

Ein Jahr Erfahrungen aus dem Betrieb der weltgrößten Wellenfeldsyntheseanlage

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

Christoph Moldrzyk*¹, Anselm Goertz*², Michael Makarski*²
 *¹ Visaural und *² IFAA (*Institut für Akustik und Audiotechnik*)

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

1

Übersicht zum Vortrag

- Einleitung
- Teil 1: Planung von WFS Systemen am Beispiel des Hörsaal H104 der TU Berlin
- Teil 2: Messungen an Lautsprecheranlagen für die Wellenfeldsynthese
 - Messungen der Lautsprecher im Freifeld
 - Ortsanpassung nach der Installation
 - WFS Filterung
- Teil 3: Weiterentwicklung der WFS Lautsprechersysteme aus dem H104 der TU Berlin

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

2

Planung und Inbetriebnahme von WFS-Systemen

- Bestimmung des Einsatzzwecks
- Akustische Voraussetzungen (Raumakustik, Einbausituation, Beschallungsanlage)
- Komponentendimensionierung
- Einbau
- Filtereinstellungen
- Erfolgskontrolle
- Systemüberwachung
- Kosten (Planung, Bau, Technik)
- Optimierungsmöglichkeiten

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

3

Einsatzzweck

- Raumnutzung
 - Mehrzweckraum (z. B. Hörsaal wie H 104, Kongreßzentrum, Konzertsaal)
 - Dezidierter Spezialraum (z. B. VR, Konzertsaal Neue Musik)
 - Anlagendimensionierung
 - Front-, Front-/Seit- oder umlaufendes Array (laufende Meter), zusätzliche Höhen-LS
 - Kosten
 - Komplettsystem mit Planungs- und Baukosten ab ca. 6.000.- €/m

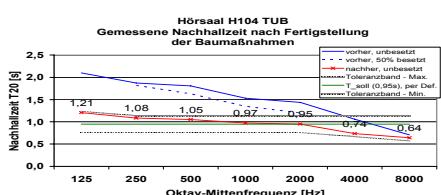
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

4

Akustische Voraussetzungen

- Raumakustik
 - Hörsaal H 104: Neugestaltung im Zuge der Modernisierung (Nachhallzeitreduktion: RT von 1,5 s auf 0,97 s bei 1 kHz)
 - Grundsätzlich gilt: Nachhallzeit so gering wie möglich, Nachhall spektral ausgewogen, keine diskreten Reflexionen mit hohen Pegeln

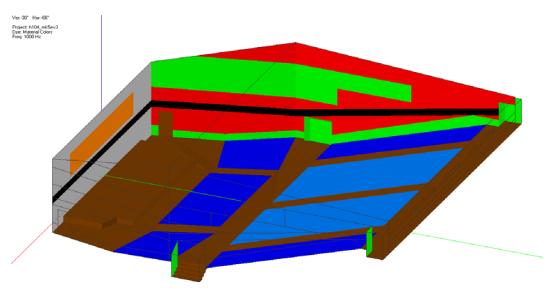


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

5

Akustische Voraussetzungen

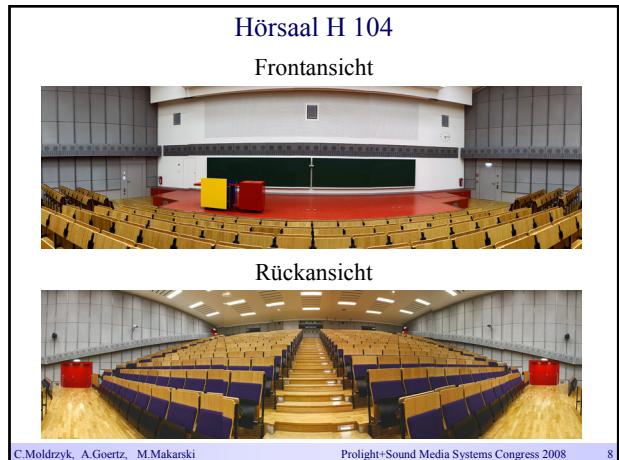
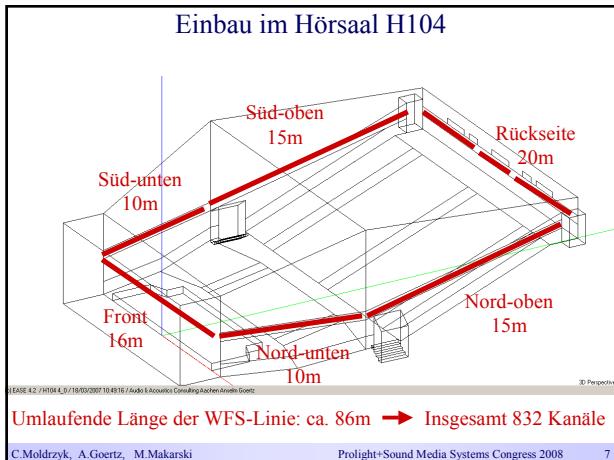


Schwarz: WFS Rot: Absorbierend Grün:Reflektierend

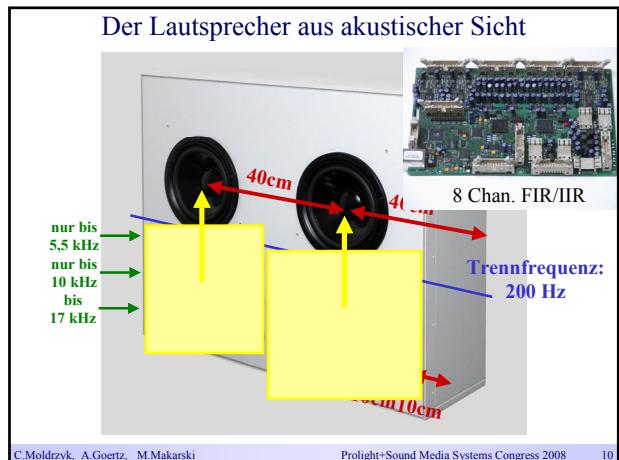
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

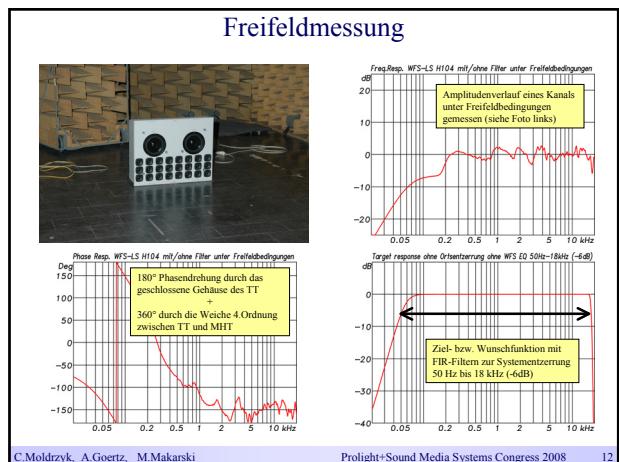
6



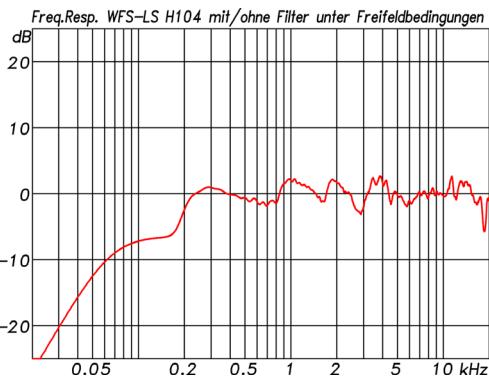
- Komponentendimensionierung**
- Kriterien für WFS-Lautsprecher
 - Decke weitgehend schallhart
 - LS müssen vertikal gerichtet abstrahlen
 - Lautsprecherband in H 104 teilweise oberhalb der Zuhörer (Türen)
 - LS müssen vertikal kontrolliert abstrahlen, so dass das Publikum gut versorgt, aber die Decke möglichst wenig beschaltet wird
- C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 9



- Filterberechnung für die Lautsprecheranlagen der Wellenfeldsynthese**
- Aktive 2-Wege Systeme mit je einem Tieftöner für vier Kanäle (Trennfrequenz bei ca. 200 Hz)
 - Pro Kanal ein digitales FIR-Filter mit bis zu 2000 Taps bei 48 kHz Samplerate
 - FIR-Filter zur:
 - Systementzerrung in Amplitude und Phase
 - Ortsanpassung
 - WFS-Entzerrung
- C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 11



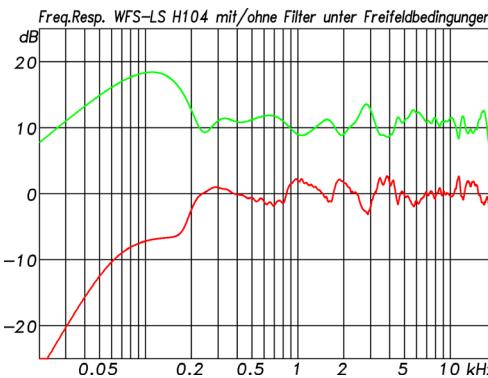
Frequenzgang des Lautsprechers



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

Frequenzgang des Lautsprechers und Filters

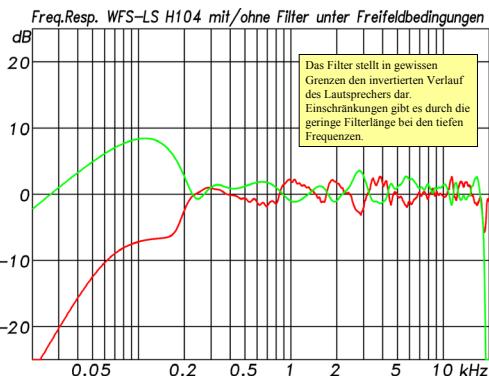


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

14

Frequenzgang des Lautsprechers und Filters

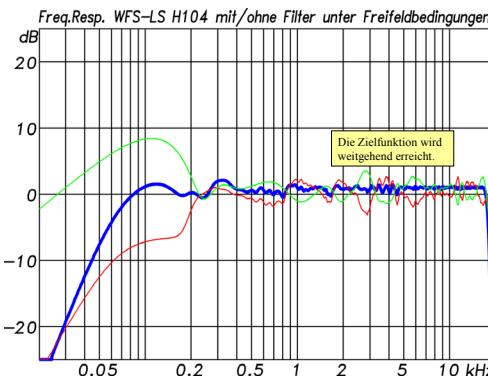


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

15

Amplitudenfrequenzgang mit Filtern

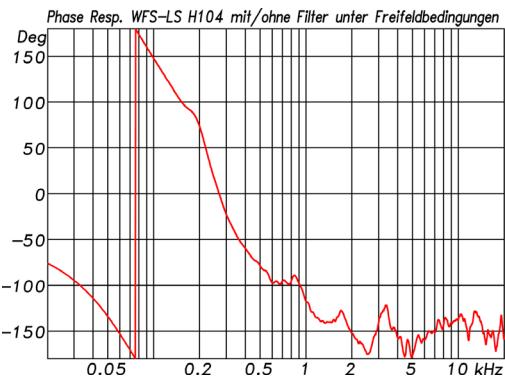


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

16

Phasengang des Lautsprechers

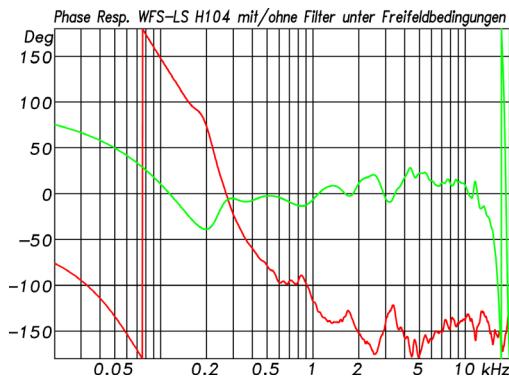


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

17

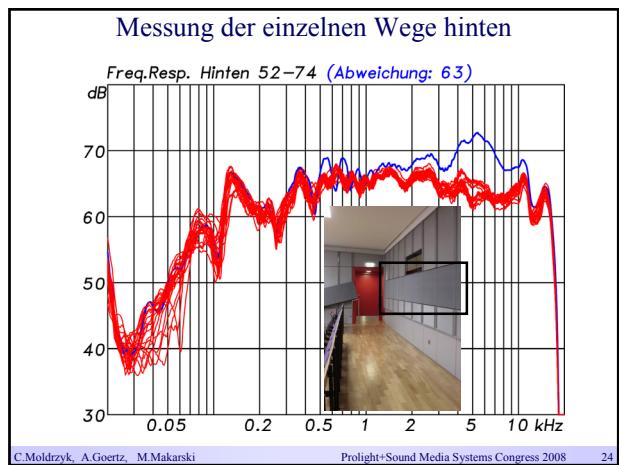
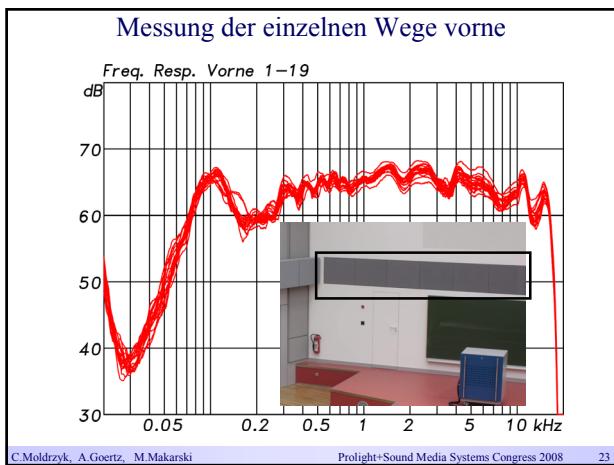
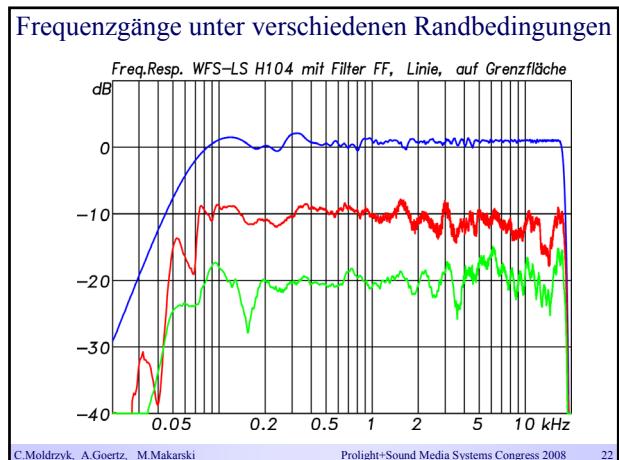
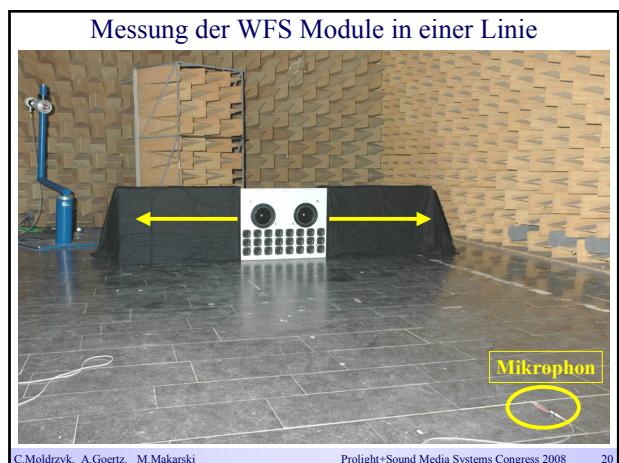
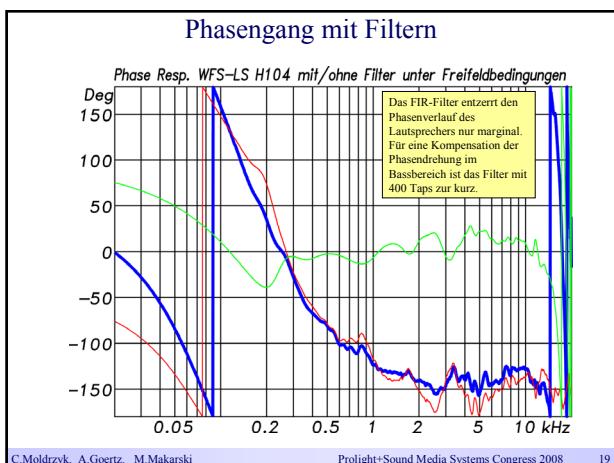
Phasengang des Lautsprechers und des Filters



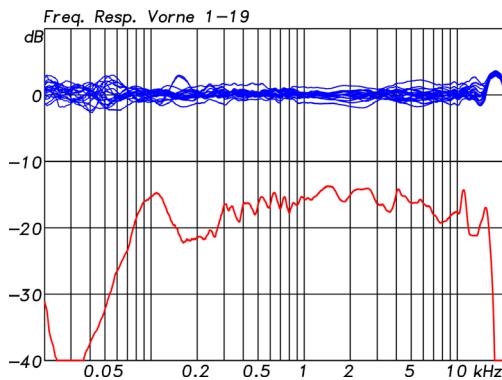
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

18



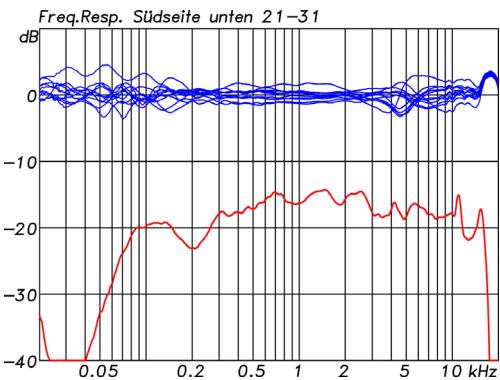
Mittelwert und Abweichungen Kanal 1-19 (Vorne)



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

Mittelwert und Abweichungen Kanal 21-31 (Süd unten)

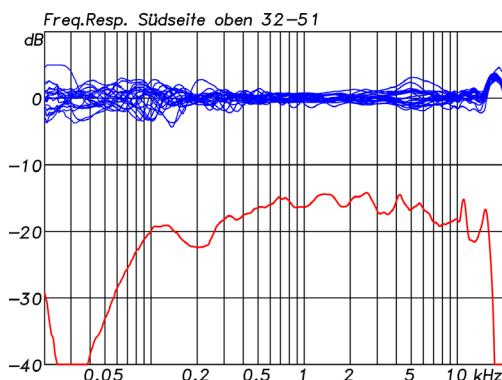


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

25

Mittelwert und Abweichungen Kanal 32-51 (Süd oben)

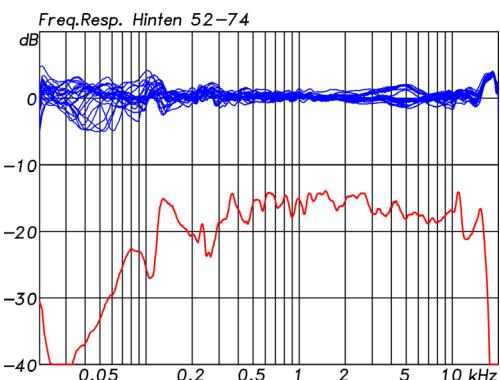


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

27

Mittelwert und Abweichungen Kanal 52-74 (hinten)

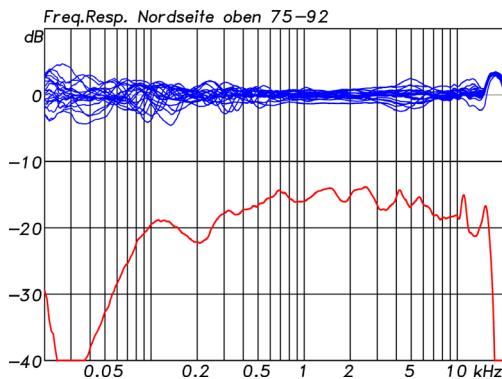


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

28

Mittelwert und Abweichungen Kanal 75-94 (Nord oben)

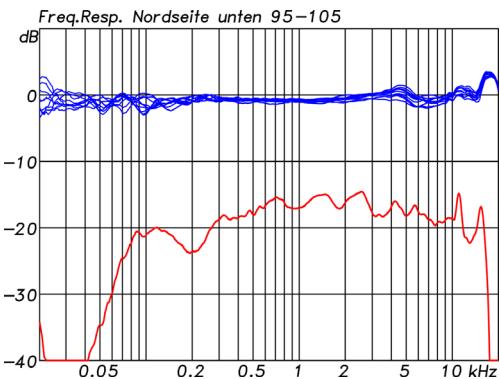


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

29

Mittelwert und Abweichungen Kanal 95-105 (Nord unten)

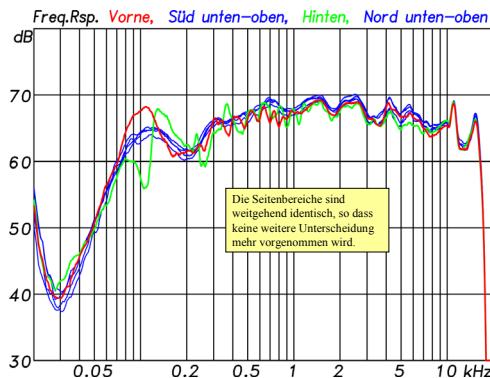


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

30

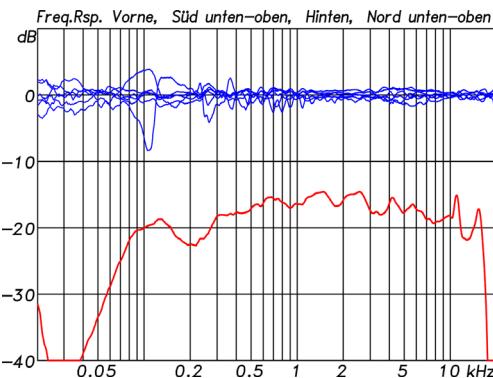
Mittelwerte nach räumlichen Bereichen



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

Mittelwert und Abweichungen Kanal 1-105 nach Bereichen



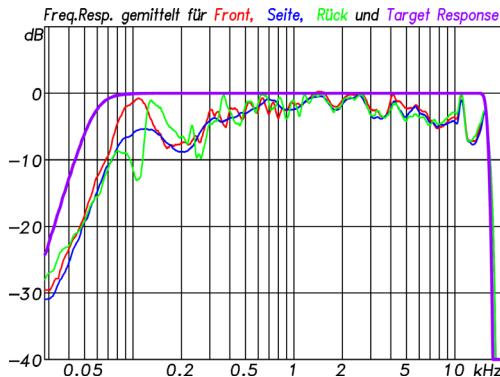
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

31

32

Bereiche Vorne, Seite und Hinten mit Zielfunktion

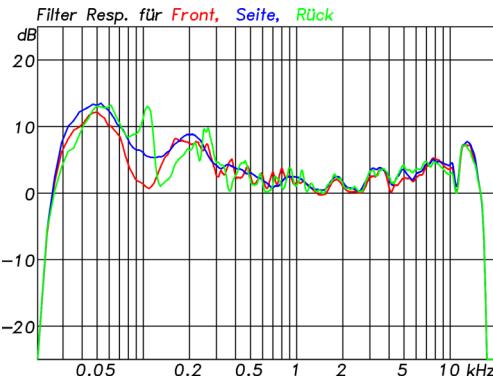


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

33

Filter für Vorne, Seite und Hinten

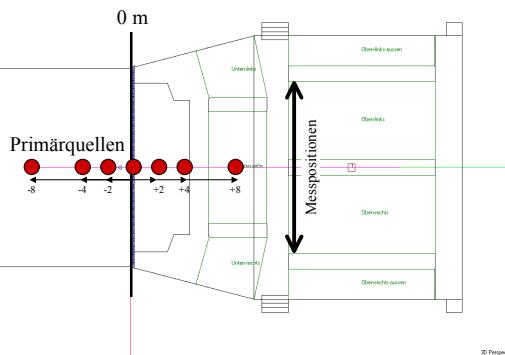


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

34

Primärquellen in verschiedenen Abständen

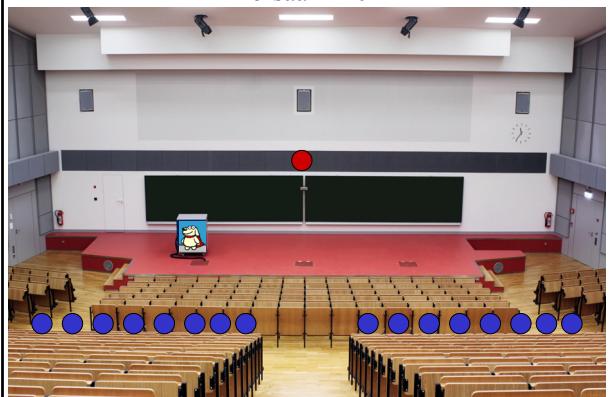


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

35

Hörsaal H104

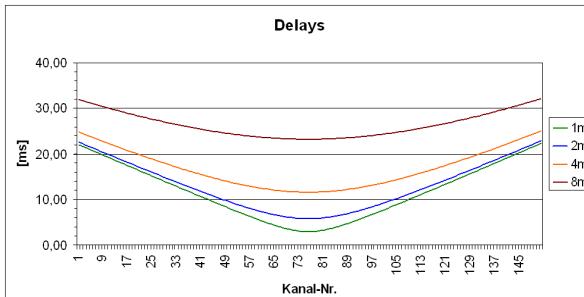


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

36

Delays der WFS Kanäle für 1, 2, 4 und 8m

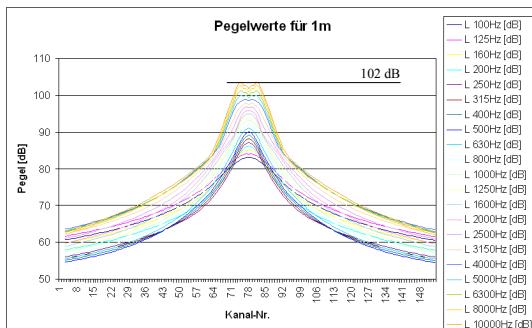


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

37

Pegelverteilung der WFS Kanäle für 1m

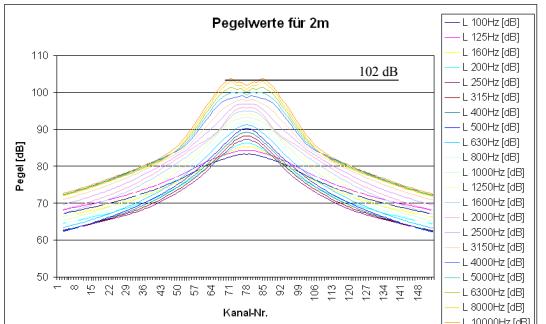


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

38

Pegelverteilung der WFS Kanäle für 2m

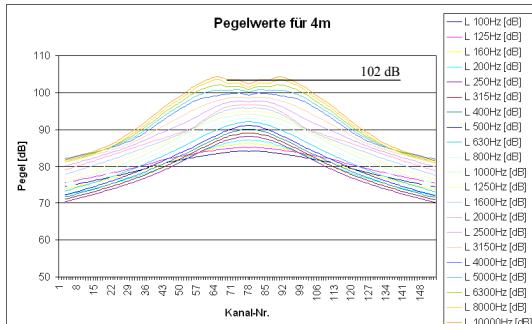


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

39

Pegelverteilung der WFS Kanäle für 4m

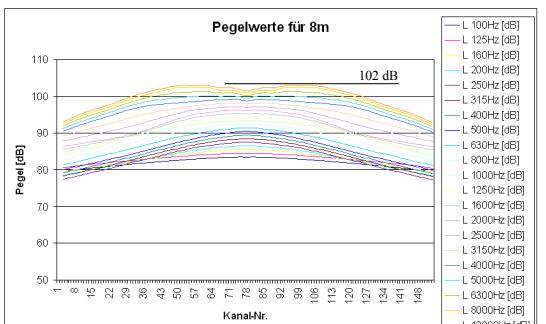


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

40

Pegelverteilung der WFS Kanäle für 8m

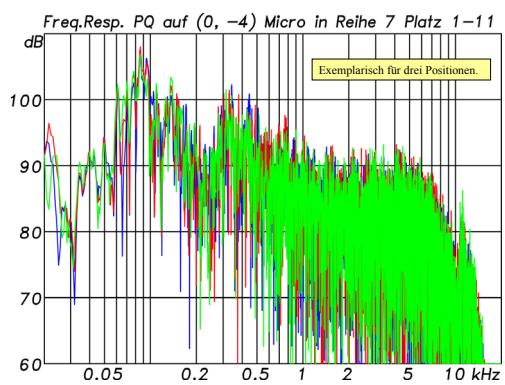


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

41

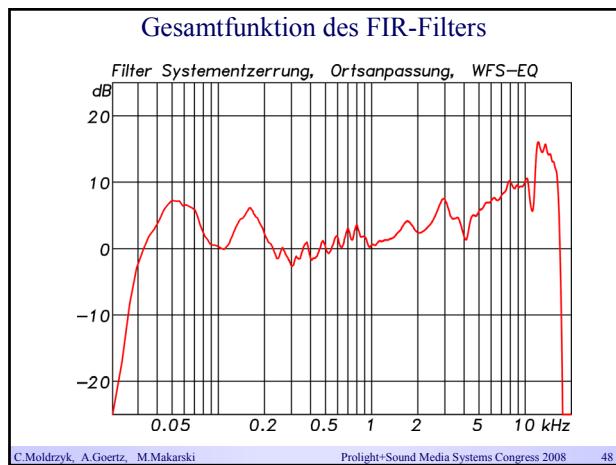
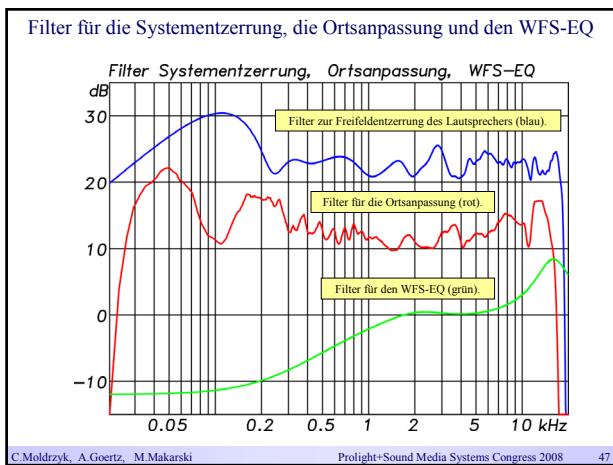
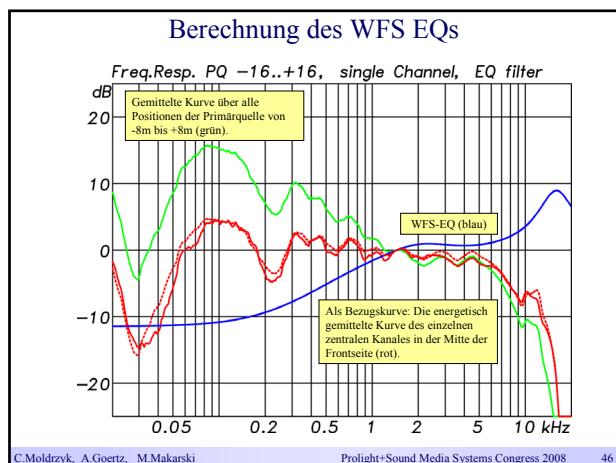
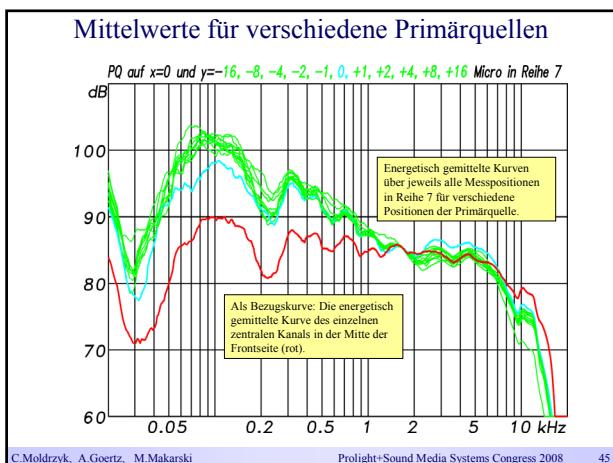
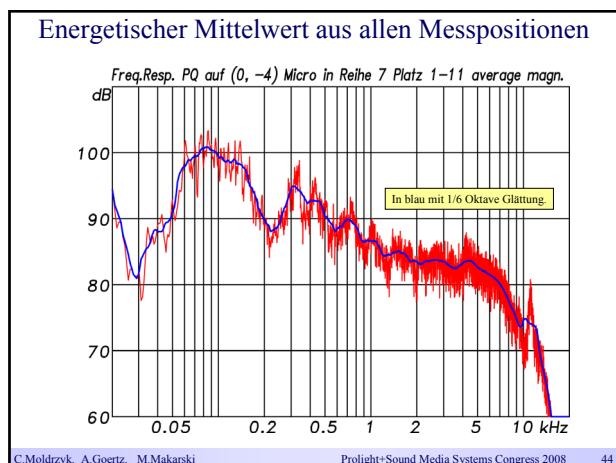
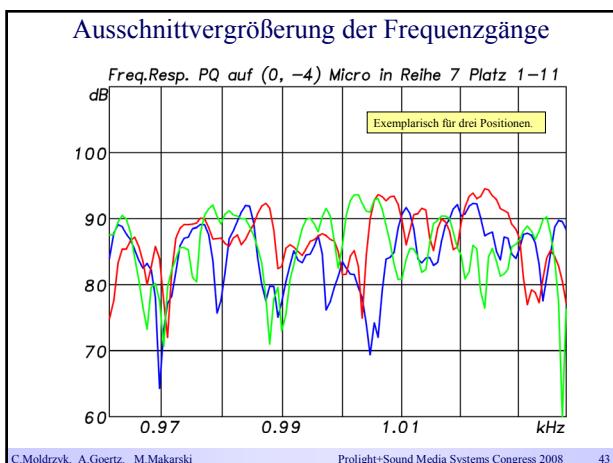
Frequenzgänge an den einzelnen Messpositionen



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

42



Zusammenfassung der Filterberechnung

- Einmessung der WFS Anlage:
 - Systementzerrung der Lautsprecher unter FF-Bedingungen als Basis
 - Ortsanpassung und WFS-EQ sind erforderlich für eine gleichmäßige und tonal ausgeglichene Wiedergabe
 - Umsetzung mit digitalen IIR- und/oder FIR-Filtern
 - FIR-FILTER sind besonders schnell und präzise einzustellen, bedürfen allerdings einer relativ hohen Rechenleistung

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

49

Messung mit Schrittmotor-Mikrofonarray



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

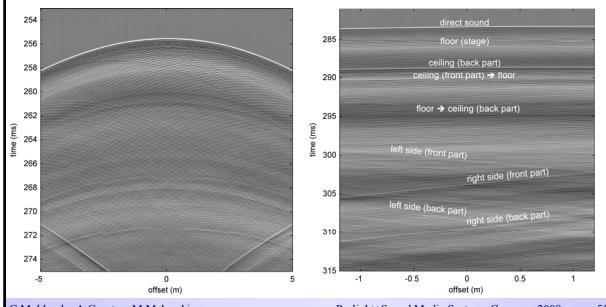
Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

50

Erfolgskontrolle

Messergebnisse:

Punktschallquelle außerhalb Schallfeld mit Reflexionen



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

51

Funktionsprüfung und Wartung der WFS Anlage

- Abnahmemessungen
 - Standardisierte Kriterien zur qualitativen Beurteilung eines WFS Systems sind noch zu entwickeln
- Wartungsarbeiten
 - Dauerhafte Messüberwachung mit Mikrofonen in Planung
 - Direkte Zugangsmöglichkeit WFS-LS
 - Automatisiertes Fehlerprotokoll mit Benachrichtigungsabsendung, Mängellistengenerierung, ...

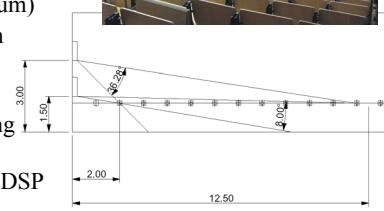
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

52

Anforderung an den Lautsprecher für den H104

- Möglichst breite Abstrahlung horizontal (WFS)
- Vertikal angepasst an die Aufhängepos. und gleichzeitig möglichst stark bündelnd (Raum)
- Kanalabstand 10cm (WFS)
- Basstauglichkeit
- Individualentzerrung per DSP
- Ortsentzerrung per DSP

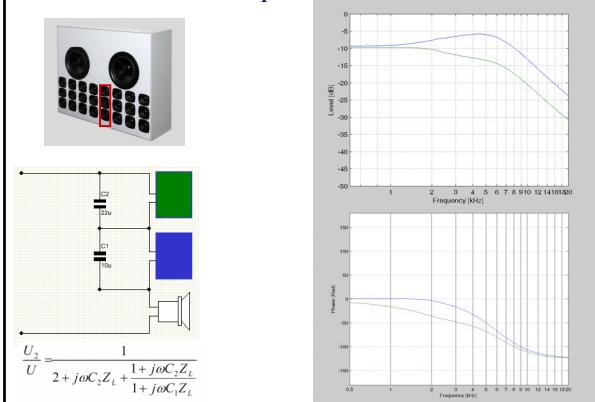


C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

53

Konzept eines Kanals



C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski

Prolight+Sound Media Systems Congress 2008

54

Directivity mit Weiche

- Trotz der Sachzwänge
 - Auf die Gegebenheiten im H104 optimierte Directivity
 - Simpleste und im Einkauf günstige Weiche
 - Der Einsatz eines zusätzlichen Kalottenhochtoners war kontraproduktiv

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 55

Weiterentwicklung der LS

- Zukünftige Projekte mit geänderten Anforderungen
- Weiterentwicklung und Verbesserung der akustischen Eigenschaften mit Hilfe moderner Simulationsverfahren

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 56

Weiterentwicklung der WFS-Lautsprecher

- Andere WFS-Projekte erfordern
 - Vertikal symmetrische Abstrahlung mit evtl. stärkerer (oder schwächerer) Bündelung
 - Mehr maximaler Schalldruckpegel (>100dB pro Kanal)
 - Horizontal breitere Abstrahlung ab 6kHz
- Umsetzung
 - größeres Budget
 - Bewährtes und erprobtes Konzept soll beibehalten, aber abgeändert werden

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 57

Vorgehensweise

- Erweiterte Konzepte im CAD umsetzen
- Numerische Abstrahlungsberechnung (BEM)
 - Simulation der Einzelwege
 - Optimierung der Einzelwege
- Abstrahlungsberechnung der kompletten Anordnung
 - Superposition der Einzelwege für optimierte elektrische Filter
- Prototyping und messtechnische Verifikation

C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 58

Ansätze zur Weiterentwicklung

Effektive Aperturgröße
Abstand der Quellen
Filterung
Wirkungsgrad/Anzahl der Schallwandler
Endstufenleistung

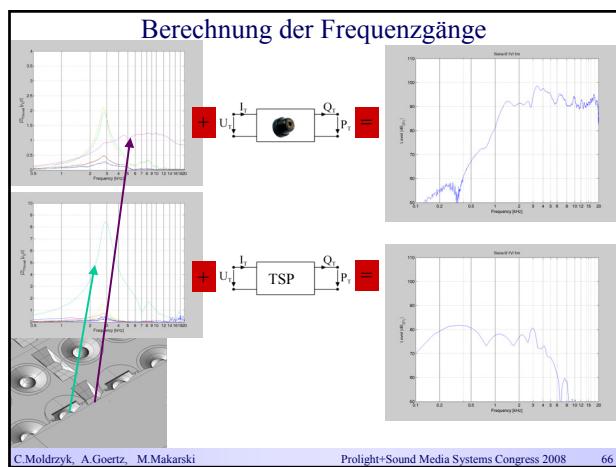
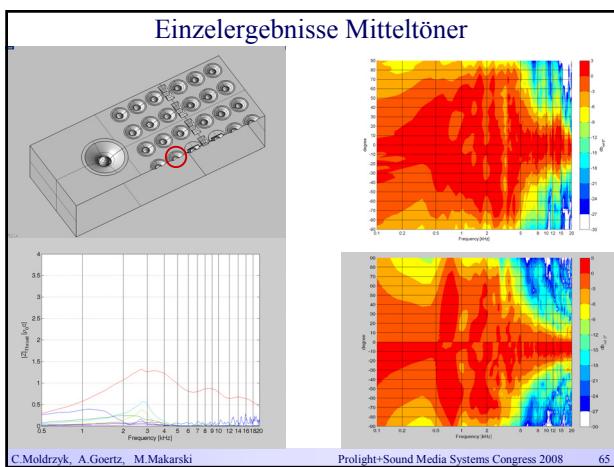
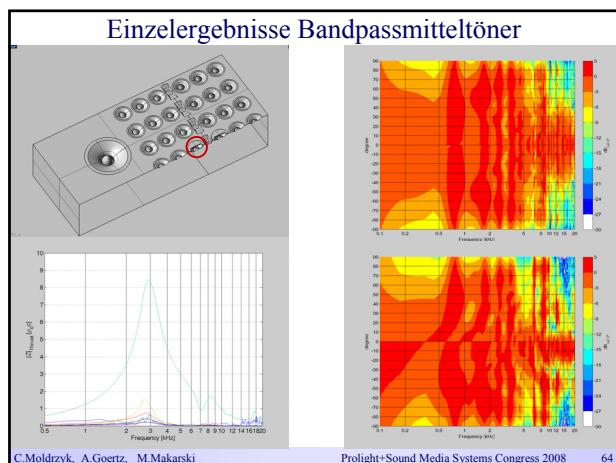
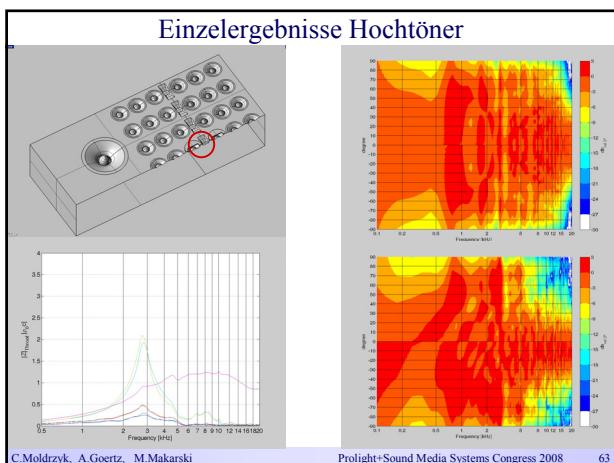
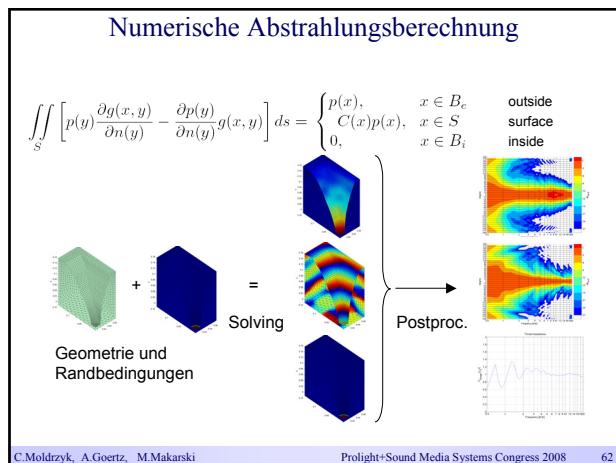
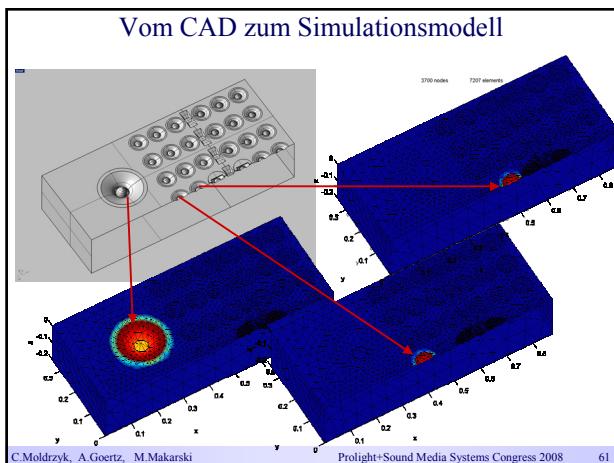
Max SPL WFS Modul HS-Messung auf Grenzfäche

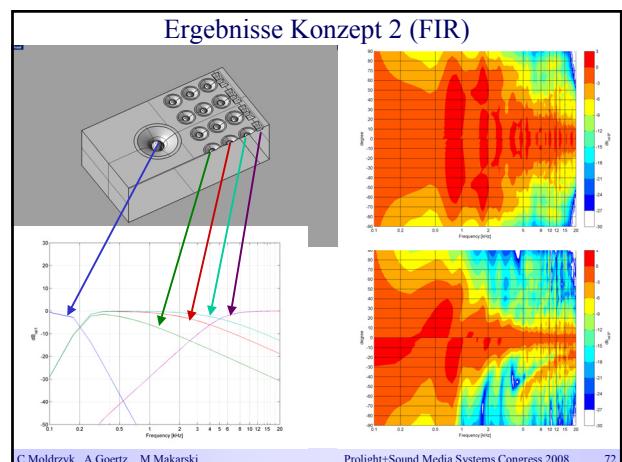
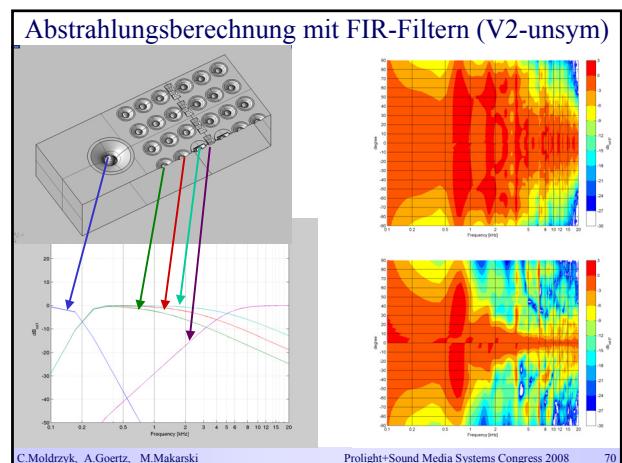
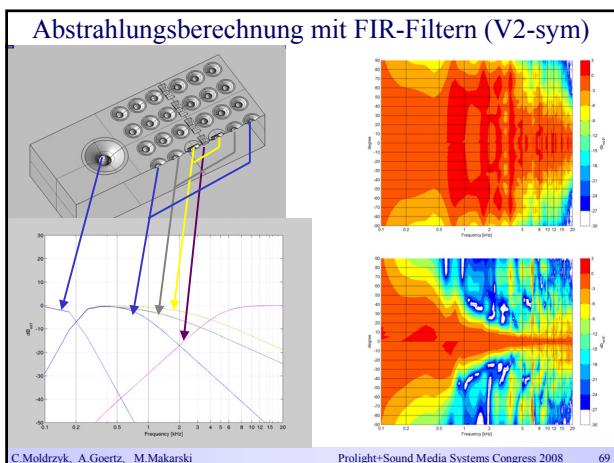
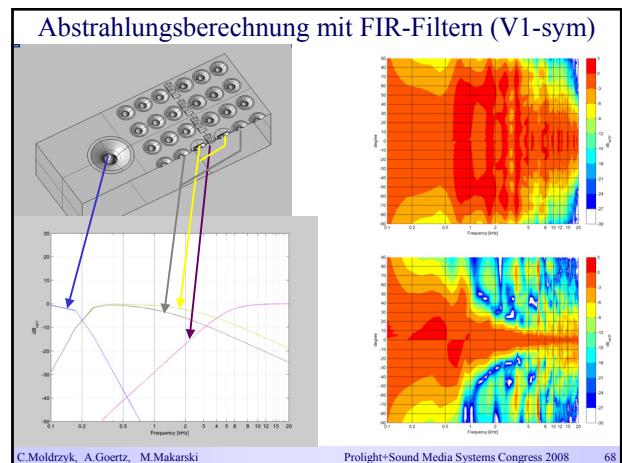
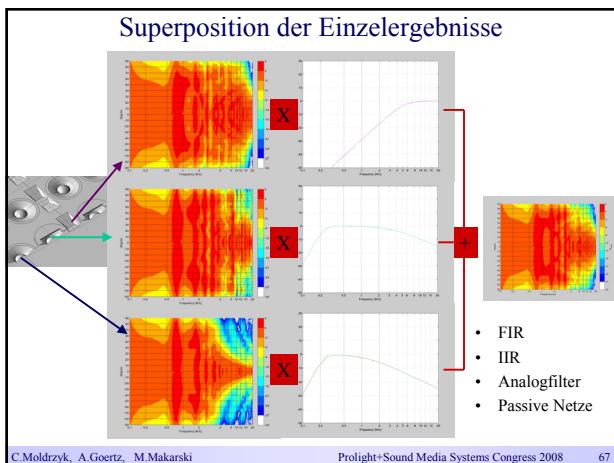
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 59

Konzeptmodell

- Vergleich zwischen symmetrischer/asymmetrischer vertikaler Anordnung
- Benötigte Linienlänge
- Beugungsmuster
- Separater Horntreiber mit Minihorn
- Geringer Abstand zu benachbarten Strahlern
- Bandpass mit schlitzförmigem Ausgang
 - Obere Grenzfrequenz
 - Wirkung auf Directivity

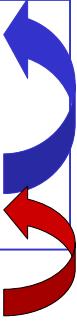
C.Moldrzyk, A.Goertz, M.Makarski Prolight+Sound Media Systems Congress 2008 60





Weitere Schritte

- Weitere Konzepte im CAD umsetzen
- Numerische Abstrahlungsberechnung (BEM)
 - Simulation der Einzelwege
 - Optimierung der Einzelwege
- Abstrahlungsberechnung der kompletten Anordnung
 - Superposition der Einzelwege für optimierte elektrische Filter
- Prototyping und messtechnische Verifikation
- Weichenentwicklung anhand von Messdaten



Fazit

- Die besten Ergebnisse erzielt man mit symmetrischen Anordnungen und FIR-Filtern
- Inhomogene Zeilenbestückungen sind aufwändig mit passiver Filterung (keine einfache Trickschaltung möglich)
- Weitere Kombinationen werden aktuell untersucht
- Vollaktives, digitales Konzept ist zu diskutieren
 - 32 Low-Power Kanäle mit je 25W und 2 High-Power Kanäle mit je 200W
 - Dadurch: erheblich mehr Freiheiten bei der Filterung der Einzelwege
 - Kosten?

Paper Download

www.anselmgoertz.de

Manuskript zu diesem Vortrag mit Text und Grafiken als PDF File ab dem 17.März 2008