittlung der Unbehaglichkeitsschwelle



Tests der zentralen Verarbeitung (psychoakustische Tests: Zeitliches Auflösungsvermögen, Diskriminationstest, Binauraler Summationstest), um neuronale Störungen auszuschließen.



Kompressionsanpassung bei AGC Geräten gering halten. Nicht mehr als nötig!



Filter so einstellen, daß ihre Bandbreite nur ganze Frequenzgruppen umfaßt.



Release Time bei AGC Geräten mit zunehmender Kompression erhöhen.