

1. Zur Notwendigkeit einer verstärkten Basswiedergabe mit kleinen Lautsprechern und zum Ziel dieser Dissertation

Diese Dissertation ist nicht der schriftliche Bericht einer an einer Hochschule durchgeführten Arbeit, sondern ist aus einer Industrietätigkeit heraus entstanden. Und so verfolgt die vorliegende Arbeit auch zwei Ziele: Ein wirtschaftlich bedeutendes technisches Problem mit erprobten und neuartigen Lösungsstrategien soll vorgestellt und wissenschaftlich ergründet werden. Dieses technische Problem ist die qualitativ befriedigende elektroakustische Schallwiedergabe trotz unzulänglicher Schallwandler unter Ausnutzung von Höreigenschaften und Effekten der kognitiven Schallwahrnehmung mit Hilfe von Verfahren der Signalverarbeitung. Ursprünglich verwendete man analoge, nunmehr aber digitale Signalverarbeitung, die wegen ihrer Integrierbarkeit und den damit möglichen niedrigen Kosten zu bevorzugen ist. Die für diese Arbeit wichtigste Höreigenschaft ist die pegelabhängige Lautstärkeempfindung und die wichtigste kognitive Eigenschaft das in der Akustik schon seit langem bekannte *Phänomen der Rekonstruktion der fehlenden Grundfrequenz*.

Neben diesem technischen Aspekt soll an diesem Beispiel auch gezeigt werden, wie sich die Ingenieur-Arbeitskultur an die Bedingungen der Produktion im Consumer-Bereich, einem Bereich der Massenmarktproduktion, anzupassen hat und auch, wie sich diese Ingenieur-Arbeitskultur in den vergangenen Jahren geändert hat. Ein Anliegen der Arbeit ist daher, eine Diskrepanz aufzuzeigen zwischen

- a) dem vermittelten Bild der Ingenieurstätigkeit und
- b) einer tatsächlichen Ingenieurstätigkeit, die zahlreichen Einflussgrößen der Produktion für den Massenmarkt unterliegt.

Damit wird der Wunsch verknüpft, diese mögliche Diskrepanz bereits im Ingenieur-Studium anzusprechen und in den Lehrinhalten zu berücksichtigen. Als Einflussgrößen der Massenmarktproduktion sind vor allem der Kosten- und damit Termindruck oder auch Patentansprüche zu erwähnen, Einflussgrößen, die nicht das technisch beste Pro-

1. Zur Notwendigkeit einer verstärkten Basswiedergabe und zum Ziel der Dissertation

dukt, sondern oft nur ein preisgünstiges Produkt erlauben, das obendrein auch nicht durch fremde Patentrechtsansprüche angreifbar ist.

Als Beispiel für klare Wertevorstellungen, für die eine Firma einstehen sollte, diene der von den Gründern der Firma Hewlett-Packard, William Hewlett und David Packard, definierte sogenannte „HP-Way“. Folgendes Zitat fasst die fünf Kernaussagen zusammen.

Zitat (Hewlett/Packard)

A core ideology ... [which] includes a deep respect for the individual, a dedication to affordable quality and reliability, a commitment to community responsibility, and a view that the company exists to make technical contributions for the advancement and welfare of humanity.

(Quelle: The HP Way [HP11])

In der modernen Massenmarktproduktion und in einem globalisierten Umfeld sind diese Werte im Arbeitsalltag oft nur noch von untergeordneter Bedeutung. So ist die technisch beste Lösung nicht gefragt, wenn sie mehr kostet oder die Realisierung einen vorgegebenen Zeitrahmen verlässt. Auch die im oben stehenden Zitat genannte Aussage ... *the company exists to make technical contributions for the advancement and welfare of humanity...* beschreibt eine Vorstellung, die in der Realität kaum mehr anzutreffen ist, wenn es ausschließlich darum geht, den Profit zu maximieren. Eine Einsicht, die schon David Packard zu seiner Zeit machen musste, wie nachzulesen ist in [Pac08]. Um Missverständnissen vorzubeugen, sei auch hier klar gesagt, dass das Erwirtschaften eines Profits ein unbedingt nötiges Unternehmensziel ist, wie es auch im „HP Way“ mit hoher Priorität festgeschrieben ist. Dort ist dieses Ziel aber mittels eines „und“ verknüpft mit den anderen, ebenfalls klar definierten Unternehmenswerten. Oder, um es mit anderen Worten auszudrücken: Im „HP Way“ werden nicht alle anderen Werte dem Unternehmensziel Profit untergeordnet.

Nun berührt dies sicher nicht die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektroakustik, wohl aber die Denk- und Handlungsmuster von Ingenieuren im Alltag. Auch der „HP Way“ ist in dem heutigen Unternehmen Hewlett-Packard in oben genannten Form nicht mehr zu finden. Unter Carly Fiorina (siehe [Wik11]) wurde die Firma an die globalisierte Wirtschaft angepasst. Dabei spielte auch die Erkenntnis über sogenanntes „over-engineering“ eine Rolle. Denn das unbedingte Ausentwickeln eines Gerätes führt zwar möglicherweise zu einer optimalen Lösung, diese ist aber unverkäuflich, wenn sie des-

wegen erst ein oder zwei Jahre nach weniger perfekten Konkurrenzprodukten auf dem Markt ist.

Die Abkehr von einer Ingenieurskultur kann also als Tribut an diejenigen betrachtet werden, die über eine solche Kultur wie z.B. im „HP Way“ definiert, nie verfügten, vor allem sind das die Schwellenländer im asiatischen Raum. Die Ausbildung von Ingenieuren in Europa und den Vereinigten Staaten ist, nicht ohne Grund, der tradierten Form einer Ingenieur-Kultur verhaftet. Wünschenswert wäre, die Veränderung in der Arbeitswelt des Ingenieurs im Studium zu vermitteln, ausgehend z.B. von Firmen und Namen wie Siemens und Benz, über die Geschichten von Hewlett und Packard oder Apple, an deren Beispiel gezeigt werden kann, dass die althergebrachte Ingenieurausbildung durchaus zu Erfolgen führt. Der derzeitige Trend, der weg von dem perfekten und hin zum nur noch marktorientierten Produkt führt, neigt dazu den Ingenieur in vielen Bereichen zum Techniker, also zum ausführenden Organ zu degradieren, dem kreativer Freiraum nicht mehr eingeräumt wird.

Hilfreich wären demnach Ausbildungsinhalte, die sich mit der sogenannten „intercultural awareness“ beschäftigen, also zukünftige Ingenieure auf einen Einsatz in multinationalen Unternehmen vorbereiten, speziell auf die teilweise völlig anderen Arbeitswelten in Ländern wie Indien und China.

Die eigentliche technische Aufgabenstellung, das technische Problem, betrifft nahezu alle Bereiche oder Produkte der Consumer-Technik, insbesondere mobile Geräte, stereophone und mehrkanalige Audiokompaktanlagen und Flachbildfernsehgeräte. Dieser Bereich ist ein Massenmarkt und dadurch von extremem Kostendruck getrieben und geprägt. Dieser Kostendruck schließt Lösungen unter Verwendung hochwertiger Schallwandler kategorisch aus, auch wenn diese Lösung zu technisch, d.h. im Hinblick auf die Wiedergabequalität, weit befriedigenderen Resultaten führen würde. Zwar verursachen die hier beschriebenen Methoden erhebliche Entwicklungskosten, die bei der Verwendung hochwertiger Schallwandler nicht anfielen, diese sind aber bei der angestrebten Vermarktung in riesigen Stückzahlen am Ende nicht mehr von Bedeutung und ermöglichen wegen ihrer weit geringeren Produktionskosten dann den nötigen Gewinn. Im folgenden wird nun die Ausprägung des zu lösenden technischen Problems zusammenfassend dargelegt und der inhaltliche Aufbau der vorliegenden Arbeit vorgestellt.

1. Zur Notwendigkeit einer verstärkten Basswiedergabe und zum Ziel der Dissertation

Die Wiedergabe tiefer Frequenzen in Räumen mittels dynamischer Lautsprecher ist nicht trivial: denn erst ab einer gewissen Größe des Schallwandlers (Größe ist hier im Sinne von physikalischer Abmessung zu verstehen) kann eine Abstrahlung mit einem Schalldruckpegel erfolgen, der dem Pegel im Mitteltonbereich entspricht, in dem auch kleinere Schallwandler hohe Pegel wiedergeben können.

Diametral entgegengesetzt sind diesen physikalischen Grundlagen die Anforderungen an einen Schallwandler, der in vielen Geräten der sogenannten Consumer-Elektronik zum Einsatz kommt: Dieser Wandler muss, dem Trend der zunehmenden Miniaturisierung folgend, möglichst klein sein und ein fester, meist spärlich bemessener Kostenrahmen darf nicht überschritten werden.

An neu entwickelten Fernsehgeräten mit Flüssigkristall- oder Plasmabildschirmen, die unter anderem zum Thema Heimkino beworben werden, zeigt sich nun eine Problematik besonders deutlich auf: Hochauflösendem Videomaterial auf großen Bildschirmen wird eine Wiedergabequalität des Filmtons zur Seite gestellt, die in keiner Weise mit der Bildqualität Schritt halten kann. Bedingt durch die Entwurfsvorgabe, ein Gerät mit möglichst geringer Bautiefe herzustellen, fehlt zum einen der Platz für zur Tieftonwiedergabe ausreichend große Lautsprecher, zum anderen bedingt ein extremer Kostendruck die Billigstfertigung der Lautsprecher-Chassis.

Zugleich werden mit neuen Speichermedien wie z.B. der BluRay-Disc neue Audio-Standards eingeführt, mit nominell deutlich höherer Qualität verglichen mit Medien wie der Compact Disc (CD) oder der Digitalen Video Disc (DVD). Im einzelnen sind dies höhere Abtastraten (bis zu 192 kHz gegenüber 44.1 kHz) und größere Wortbreiten der Audio-Abtastwerte (bis zu 24 Bit gegenüber 16 Bit). Inwieweit dies selbst über sehr gute Lautsprecher als Verbesserung wahrgenommen werden kann, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht diskutiert. Festzuhalten bleibt, dass einer nominell höheren Quellen- oder Aufnahmequalität Lautsprecher, und damit Wiedergabesysteme, schlechter Qualität gegenüber stehen.

Entwicklungen in der Musikbranche mit Stilrichtungen wie „Rap“, „Techno“, „Hip-Hop“ oder „Drum-and-Bass“ [Wik09b] zeigen eine Verschiebung zum tiefen Frequenzbereich oder zumindest die Betonung dessen. Dies ist in Abbildung 1.1 am Beispiel „Rap“ im Vergleich zu „Jazz“ und „Klassik“ dargestellt und auch in Bezug auf „Rap“ sehr deutlich zu erkennen. Klassische Musik zeigt dagegen ein eher mitten-betontes Spektrum.

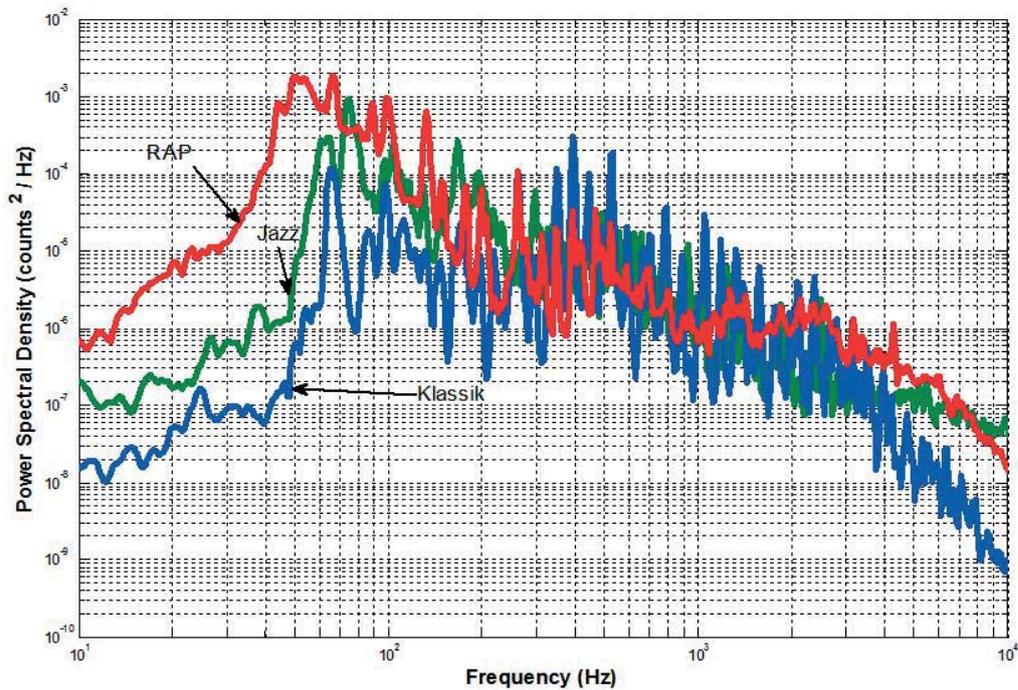


Abbildung 1.1.: Power Spectral Density (Leistungsdichte) für verschiedene Musikrichtungen (Rap (rot, The Roots), Jazz (grün, Diana Krall), Klassik (blau, Johann Sebastian Bach)), jeweils ein 10s Ausschnitt. Berechnet mittels der LPSD-Funktion (Logarithmic frequency axis Power Spectral Density), Hamming-Fenster mit frequenzabhängiger Länge, 100 Mittelungen, siehe [TH06].

Auch beim Filmtone, speziell bei sogenannten „Action“-Filmen, wird intensiv mit Tiefbass-Effekten gearbeitet. Diese gehen bei der Wiedergabe auch über hochwertige und entsprechend teure moderne Flachbildfernseher völlig verloren. Denn selbst wenn seitens der Hersteller ein möglichst hochwertiger Lautsprecher zum Einsatz kommen darf, so verhindert meist der durch das Gehäusedesign vorgegebene Einbauort die Auswahl eines adäquaten Schallwandlers. Dem Anspruch, eine sogenannte Heimkinofunktion zu bieten, werden diese Fernseher daher in der Regel in Bezug auf die Filmtone wiedergabe nicht gerecht.

Seitens der Hersteller wird versucht, diesen Misstand zu kompensieren. Die Vorgabe der Miniaturisierung oder Unsichtbarkeit der Lautsprecher (engl. Invisible Sound), verlangt dabei grundsätzlich andere Ansätze im Vergleich zu den Anstrengungen, die unternom-

1. Zur Notwendigkeit einer verstärkten Basswiedergabe und zum Ziel der Dissertation

men werden, um die Basswiedergabe veritabler HiFi-Lautsprecher (engl. High Fidelity) zu verbessern. Bei diesen wird eine möglichst verzerrungsarme Wiedergabe mit einem konstanten Amplitudenverlauf bis zu einer möglichst niedrigen unteren Grenzfrequenz angestrebt. Diese Anforderungen können bei kleinen Lautsprechern nicht simultan oder gegebenenfalls auch gar nicht erfüllt werden. Um eine befriedigende Wiedergabe zu erreichen, werden deshalb z.B. die tiefen Frequenzen im Übertragungsband des Lautsprechers überbetont oder ein höheres Maß an Verzerrungen geduldet bzw. sogar gezielt hinzugefügt.

Letzteres findet unter Ausnutzung der Gehöreigenschaften sowie kognitiver Effekte statt, wie des sogenannten *Phänomen der Rekonstruktion der fehlenden Grundfrequenz*: die Illusion von tieffrequenten Tönen, ohne dass diese selbst über Lautsprecher wiedergegeben werden müssen.

Zusammengefasst betrachtet ist das technische Problem also rein physikalisch, ohne die spektralen Eigenschaften des Signals zu ändern, nicht zu lösen. Problemlösungen mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung basieren daher zumeist auf subjektiven, d.h. psychoakustischen Erkenntnissen und Phänomenen.

Nachdem nun die Notwendigkeit der verstärkten Basswiedergabe in aller Kürze dargelegt worden ist, werden im folgenden der Aufbau und das Ziel der vorliegenden Dissertation herausgestellt. Kapitel 2 stellt das menschliche Gehör und Hörvermögen vor, und geht insbesondere auf die beiden für diese Arbeit wichtigsten Eigenschaften ein, das Lautstärkeempfinden und das Phänomen der Rekonstruktion der fehlenden Grundfrequenz. Daran anschließend erfolgt eine Beschreibung der Tonhöhenwahrnehmung, mit besonderem Blick auf die Rekonstruktion der fehlenden Grundfrequenz. Hier findet sich auch ein geschichtlicher Überblick von der Entdeckung des Phänomens im Jahre 1841 bis hin zu neueren wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Beschreibung der kognitiven Wahrnehmung. In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Schallabstrahlung über dynamische Lautsprecher zusammengefasst, um die physikalischen Randbedingungen zu verdeutlichen. Kapitel 4 beschreibt die Anforderungen an eine Lösung zur perzeptuell verbesserten Basswiedergabe aus der Consumer-Elektronik. Im anschließenden Kapitel 5 folgt ein Überblick über gebräuchliche und industriell eingesetzte Verfahren, die das Phänomen der Rekonstruktion der fehlenden Grundfrequenz nutzen, mit einer kritischen Beschreibung ihrer für diese Arbeit relevanten Eigenschaften. Alle vorgestellten Verfahren arbeiten im Zeitbereich. Nun sind selbstverständlich auch Lösungsansätze möglich, die im Frequenzbereich arbeiten. Die dafür nötige Frequenz-Transformation bringt al-

lerdings zusätzliche Speicheranforderungen mit sich, Speicher der in einer vorgegebenen Architektur nicht ohne weiteres hinzuzufügen ist, ebenso würde diese Transformation die Architektur, die eben auf Verarbeitung im Zeitbereich beruht, aufbrechen.

Anhand des Verfahrens *Adaptive Ultra Bass* (AUB) werden beispielhaft Probleme bei der Umsetzung analysiert. Dies dient als Grundlage zur Entwicklung des in dieser Arbeit in Kapitel 6 beschriebenen verbesserten Verfahrens. Der Schwerpunkt der Verbesserung liegt dabei zum einem auf einer effizienten, hardwarenahen Umsetzung, die gegenüber anderen Verfahren eine einfachere und kostengünstige Realisierung erlaubt. Zum anderen ist der Vorteil gegenüber anderen Verfahren eine wählbare Harmonischen-Charakteristik. Auch der eingangs erwähnte rechtliche Aspekt spielt hier eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Eine Darstellung der Validierung der Ergebnisse in Kapitel 10 führt schließlich in Kapitel 11 zur Zusammenfassung und zum Ausblick auf weitere mögliche Einsatzfelder des neu entwickelten Verfahrens.