Zur Entzerrung von Lautsprechersignalen für die Wellenfeldsynthese

(Equalization of loudspeaker signals for wave field synthesis systems)

*Anselm Goertz *, Michael Makarski ***

*Christoph Moldrzyk ***, Stefan Weinzierl *****

* TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation) und IFAA, anselm.goertz@ifaa-akustik.de
** IFAA (Institut für Akustik und Audiotechnik), michael.makarski@ifaa-akustik.de
*** VISAURAL Berlin, aural@prz.tu-berlin.de
**** TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation), stefan.weinzierl@tu-berlin.de

Kurzfassung

Lautsprechersysteme zur Wellenfeldsynthese (WFS) erfordern eine Entzerrung der anliegenden Quellsignale, die nicht nur einen linearen Frequenzgang im Hinblick auf den einzelnen Lautsprecher und den Wiedergaberaum gewährleistet, sondern auch die WFS-bedingten Verzerrungen kompensiert. Lautsprechermodule mit integrierten DSP-Systemen erlauben in diesem Zusammenhang vielfältige Möglichkeiten des Systementzerrung mit IIR- und FIR-Filtern. Vorgestellt wird hier eine auf die Wellenfeldsynthese zugeschnittene, dreistufige Vorgehensweise. Sie beinhaltet 1. eine Einstellung der einzelnen Wege auf einen weitgehend linearen Frequenz- und Phasengang im Freifeld, 2. eine individuelle Ortsanpassung an das akustische Umfeld im Raum und 3. eine Kompensation der durch das WFS-Rendering bedingten Verzerrungen für verschiedene Positionen einer primären Punktquelle. Dieser Beitrag zeigt die Messverfahren sowie die Ergebnisse der einzelnen Schritte anhand der Wellenfeldsynthese-Installation im Hörsaal H 104 der TU Berlin.

1. Einleitung

Die Entzerrung der Lautsprechersignale von großen Beschallungsanlagen soll eine Kompensation unterschiedlicher akustischer Einflussgrößen bewirken, mit dem Ziel, für das Gesamtsystem eine möglichst lineare Übertragungsfunktion zwischen Schallquelle und Empfänger herzustellen. Diese Entzerrung beinhaltet in der Regel zum einen eine Linearisierung des Freifeld-Frequenzgangs und des Phasengangs jedes einzelnen Lautsprechers, zum anderen eine Kompensation der durch den Einbau der Lautsprecher und die Raumübertragungsfunktion bedingten Verzerrungen. Dazu gehören akustische Kopplungseffekte durch dicht benachbarte Lautsprecher ebenso wie Verzerrungen, die durch Moden, Absorption und Kammfiltereffekte im Raum entstehen. Diese Effekte sind bei Beschallungsanlagen stets zu berücksichtigen, die Vorgehensweise im Hinblick auf geeignete Messverfahren und den Einsatz von analogen oder digitalen Filtern ist z.B. in [1] im Detail beschrieben.

Beim Einsatz von Lautsprecheranlagen für die Wellenfeldsynthese sind darüberhinaus weitere frequenzabhängige Einflussgrößen zu berücksichtigen. Dazu gehört zum einen eine Frequenzabhängigkeit der für die Wellenfeldsynthese verwendeten Treiberfunktion der Lautsprecher, zum anderen ein durch den Lautsprecherabstand und die Geometrie des Arrays bedingtes Spatial Aliasing bei höheren Frequenzen. Beide Effekte sollen kurz erläutert werden.

Die für die Darstellung virtueller Schallquellen (Primärquellen) erforderliche Treiberfunktion der einzelnen Lautsprecher (Sekundärquellen) eines Wellenfeldsynthesearrays enthält stets einen frequenzabhängigen Anteil. Für die bei den meisten WFS-Anwendungen eingesetzten Lautsprecher mit Monopol-Charakteristik (geschlossenes Gehäuse) in Form eines linearen Arrays, und unter der Annahme, dass sich sowohl die Primärquelle als auch der Hörer im (für die Primärquelle: gedachten) Fernfeld der Lautsprecher befinden, kann diese Frequenzabhängigkeit durch einen Faktor

$$K(\omega) = \sqrt{\frac{\mathrm{j}k}{2\pi}} = \sqrt{\frac{\mathrm{j}\omega}{2\pi c}} \qquad (1)$$

linearisiert werden, entsprechend einem Anstieg mit 3 dB pro Oktave. Dieser Anstieg resultiert aus der bei der Herleitung der Treiberfunktion notwendigen Bildung des Druckgradienten aus dem Schalldruck-Modell der Primärquelle sowie aus der Reduktion des einer exakten Synthese zugrundeliegenden Oberflächenintegrals (Kirchhoff-Helmholtz-Integral) auf ein Linienintegral, bei der jeder Lautsprecher selbst das Verhalten einer Linienquelle annehmen muss. [2]

Eine zweite WFS-spezifische Einflussgröße ist die als *Spatial Aliasing* bezeichnete Störung durch Aliasing-Wellen, die zu einer räumlichen und spektralen Verzerrung des synthetisierten Wellenfelds führen. Die Frequenz, oberhalb der ein solches Aliasing einsetzt, hängt von der Geometrie des Lautsprecherarrays, vom Abstand der Einzelsysteme, sowie von der Geometrie der synthetisierten Schallwelle ab. Für den theoretisch relativ einfach beschreibbaren Fall einer Synthese von ebenen Schallwellen durch ein lineares Lautsprecherarray tritt Aliasing oberhalb einer Frequenz von

$$f_0 = \frac{c}{\Delta x(1 + |\cos\alpha_{PW}|)} \qquad (2)$$

auf, wobei Δx der Lautsprecherabstand, c die Schallgeschwindigkeit und α_{PW} der Einfallswinkel der ebenen Welle relativ zur Richtung des Lautsprecherarrays ist. [3] Für Lautsprecherarrays endlicher Länge kommt zusätzlich noch eine Abhängigkeit vom Hörerplatz hinzu, da Aliasing-Wellen höherer Ordnung evtl. nur Hörerplätze in der Nähe der Lautsprecher erreichen.

Abb. 1 zeigt exemplarisch eine Simulation der durch Spatial Aliasing bedingten räumlichen und spektralen Störungen des Wellenfelds für ein lineares Lautsprecherarray von 6 m Länge (am oberen Bildrand) und einen Lautsprecherabstand von Δx = 15 cm für einen Hörbereich von 7 m Breite und 12 m Höhe. Die Grenzfrequenz f_0 für eine frontal einfallende ebene Welle liegt nach (2) bei 2293 Hz. Für eine Frequenz von 1600 Hz (im Bild links) ist somit eine artefaktfreie Synthese im ganzen Hörbereich gewährleistet. Bei einer Frequenz von 3200 Hz (Bildmitte) führen schräg einfallenden Aliasing-Wellen im vorderen Hörbereich in der Nähe der Lautsprecher zu einer Verzerrung des Schallfelds, während bei einem Abstand von 5 m wieder eine weitgehend ungestörte Wellenausbreitung zu erkennen ist. Bei einer Frequenz von 6400 Hz erreichen die Störungen auch den hinteren Bereich der Hörerfläche. Zusätzlich zu den durch das Spatial Aliasing bedingten Störungen sind in allen Bildern Beugungseffekte

am linken und rechten Ende des Arrays erkennbar, die zu Störungen zu beiden Seiten des Hörbereichs führen.
Die resultierenden Übertragungsfunktionen für unterschiedliche Hörerplätze zeigen unterhalb der Aliasing-Grenzfrequenz einen Abfall mit 3 dB pro Oktave, oberhalb der Grenzfrequenz treten starke, kammfilterartige Einbrüche im Spektrum auf, die als klangliche Verfärbungen in Erscheinung treten.

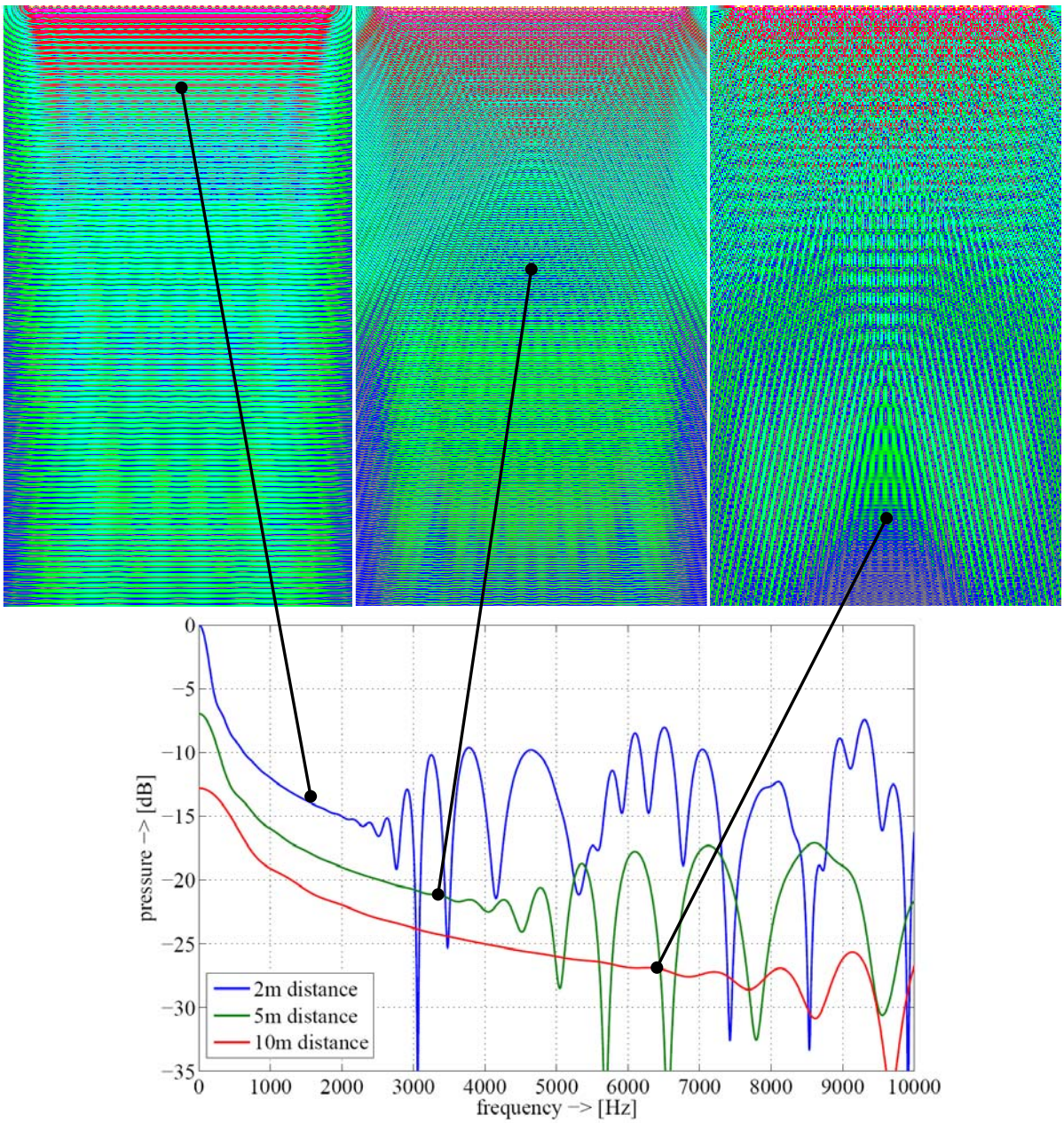

Abb. 1: Simulation der durch *Spatial Aliasing* bedingten räumlichen und spektralen Störung des Wellenfelds für ein lineares Lautsprecherarray von 6 m Länge (am oberen Bildrand), einen Lautsprecherabstand von $\Delta x = 15$ cm und Frequenzen von 1600 Hz (links), 3200 Hz (Mitte) und 6400 Hz (rechts). Unten: Resultierende Übertragungsfunktionen für unterschiedliche Abstände vom Lautsprecherarray (m.f.G. von S. Spors)

Für die Kompensation der aus der Frequenzabhängigkeit der Treiberfunktion und dem Spatial Aliasing resultierenden linearen Verzerrungen (Abb. 1) bieten sich im wesentlichen drei Alternativen an, die an unterschiedlichen Stellen der Wiedergabekette ansetzen:
1. Eine Kompensation der den simulierten Schallquellen zugeordneten Quellsignale. Dies erfordert eine Vor-Entzerrung der eingesetzten Audiospuren.
2. Eine Kompensation innerhalb des WFS-Renderings, d. h. die Einbeziehung eines Filters, das die Frequenzgänge in Abb. 1 invertiert, in die Treiberfunktion der WFS-Lautsprecher.
3. Eine Kompensation der einzelnen Lautsprechersignale, insbesondere dann, wenn diese über einen digitalen Controller mit DSP-basierten FIR- oder IIR-Filtern verfügen.
Die letztere Option mag zunächst ineffizient erscheinen, da die Filterung nicht nur einmal, sondern für jeden Kanal separat erfolgen muss. Andererseits ähnelt das kammfilterartige Spektrum der Aliasing-bedingten linearen Verzerrungen dem Frequenzgang der Raumübertragungsfunktion, inklusive seiner Abhängigkeit von der Hörerposition. Somit kann das System durch geeignete Invertierung einer gemessenen Übertragungsfunktion, die sowohl den Einfluss des Raums als auch der WFS-bedingten spektralen Einflüsse enthält, linearisiert werden, ohne das WFS-Rendering durch zusätzliche Filteroperationen zu belasten. Das spielt insbesondere bei akustischen Szenen mit zahlreichen Quellen eine Rolle, weil dieses Filter für jede Quelle gerechnet werden muss. Da im Hörsaal H 104 ein leistungsfähiger digitaler Controller zur Entzerrung der Einzelsysteme und zur Ortsanpassung ohnehin zur Verfügung steht, wird im folgenden die letztere Vorgehensweise (3.) beschrieben.

2. Systemkomponenten

Für die Ausstattung eines großen Hörsaals (H104) der TU-Berlin [4][5][6] mit einer Wellenfeldsyntheseanlage wurde ein spezielles Lautsprechermodul mit der Zielsetzung konstruiert, sich gut in die architektonischen Gegebenheiten des Raumes einzufügen und die besonderen akustischen Verhältnissen eines Hörsaals zu berücksichtigen.
Auf einer umlaufenden Länge von ca. 86 m sind insgesamt 832 Kanäle angeordnet. Ausgespart wurden dabei lediglich vier kurze Teilstücke an der Rückseite des Raumes für die hinteren Ausgänge und für die Zugänge zur Regie. Im hinteren Bereich des Saals befinden sich die Lautsprecher knapp über Kopfhöhe der Zuhörer. Weiter nach vorne vergrößert sich der Abstand zwischen den Lautsprecher und der Ohrhöhe der Zuhörer, da die Lautsprecherlinie oberhalb der vorderen Eingangstüren entlang geführt werden musste. Eine tiefere Position war an dieser Stelle nicht möglich, da die breiten Eingangstüren weder versperrt werden durften noch Lücken in der Linie in dieser Größenordnung vertretbar waren.

2.1. Anforderungen an die Lautsprecher

Für das hier vorgestellte Projekt wurde ein Abstand der Lautsprecherkanäle von 10 cm vorgegeben. Die daraus resultierende große Anzahl von Kanälen erforderte ein entsprechend kostengünstiges Konzept, so dass die Auswahl auf einfache Breitbandlautsprecher mit der Unterstützung durch zusätzliche Tieftöner fiel. Für das Abstrahlverhalten der Lautsprecher wurde ein möglichst breiter horizontaler Abstrahlwinkel bis zu den höchsten Frequenzen angestrebt bei einem gleichzeitig engem vertikalen Öffnungswinkel, um die Reflexionen vom Boden und von der Decke des Raumes zu reduzieren.

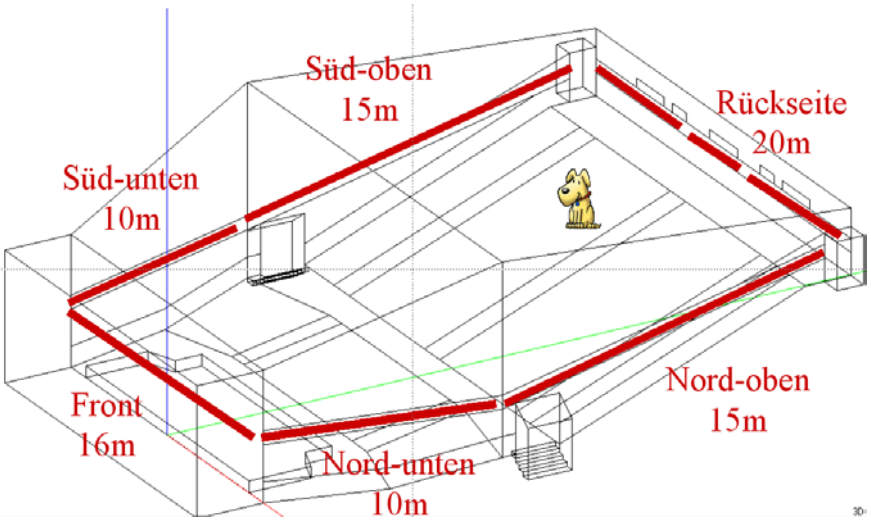

Abb. 2: EASE Modell des Hörsaals mit den Lautsprecherlinien für die Wellenfeldsynthese

Die Ausdehnung der Anlage erforderte eine einfache digitale Signaldistribution und die Möglichkeit der Fernsteuerung und Fernwartung der Lautsprecher per Netzwerk. Zur Vermeidung von Überlastung oder Beschädigung der Lautsprecher durch zu hohe Pegel wurde zudem ein sicheres Limiterkonzept vorausgesetzt.
Das Elektronikmodul des Lautsprechers ist mit 10 Endstufenkanälen (8x 40 Watt und 2x 100 Watt), einem DSP System zur Signalverarbeitung und einem ADAT-Interface zur Signaleinspeisung ausgestattet. Die Programmierung und Fernüberwachung erfolgt über eine standardisierte Ethernet Schnittstelle mit DHCP Fähigkeit, so dass alle Lautsprecher über ein herkömmliches PC Netzwerk mit dem Steuerrechner kommunizieren können. Das integrierte DSP-System ermöglicht mit FIR-Filtern eine phasenlineare Entzerrung der einzelnen Wege oberhalb von 300 Hz. Vier unabhängigen Limiter pro Kanal bieten zudem einen weitreichenden Schutz vor thermischer und mechanischer Überlastung der Lautsprecher sowie vor Verzerrungen durch Übersteuerung der Endstufen.

Abb. 3: Links: Achtkanaliges Lautsprechermodul mit Breitbandsystemen in 10 cm Abstand und Tieftönern in 40 cm Abstand. Rechts die Rückansicht mit Elektronikmodul, ADAT-Anschluss und Netzwerkschnittstelle

2.2. DSP-System

Lautsprecheranlagen für die Wellenfeldsynthese müssen aus Gründen der Finanzierbarkeit der extremen Menge von Lautsprecher meist mit entsprechend preiswerten und einfachen Chassis bestückt werden. Mangelnde Dynamik und eine tonal unausgewogene sowie im Übertragungsbereich beschränkte Wiedergabe können daher die Folge sein. Das hier beschriebene Modul wurde daher von vorne herein als 2-Wege System geplant und mit kräftigen Endverstärkern ausgestattet. Die tonale Ausgewogenheit der Wiedergabe wird über entsprechende Filtermöglichkeiten sichergestellt. Die Filterungen erfolgt prinzipiell in drei Schritten:

1. Freifeldentzerrung des eigentlichen Lautsprechers auf einen weitgehend linearen Frequenz- und Phasengang. Die Freifeldentzerrung kann bei Bedarf für eine möglichst geringe Kanalabweichung für jeden Kanal individuell erfolgen.
2. Filter zur Ortsanpassung für verschiedene Einbausituationen, die nach dem Einbau vor Ort ermittelt werden. Auch hier könnte bei Bedarf eine individuelle Einstellung für jeden Kanal erfolgen.
3. Filter für den WFS-EQ. Für das vorliegende System wurde eine Kompensation der WFS-spezifischen Verfärbungen durch das Filtersystem des Lautsprechermoduls vorgenommen.

Optimal geeignet für diese komplexe Filteraufgabe sind digitale FIR-Filter in Kombination mit IIR-Filtern. FIR-Filter erlauben eine voneinander unabhängige Einstellung des Amplituden- und Phasenverlaufes und somit ein linearphasiges Gesamtsystem. Dabei gilt es jedoch die durch die FIR-Filterung entstehende Latenz zu beachten. Für das hier vorgestellt System wurde die Länge der FIR-Filter auf 400 Taps pro Kanal begrenzt, so dass bei 48 kHz Abtastrate zzgl. der Laufzeit für den ADAT-Converter und die DA-Umsetzer eine Gesamtlatenz von nur 6 ms entsteht. Sollte speziell im tieffrequenten Bereich die Auflösung der Filter nicht ausreichen, dann können noch zusätzliche IIR-Filter eingesetzt werden.

3. Freifeldmessungen

Messungen an Lautsprechern unter Freifeldbedingungen stellen grundsätzlich die Ausgangsbasis für alle weitergehenden Messungen und Anpassungen sowie Filtereinstellungen dar. Im Fall von Wellenfeldsyntheseanlagen und den verwendeten Lautsprechern gilt dies umso mehr, als in Form der räumlichen Verortung (Wandnähe, Reihung) und der Betriebssoftware weitere akustisch wirksame Einflüsse hinzukommen.

3.1. Einzelsystem

Für die Freifeldentzerrung der WFS-Module erfolgte zunächst eine Messung eines einzelnen Kanals. Basierend darauf konnte eine erste Filterfunktion berechnet werden, die den Lautsprecher in der Amplitude und Phase auf eine quasi beliebige Wunschfunktion hin korrigiert.
Abb. 4 zeigt die Messung des Lautsprechers, die daraus berechnete Filterfunktion und das Gesamtergebnis sowohl für den Amplituden- wie auch für den Phasenverlauf. Die Phasenentzerrung gelingt insbesondere bei tiefen Frequenzen nur in Grenzen, da die Auflösung des FIR-Filter hier nicht ausreicht. Der Amplitudenverlauf wird jedoch wunschgemäß geglättet.

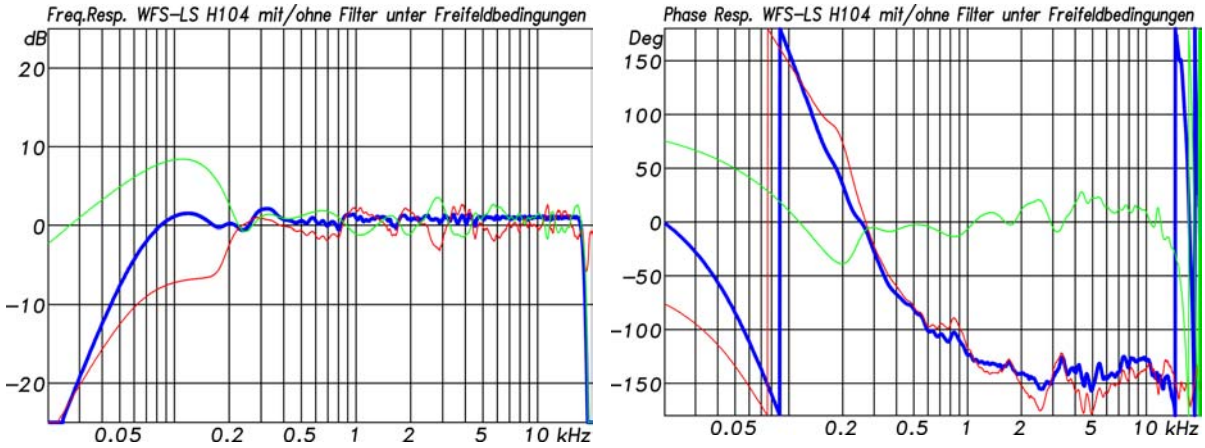

Abb. 4: Messung Amplituden-(links) und Phasengang (rechts) LS-Modul (rot), aus Zielfunktion resultierendes invertierendes Filter (grün) und das Gesamtergebnis (blau)

Der Übertragungsbereich (-6 dB) reicht so erst einmal von 55 Hz bis 18 kHz. Auf eine weitere Ausdehnung im Bassbereich wurde mit Bedacht verzichtet, da durch die Einbausituation und die Aneinanderreihung der vielen Systeme ohnehin noch ein kräftige Pegelanhebung zu erwarten war.

3.2. Linien- und Grenzflächenmessungen

Bei vergleichenden Messungen der Lautsprecher auf einer Grenzfläche bzw. unter Simulation der in der Einbausituation auftretenden Reihung in einer Linie ergaben sich Unterschiede, die deutlich machen, dass zusätzliche Messungen im eingebauten Zustand notwendig sind. Schon vor dem eigentlich Einbau der WFS-Module wurde im reflexionsarmen Raum die spätere Einbausituation als Wandeinbau oder Wandaufbau in einer ausgedehnten Reihe sozusagen unter Idealbedingungen geprüft. *Abb. 6* zeigt die entsprechenden Messaufbauten, mit deren Hilfe auch das räumliche Abstrahlverhalten unter verschiedenen Bedingungen gemessen werden konnte. Der reflexionsarme Halbraum eignete sich dazu besonders gut, da so auch der Aufbau der Linien auf einer schallharten Wand nachgestellt werden konnte, so wie es später an den Seitenwänden der Hörsaals geplant war.

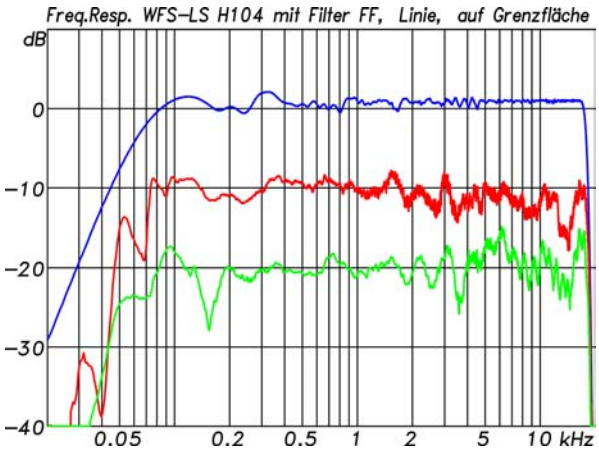

Abb. 5: Messung LS-Modul Amplitudengang mit Filter unter Freifeld-Bedingungen eines einzelnen Moduls (blau), als Linie angeordnet unter simulierter Reihung (rot) und als Linie unter Grenzflächenbedingungen (grün)

Die Labormessungen ergaben für die verlängerten Reihe nur unwesentliche Änderungen gegenüber der Freifeldmessung eines einzelnen Moduls (*Abb. 6* linkes Bild und rote Kurve in *Abb. 5*). Deutlicher fielen die Unterschiede für den Grenzflächenaufbau der Linie aus (*Abb. 6* rechtes Bild und grüne Kurve in *Abb. 5*).

Abb. 6: Messaufbau für die Simulation angereihter WFS-Module (linkes Foto) und für eine Grenzflächenaufbausituation (rechtes Foto)

4. Messungen im eingebauten Zustand

4.1. Einbausituation im Hörsaal

Die Einbausituation im Hörsaal mit einem Wandaufbau der WFS Module an den Seitenflächen des Raumes und einem bündigen Wandeinbau auf der Vorder- und Rückseite des Raumes zeigt *Abb. 7*. Im vorderen Bereich des Saales sind die Module in ihrer Abstrahlung weitgehend frei ohne reflektierende Gegenstände in der Nähe. Mit den ansteigenden Sitzreihen wird der Abstand zwischen den Modulen und den Stuhlreihen zusehends geringer. Die freie Abstrahlung in den Raum wird dadurch zwar nicht behindert, aber es kommt zu verstärkten frühen Reflexionen von der Bestuhlung. Besonders kritisch ist die WFS-Linie an der Rückseite des Saales, wo die Lautsprecher teilweise gegen die Rückenlehnen der Bestuhlung strahlen. Es wurde daher beschlossen jeden Weg einzeln zu messen und erst danach eine Entscheidung für die Ortsentzerrung zu treffen. Zur Diskussion standen die Möglichkeiten von der individuellen Entzerrung jedes einzelnen Kanales bis hin zu eiiner pauschalen gemittelten Filterungen, die für alle Kanäle gleich ist.

4.2. Einzelmessreihen und Funktionskontrolle

Nach dem Einbau der WFS-Anlage wurde zunächst jeder Kanal einzeln mit einem Mikrophonabstand von ca. 2 m gemessen. Das Messmikrophon wurde dazu mittig vor einem Modul platziert und anschließend wurden für diese Position alle acht Kanäle des Moduls gemessen. Direkt nach der Messung eines einzelnen Moduls war es so schon möglich durch den Vergleich mit einer Referenzmessung eine Aussage über die korrekte Funktion des Moduls zu machen. Anschließend wurde alle acht Kurven zu einer Gesamtkurve für das Modul gemittelt. Als endgültiges Ergebnis lagen nach Abschluss dieser Messreihen 104 Modulkurve vor.

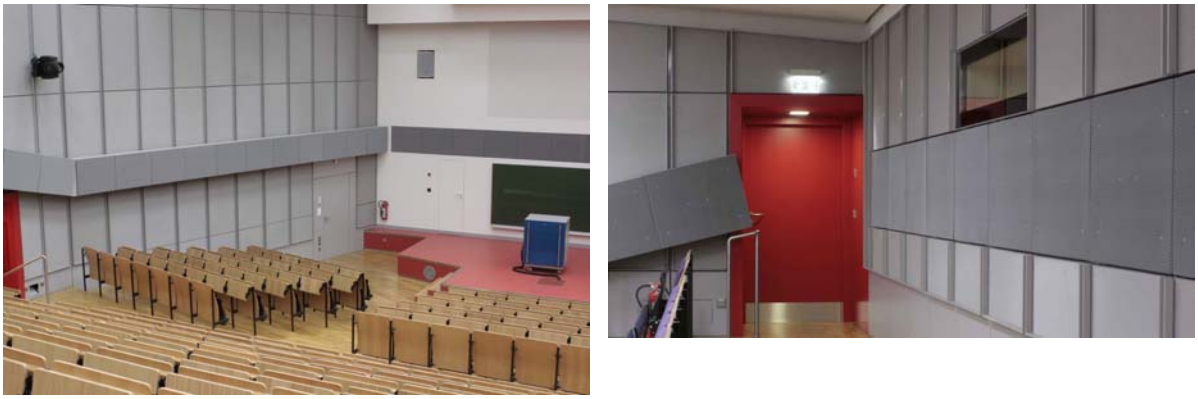

Abb. 7: Die Einbausituation im Hörsaal mit Wandaufbau der WFS Module an den Seiten und bündigem Wandeinbau auf der Vorder- und Rückseite.

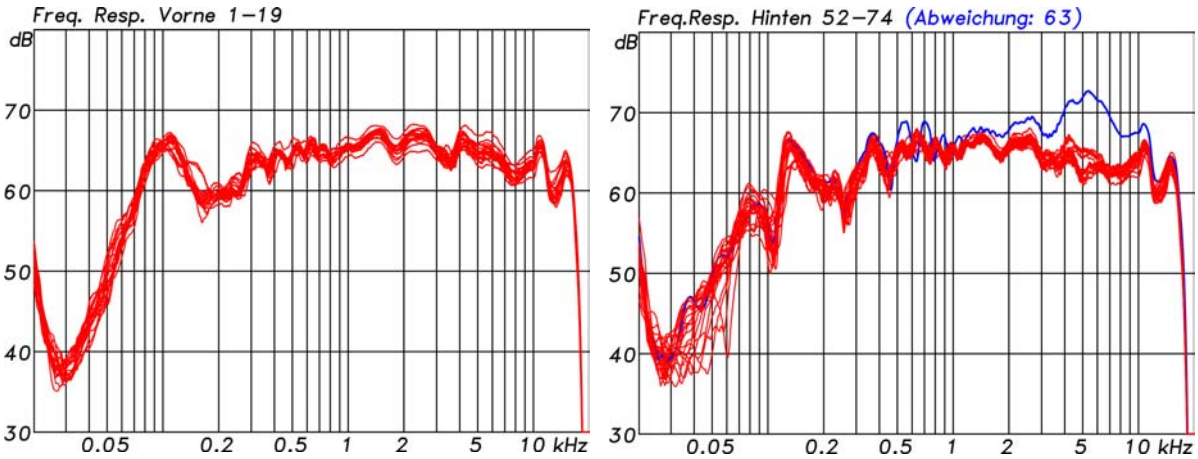

Abb. 8: Einzelmessung der WFS Module auf der Vorderseite (links) und auf der Rückseite (rechts) des Saales. Auf der Rückseite wurde ein abweichendes (fehlerhaftes) Modul (blau) detektiert. Die Abweichungen zwischen den anderen Modulen verlaufen in einem Schwankungsbereich, der sich durch die von Modul zu Modul immer wieder leicht veränderte Umgebungssituation ergibt.

Wie sich die Modulkurven in Abhängigkeit von der Einbausituation präsentierten zeigt Abb. 8 exemplarisch für die Front- und Rückseiten-Linie des Saals. Trotz der prinzipiell gleichen Einbausituation mit einem bündigen Wandeinbau fallen die Kurven deutlich unterschiedlich aus. Die Ursache liegt im direkten Umfeld der WFS Linien, die auf der Frontseite völlig frei abstrahlen können und auf der Rückseite sehr viel näher am Boden und der hinteren Stuhlreihe sind. Innerhalb eines räumlichen Bereiches (Front-, Seiten- oder Rückwand) fallen die Unterschiede jedoch eher gering aus.

4.3. Ortsanpassung

Nach Auswertung aller Messungen wurden diese zunächst in sechs Raumbereiche zusammengefasst. *Abb. 9* links zeigt die gemittelten Kurven über jeweils alle Messungen der Bereiche: Front, Südseite oben und unten, Rückwand sowie Nordseite oben und unten. Die vier Seitenbereiche wiesen eine so große Ähnlichkeit auf, dass sie zu einem großen Bereich „Seite“ zusammengelegt wurden. Es blieben somit drei Raumbereiche: Front, Seiten und

Rückwand, die jeweils eine individuelle Ortsentzerrung erhalten sollten. *Abb. 9* rechts zeigt die drei gemittelten Bereichskurven sowie die angestrebte Zielfunktion.

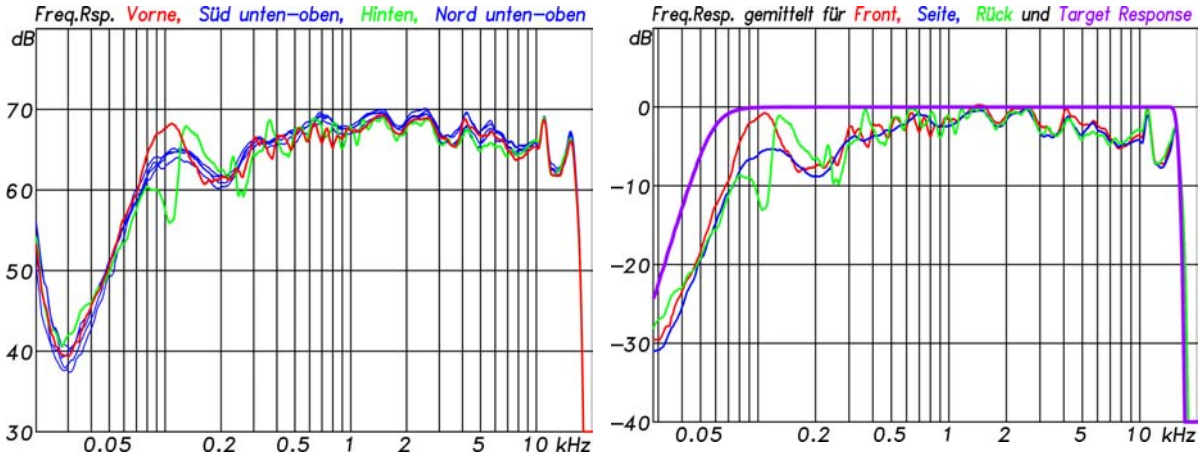

Abb. 9: links: gemittelte Kurven für die Front- und Rückseite sowie die vier noch getrennt betrachteten Seitenbereiche. rechts: Mittelwerte der Messergebnisse für Front- und Rückwand sowie die zusammengefassten Seiten zusammen mit der angestrebten Zielfunktion für alle Bereiche

Aus der Zielfunktion und den Bereichskurven wurden anschließend die Filter berechnet. *Abb. 10* zeigt die Amplitudenverläufe der Filter, die ebenfalls als FIR-Filter in den DSP-Systemen realisiert wurden. Die Ortsanpassungsfilter werden dazu nicht als eigenständige FIR-Filter gerechnet, sondern als betragsmäßige Überlagerung in das schon bestehende FIR-Filter zur Freifeldentzerrung des Lautsprechers eingerechnet, so dass keine weitere Rechenleistung erforderlich ist. Lediglich die Filterfunktion des schon bestehenden FIR-Filters ändert sich.

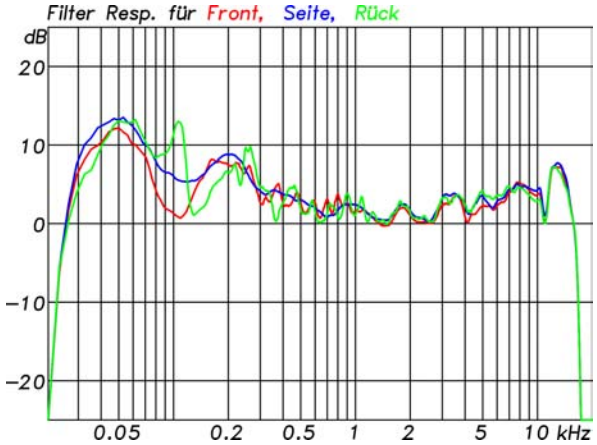

Abb. 10: Aus den gemittelten Bereichsmessungen und der Zielfunktion aus *Abb. 9* abgeleitete Filterfunktionen für die Ortsanpassung der Front-, Seiten- und Rücklinie

5. WFS-EQ

Nachdem die Ortsanpassung des Lautsprechersystems als eigener Filtersatz im Controller abgelegt war, wurde eine zusätzliche Entzerrung im Hinblick auf die WFS-spezifischen

Einflüsse auf die Übertragungsfunktion vorgenommen. Da diese Einflüsse von der Schallfeldgeometrie sowie von der Position von Primärquelle und Hörer abhängig sind (s. Abschn. 1), wurden typische Primärquellen in unterschiedlichem Abstand von der WFS-Anlage dargestellt und vermessen, um eine im Mittel optimale Kompensation zu erhalten.

5.1. Messverfahren

Abb. 11 links zeigt die Anordnung verschiedener mit der WFS Anlage dargestellter Primärquellen. Für jede dieser Primärquellen wurden im Saal räumlich verteilt eine Vielzahl von Messungen ausgeführt und anschließend energetisch gemittelt. *Abb. 13* und *Abb. 14* erläutern die Messmethode. Für die Messungen wurden Punktquellen als Primärquellen in verschiedenen Abständen vor und hinter der Nulllinie platziert. Die daraus über die vorab erläuterte räumliche Mittelung entstandenen Frequenzgänge sind in *Abb. 14* rechts in grün dargestellt. Zum Vergleich dazu wird in rot die Messung eines mittig gelegenen einzelnen Kanals gezeigt.

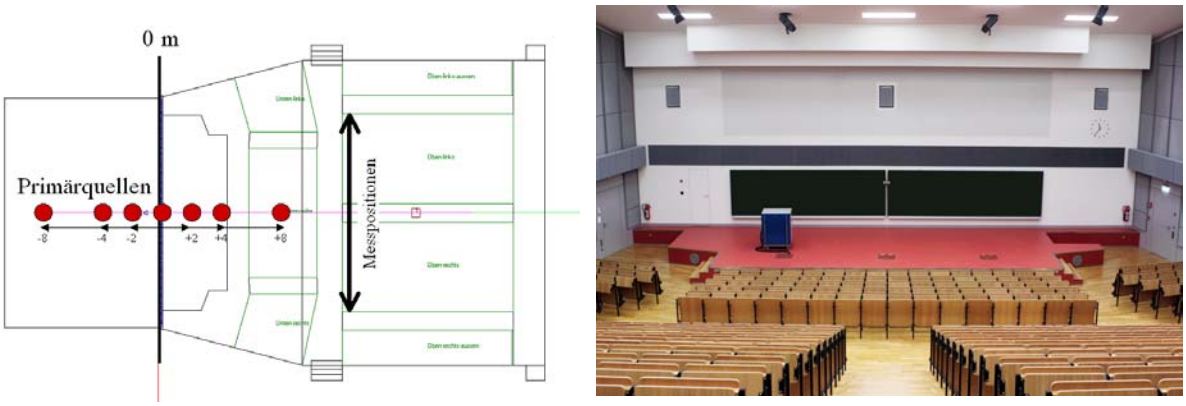

Abb. 11: Messpositionen und Anordnung der Primärquellen für die Messreihen. Bei 0 m befindet sich die Projektions- bzw. Tafelwand.

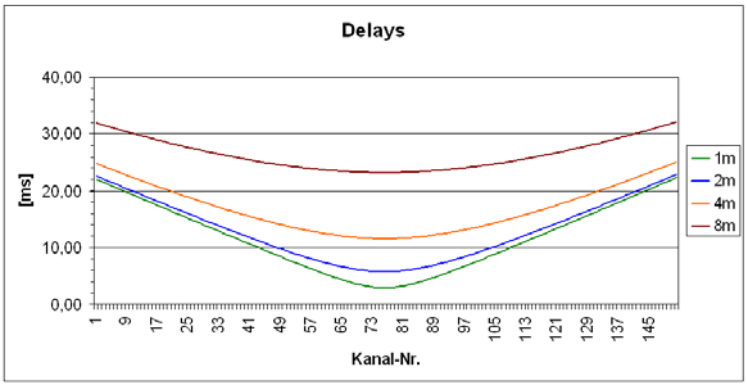

Abb. 12: Verteilung der Delays auf der WFS Linie an der Frontseite für eine Primärquelle in 1, 2, 4 und 8 m Entfernung hinter der Projektionswand. Die „Delay-Kurven“ entsprechen dem Verlauf der Wellenfront, die mit zunehmender Entfernung immer flacher wird.

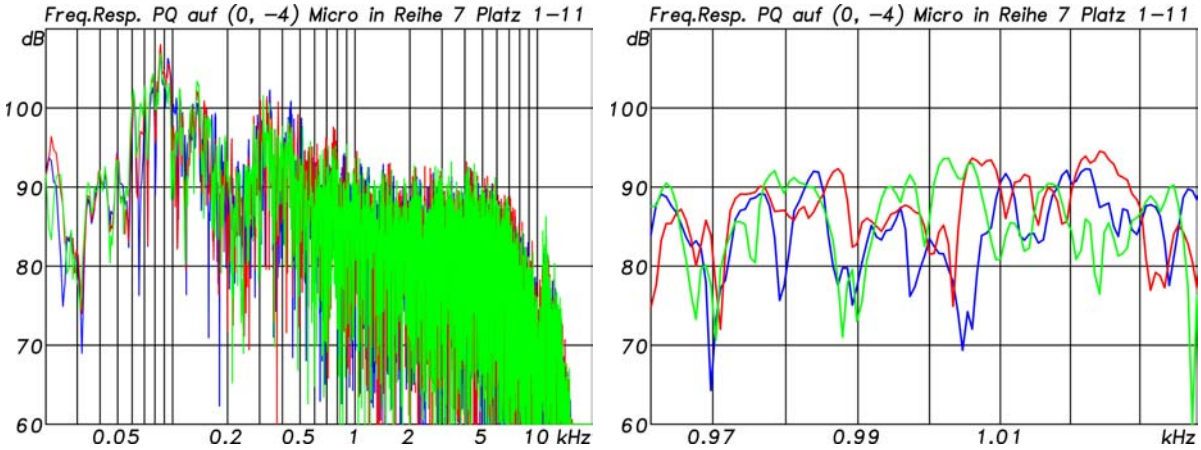

Abb. 13: links: Drei exemplarische Einzelmessungen im Saal an verschiedenen Positionen. Die Kurvenverläufe sind geprägt von stochastisch verteilten und fein strukturierten Interferenzen. rechts: Ausschnittvergrößerung der drei Kurven bei 1 kHz. Bei einer energetische Mittelung gleichen sich Maxima und Minima der Kurven aus.

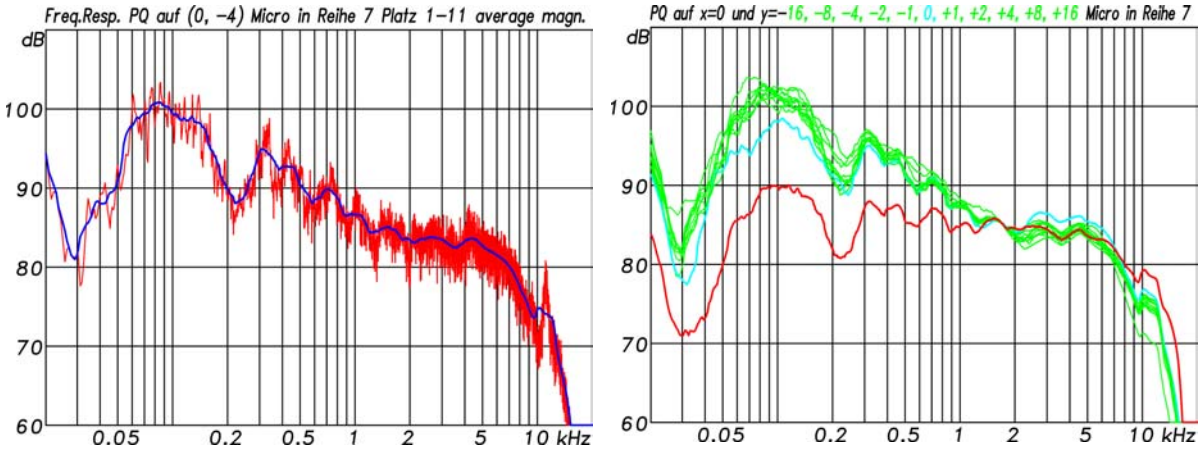

Abb. 14: links: Energetisch gemittelter Verlauf aus allen Messpositionen im Raum für eine Primärquelle (rot). Der zusätzlich noch in der Darstellung mit 1/12 Oktave Bandbreite leicht geglättete Verlauf (blau). rechts: Gemittelte und geglättet Kurven für verschiedene Positionen der Primärquelle in grün sowie die Messung eines einzelnen Lautsprecherkanals in rot. Der Einbruch bei 220 Hz entsteht durch die Bodenreflexion.

5.2. Filterung

Aus den vorab erläuterten Messung ergibt sich eine gemittelte Kurve für die Primärquellen, die unabhängig von der Entfernung ist und die im Vergleich zur energetisch gemittelten Kurve des einzelnen zentralen Kanals den WFS-EQ ergibt.

Abb. 15 stellt die aus den Messreihen für verschiedene Primärquellen (grün) abgeleitete Filterfunktion (blau) dar. Die Messung eines einzelnen Kanals wird in rot gezeigt sowie einer simulierten Primärquelle mit Filter in rot gestrichelt. Mit Hilfe des WFS-EQs kann so eine im Mittel über verschiedene Positionen der virtuellen Schallquelle optimal entzerrte Wiedergabe erreicht werden. Ohne den EQ kommt es insbesondere zu einer deutlichen Bassüberhöhung.

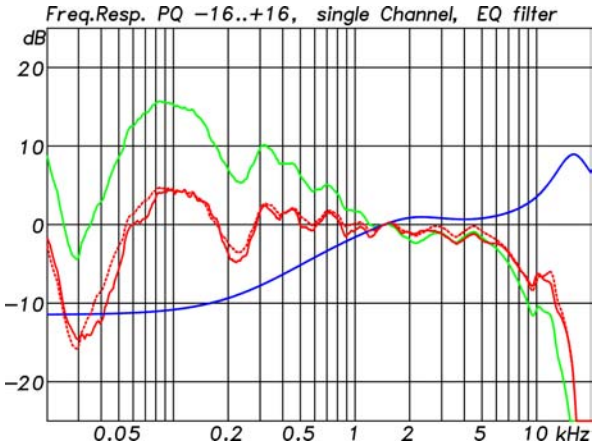

Abb. 15: Aus den Messreihen für verschiedene Primärquellen (grün) abgeleitete Filterfunktion (blau). Messung eines einzelnen Kanals in rot sowie einer simulierten Primärquelle mit EQ in rot gestrichelt.

Das in *Abb. 15* dargestellte WFS-EQ Filter kann ganz nach vorhandenen Möglichkeiten entweder mit drei einfachen IIR-Filtern in Form parametrischer EQs realisiert werden oder auch in das schon bestehende FIR-Filter mit eingerechnet werden.

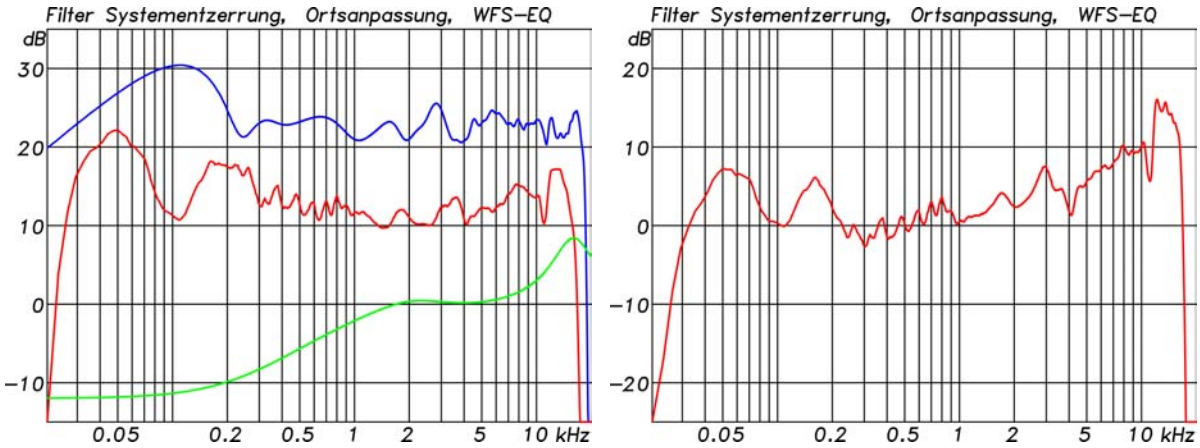

Abb. 16: links: Die Filter für einen WFS-Lautsprecher: Freifeldentzerrung des Lautsprechers (blau), Ortsanpassung nach Einbau (rot) und WFS-EQ (grün). Alle Filter können im DSP System zu einem FIR-Filter zusammengefasst werden (rechte Abbildung).

6. Zusammenfassung

Die Filterung von Lautsprechern in Wellenfeldsynthese Anlagen kann in drei grundsätzliche Stufen unterteilt werden:

1. Entzerrung der Lautsprecher auf einen Freifeldfrequenzgang nach Wunsch
2. Kompensation von ortsabhängigen Einflüssen, die durch den Einbau bedingt sind
3. EQ zur Kompensation WFS-spezifischer spektraler Einflüsse

Punkt 1. und 2. können entweder pauschal, in Untergruppen oder bei höchsten Anforderungen auch individuell für jeden Kanal ausgeführt werden. In Anbetracht der großen Anzahl von Kanälen bei WFS-Systemen und der Forderungen nach einer schnellen und unkomplizierten Einstellung der Filter eignen sich nur digitale Filter für diese Aufgabe. Hier können IIR- und FIR-Filter oder auch eine Kombination aus beiden zum Einsatz kommen. Mit FIR-Filtern besteht die sehr komfortable Möglichkeit quasi beliebige Filterfunktionen durch eine einfache Überlagerung der einzelnen Funktionen in einem Filter umzusetzen.

7. Quellenverzeichnis

[1] Ahnert, W., Goertz, A.: „Beschallungstechnik“, in: Weinzierl, S. (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Springer Verlag, Berlin 2008, S. 524ff.

[2] Vogel, P.: „Application of wave field synthesis in room acoustics“. Dissertation TU Delft 1993, http://www.library.tudelft.nl/ws/search/publications/dissertations/index.htm, S. 58ff.

[3] Spors, S., Rabenstein, R.: „Spatial aliasing artifacts produced by linear and circular loudspeaker arrays used for wave field synthesis“. In: 120th AES Convention, Paris, France, May 2006

[4] Behrens, T., Ahnert, W., Moldrzyk, C.: „Raumakustische Konzeption von Wiedergaberäumen für Wellenfeldsynthese am Beispiel eines Hörsaals der TU Berlin“ Fortschritte der Akustik, DAGA Tagungsband *2007*

[5] Moldrzyk, C., Goertz, A., Makarski, M., Feistel, S., Weinzierl, S., Ahnert, W.: „Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal“ Fortschritte der Akustik, DAGA Tagungsband *2007*

[6] Goertz, A., Makarski, M., Moldrzyk, C., Weinzierl, S.: „Entwicklung eines achtkanaligen Lautsprechermoduls für die Wellenfeldsynthese“ Fortschritte der Akustik, DAGA Tagungsband *2007*