

Signalverarbeitung in digitalen Hörgeräten

Von Volker Hohmann



Stimmengewirr, Geschirrklopfen und Musik - eine Begleiterscheinung von "Kneipenatmosphäre" - bereiten schon dem Normalhörenden Probleme. Für Schwerhörende können hier digitale Hörgeräte mit ausgeklügelten Signalverarbeitungsverfahren Abhilfe schaffen.

Die Einführung der Digitaltechnik in Hörgeräten eröffnet substanzial neue Möglichkeiten zur Kompensation von Hörstörungen. Am Fachbereich Physik der Universität Oldenburg wird dazu Grundlagenforschung betrieben, die langfristig auf eine Verbesserung von Hörgeräten abzielt. Dieser Artikel beschreibt die Forschungsansätze auf diesem Arbeitsgebiet.

The introduction of digital signal processing in hearing aids facilitates the use of complex processing schemes for the compensation of hearing disorders. Basic research is carried on at the department of Physics that aims at improving hearing aids using the new techniques. This article describes the basic approach to this work.

Das erste Hörgerät mit digitaler Verarbeitung der akustischen Signale wurde 1996 vorgestellt. Obwohl die digitale Technik zu diesem Zeitpunkt bereits mit der CD in allen Wohnzimmern Einzug gehalten hatte, war es eine Überraschung für alle in der Hörgerätebranche, dass es möglich war, diese Technik und diese Prozessorleistung auf kleinstem Raum im Hörgerät unterzubringen und mit geringstem Energiebedarf zu betreiben. Nicht einmal Mobiltelefone, die gemeinhin als Innovationswunder gelten, erreichten diese Effizienz. Man kann also die Einführung des digitalen Hörgeräts ohne weiteres als "Quantensprung" bezeichnen. Seitdem ist die Entwicklung schnell vorangeschritten und alle großen Hörgerätehersteller bieten mittlerweile volldigitale Geräte an, die eine komplexe digitale Verarbeitung der akustischen Signale erlauben. Die verfügbare Prozessorleistung im Hörgerät steigt dabei etwa genauso schnell wie diejenige der Heim-PCs. Das liegt im Wesentlichen an den verwendeten Packungsdichten der Bauteile auf den Prozessor-Bausteinen, die in beiden Bereichen gleichermaßen steigen. Die Frage ist nun, was man mit der steigenden Prozessorleistung im Hörgerät zum Nutzen des Hörgeschädigten anfängt, also welche Programme darauf installiert werden sollen (im Kontext der digitalen Signalverarbeitung spricht man dabei von *Algorithmen*). Dies entspricht in etwa der Frage, welche aufregenden Computerspiele auf

heutigen PC's laufen können. Softwaretechnisch ist es immer äußerst anspruchsvoll und eindrucksvoll, aber ist es auch gut und nicht nur teuer?

Betrachtet man die vorhandenen mathematischen Grundlagen für die digitale Signalverarbeitung, so sind diese bereits sehr alt und gehen zum Teil schon auf das 18. Jahrhundert zurück. Etwa finden sich bereits bei Gauß die Grundlagen für die schnelle digitale Fourier-Transformation zur Analyse des Frequenzgehalts eines Signals, anschaulich gesprochen: seines Tonhöhengehalts. Seit etwa 30 Jahren gibt es Standardlehrbücher zur digitalen Signalverarbeitung und seitdem wird diese Theorie ständig erweitert. Mit ihr steht also ein gut erforschtes und fundiertes Werkzeug für die Entwicklung von Programmen zur Verarbeitung digitalisierter akustischer Signale zur Verfügung. Ihre Möglichkeiten gehen prinzipiell über die Möglichkeiten der herkömmlichen analogen Technik hinaus, d.h. es können Algorithmen verwendet werden, die keine Entsprechung in der analogen Welt haben. Insofern bietet die Einführung der Digitaltechnik in Hörgeräten ein großes Potenzial zur Verbesserung der Sprachverarbeitung in Hörgeräten, obwohl noch weitgehend unklar ist, wie es genau genutzt werden soll. Dies kann man daran ersehen, dass die meisten in den heutigen digitalen Hörgeräten benutzten Algorithmen mehr oder weniger Kopien der bislang benutzten analo-

gen Versionen sind. Sie bieten allenfalls eine erhöhte Flexibilität der Einstellung und eine verbesserte Klangqualität, stellen aber noch nichts prinzipiell Neues dar. Hier setzt unsere Oldenburger Arbeitsgruppe an: Sie betreibt Grundlagenforschung im Bereich der Algorithmen für die Sprachverarbeitung in Hörgeräten, die das Potenzial der digitalen Signalverarbeitung ausnutzt und langfristig zu einer verbesserten Kompensation von Hörstörungen führen soll.

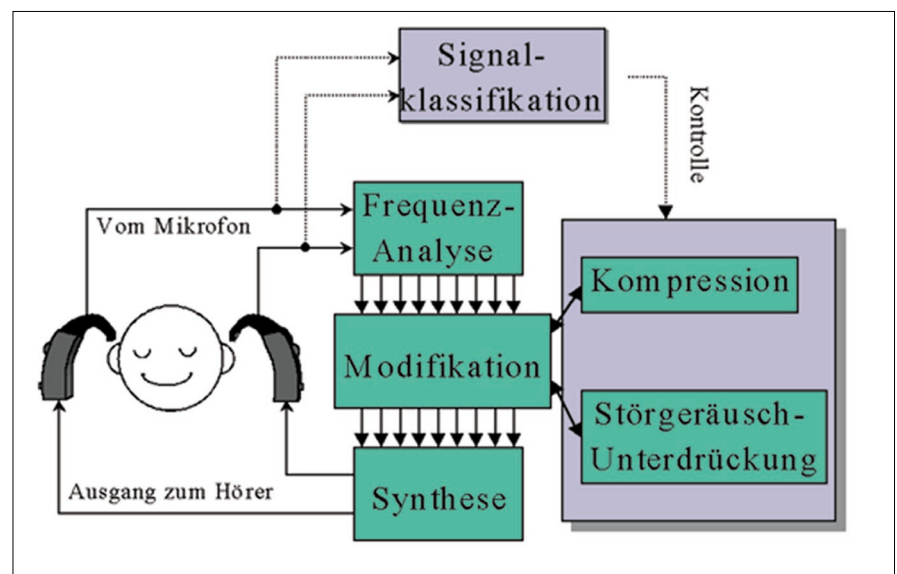
Warum nun kümmern sich, unter anderem in Oldenburg, gerade Physikerinnen und Physiker um das Problem der Signalverarbeitung in Hörgeräten, warum ist das nicht nur eine Aufgabe für die Ingenieurwissenschaften? Der Grund: Das Gehör ist ein äußerst komplexes System, das sich nur durch gemeinsame Anstrengung verschiedener Disziplinen verstehen lässt. Außerdem ist die Physik ja gerade dazu da, komplexe Systeme in der Natur zu beobachten und zu beschreiben. Ich möchte dies den "modellbasierten Ansatz" nennen: Wir versuchen, eine modellmäßige Beschreibung der Gehörfunktion zu finden, die auch die Unterschiede zwischen dem normalen und dem gestörten Gehör wiedergibt (siehe dazu auch Torsten Dau in EINBLICKE Nr. 29: "Modell der effektiven Sprachverarbeitung im Gehör"). Ausgehend davon suchen wir Algorithmen, die die vom Modell beschriebenen Auswirkungen der Schwerhörigkeit gerade kompensieren oder bestimmte durch die Schwerhörigkeit ausgefallene Leistungen ersetzen/kopieren. Was sind nun die konkreten Inhalte dieses Ansatzes?

Wie Wellen und Boote auf einem See

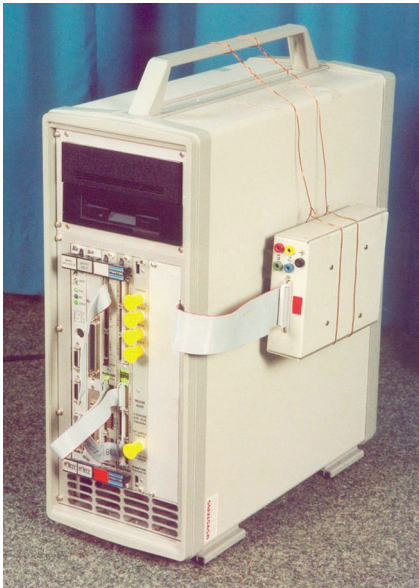
Eine der faszinierendsten Leistungen des menschlichen Gehörs, die bei Schwerhörigkeit gestört ist, ist die Fähigkeit zum Verständnis von Sprache in störrauschbehafteter Umgebung (diese Fähigkeit wird oft als "Cocktail-Party-Effekt" bezeichnet). Wir können verschiedene akustische Objekte, etwa eine Stimme, Geschirrkloppern und Hintergrundmusik, unterscheiden und dann das gewünschte akustische Objekt herausfiltern, etwa die Stimme. Physikalisch geschieht dabei Folgendes: Die von den verschiedenen Objekten ausgesandten Schallwellen überlagern sich im Raum, so dass nur ein "Wellensalat" das Ohr erreicht. Unser Gehör muss dann daraus die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Objekte "zurückrechnen". Das ist etwa so, als sollte man anhand der am Ufer eines Sees auflaufenden Wellen sagen, wie viele und welche Art Boote wo auf dem See herumfahren. Im akustischen Fall leistet unser Gehör dieses scheinbar unmögliche sozusagen nebenbei. Es ist bisher noch unklar, wie

diese Leistung zustande kommt, jedoch werden in der psychoakustischen Forschung immer genauere Modelle dafür entwickelt. Es zeigt sich, dass neben der hohen Selektivität des Gehörs für verschiedene Frequenzen/Tonhöhen die Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen (schnellen Lautstärkeschwankungen) sowie das Richtungshören eine wesentliche Rolle für diese Objektrennung und -erkennung spielt. Das Richtungshören wiederum ist eng verknüpft mit dem *zweiohrigen (binauralen) Hören*, das eine Verrechnung der an beiden Ohren ankommenden Schallwellen ermöglicht. Bei Schwerhörenden stellt man nun fest, dass die Fähigkeit zur Trennung akustischer Objekte gestört und die Sprachverständlichkeit im Störrausch reduziert ist. Dies wird von vielen Schwerhörenden als deutliche Einschränkung des sozialen Lebens beschrieben. Ein Hörgerät, das alle akustischen Signale gleichermaßen verstärkt, nützt hier nichts. Vielmehr muss es selbst die Trennung der Objekte durchführen und selektiv verstärken. In Oldenburg arbeiten wir an einem Richtungsfilter-Algorithmus, der dasjenige Signal verstärkt, das gerade von vorne kommt. Um zu erkennen, welche Signalanteile aus der Vorne-Richtung kommen, werden dabei im Wesentlichen Eigenschaften des binauralen Hörens simuliert, d.h. wir benötigen je ein Mikrofon an jedem Ohr und einen zentralen Prozessor, der die beiden Mikrofonsignale verrechnet. Wir nennen das ein *binaurales Hörgerät*. Obwohl unsere Arbeitsgruppe wesentliche

Entwicklungen dafür geleistet hat, funktioniert es noch nicht so gut wie unser (normales) Richtungshören. Dennoch können Schwerhörige mit gestörten binauralen Funktionen davon durchaus profitieren. Weitere Grundlagenforschung ist nötig, um hier noch größere Verbesserungen zu erzielen. Eine weitere, heute bereits kommerziell verfügbare Möglichkeit zur selektiven Filterung bietet ein Richtmikrofon, das meist auch aus zwei Einzelmikrofonen besteht. Im Hörgerät ist der erzielbare Effekt jedoch begrenzt, da die Mikrofone aufgrund der geringen Abmessungen der Geräte räumlich sehr dicht beieinander liegen müssen. Eine Anordnung von Mikrofonen im Abstand der Ohren erscheint hier zukunftssträchtiger, jedoch ist die notwendige Kopplung der Geräte am linken und rechten Ohr über den zentralen Prozessor technisch noch nicht realisiert. Eventuell wird zukünftig die Übertragung per Funk möglich. Der zweite große Bereich sind Algorithmen zur Dynamikkompensation zum Ausgleich von Störungen der Lautstärkewahrnehmung bei Schwerhörigen. Durch Adaptationsprozesse im Innenohr, bei denen die so genannten äußeren Haarzellen eine wesentliche Rolle spielen, erreicht das normale Gehör sowohl eine sehr hohe Empfindlichkeit bei niedrigen Schallpegeln als auch eine sehr hohe Toleranz bei hohen Schallpegeln. Der Schallpegel ist eine physikalische Größe für die Intensität des Schalls und ist mit einem Messgerät messbar. Das Gehör passt also seine "Verstärkung" dem Schallpegel



Verarbeitungsmodell eines Hörgerätealgorithmus, d.h. eines Programms für digitale Hörgeräte. Es nimmt Signale von Mikrofonen an beiden Ohren auf, verrechnet diese in einem zentralen Prozessor und sendet das modifizierte Signal wieder an die Hörer (Lautsprecher) an beiden Ohren (binaurales Hörgerät). Die Verarbeitung umfasst Frequenzanalyse, Lautheitsanpassung (Kompression) und Störrauschunterdrückung in den verschiedenen Frequenzbereichen sowie eine Signalklassifikation zur automatischen Anpassung der Verarbeitung an die Hörumgebung.



Spezialisiertes Prozessorsystem zur Entwicklung und zum Labortest von Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung. Dieses System erlaubt die Verarbeitung in Echtzeit, d. h. man hört das verarbeitete akustische Eingangssignal sofort und kontinuierlich am Ausgang.

an und deckt so einen sehr großen Dynamikbereich an Schallpegeln zwischen den als leise und den als laut empfundenen Schall ab. Im gestörten Gehör sind meist die äußeren Haarzellen in Mitleidenschaft gezogen und die Erhöhung der Empfindlichkeit bei niedrigen Schallpegeln fällt aus. Das Gehör arbeitet dann immer mit der für hohe Schallpegel vorgesehenen Empfindlichkeit. Das führt dazu, dass der "nutzbare" Bereich an Schallpegeln zwischen der Hörschwelle (sehr leise) und der Unannehmlichkeitschwelle (sehr laut) kleiner wird. Zum Ausgleich dieses so genannten "Recruitment"-Phänomens ist eine Dynamikkompression notwendig, die den großen Schallpegelbereich der akustischen Umwelt auf den wahrnehmbaren Bereich des Schwerhörenden individuell "zusammendrückt" (daher der Name Kompression). Solche Kompressoren sind auch aus der Musik-Übertragungstechnik bekannt, jedoch treten im Gehör mehrere nicht-lineare Effekte bei der Lautstärkewahrnehmung auf, die eine komplexere Regelung der Verstärkung je nach Gesamt-Schallpegel, Frequenzgehalt sowie Vorgeschichte des Signals notwendig machen. Zur optimalen Verstärkungsregelung spielen also wieder Modelle des Hörprozesses eine Rolle.

Der dritte Arbeitsbereich betrifft Algorithmen zur Signalklassifikation. Die meisten der bisher beschriebenen Algorithmen, insbesondere zur Störgeräuschunterdrückung, sind für bestimmte Hörsituationen optimiert, d.h. das aktuelle Signal muss bestimmte, meist statistisch definierte Randbedingungen erfüllen, damit der Algorithmus wirksam ist. Beispielsweise kann die Optimierung entweder auf ein diffuses, also räumlich verteiltes Störgeräusch oder auf eine einzelne, raumfeste Störquelle erfolgen, aber nicht gleichzeitig (auch unser Ge-

hör adaptiert seine Verarbeitungsstrategie entsprechend der Hörsituation). Sind die spezifischen Randbedingungen nicht erfüllt, kann ein Algorithmus unangenehme Verzerrungen (Artefakte) hervorrufen, die vermieden werden müssen. Um solche spezifisch wirkenden Algorithmen im Hörgerät verwenden zu können, ist eine Klassifikation der Hörsituation notwendig, die das automatische Zu- und Abschalten der einzelnen Verarbeitungsalgorithmen ermöglicht. Speziell arbeiten wir an

Klassifikationalgorithmen, die etwas über die Diffusität der Hörumgebung sowie das Vorhandensein von Sprache und bestimmter Klassen von Störgeräuschen im aktuellen Signal aussagen. Dabei werden statistische Signaleigenschaften ausgenutzt, die unser Gehör nach den vorliegenden Modellvorstellungen ebenfalls zur Klassifikation nutzt (also wieder der "modellbasierte" Ansatz).

Zusammenfassend lassen sich folgende Komponenten eines Hörgeräts identifizieren, an denen in Oldenburg gearbeitet wird:

1. Signalaufnahme mit Mikrofonen an beiden Ohren und Digitalisierung der Signale.
2. Automatische Signalklassifikation zur Bestimmung der aktuellen Hörumgebung.
3. Frequenzanalyse zur Bestimmung des "Tonhöhengehalts".
4. Modifikation der verschiedenen Frequenzbereiche zur Lautheitsanpassung (Kompression) und zur Unterdrückung nicht gewünschter Signalanteile (Störgeräuschunterdrückung), je nach Hörumgebung.
5. Zusammenfassung der Frequenzbereiche zu einem Ausgangssignal (Frequenzsynthese).
6. Wandlung der digitalen Ausgangssignale in analoge Signale und Wiedergabe über die Hörer (Lautsprecher) der Hörgeräte.

Entwicklungswerkzeuge

Da man nicht von vornherein weiß, ob eine Idee für einen Algorithmus zu sinnvollen Ergebnissen führt, und meist ein umfangreicher Optimierungsprozess notwendig ist, ist es ein langer Weg von der Idee zum fertigen Prozessor-Chip. Man ist daher bemüht, einfache und flexible Entwicklungswerkzeuge zu nutzen. Ein Algorithmus wird zunächst "in Formeln" erdacht und kann auf einem Blatt Papier aufgeschrieben werden. Ein Algorithmus nutzt

Berechnungen, die ein Taschenrechner im Prinzip auch leisten kann, allerdings viele davon und in komplexen Verschaltungen. Die Theorie der digitalen Signalverarbeitung bestimmt dabei die Regeln und besagt, welche Modifikation eine bestimmte Berechnung mit Zahlen an dem akustischen Signal bewirkt, das durch diese Zahlen repräsentiert ist. Ist der Algorithmus erdacht, wird er zunächst auf herkömmlichen PCs unter Verwendung verschiedener Programme der numerischen Mathematik programmiert. Das kann z.B. in formalen Programmiersprachen wie Fortran und C oder auch in Form von Blockschaltbildern geschehen, die die einzelnen Berechnungsstufen repräsentieren. Damit lassen sich bereits Hörbeispiele erzeugen, jedoch ist die Berechnungsgeschwindigkeit meist ziemlich langsam. Daher werden vielversprechende Algorithmen auf ein spezialisiertes Labor-Prozessorsystem übertragen, das die Verarbeitung in Echtzeit erlaubt, d.h. das System braucht zur Verarbeitung von 1s des Signals maximal 1s. In absehbarer Zeit werden herkömmliche PCs bereits schnell genug für die Echtzeitverarbeitung sein, so dass die spezialisierten Prozessorsysteme obsolet werden. Mit Hilfe der Echtzeit-Verarbeitung kann ein Algorithmus intensiv mit Normal- und Schwerhörenden im Labor unter Verwendung vieler Hörbeispiele getestet und seine Einstellparameter optimiert werden. Die nächste Stufe ist dann die Übertragung des Algorithmus auf ein tragbares Signalprozessorsystem im Walkman-Format, mit dem Schwerhörende den Algorithmus in ihrem Alltag testen können. Hat ein Algorithmus in einem solchen Feldtest seine Wirksamkeit gezeigt, kann er auf die hochspezialisierten Prozessoren kommerzieller digitaler Hörgeräte übertragen werden. Aber das ist für die jetzt in der Grundlagenforschung zumeist von Physikerinnen und Physikern untersuchten Algorithmen noch nicht in Sicht und wird dann endgültig eine Aufgabe für Ingenieurinnen und Ingenieure werden!

Der Autor



Dr. Volker Hohmann, wiss. Mitarbeiter am Fachbereich Physik, AG Medizinische Physik. Physikstudium 1983-1986 in Braunschweig und 1986-1989 in Göttingen. 1993 Promotion. Forschungsaufenthalte in Cambridge, Boston und Stockholm. Forschungsschwerpunkte: Psychoakustik bei Schwerhörenden und Algorithmen zur digitalen Sprachverarbeitung in Hörgeräten.