



Masterarbeit

Optimierte Wiedergabe binauraler Signale

erstellt von cand. M.Sc. Dipl.-Ing. (FH)

Frank Schultz (geb. 17.05.1979 in Leipzig)

Matrikelnr.: 232012

Studiengang: Audiokommunikation -und technologie (WS07/08)

Hochschullehrer: Prof. Dr. phil. Stefan Weinzierl, TU Berlin

Betreuer: M.A. Alexander Lindau, TU Berlin

kompiliert: 14. Juli 2010, 13:33 Uhr

Technische Universität Berlin, Institut für Sprache und Kommunikation

Fachgebiet Audiokommunikation

Berlin, 2009/2010

1 Exposé zur Masterarbeit „Optimierte Wiedergabe binauraler Signale“

Frank Schultz

14. Juli 2010

1.1 Abstract

Klangfarbliche Abweichungen sind das wesentlichste subjektive Unterscheidungsmerkmal beim direkten Vergleich von, auf Messungen basierenden, dynamischen, binauralen Simulationen mit der akustischen Realität. Oft ist eine nur unzureichende Frequenzgangskompensation der Kopfhörerwiedergabestrecke Ursprung wahrnehmbarer Klangfärbungen. Eine Untersuchung verschiedener Kopfhörer und Entzerrungsmethoden zeigte weiterhin, dass die meisten am Markt verfügbaren Kopfhörer aufgrund stark nichtlinearer und von Hörer und Sitzposition abhängiger Frequenzgänge für eine perfekte Frequenzgangkompensation ungeeignet sind. Zur einfacheren Individualentzerrung soll ein frequenzgangsneutraler, extraauraler Kopfhörer für die optimierte Wiedergabe binauraler Signale entwickelt werden.

1.2 Einleitung und Fragestellung

Dynamische, binaurale, kopfhörerbasierte akustische Simulationen [Vor08, Nic10] können einen hohen Grad subjektiver Plausibilität erreichen, wenn synthesebedingte Artefakte nicht wahrnehmbar sind oder als nicht störend empfunden werden. Es ist bekannt, dass die Simulationsqualität bei nichtindividueller, dynamischer Binauralsynthese wegen falscher ITD/ILD-Cues und durch spektrale Verfärbungen stark beeinträchtigt wird. Eine unzureichende Kompensation der HpTF ist zum großen Teil Ursprung der Klangfärbungen, die als wesentlichstes subjektives Unterscheidungsmerkmal [Lin07, Sch09] beim direkten Vergleich von, auf Messungen basierenden, binauralen Simulationen mit der akustischen Realität gelten. Typische KH sind im Hinblick vergleichbarer Ergebnisse mit Stereolautsprecherwiedergabe auf eine Diffus- oder Freifeldentzerrung [San80, Too84] optimiert. Da es allenfalls Standardisierungsempfehlungen [The86], jedoch keine verbindlichen Standards gibt, unterscheiden sich die HpTFs verschiedener Kopfhörermarken und sogar -modelle ein

und desselben Herstellers beträchtlich [Mø195a, Sch09]. Diese, für binaurale Reproduktion unerwünschte „Geschmacksentzerrung“ muss rückgängig gemacht werden. Die Untersuchungen [Mø195a, Sch09] zeigten zudem, dass die getesteten extra- und circumauralen KH bezüglich Aufsetzposition (intraindividuelle Variabilität) und Passung (KH auf Ohr, interindividuelle Variabilität) stark frequenzgangsvariant sein können. Die größte Variabilität kann im Allgemeinen dem Frequenzbereich $f > 4\text{kHz}$ durch variierende Peaks und Notches hoher Güte und Amplitude zugeschrieben werden. Zudem weist der Frequenzbereich $f < 300\text{Hz}$ bei, auf Druckkammerprinzip basierenden, geschlossenen KH eine starke Frequenzgangsvariabilität durch unterschiedliches Leakage auf. Mit einer wichtigen Kopfhörermaßzahl PDR [Mø195a] kann das FEC-Kriterium quantitativ erfasst werden. Das Verhältnis PDR gibt Aufschluss wie stark die Kopfhörerimpedanz, die der Ohreingang „sieht“, von der eigentlich gewünschten Schallfeldimpedanz abweicht. Für binaurale Reproduktion sollte $\text{PDR} \approx 1$ angestrebt werden. Es wurde gezeigt, dass extraaurale KH-Modelle eine vergleichsweise lineare HpTF besitzen [Too84, Ric90], am stärksten frequenzgangs-invariant sind [Sch09] und das FEC-Kriterium am besten erfüllen [Mø195a]. Aus den Erkenntnissen führten Überlegungen auf folgende Kriterien, die ein für Binauralsynthese optimierter, aktiv entzerrbarer, extraauraler KH erfüllen sollte:

- Frequenzgangsneutralität (bezogen auf schallharte Kugel)
 - für einfache, individuelle Kompensation der 90° -Nahfeld-HRTF
 - für einfache, individuelle/generische Diffus-/Freifeldentzerrung
- geringe intraindividuelle Frequenzgangsvariabilität (Aufsetzposition)
- geringe interindividuelle Frequenzgangsvariabilität (Passung)
- Erfüllung des FEC-Kriteriums
- Wiedergabe der gesamten Audiobandbreite
- einfache Kopplung mit einem Subbass-Lautsprecher

Der nach obigen Punkten im Rahmen der Masterarbeit zu entwickelnde KH erhält das Arbeitskürzel BK109.

1.3 Stand der Forschung

Gebäuchliche KH weisen eine auf verschiedene Anwendungen optimierte mittlere HpTF auf, es existieren jedoch derzeit keine KH für die optimierte Wiedergabe binauraler Signale. Die HpTFs der getesteten KH in [Sha66] zeigen große Ähnlichkeiten mit einer gemittelten $\pm 90^\circ$ -HRTF auf und weisen damit auf eine frühe Anwendung einer Freifeldentzerrung hin. Die Notwendigkeit und Qualität einer Diffusfeldentzerrung wird messtechnisch und perceptiv in u.a. [Too84, The86, Mø195b] evaluiert. Die vorgestellten notwendigen generischen Diffusfeldentzerrungen weisen dabei große Ähnlichkeiten auf. In [San80] wird festgestellt, dass die Diffusfeldentzerrung der getesteten KH für das benutzte Wiedergabesetup als unzureichend eingestuft werden muss, um Lautsprecher- und Kopfhörerreproduktion ähnlich

zu empfinden. Der Autor schlägt daher vor, KH mit linearem Frequenzgang herzustellen und eine gewünschte Frei-/Diffus- oder andere „Geschmacksentzerrung“ über eine individuelle Messung von HEAT/HpTF und einer individuellen Entzerrungsmethode PEP einzustellen. Diese in der Forschung nicht weiterverfolgte Methodik wird für die Entwicklung und Optimierung des BK109 wieder aufgegriffen.

Bei Binauraltechnik wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die Trommelfellschalldrücke sämtliche Informationen zum räumlichen Hören enthalten [Mø192]. Kann dieser Schalldruckverlauf mit Kopfhörern exakt reproduziert werden, ergibt sich somit der ursprüngliche räumliche Eindruck in einer Simulation. Hierfür ist eine Kompensation der gesamten Aufnahme- und Wiedergabekette erforderlich. Die Entzerrung der HpTF ist in diesem Zusammenhang besonders kritisch einzustufen, da HpTF-Amplitudenverläufe eine ähnliche Größenordnung wie HRTFs aufweisen und bei fehlender oder unzureichender Kompensation unmittelbar auf ILD und reproduziertes HRTF-Spektrum wirken. Eine generische HpTF-Entzerrung pro Kopfhörermodell würde ausreichen die unter Umständen herstellerseitig erfolgte, aber unerwünschte Diffus- oder Freifeldentzerrung rückgängig zu machen. Allerdings existieren zudem starke inter- und intraindividuelle Frequenzgangsvariabilitäten in den HpTFs unterschiedlicher VP und Tragepositionen.

In [Mø192] wird ein vereinfachtes Ersatzschaltbild entwickelt, in dem das auf Ohreingang, Ohrkanal, sowie Trommelfell eintreffende Schallfeld die Messvorschrift für HRTFs erklären. Es wird zunächst durch Rechnung bewiesen, dass für bestimmte Annahmen eine Messung des Schalldrucks am geblocktem Ohrkanal ausreicht, um auf den Trommelfellschalldruck zu schließen; in [Mø195a] erfolgt dann der Vorschlag diese Messvorschrift zu bevorzugen, wenn der verwendete KH das FEC-Kriterium erfüllt. Mit einem weiteren Ersatzschaltbild [Mø192] werden KH-Gütekriterien für die binaurale Kopfhörerwiedergabe eingeführt und diskutiert. In [Mø195a] wurden HpTFs mehrerer KH und VP gemessen, die HpTF-Variabilität aufgezeigt und anhand der aufgestellten Gütekriterien die Tauglichkeit der getesteten KH zur binauralen Reproduktion diskutiert, wobei sich herausstellt, dass keiner der verwendeten KH alle Gütekriterien optimal erfüllt. Die Untersuchung wurde am FG mit [Sch09] bestätigt. Es wurden ebenda verschiedene Entzerrungsmethoden im Kontext der HpTF-Kompensation technisch und perceptiv untersucht, wonach für die am FG verwendeten STAX KH eine Entzerrungsmethode favorisiert werden kann und eine unkompensierte HpTF deutlich schlechter bewertet wurde als eine nichtindividuelle HpTF-Kompensation. Zur HpTF-Messmethodenverbesserung wurde in [Bri10] eine neu entwickelte Silikon-Otoplastik mit integriertem Miniaturmikrofon vorgestellt, die im Vergleich zu anderen Otoplastiken die geringste HpTF-Variabilität nach mehrmaligem Positionieren in ein künstliches Ohr aufweist und damit reproduzierbare, individuelle HpTF-Messungen ermöglicht. Zudem wird mit auditorischer Modellierung aufgezeigt, dass eine individuelle HpTF-Kompensation fehlerärmer ist als eine generische HpTF-Kompensation (d.h. aus HpTF-Mittelung vieler VP) und als eine nichtindividuelle HpTF-Kompensation (d.h. mit der HpTF des FABIAN HATS [Lin07]). In [Paq10] wird gezeigt, dass Unterschiede bei allen getesteten Stimuli signifikant hörbar sind, wenn die HpTF durch unterschiedliche KH-Tragepositionen variiert.

1.4 Methodik

Der zu entwickelnde, aktiv entzerrbare BK109 soll mit Miniaturbreitbandlautsprechern im „closed box“-Design betrieben werden und kann nach DIN-Nomenklatur als Ohrlautsprecher bezeichnet werden [DIN08]. Fundamentale Erkenntnisse für die Lautsprecherentwicklung basierend auf elektromechanischen und elektroakustischen Ersatzschaltbildern [Bal09] können [Pol06] und [Avi06] entnommen werden. Die elektroakustischen Eigenschaften eines Lautsprechers können für den linearen Arbeitsbereich mit einfachen elektrischen Äquivalenz-Schaltungen konzentrierter Elemente ausreichend genau modelliert werden. Mit einer Thiele-Small Parametrierung [Sma72, Sma73] kann das angestrebte „closed-box“-Design systemtheoretisch beschrieben werden. Für die Passform des Kopfhörergehäuses werden die Perzentile der anthropometrischen Stichproben aus [Alg01, Gre01, DIN05, Bri10] berücksichtigt. Das 3D-Modell soll unter Verwendung von ABS mit FDM gerendert werden [Geb00]. Bezüglich digitaler Audio-/Akustik-Messtechnik muss man nebst zu verwendendem Messsystem Monkey Forest die modernen FFT-Verfahren zur Sweepmesstechnik [Mül01] beherrschen. Zur Frequenzweichenentwicklung für eine Subbasskopplung wird [Lin76, Lip83] Verwendung finden, parametrische Filter können nach [BJ94, BJ, Orf97] entworfen werden. Prototypisches Filter- und Entzerrungsdesign lässt sich komfortabel mit einem am FG vorhandenen Lautsprechercontroller [Goe04] bewerkstelligen. Die resultierenden Filtersätze sollen in ein Linux- und echtzeitfähiges Plug-In implementiert werden. Eine HpTF-Frequenzgangsinversion soll nach [Nor06] vorgenommen werden. Eine u.U. notwendige Übersprechkompensation kann nach [Gar97, Vor08] mit adaptiven Filtern realisiert werden. Die akustischen Eigenschaften des fertiggestellten Prototypen sollen nach [DIN08] gemessen werden, die FEC-Kompatibilitätsprüfung soll nach [Kle02] erfolgen.

1.5 Arbeits- und Zeitplan 2010 für die Entwicklung des BK109

- April: Literaturrecherche (theoretische Akustik, Binauraltechnik, Kopfhörertechnik)
- Mai: Anfertigung Exposé, theoretische Vorarbeiten Schallfeldsimulation und -synthese (Kugelquelle, Pistonmodell, Horndesign, BEM, BRIR-Akquise, HpTF-Inversion), Auswahl 3D CAD Software
- Juni: Marktrecherche und Bemusterung von Miniaturtreibern, Treibermessungen, Spezifikation eines elektroakustischen Prototypen und des Filterdesigns
- Juli: Entwurf und Anfertigung des Prototypen
- August: Revision und physikalische Validierung des Prototypen
- September-Oktober: Dokumentation mittels Masterarbeit

Abkürzungen und Formelzeichen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
BEM	boundary element method
BK109	binauraler Kopfhörer, Nr. I, 2009
BRIR	binaural room impulse response
BRTF	binaural room transfer function
FABIAN	fast and automatic binaural impulse response acquisition
FDM	fused deposition modeling
FEC	free-air equivalent coupling
FFT	fast fourier transformation
FG	Fachgebiet
HATS	head and torso simulator
HEAT	headphone electroacoustical transfer (function)
HpTF	headphone transfer function
HRIR	head related impulse response
HRTF	head related transfer function
ITA	Institut für Technische Akustik
ISTA	Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik
ITD	interaural time difference
ILD	interaural level difference
KH	Kopfhörer
KHI	Kirchoff-Helmholtz-Integral
KK	Kunstkopf
PEP	personal equalization procedure
PDR	pressure division ratio
VP	Versuchsperson
VPn	Versuchspersonen
VAE	virtual acoustical environment

f	Frequenz, $[f]=1 \text{ Hz} = \text{s}^{-1}$
ω	Kreisfrequenz, $[\omega]=\text{rad s}^{-1}$

Literaturverzeichnis

- [Alg01] Algazi, V.R.; Duda, R.O.; Thompson, D.M.; et al. (2001): "The CIPIC HRTF database". In *Proc. of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz*. » pdf.
- [Avi06] Avis, M.R.; Kelly, L.J. (2006): "Principles of headphone design - A tutorial review". In *Proc. of the 21st AES UK Conference - Audio at Home, Cambridge*. » pdf.
- [Bal09] Ballas, R.G.; Werthschützky, R.; Pfeifer, G. (2009): *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik: Dynamischer Entwurf - Grundlagen und Anwendungen*. 2. Auflage. Berlin: Springer.
- [BJ] Bristow-Johnson, R.: "Cookbook formulae for audio EQ biquad filter coefficients". WWW, Zugriff 28.06.2010. URL <http://www.musicdsp.org/files/Audio-EQ-Cookbook.txt>. » pdf.
- [BJ94] Bristow-Johnson, R. (1994): "The equivalence of various methods of computing biquad coefficients for audio parametric equalizers". In *Proc. of 97th AES Convention, San Fransisco*, 3906. » pdf.
- [Bri10] Brinkmann, F.; Lindau, A. (2010): "On the effect of individual headphone compensation in binaural synthesis". In *Fortschritte der Akustik: Tagungsband d. 36. DAGA, Berlin*. 1055–1056. » pdf.
- [DIN05] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. (2005): *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte, DIN 33402-2*. Berlin: Beuth. » pdf.
- [DIN08] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. (2008): *Elektroakustische Geräte, Teil 7: Kopfhörer und Ohrhörer ; DIN IEC 60268-7:2008 ; Entwurf*. Berlin: Beuth. » pdf.
- [Gar97] Gardner, W.G. (1997): *3-D Audio Using Loudspeakers*. Dissertation, Program in Media Arts and Sciences, School of Architecture and Planning, Massachusetts Institute of Technology.
- [Geb00] Gebhardt, A. (2000): *Rapid Prototyping, Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung*. 2. Auflage. München, Wien: Hanser.
- [Goe04] Goertz, A. (2004): "Behringer DCX2496". In *Production Partner* **2004**(4):98–107. » pdf.

- [Gre01] Greil, H. (2001): "Körpermaße 2000: aktuelle Perzentilwerte der deutschen Bevölkerung im jungen Erwachsenenalter". In *Brandenburgische Umwelt-Berichte (Bd. 10): "Mensch, Technik, Umwelt : Forschungsforum Anthropologie"*, Hg. Greil, H.; Scheffler, C. Potsdam: Schriftenreihe des Zentrums für Umweltwissenschaften der Universität Potsdam, 23–53. » pdf.
- [Kle02] Kleber, J.; Cruzado, C.G.M. (2002): "Akustische Impedanzmessungen an ohrnahen Schallwandlern". In *Fortschritte der Akustik: Tagungsband d. 28. DAGA, Bochum*. 50–51. » pdf.
- [Lin76] Linkwitz, S.H. (1976): "Active crossover networks for non-coincident drivers". In *J. Aud. Eng. Soc.* **24**(1/2):2–8. » pdf.
- [Lin07] Lindau, A.; Hohn, T.; Weinzierl, S. (2007): "Binaural resynthesis for comparative studies of acoustical environments". In *Proc. of 122nd AES Convention, Wien*, 7032. » pdf.
- [Lip83] Lipshitz, S.P.; Vanderkooy, J. (1983): "A family of linear-phase crossover networks of high slope derived by time delay". In *J. Aud. Eng. Soc.* **31**(1/2):2–20. » pdf.
- [Mø192] Møller, H. (1992): "Fundamentals of binaural technology". In *Applied Acoustics* **36**(3/4):171–218. » pdf.
- [Mø195a] Møller, H.; Hammershøi, D.; Jensen, C.B.; et al. (1995): "Transfer characteristics of headphones measured on human ears". In *J. Aud. Eng. Soc.* **43**(4):203–217. » pdf.
- [Mø195b] Møller, H.; Jensen, C.B.; Hammershøi, D.; et al. (1995): "Design criteria for headphones". In *J. Aud. Eng. Soc.* **43**(4):218–232. » pdf.
- [Mül01] Müller, S.; Massarani, P. (2001): "Transfer-function measurement with sweeps". In *J. Aud. Eng. Soc.* **49**(6):443–471. » pdf.
- [Nic10] Nicol, R. (2010): *Binaural technology*. 1. Auflage. AES Monograph. » pdf.
- [Nor06] Norcross, S.G.; Bouchard, M.; Soulodre, G.A. (2006): "Inverse filtering design using a minimal-phase target function from regularization". In *Proc. of 121st AES Convention, San Francisco*, 6929. » pdf.
- [Orf97] Orfanidis, S.J. (1997): "Digital parametric equalizer design with prescribed Nyquist-frequency gain". In *J. Aud. Eng. Soc.* **45**(6):444–455. » pdf.
- [Paq10] Paquier, M.; Koehl, V. (2010): "Audibility of headphone positioning variability". In *Proc. of 128th AES Convention, London*, 8147. » pdf.
- [Pol06] Poldy, C.A. (2006): "Headphone fundamentals, tutorial". In *Proc. of 120th AES Convention, Paris*. » pdf.

- [Ric90] Richter, F. (1990): “Kopfhörerkonzept für binaurale Simulation eines idealen Abhörtraumes”. In *Bericht der 16. Tonmeistertagung 1990, Karlsruhe*. 618–628. » pdf.
- [San80] Sank, J.R. (1980): “Improved real-ear test for stereophones”. In *J. Aud. Eng. Soc.* **28**(4):206–218. » pdf.
- [Sch09] Schärer, Z.; Lindau, A. (2009): “Evaluation of equalization methods for binaural signals”. In *Proc. of the 126th AES Convention, München, 7721*. 123–128. » pdf.
- [Sha66] Shaw, E.A.G. (1966): “Ear canal pressure generated by circumaural and supraaural earphones”. In *J. Acoust. Soc. Am.* **39**(3):471–479. » pdf.
- [Sma72] Small, R.H. (1972): “Closed-box loudspeaker systems part I: analysis”. In *J. Aud. Eng. Soc.* **20**(10):798–808. » pdf.
- [Sma73] Small, R.H. (1973): “Closed-box loudspeaker systems part II: synthesis”. In *J. Aud. Eng. Soc.* **21**(1):11–18. » pdf.
- [The86] Theile, G. (1986): “On the standardization of the frequency response of high-quality studio headphones”. In *J. Aud. Eng. Soc.* **34**(12):956–969. » pdf.
- [Too84] Toole, F.E. (1984): “The acoustics and psychoacoustics of headphones”. In *Proc. of 2nd International AES Conference: The Art and Technology of Recording, Anaheim, C1006*. » pdf.
- [Vor08] Vorländer, M. (2008): *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.