

Hörgerätetechnologien

Inga Holube

FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Studiengang Hörtechnik und Audiologie,
Ofener Str. 16/19, D-26121 Oldenburg

Einleitung

Moderne Technologien haben bei Hörgeräten innerhalb des letzten Jahrzehnts große Fortschritte erlaubt. Für die derzeit leistungsfähigsten kommerziellen Hörgeräte wird ein Einblick in die Möglichkeiten und Grenzen der zugrundeliegenden Technologien und Signalverarbeitungsalgorithmen gegeben. Aufgrund der Entwicklung der Halbleitertechnologien kann in naher Zukunft mit der Umsetzung von zunehmend komplexeren Algorithmen gerechnet werden. Der erste Teil des Beitrages behandelt zunächst unterschiedliche Hörgerätebauformen und Chiptechnologien. Danach werden die in digitalen Hörgeräten zur Anwendung kommenden Signalverarbeitungsalgorithmen vorgestellt. Den Abschluss des Beitrages bilden die zur Verwendung kommenden Hörgerätekomponenten und die Anpassung der Hörgeräteeinstellung an den individuellen Hörverlust.

Hörgerätebauformen

Hörgeräte werden in verschiedenen Bauformen und mit unterschiedlicher Verstärkung hergestellt. Neben den Hinterdem-Ohr (HdO)-Geräten werden auch Im-Ohr (IdO)-Geräte verwendet. Je nach Verstärkungsbedarf und Gehörgangsgröße unterscheidet man bei den IdO-Geräten zwischen den kleinsten Completely-in-the-Canal (CIC)-Geräten, In-the-Canal-Geräten (ITC) und Concha-Geräten (In-the-Ear, ITE), die in der Ohrmuschel platziert werden. Bei CIC-Geräten werden Batterien der Größen A10 und A5 verwendet, während bei ITC-Geräten 312-Batterien und bei ITE-Geräten 13-Batterien zum Einsatz kommen. Typischerweise können IdO-Geräte mit verschiedener Verstärkung bestellt werden. Bei CIC-Geräten reicht die maximale Verstärkung von 25 bis 40 dB, während Concha-Geräte eine Verstärkung von bis zu 55 dB ermöglichen. HdO-Geräte decken einen Bereich von 45 bis 80 dB als maximale Verstärkung ab.

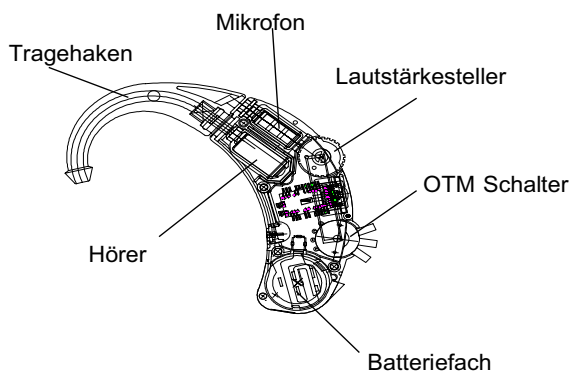


Abb. 1: Aufbau eines HdO-Gerätes.

Der Aufbau eines HdO-Gerätes ist in Abb. 1 dargestellt. Das Hörgerät besteht aus einem Mikrofon, einem Lautstärkesteller, einem OTM-Steller (zum Schalten zwischen aus, Telefonspulenbetrieb und Mikrofonbetrieb), einem Batteriefach, einem Hörer und einem Tragehaken. Die eigentliche Signalverarbeitung findet in dem sogenannten Integrated Circuit (IC) oder im Hybriden statt. Hybriden werden aus Platzgründen vor allem bei IdO-Geräten verwendet

und beinhalten neben dem IC noch externe passive Komponenten wie z. B. Kapazitäten.

Chiptechnologien

Zur Kompensation einer Schwerhörigkeit können drei verschiedene Klassen von Hörgeräten eingesetzt werden. Bis zum Ende der 80er Jahre kamen nur analoge Hörgeräte zum Einsatz, die mit Hilfe von Trimmern an die individuelle Hörschwäche angepasst wurden. Die Weiterentwicklung der Chiptechnologie erlaubte die Verwendung von analogen Hörgeräten, die digital mit Hilfe von Programmiergeräten oder PCs eingestellt werden konnten. Im Jahr 1996 wurden Hörgeräte eingeführt, die nicht nur digital programmiert werden können, sondern auch die akustischen Signale digital verarbeiten.

Auf die konventionellen analogen Hörgeräte soll hier nicht näher eingegangen werden. Analoge, digital programmierbare Hörgeräte enthalten meist einen IC, auf dem elektronische Bauteile wie Transistoren, Kapazitäten und Widerstände integriert sind. Sie weisen eine bestimmte Strukturgröße (z.B. 1,5 μm) auf. Die Strukturgröße bestimmt, welche Fläche auf dem Chip zur Realisierung der Bauteile benötigt wird. Je kleiner die Strukturgröße ist, desto mehr Bauteile können auf dem Chip integriert werden und desto kleiner wird der Chip bei einer bestimmten Anzahl von benötigten Bauteilen.

Im Vergleich mit analogen Hörgeräten können digitale Hörgeräte heute mit einer kleineren Strukturgröße (z. B. 0,18 μm) gefertigt werden. Daher erlauben digitale Chips die Umsetzung komplexerer Signalverarbeitungsalgorithmen als analoge Chips. Die Strukturgröße der Chips hat sich in den letzten 10 Jahren von 3 μm auf 0,18 μm verkleinert.

Vorteile der Digitaltechnik

Digitale Signalverarbeitung weist gegenüber analoger Signalverarbeitung eine Reihe von Vorteilen auf:

- **Miniaturisierung:** Aufgrund der zur Verfügung stehenden Halbleitertechnologie können komplexe digitale Signalverarbeitungsalgorithmen auf einer sehr kleinen Chipfläche implementiert werden. Falls die zur Zeit in einem digitalen CIC zur Verfügung stehende Signalverarbeitung mit analoger Technologie nachgebildet würde, wäre dazu die Größe eines Taschengerätes erforderlich.
- **Geringer Stromverbrauch:** Im gleichen Maße wie die Miniaturisierung fortschreitet, reduziert sich auch der Stromverbrauch für die entsprechenden Signalverarbeitungsalgorithmen. Damit können kosmetisch anspruchsvolle Hörgeräte entwickelt werden.
- **Geringes internes Rauschen:** Das interne Rauschen wird bei der digitalen Signalverarbeitung durch die Anzahl der verwendeten Bits (Wortlänge) bestimmt, nicht aber durch die Komplexität des Algorithmus. Im Gegensatz dazu nimmt bei analoger Technologie das interne Rauschen mit der Komplexität der Signalverarbeitung zu.
- **Reproduzierbarkeit:** Analoge Bauteile weisen Fertigungstoleranzen und Alterung auf, die die Verarbeitung beeinflussen. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei Verwendung von digitaler Signalverarbeitung immer das gleiche Ergebnis.

- Stabilität: Digitale Signalverarbeitung ist von externen Einflüssen unabhängig, während analoge Bauteile z.B. temperaturabhängig sind.
- Programmierbarkeit: Die Parameter von digitalen Signalverarbeitungskomponenten können in einem weiten Bereich verändert werden. Gegenüber analoger Technologie können die Anzahl der variierten Parameter sowie der Variationsbereich größer sein.
- Komplexität: Mit Hilfe von digitaler Signalverarbeitung können komplexe Algorithmen effizient implementiert werden. Ein Beispiel ist die Analyse von Eingangssignalen und deren entsprechende Modifikation zur Störgeräuschreduktion.

Technologische Restriktionen

Bei der Anwendung digitaler Signalverarbeitung in Hörgeräten müssen einige Restriktionen beachtet werden: Während bei analogen und digitalen Hörgeräten die gleichen Mikrofone mit einem Dynamikbereich von ca. 90dB verwendet werden, wird in digitalen Hörgeräten zusätzlich der Dynamikbereich in der Signalverarbeitung durch die Wortlänge (definiert durch die Anzahl der verwendeten Bits) begrenzt. Die Wortlänge der verwendeten AD-Wandler in digitalen Hörgeräten beträgt typischerweise 16-20 bit, wobei jedoch nur ca. 10-14 bit effektiv nutzbar sind. Die niederwertigsten Bits enthalten keine verwertbaren Informationen, sondern tragen zum Rauschen bei. Die nutzbare Wortlänge entspricht einem Dynamikbereich von ca. 60-84 dB. Der Dynamikbereich der verarbeitbaren Eingangssignale kann jedoch durch Signalverarbeitung vergrößert werden. Dazu werden im Eingangsbereich High-Level-Kompressoren verwendet. Sie haben einen hohen Einsatzpunkt der Kompression und ein hohes Kompressionsverhältnis. Darüber hinaus finden Expanderfunktionen Verwendung, die die Verstärkung für kleine Eingangsspiegel reduzieren.

Ebenfalls durch die Wortlänge wird die Rechengenauigkeit und damit der Dynamikbereich der internen Signalverarbeitung in digitalen Hörgeräten bestimmt. Dabei ist darauf zu achten, dass bei bestimmten Rechenoperationen (z. B. Multiplikation kleiner Zahlen) eine höhere Rechengenauigkeit notwendig ist als bei anderen Rechenoperationen (z. B. Additionen). Deshalb werden je nach Rechenoperation 16-32 Bits verwendet, die einem Dynamikbereich von 96-192 dB entsprechen.

Eine weitere Restriktion ist die Abtastfrequenz, die die verarbeitbare Signalbandbreite im Hörgerät bestimmt. Die Bandbreite beträgt höchstens die Hälfte der Abtastfrequenz. Aufgrund der endlichen Steilheit der zur Vermeidung von Aliasingeffekten notwendigen eingangsseitigen Tiefpassfilter jedoch etwas weniger. Derzeitige digitale Hörgeräte arbeiten mit einer Abtastfrequenz von 12-32 kHz. Damit kann eine Bandbreite von ca. 5-12 kHz übertragen werden.

Der Dynamikbereich der Endstufe kann bei digitaler Signalverarbeitung gegenüber analoger Signalverarbeitung erhöht werden. Während typische Hörgeräthörer (z.B. Class-D-Hörer) einen Dynamikbereich von 70-75 dB aufweisen, kann bei digitalen Hörgeräten ein Dynamikbereich von mehr als 85 dB erreicht werden.

Die digitale Signalverarbeitung kann sowohl in der Hardware festgelegt und über Parameter steuerbar als auch über Software austauschbar implementiert werden kann. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die erste Variante in bezug auf Platzbedarf und Stromverbrauch effizienter.

Digitales Hörgerät

In Abb. 2 ist ein Blockschaltbild für ein digitales Hörgerät dargestellt. Es hat bis zu drei Mikrofone, die wahlweise zu einem Richtmikrofon kombiniert werden können. Die Eingangssignale werden mit Hilfe einer Filterbank oder einer FFT in verschiedene Frequenzbereiche aufgeteilt. In jedem Frequenzbereich können Störgeräusche reduziert und Nutzsignale angehoben werden. Auch eine Dynamikkompression wird durchgeführt. Auftretende Rückkopplungen können mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus reduziert werden. Ein Klassifikationsalgorithmus unterscheidet verschiedene Hörsituationen und steuert die Funktionsweise der Verarbeitungsalgorithmen.

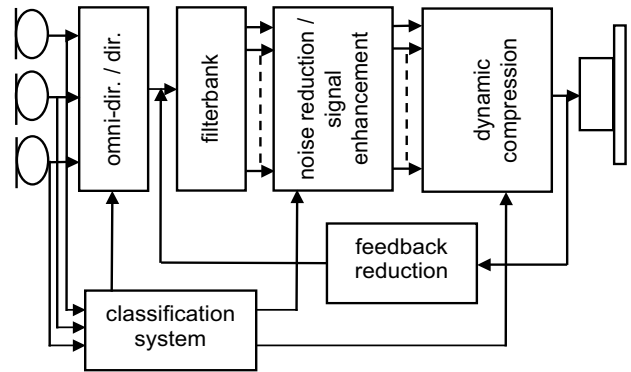


Abb. 2: Aufbau eines digitalen Hörgerätes.

Im folgenden werden nun die einzelnen Signalverarbeitungsalgorithmen in digitalen Hörgeräten dargestellt.

Richtmikrofonsysteme

Konventionelle Richtmikrofone weisen zwei Schalleingänge und einen akustischen Dämpfer auf, der die Richtcharakteristik des Systems beeinflusst. Im Gegensatz dazu werden bei kommerziellen Hörgeräten mit zwei omnidirektionalen Mikrofonen die beiden Eingangssignale zeitlich verzögert und voneinander subtrahiert (siehe Abb. 3).

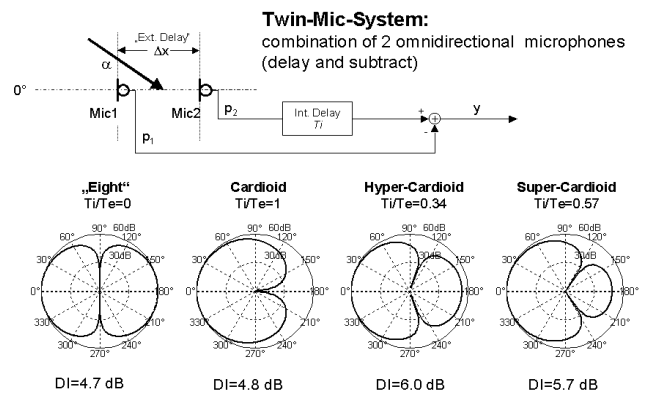


Abb. 3: Polardiagramme und Directivity Indices (DI) für verschiedene Verhältnisse zwischen interner und externer Verzögerung in einem Zwei-Mikrofon-System.

Die Richtwirkung des Systems ist gegeben durch das Verhältnis von der internen Verzögerung zwischen den beiden Eingangssignalen zu der externen durch den Mikrofonabstand gegebenen Verzögerung. In Abb. 3 ist zusätzlich der Directivity Index (DI) für jede Richtwirkung angegeben. Der DI ist definiert als die Pegelreduzierung in einem diffusen Schallfeld, wenn zwischen omnidirektionaler und direktonaler

Charakteristik umgeschaltet wird, während die Sensitivität für die Vorne-Richtung (0 Grad) gleich bleibt. Theoretisch kann mit diesen Zwei-Mikrofon-Systemen ein DI von 6 dB erreicht werden. Durch den Einfluss des Kopfes, Ungleichheit zwischen den Mikrofonen und Nachhall in natürlichen räumlichen Umgebungen ist der DI jedoch bei praktischer Anwendung reduziert.

Folgende Randbedingungen müssen bei Zwei-Mikrofon-Systemen beachtet werden:

- Wie bereits erwähnt, hat der Kopf durch Abschattung und Beugung der Schallwellen einen negativen Einfluss auf die Richtcharakteristik eines Zwei-Mikrofon-Systems.
- Die Abstimmung der beiden Mikrofone spielt eine große Rolle. Wenn sich die Empfindlichkeit der Mikrofone um 3 dB unterscheidet, dann reduziert sich der DI bei 500 Hz von z.B. 5,7 dB auf 0,9 dB und bei 4 kHz von z.B. 5,3 dB auf 4,8 dB.
- Die beiden Mikrofoneingänge müssen in der horizontalen Ebene liegen, da sonst effektiv ein kleinerer Abstand wirkt.
- Bohrungen im Ohrpassstück führen zum Einlass von Direktschall in den Gehörgang, der die Richtwirkung des Hörgerätes bei tiefen Frequenzen reduziert.
- Bei der Aufnahme der Richtcharakteristik darf die Dynamikkompression (AGC) des Hörgerätes nicht aktiviert sein, da sonst verfälschte Werte gemessen werden.
- Eine wichtiger Vorteil von Zwei-Mikrofon-Systemen gegenüber konventionellen Richtmikrofonen besteht in der Umschaltbarkeit zwischen omnidirektionaler und direktonaler Charakteristik in verschiedenen Hörsituationen.

Die neuesten Entwicklungen in diesem Bereich stellen adaptive Zwei-Mikrofon-Systeme und Drei-Mikrofon-Systeme dar. Bei den adaptiven Zwei-Mikrofon-Systemen wird die Richtcharakteristik in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Störgeräusches variiert, während die Sensitivität für die Vorne-Richtung beibehalten wird. Drei-Mikrofon-Systeme ermöglichen eine weitere Steigerung des DI auf maximal 9 dB. Dabei steigt jedoch die Empfindlichkeit bei geringen Unterschieden zwischen den Mikrofonen stark an. Darüber hinaus zeigen Drei-Mikrofon-Systeme einen Abfall des Frequenzgangs zu tiefen Frequenzen mit 12 dB/Oktave. Diese Nachteile können durch eine Kombination eines Zwei- mit einem Drei-Mikrofon-System reduziert werden. Dabei ist das Zwei-Mikrofon-System nur bei tiefen Frequenzen und das Drei-Mikrofon-System nur bei hohen Frequenzen aktiv. Dadurch reduziert sich zwar der erreichbare Directivity Index bei tiefen Frequenzen, jedoch vermindert sich auch die Empfindlichkeit gegenüber dem Mikrofonabgleich und der Frequenzgang fällt zu tiefen Frequenzen nur mit 6 dB/Oktave ab.

Frequenzabhängige Filterung

Aufgrund der Frequenz- und Pegelabhängigkeit von Innenohrschwerhörigkeiten ist eine Grundvoraussetzung für jede Signalverarbeitung in Hörgeräten die Aufteilung der Schallereignisse in mehrere Frequenzbereiche. Die Signalanteile in den verschiedenen Frequenzbereichen können dann unabhängig voneinander weiterverarbeitet werden.

Zur frequenzabhängigen Filterung wird eine Filterbank oder ein FFT-Algorithmus verwendet. Die Filterung kann eine unterschiedliche Anzahl von Ausgängen aufweisen und wird durch die Grenzfrequenzen zwischen den Ausgangsfrequenzbereichen und durch die Steilheit der Filterflanken beschrieben. Je mehr Frequenzkanäle verwendet

werden und je steiler die Filterflanken sind, desto gezielter können die Signale in den Frequenzbereichen manipuliert werden. Dies ist z. B. zur Frequenzgangformung durch die Einstellung der Verstärkung in den Bändern notwendig.

Störgeräuschreduktion

Zur Reduzierung von Störgeräuschen können in digitalen Hörgeräten die Eingangssignale analysiert und dadurch Nutzsignale von Rauschen unterschieden werden. Die frequenzabhängige Verstärkung des Hörgerätes kann dann in Abhängigkeit von der Umgebungssituation geregelt werden. Um Sprache von Störgeräuschen zu unterscheiden, müssen spezielle Kenntnisse über die Eigenschaften von Sprache herangezogen werden. Sprache kann z. B. durch ihre harmonische Struktur von Rauschen unterschieden werden. Bei dem spektralen Subtraktionsverfahren wird dagegen das Störgeräusch geschätzt. Es wird zur Steuerung eines Wienerfilters verwendet, das die verschiedenen Frequenzbereiche je nach Rauschanteil unterschiedlich gewichtet.

Bei einem anderen Algorithmus werden die Modulationsfrequenzen der Signale berechnet. Die Modulationsfrequenzen zeigen einen für Sprache typischen Verlauf mit einem Maximum im Bereich von 2-8 Hz. Diese Frequenzen sind durch den Rhythmus der Sprache (die Dauer der Wörter, Silben und Phoneme) bestimmt und sind sowohl vom Klang der Stimme als auch von der gesprochenen Sprache unabhängig. Störgeräusche dagegen beinhalten zumeist andere Modulationsfrequenzen. Ein Algorithmus kann nun die Einhüllenden der Eingangssignale analysieren. Wenn die typischen Modulationsfrequenzen von Sprache im Bereich von bis zu 10 Hz nicht vorhanden sind, wird die Verstärkung in dem entsprechenden Frequenzbereich und damit das Störgeräusch reduziert.

Dynamikkompression

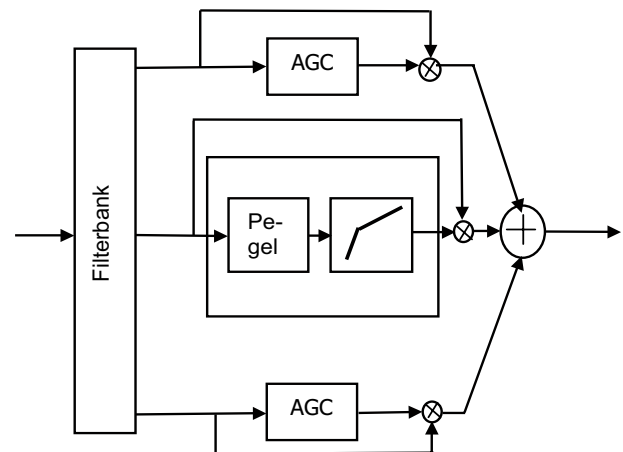


Abb. 4: Wirkungsweise der Multi-Kanal-Dynamikkompression (MCC).

Bei der Versorgung einer Innenohrschwerhörigkeit mit linearen Hörgeräten werden typischerweise leise Signale als zu leise und laute Signale als zu laut wahrgenommen. Eine Dynamikkompression kann dieses Problem lösen, indem leise und laute Signale unterschiedlich stark verstärkt werden. Findet diese Dynamikkompression unabhängig in verschiedenen Frequenzbereichen statt, dann spricht man von Multikanal-Dynamikkompression (MCC, siehe Abb. 4). Die Vorteile der MCC sind die frequenzspezifische Normalisierung der

Lautheit, die Hörbarkeit leiser Signale in allen Frequenzbereichen und die Störreduktion bei unterschiedlichem Spektrum von Sprache und Störgeräusch. Die MCC ist zur Zeit Standard für High-End-Hörgeräte. Die Produkte unterscheiden sich jedoch durch die Anzahl der verwendeten Kompressionskanäle und das dynamische Verhalten der Kompression, d.h. die Zeitkonstanten (Ein- und Ausschwingzeiten). Die Kanalzahl reicht von 2 bis 20, und die verwendeten Zeitkonstanten sind kurz oder lang. In einigen Geräten kann sogar zwischen kurzen und langen Zeitkonstanten umgeschaltet werden.

Feedbackreduktion

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Hörgeräten ist die Unterdrückung der akustischen Rückkopplungen (Feedback). Sie wird meist durch eine Reduzierung der Verstärkung bei der Anpassung des Hörgerätes vermieden. Eine andere Möglichkeit sind schmalbandige Lückenfilter (Notch-Filter), die bei den kritischen Feedbackfrequenzen positioniert werden und die Verstärkung bei der betreffenden Frequenz damit selektiv reduzieren. Solche statischen Anpassungen sind jedoch wirkungslos, falls die Rückkopplungen in Folge veränderter äußerer akustischer Bedingungen plötzlich bei einer anderen Frequenz auftreten. Dieses Problem können adaptive Algorithmen lösen. Sie analysieren ständig das Eingangssignal und erkennen Rückkopplungen. Daraufhin wird ein Kompensationsfilter so eingeregelt, dass sein Ausgangssignal die rückgekoppelten Anteile im Eingangssignal gerade auslöscht.

Klassifikation von Hörsituationen

Die in Hörgeräten zur Verfügung stehenden Signalverarbeitungsalgorithmen werden immer zahlreicher und komplexer. Weitere Verbesserungen z.B. in der Störgeräuschreduktion können jedoch oft nur in bestimmten Hörsituationen erreicht werden, während in anderen Hörsituationen diese Algorithmen keine Wirkung erzielen oder sogar von Nachteil sind. Beispielsweise ermöglichen einige Störgeräuschreduktionsalgorithmen eine Reduktion von Hintergrundgeräuschen, sie führen aber auch zu einer Verminderung der Klangqualität von Musik. Ein weiteres Beispiel sind Richtmikrofonsysteme. Sie führen zu einer Reduktion von seitlichen Störschallquellen, aber auch zu einer Abschwächung von Gesprächspartnern im Auto, die man als Fahrer während der Fahrt nicht direkt ansehen kann.

Ein Klassifikationssystem extrahiert bestimmte Merkmale aus dem Eingangssignal, die für die jeweilige Hörsituation charakteristisch sind (siehe Abb. 5).

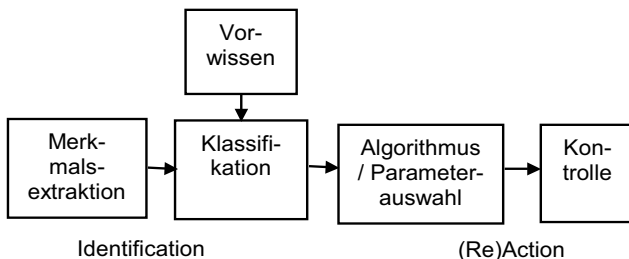


Abb. 5: Prinzip eines Klassifikationssystems.

Ein Klassifikationsalgorithmus ordnet dann den Ausprägungen der Merkmale mit Hilfe von Vorwissen aus einer Lernphase bestimmten Hörsituationen zu. Aufgrund der erkannten Hörsituation wird dann ein bestimmter

Signalverarbeitungsalgorithmus oder eine bestimmte Parametereinstellung ausgewählt und an eine Kontrolleinheit übergeben, die die Einstellungen im Hörgerät steuert.

Die plötzliche Umschaltung zwischen verschiedenen Hörgeräteeinstellungen kann bei Hörgeräteträgern zu Verwirrungen führen. Durch einen kontinuierlichen Übergang zwischen den unterschiedlichen Einstellungen mit längeren Zeitkonstanten kann jedoch plötzliches Umschalten vermieden und die Reaktion des Hörgerätes bei auftretenden kurzzeitigen Fehlklassifikationen begrenzt werden.

Hörgerätekomponenten

Die beschriebenen Signalverarbeitungsalgorithmen sind auf dem Hörgerätechip integriert. Zusätzlich werden jedoch noch weitere Komponenten benötigt, die wesentlich zur Qualität des Gesamtsystems Hörgerät beitragen. Ein wichtiges Merkmal von Hörgeräten ist ihr Dynamikbereich, der vor allem bei frequenzabhängigem Hörverlust die Klangqualität beeinflusst. Moderne Hörgeräte können Eingangssignale mit einem Dynamikumfang bis zu 100 dB verarbeiten und weisen am Ausgang einen Dynamikbereich von bis zu 85 dB auf.

Die Wandler müssen sehr klein sein, damit auch kosmetisch anspruchsvolle Lösungen realisiert werden können. Sie sind auf Empfindlichkeit und hohe Ausgangsleistungen optimiert, jedoch sollte der Frequenzgang möglichst glatt und die Verzerrungen möglichst gering sein. Diese Anforderungen werden von heutigen Hörgeräten zum Teil nur unzureichend erfüllt, so dass hier Verbesserungspotential besteht.

Hörgeräte werden oft in Handarbeit unter dem Mikroskop hergestellt. Eine Automatisierung bei der Schalenherstellung erhofft man sich zur Zeit durch die Verwendung von Lasersintering-Verfahren. Dabei wird der Ohrabdruck des Hörgeräteträgers dreidimensional gescannt und eine entsprechende Schale aus einem Kunststoff aufgebaut.

Hörgeräteanpassung

Bei der Hörgeräteanpassung nimmt der Hörgeräteakustiker eine Einstellung aufgrund des individuellen Hörverlustes vor. Ein entsprechendes PC-basiertes Anpassprogramm berechnet einen Vorschlag für die Parametereinstellungen aufgrund verschiedener Angaben über den Hörgeräteträger. Individuelle Präferenzen können jedoch eine abweichende Einstellung erfordern. Dazu können entweder mehrere Einstellparameter des Hörgerätes direkt oder indirekt über eine problemorientierte Anpasshilfe verändert werden. Zum Teil stehen auch Hörbeispiele zur Verfügung, die die Überprüfung der Hörgeräteanpassung bzw. die Optimierung der Lautstärkeinstellung oder des Klangs unterstützen können.

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beinhaltet einen Überblick über Eigenschaften, Komponenten und Randbedingungen von modernen Hörgeräten, deren Funktionalität sich aufgrund der verwendeten Technologien in den letzten Jahren gesteigert hat. Zukünftige Entwicklungen sollten die Möglichkeiten der binauralen Signalverarbeitung und der Kombination mit Telekommunikationssystemen berücksichtigen sowie die Verbesserung der Klangqualität des Hörers und die Reduktion des Okklusionseffektes anstreben.