

Wellenfeldsynthese für Eventbeschallungen



Bachelorarbeit

durchgeführt von

Rafael Philip Ludwig

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Betreuer: Dipl.-Ing. Thorsten Rohde

Graz, im Juni 2012

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit liefert einen allgemeinen Überblick darüber, was mit den aktuellen Entwicklungen der Wellenfeldsynthese möglich und realisierbar ist. Zunächst werden kurz die theoretischen Grundlagen erläutert, die den Grundstein für Wellenfeldsynthese legen. Danach werden die Vorteile gezeigt, die die Wellenfeldsynthese im Vergleich zu konventionellen Beschallungskonzepten bietet. Das darauf folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Grenzen, auf die die Theorie stößt, wenn sie in die Praxis umgesetzt wird und mit den besonderen Anforderungen, die wellenfeldsynthesetaugliche Lautsprecher erfüllen sollten. Außerdem werden hier sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten und bereits realisierte Installationen kurz vorgestellt. Anschließend werden Forschungseinrichtungen und Firmen, die sich mit der Erforschung neuer Möglichkeiten und Produkten für die Wellenfeldsynthese beschäftigen, genannt. Da Wellenfeldsynthese auch gewisse Nachteile mit sich bringt, werden im nächsten Kapitel zwei Konzepte vorgestellt, mit denen gewisse Nachteile durch Vorteile der Stereophonie kompensiert werden können. Zum Schluss der Arbeit folgt noch ein Planungskonzept, wie Wellenfeldsynthese in der Grazer Oper realisiert werden kann. Dabei geht es in erster Linie darum, was in der Grazer Oper mit Wellenfeldsynthese theoretisch überhaupt möglich und sinnvoll wäre und was eine Installation dieser Größenordnung in etwa kosten würde.

Abstract

The present thesis delivers a general overview of what is possible and feasible with the current developments of wavefield synthesis. At first the notional basics, that form the basis of wavefield synthesis, will be elucidated. Then the advantages, which wavefield synthesis provides in comparison to traditional public address ideas, are indicated. The following chapter is about the limitations when the theory is realized and about the special requirements wavefield synthesis-suitable loudspeakers should fulfill. Furthermore, useful possibilities of application and already realized installations are presented briefly here. Subsequently, science research institutions and companies that deal with the development for new possibilities and products for wavefield synthesis are named. As wavefield synthesis contains also certain disadvantages, the next chapter introduces two new concepts through which those disadvantages can be compensated by using the advantages of stereophony. At last, a concept for planning a wavefield synthesis-system at the Opera Graz is presented. The major point hereby is to show what would be theoretically possible and useful. The paper concludes with a rough estimation of the costs the project would consume.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Theoretische Grundlagen der Wellenfeldsynthese	8
2.1 Das Huygens-Fresnel'sche Prinzip	8
2.2 Das Kirchhoff-Helmholtz-Integral	9
3. Neue Möglichkeiten der Wellenfeldsynthese im Vergleich zu herkömmlichen Beschallungskonzepten	11
4. Praktische Umsetzung der Wellenfeldsynthese	15
4.1 Grenzen der Theorie	15
4.2 Positionierung und Wahl der Lautsprecher	17
4.3 Anwendungsmöglichkeiten	22
4.3.1 Theater- und Opernaufführungen	22
4.3.2 Kino	22
4.3.3 Diskotheken	23
4.3.4 Präsentationen	23
4.3.5 Heimkinoanwendungen	23
4.4 Aktuelle Installationen	24
4.4.1 Bregenzer Seebühne	24
4.4.2 Linden Lichtspiele Ilmenau	25
4.4.3 Diskotheken	26
4.4.4 Konzertsäle	26
4.4.5 Sonstige Installationen	26
5. Marktanalyse	28
5.1 Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie	28
5.2 IOSONO-GmbH	29
5.3 Institut für Rundfunktechnik	30
5.4 sonicEmotion	30

5.5 Taucher Sound Environments	30
6. Kombination von Wellenfeldsynthese und Stereophonie	32
6.1 Virtual Panning Spot	32
6.2 Virtuelle Lautsprecher	33
7. Planung eines Wellenfeldsynthese-Systems für die Grazer Oper	35
7.1 Ausgangslage	35
7.2 Planungskonzept	36
7.3 Kostenprognose	40
8. Schlusswort	45
9. Literaturverzeichnis	46
10. Anhang	50
10.1 Anhang 1: BMZ-Plan der Oper Graz, EG	50
10.2 Anhang 2: E-Mail von d&b audiotechnik	51
10.3 Anhang 3: E-Mail der IOSONO-GmbH	52

1. Einleitung

Seitdem es Ende des 19. Jahrhunderts erstmals gelungen war, Schall auf einem Tonträger zu speichern und wiederzugeben, strebten die Entwickler stets danach, sowohl die jeweils gängigen Wiedergabe- als auch Aufnahmeverfahren zu verbessern. Das Monoformat, mit dem es „lediglich“ möglich war, Schall zu speichern und wiederzugeben, wurde ab Mitte des letzten Jahrhunderts sukzessive durch das Stereoverfahren ersetzt, da die Stereophonie es ermöglichte, Schallquellen auf einer horizontalen Linie zwischen zwei Lautsprechern zu verteilen. Dies ist auch bis heute noch das gängigste Wiedergabeverfahren. Die nächste Entwicklung zielte darauf ab, Schallquellen auch neben oder hinter dem Zuhörer zu verteilen. Hier erschienen mehrere Surround-Formate auf dem Markt, bei denen dann die 5.1-Lautsprecheranordnung standardisiert wurde. Mittels dieser Anordnung war es somit erstmals möglich, dem Zuhörer einen räumlichen Höreindruck zu bieten. Das Problem, das sich allerdings auch mit diesen Formaten nicht lösen ließ, bestand darin, dass es nur in einem bestimmten Punkt des Schallfeldes möglich war, einen räumlichen Höreindruck zu erfahren - im sogenannten Sweet Spot. Die Ursache liegt in der Tatsache, dass die Abbildung der Quellen durch Pegel- und Laufzeitunterschiede erfolgt, wodurch bestimmte psychoakustische Effekte entstehen, die das räumliche Hören ermöglichen.

Ende der 1980er Jahre fanden Forscher an der TU Delft in den Niederlanden eine Lösung für dieses Problem und nannten dieses neue Verfahren Wellenfeldsynthese (WFS). Die Idee, die diesem Verfahren zugrunde liegt, besteht darin, den Richtungseindruck nicht durch psychoakustische Effekte zu erzeugen, sondern die Wellenfront einer Schallquelle physikalisch nachzubilden, indem man viele, dicht nebeneinander liegende Lautsprechersignale überlagert. Erste theoretische Formulierungen eines solchen Verfahrens gab es bereits Anfang der 1970er Jahre, parallel zur Entwicklung von Ambisonics. Allerdings war es aufgrund der geringen Rechenleistung der damaligen PCs nicht möglich, die Schallfelder zu berechnen. Erst mit leistungsstärkeren CPUs wurde die WFS nach und nach realisierbar. Im Laufe der letzten 20 Jahre wurde die Idee des Verfahrens immer bekannter und so interessierten sich

immer mehr Forschungseinrichtungen für die WFS und entwickelten immer bessere Methoden, diese Idee in die Praxis umzusetzen. Da die WFS jedoch einen sehr hohen Materialaufwand mit sich bringt, sind Installationen noch immer nicht sehr verbreitet.

Im Folgenden soll die Idee der WFS nun näher beschrieben werden. Angefangen bei den theoretischen Grundlagen und den Vorteilen geht die Arbeit Schritt für Schritt immer weiter auf die praktische Realisierung ein. Am Ende werden anhand einer Planung eines WFS-Systems für die Grazer Oper noch gewisse Probleme beleuchtet, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden müssen.

2. Theoretische Grundlagen der Wellenfeldsynthese

2.1 Das Huygens-Fresnel'sche Prinzip

Von der theoretischen Seite her sind zwei Prinzipien notwendig, die dafür sorgen, dass WFS überhaupt realisiert werden kann. Das Erste ist das Huygens-Fresnel'sche Prinzip, welches die WFS von der physikalischen Seite her ermöglicht. Dieses Theorem besagt, dass jedes Schallfeld, das von einer Quelle erzeugt worden ist, als Überlagerung von unendlich vielen kugelförmigen Elementarwellen betrachtet werden kann. Durch Verwendung eines Lautsprecherarrays, bei dem jeder Lautsprecher eine Elementarwelle abstrahlt, ist es somit möglich, ein Schallfeld einer realen Quelle zu reproduzieren [1].

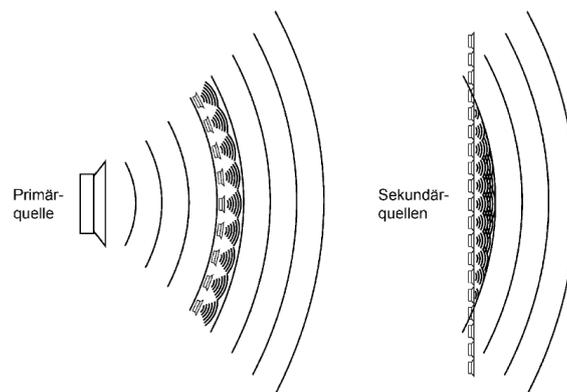


Abbildung 1: Huygens-Fresnel'sches Prinzip [2]

2.2 Das Kirchhoff-Helmholtz-Integral

Das zweite Prinzip, das die WFS von der mathematischen Seite her begründet, ist das Kirchhoff-Helmholtz-Integral. Es besagt, dass an jedem Punkt innerhalb eines geschlossenen Volumens der Schalldruck berechnet werden kann, sofern Schalldruck und -schnelle an jedem Punkt der Oberfläche bekannt sind. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 2.

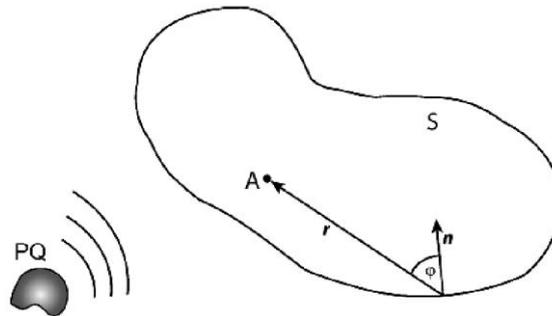


Abbildung 2: Kirchhoff-Helmholtz-Integral [2]

Punkt A bezeichnet hier den Hörerplatz, an dem das Schallfeld reproduziert werden soll, PQ die primäre Schallquelle und S die Oberfläche des Volumens. Der Schalldruck am Punkt A ist hier eindeutig durch Schalldruck und Schallschnelle auf der Oberfläche S definiert. Bei der WFS muss entlang der Oberfläche des Volumens schließlich ein Lautsprecherarray angeordnet werden, mit dem der gewünschte Schalldruck im Inneren erzeugt werden kann. Die Formel, mit der der Schalldruck berechnet werden kann, lautet folgendermaßen:

$$p_A = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[\left(p \frac{1 + jkr}{r} \cos\varphi \frac{e^{-jkr}}{r} \right) + \left(j\omega\rho_0 v_n \frac{e^{-jkr}}{r} \right) \right] dS$$

Diese Formel besagt, dass sich am Hörerplatz der Schalldruck p_a aus der Summe von Schalldruck an der Oberfläche, der sich dipolförmig ausbreitet, und der Schallschnelle, die sich monopolförmig ausbreitet, berechnen lässt. Der Term $\cos\varphi \frac{e^{-jkr}}{r}$ beschreibt hier den Dipolstrahler und der Term $\frac{e^{-jkr}}{r}$ den Monopolstrahler [2]. Da diese Formel ziemlich komplex ist, wird sie in der Regel vereinfacht. Die Vereinfachungen bestehen für gewöhnlich darin, dass man sich auf eine spezielle Oberflächenform konzentriert und nur Monopol- oder Dipolquellen verwendet, wobei normalerweise auf die Dipolquellen verzichtet wird. Die daraus

resultierenden Formeln werden dann als Rayleigh-Integrale¹ bezeichnet [3]. Beschränkt man sich auf die Schallfeldreproduktion mit Monopolquellen, folgt daraus gleichzeitig, dass Quellen lediglich in der Vertikalebene dargestellt werden und man auf die Horizontale verzichtet. Somit ist also nur eine linienförmige Lautsprecheranordnung, anstatt einer dreidimensionalen Anordnung, nötig. Die resultierende Gleichung, durch die sich das Schallfeld nun berechnen lässt, lautet dann:

$$p_A = \int_{-\infty}^{\infty} \left(Q_m(x, \omega) \frac{e^{-jk\Delta r}}{\Delta r} \right) dx$$

Q_m beschreibt hierbei das Signal, das die Lautsprecher antreibt [2].

¹ Benannt nach dem britischen Physiker und Nobelpreisträger 3. Baron Rayleigh (1842 - 1919)

3. Neue Möglichkeiten der Wellenfeldsynthese im Vergleich zu herkömmlichen Beschallungskonzepten

Da die WFS darauf ausgerichtet ist, das Schallfeld einer Schallquelle physikalisch nachzubilden, entstehen so eine Reihe neuer Anwendungsmöglichkeiten. Der wichtigste Punkt ist, dass sich die WFS so vom traditionellen Stereo-Sweet Spot löst und räumliches Hören in einem sehr viel größeren Bereich, der sogenannten Hörfläche ermöglicht, deren Größe praktisch nur durch die Anzahl der verwendeten Lautsprecher begrenzt ist. Der Zuhörer kann sich nun also frei im Raum bewegen, ohne dass der Richtungseindruck verloren geht [4]. Der räumliche Höreindruck wird somit einer sehr viel größeren Zuhöreranzahl ermöglicht, als bei der Stereophonie. Lediglich im Nahfeld der Lautsprecher kommt es zu Fehlern bei der Schallfeldsynthese [2].

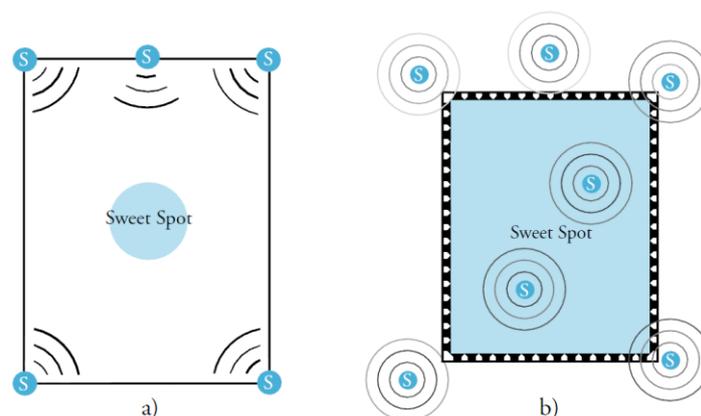


Abbildung 3: Vergleich von räumlich stark begrenztem Sweet Spot (a) und räumlich ausgedehnter Hörfläche (b) [5]

Außerdem kann man eine Schallquelle nicht nur (wie bei der Stereophonie) hinter oder neben den Lautsprechern positionieren, sondern ebenfalls davor. So ist es beispielsweise möglich, dem Zuhörer den Eindruck zu vermitteln, dass sich die Schallquelle direkt neben ihm

oder aber auch hinter ihm befindet. All diese Schallquellen, die stabil an einem beliebigen Punkt lokalisiert werden können, egal ob vor oder hinter den Lautsprechern, bezeichnet man als virtuelle Punktschallquellen. Charakteristisch für virtuelle Punktschallquellen ist, dass der Richtungseindruck abhängig vom Hörerplatz ist (Abbildung 5 illustriert diesen Effekt) [6]. Abhängig vom Rendering-System kann die Schallquelle auch im Raum umherwandern. Im Gegensatz zu virtuellen Punktschallquellen, ist es mit der WFS zudem möglich, ebene Wellen zu erzeugen, die dem Hörer den Eindruck einer unendlichen Entfernung vermitteln und deren Einfallswinkel für die gesamte Hörfläche derselbe ist [1].

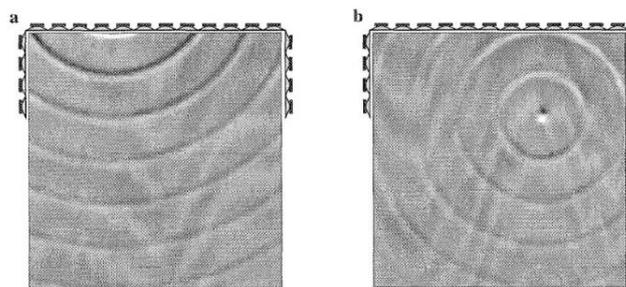


Abbildung 4: Wellenfronten virtueller Punktschallquellen, die hinter dem Array (a) und vor dem Array (b) positioniert sind [6]

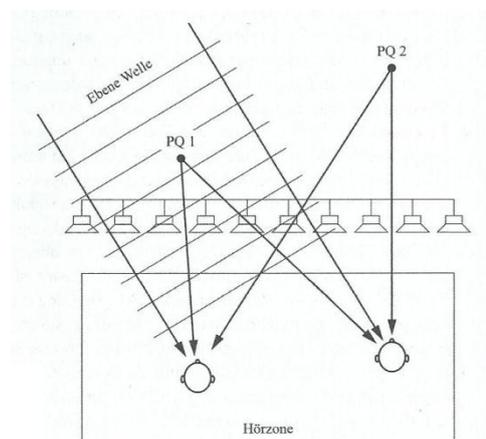


Abbildung 5: Richtungseindruck bei virtuellen Punktschallquellen und ebenen Wellen [1]

Speziell auf der aufnahmetechnischen Seite entstehen noch weitere interessante, neue Möglichkeiten. Nimmt man nämlich bei einer Aufnahme die Musiker über ein Mikrofonarray auf und ordnet man schließlich auf der Wiedergabeseite die Lautsprecher an denselben Positionen an, an denen bei der Aufnahme die Mikrofone standen, so ist es möglich, einen räum-

lichen Höreindruck zu erzeugen, bei dem jeder Musiker an der Stelle lokalisiert werden kann, an der er bei der Aufnahme gesessen ist. Darüber hinaus ist bei diesem Verfahren keinerlei Signalverarbeitung notwendig. Zu beachten ist lediglich, dass Mikrofon- und Lautsprecherpositionen übereinstimmen. Dieses Prinzip wird auch oft als „akustischer Vorhang“ bezeichnet [6].

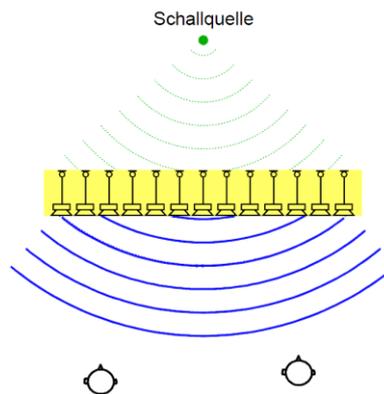


Abbildung 6: Prinzip des akustischen Vorhangs [5]

Ein weiteres Novum ist Folgendes: Eine Schallquelle kann in jedem beliebigen akustischen Raum positioniert werden. Dies geschieht dadurch, dass bei einer Aufnahme die Quelle sehr nah mikrofoniert wird, sodass lediglich der Direktschall aufgenommen wird. Dieser Direktschall muss dann bei der Wiedergabe mit der Raumimpulsantwort des Raumes, in dem die Quelle erklingen soll, gefaltet werden. Ob dieser Raum real oder fiktiv ist, spielt hier keine Rolle, da auch künstliche Impulsantworten verwendet werden können. Auf der Wiedergabe-seite hat dann die Schallquelle dieselben charakteristischen Klangfärbungen, als wäre sie wirklich in dem entsprechenden Raum aufgenommen worden. Dank der WFS bekommt der Zuhörer schließlich noch den Eindruck, als befände er sich wirklich in diesem Raum [1].

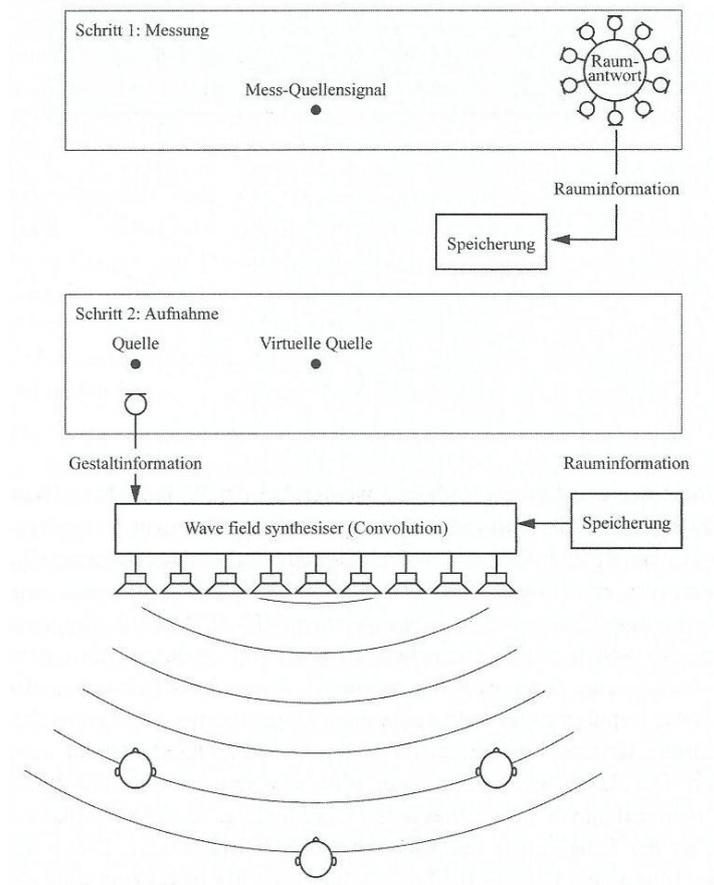


Abbildung 7: Prinzip der getrennten Übertragung von Direkt- und Diffusschall [1]

4. Praktische Umsetzung der Wellenfeldsynthese

4.1 Grenzen der Theorie

Versucht man nun die theoretischen Ideen der WFS in die Tat umzusetzen, so stößt man schnell auf die ersten Probleme. Um nach dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral den Schalldruck an einem bestimmten Punkt innerhalb des Volumens zu erzeugen, geht die Theorie von einem unendlich langen Array an der Oberfläche des Volumens aus, das aus einer kontinuierlichen Membran besteht. Selbstverständlich ist dies praktisch nicht möglich. Stattdessen müssen viele einzelne Lautsprecher verwendet werden, deren Membranen eine begrenzte Fläche besitzen und zwischen denen ein diskreter Abstand besteht. Das führt schon zu den ersten beiden Problemen. Wegen des Abstandes der einzelnen Membranen zueinander, ist es ab einer bestimmten Frequenz nicht mehr möglich, das Schallfeld korrekt nachzubilden. Es kommt zu spektralen Fehlern. Dieses Phänomen nennt man *Spatial Aliasing*. Dessen Grenzfrequenz lässt sich nach folgender Formel berechnen, wobei c der Schallgeschwindigkeit, Δx dem Lautsprechermembranabstand und α dem Einfallswinkel der ebenen Welle relativ zur Richtung des Lautsprecherarrays entspricht [7]:

$$f_g = \frac{c}{\Delta x(1 + |\cos\alpha|)}$$

In der Praxis wird auch häufig mit einer vereinfachten Form dieser Formel gerechnet, bei der der Einfallswinkel α stets mit 0° bzw. 180° angenommen wird. Diese Formel lautet [2]:

$$f_g = \frac{c}{2\Delta x}$$

Die folgende Abbildung 8 illustriert dieses Problem: Die Wellenfront der blauen Frequenz soll erzeugt werden. Allerdings ist es aufgrund des Lautsprecherabstandes maximal möglich, die Wellenfront der grauen Frequenz zu erzeugen. Der Abstand zwischen den Membranen entspricht also der halben Wellenlänge der Grenzfrequenz [5].

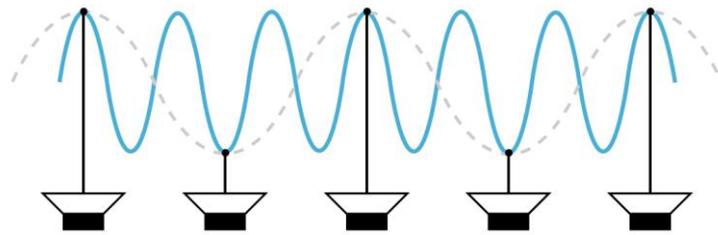


Abbildung 8: Entstehung von Spatial Aliasing [5]

Das zweite Problem, das bei der Realisierung des Kirchhoff-Helmholtz-Integrals entsteht, ist die sogenannte *Spatial Truncation*. Wie bereits erwähnt wurde, geht die Theorie von einem unendlich langen Lautsprecher-Array aus. Aufgrund der begrenzten Dimensionen des Arrays entstehen an den Rändern allerdings Beugungswellen, die Klangverfärbungen verursachen.

Des Weiteren impliziert die Theorie, dass die gesamte Wiedergabe im Freifeld stattfindet und so keine Raumreflexionen auftreten. In der Praxis entstehen jedoch immer Reflexionen, die das von der WFS erzeugte Schallfeld stören, sobald sie wieder in die Hörfläche gelangen, und so Fehler bei der Lokalisierbarkeit von Quellen verursachen. Hier spricht man von *Spatial Interference*.

Da es praktisch sehr aufwändig ist, das Kirchhoff-Helmholtz-Integral im dreidimensionalen Fall auszuführen – also rund um den Zuhörer herum, über und unter ihm Lautsprecher zu installieren – beschränkt man sich bei der WFS, wie oben schon ausgeführt, in der Praxis auf den zweidimensionalen Fall, wobei das Schallfeld lediglich in der Horizontalebene erzeugt wird. Das vereinfacht, wie oben gezeigt, auch die Formel, mit der die einzelnen Lautsprechersignale berechnet werden. Diese Vereinfachung ist auch deswegen sinnvoll, da die Lokalisationsschärfe des Gehörs in der Vertikalen bekanntlich nicht so gut ausgeprägt ist, wie in der Horizontalen. Daraus resultiert, dass eigentlich gar keine Kugel- oder ebene Wellenfront erzeugt werden kann (dies ist nur mit einem dreidimensionalen Array möglich), sondern lediglich eine zylinderförmige Wellenfront. Daher muss hier beachtet werden, dass eine Zylinderwelle bei einer Verdopplung der Entfernung, im Gegensatz zu einer ebenen Welle ohne Pegelabnahme, eine Pegelabnahme um 3 dB hat.

Besonders bei der Aufnahme von Schallquellen wird schnell klar, dass bei der WFS sehr große Übertragungskapazitäten und enormer Speicherplatz benötigt wird, was in der Realität zu großem Aufwand und hohen Kosten führt. Daher ist man in der Praxis bemüht, Signale möglichst verlustfrei zu komprimieren [1]. Wichtige Entwicklungen in diesem Bereich

wurden durch das CARROUSO-Projekt gefördert, das von 2001 bis 2003 von der EU unterstützt wurde. Dieses Projekt beinhaltete unter anderem die Aufnahme, Übertragung und Wiedergabe von Vielkanal-Audiomaterial nach dem MPEG4-Standard [8].

Ein weiterer problematischer Faktor entsteht, wenn man räumlich stark ausgedehnte Quellen übertragen möchte. Am einfachsten wird dieses Problem am Beispiel eines großen Chores deutlich. Um möglichst wenig Raumanteil aufnehmen zu können, wäre es ideal, jeden Sänger einzeln zu mikrofonieren, was zu gigantischen Datenmengen führen würde, die gespeichert und übertragen werden müssen. Auch um räumlich stark ausgedehnte Umgebungsgeräusche, wie beispielsweise Applaus, wiederzugeben, müsste theoretisch jedes Paar klatschende Hände einzeln aufgenommen werden. Bei der Wiedergabe entsteht schließlich das Problem, dieses Klatschen korrekt in der Hörfläche anzuordnen. Dies ist sehr aufwändig, wenn nicht gar unmöglich [1]. Daher wurden im Laufe der letzten Jahre einige Verfahren entwickelt, die die WFS mit der Stereophonie koppeln, da die Stereophonie bei der Übertragung räumlich ausgedehnter Quellen gewisse Stärken besitzt. Zwei dieser Verfahren werden im Kapitel 6 dieser Arbeit kurz beschrieben.

Zuletzt soll nicht unerwähnt bleiben, dass die WFS nicht abwärtskompatibel zu anderen Übertragungsformaten, wie der Stereophonie oder 5.1 Anwendungen ist. Dies schränkt die Verbreitung dieses Formats ebenfalls stark ein [6].

4.2 Positionierung und Wahl der Lautsprecher

Im vorigen Abschnitt wurde angesprochen, welche Probleme aufgrund des unweigerlich diskreten Abstandes zwischen den Lautsprechermembranen sowie den endlichen Abmessungen der Arrays entstehen. Allerdings wurde bisher noch nicht genauer erläutert, wie die Lautsprecher idealerweise angeordnet werden sollten. Dies soll nun nachgeholt werden.

Da sich die Praxis auf eine zweidimensionale Schallfeldreproduktion beschränkt, werden die Lautsprecher auf Kopfhöhe – wie es sich auch bei stereophonen Abhörsituationen bewährt hat – idealerweise um den Zuhörer herum angeordnet. Der Abstand der einzelnen Lautsprecher zueinander sollte dabei möglichst gering sein, damit die Grenzfrequenz, die

durch Spatial Aliasing entsteht, möglichst hoch gehalten werden kann [1]. Bei der Anordnung um den Zuhörer herum ist es am besten, wenn sich die Lautsprecher in einer kreisförmigen Anordnung befinden, da es in Lautsprecherecken Fehler bei der Schallfeldsynthese geben würde. Ein gewisser Abstand zum Zuhörer sollte ebenfalls eingehalten werden, da im Nahfeld der Lautsprecher Klangverfärbungen und Ungenauigkeiten bei der Schallfelderzeugung zustande kommen [2]. Es ist auch möglich, ein lineares Array vor dem Hörer zu platzieren, allerdings kann dann natürlich kein seitlicher oder rückwärtiger Schalleinfall simuliert werden [3]. Dies sind die wichtigsten Punkte, die bei der Anordnung der Lautsprecher beachtet werden sollten.



Abbildung 9: mögliche Lautsprecheranordnungen für die WFS, oben: lineares Array, unten: kreisförmiges Array, beides sind Forschungsinstallationen am IRT, München [6]

Da für die WFS sehr hohe Kanalzahlen auf sehr engem Raum benötigt werden, können auch schon bei kleineren Installationen hohe Kosten entstehen. Daher ist es sinnvoll, die Komponenten der Lautsprecher möglichst einfach und preiswert zu halten, was sich jedoch schnell negativ auf die Wiedergabequalität der Lautsprecher auswirken kann. Speziell wegen der

hohen Lautsprecherdichte, sollten Lautsprecher, die für die WFS eingesetzt werden, einige spezielle Anforderungen erfüllen, die nun noch erläutert werden.

Um eine möglichst hohe Grenzfrequenz zu erreichen, müssen die einzelnen Membranen möglichst eng beieinander liegen. Eine mögliche Lösung hierfür ist die Konzeption der Lautsprecher als Zwei-Wege-Lautsprecher und der Einbau von mehr Hochtöner als Mittel- und Tieftöner in ein Chassis, die dann enger nebeneinander liegen, um so die Grenzfrequenz zu erhöhen. Die Tieftöner können einen etwas größeren Abstand haben, da die von ihnen abgestrahlten Frequenzen ohne Probleme einen größeren Abstand erlauben, ohne Spatial Aliasing zu verursachen. Ein solches Konzept ist auch bei den Lautsprechern des linearen Arrays in Abbildung 9 verwirklicht. Um auch tiefe Frequenzen noch wiedergeben zu können, können konventionelle Subwoofer verwendet werden, da diese Frequenzen ohnehin vom menschlichen Ohr nicht mehr lokalisiert werden können.

Da die einzelnen Chassis eng nebeneinander liegen, sollten die einzelnen Lautsprecher eine hohe vertikale Bündelung aufweisen, um einem Übersprechen der einzelnen Kanäle entgegenzuwirken. Dies lässt sich ziemlich gut erreichen, indem mehrere Chassis, die denselben Frequenzbereich abstrahlen, übereinander angeordnet werden (Vgl. Abbildung 10). In die Horizontale dagegen sollten die Lautsprecher möglichst breit abstrahlen, was allein schon deshalb sinnvoll ist, dass auch verschieden große Personen gleichzeitig einen guten räumlichen Höreindruck genießen können. Die breite horizontale Abstrahlung lässt sich mit Hornlautsprechern recht gut erzielen.



Abbildung 10: Lautsprecherchassis mit vertikaler Bündelung [7]

Bei dem in Abbildung 10 dargestellten Lautsprecher wird die vertikale Bündelung zu den hohen Frequenzen hin sogar noch verbessert, indem nur einer der drei Hochtöner bis zu den höchsten Frequenzen hin abstrahlt und die anderen beiden Hochtöner ab einer geringeren Frequenz durch einen Tiefpassfilter bandbegrenzt sind [9].

Da aufgrund der meist einfach ausgeführten Lautsprecherchassis schnell Qualitätsverluste entstehen können, sollten die Lautsprecher durch bestimmte Filter entzerrt werden, um dennoch eine gute Klangqualität zu gewährleisten. Es hat sich bewährt, die Lautsprecher in drei Stufen nacheinander zu filtern.

Erstens muss zunächst der Freifeldfrequenzgang des Lautsprechers in einem schalltoten Raum ermittelt und anschließend linearisiert werden. Zweitens wirken nach dem Einbau im Raum Reflexionen von Wänden oder Einbauegegenständen störend auf den linearen Freifeldfrequenzgang, sodass diese herausgerechnet werden müssen. Drittens entstehen, speziell bei der WFS, durch das Rendering-System Verzerrungen für verschiedene Positionen einer virtuellen Punktschallquelle. Dies liegt daran, dass in der Treiberfunktion der einzelnen Lautsprecher ein frequenzabhängiger Teil enthalten ist. Der Sinn aller drei einzelnen Entzerrungen ist der, dass eine lineare Übertragungsfunktion von der Quelle zum Empfänger entsteht. Die Ermittlung der Filterfunktionen für die Freifeldentzerrung und die Eliminierung der Raumreflexionen muss zwar nacheinander erfolgen, allerdings kann nach den Messungen ein gemeinsames Filter für beide Fälle entworfen werden, das idealerweise als FIR-Filter entworfen wird. Der Vorteil von FIR-Filtern ist dabei der, dass Amplituden- und Phasenverlauf unabhängig voneinander beeinflusst werden können. Die Filterkoeffizienten können durch Messungen ermittelt werden. Um die durch die WFS entstehenden spezifischen Verzerrungen zu eliminieren, muss etwas mehr Aufwand betrieben werden. Hier müssen identische Punktschallquellen an mehreren verschiedenen Positionen im Raum positioniert werden. Für jede dieser Positionen werden dann die Frequenzgänge von mehreren Messpunkten aus gemessen. Diese Kurven werden gemittelt. Aus dieser gemittelten Kurve lässt sich abschließend eine Filterfunktion ableiten. Dieses Filter kann dann entweder als FIR-Filter in das schon bestehende Filter integriert werden oder als IIR-Filter entworfen werden. Generell ist bei der Linearisierung zu beachten, dass digitale Filter verwendet werden, da mit diesen, aufgrund der hohen Kanalzahlen, die Einstellungen leichter erfolgen können und dass sich die Latenzzeiten des Systems in einem vertretbaren Rahmen bewegen. Die Ermittlung der

Filterkoeffizienten kann dabei für jeden Lautsprecher individuell oder für mehrere zusammengefasst erfolgen [7].

Ein letzter Punkt, der in diesem Abschnitt noch angesprochen werden soll, ist der, dass ein Lautsprecherarray bei einzelnen Anwendungsmöglichkeiten optisch störend sein kann. Man denke beispielsweise daran, in einem Opernhaus ein Array zu installieren. Um die Lautsprecher optisch besser in eine Umgebung integrieren zu können, sei hier noch kurz die Idee der Flachlautsprecher erwähnt, bei der auf den optischen Aspekt sehr viel Wert gelegt wird. Flachlautsprecher besitzen sehr viele, kleine Wandler, die eng beieinander liegen, und so eine große Abstrahlfläche bilden, sodass auch tiefe Frequenzen in einer guten Qualität wiedergegeben werden können [10]. Die kleinen Abstände verhindern ebenso Partial-schwingungen und Beugungswellen an den Rändern, sodass der Lautsprecher einen glatten Frequenzgang aufweist. Aufgrund der Tatsache, dass mehrere Wandler auf einem Panel installiert sind, ist es einfacher, den Frequenzgang zu entzerren. Da Flachlautsprecher eine geringe Einbautiefe haben, können sie im Raum optisch einfacher integriert werden und wirken so weniger störend. Diese Technik ist zudem ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Installation von WFS-Systemen im Heimkinobereich. Wegen der geringen Tiefe können sie fest in die Wand eingebaut oder in Möbelstücke integriert werden [11]. Neue Entwicklungen gehen sogar so weit, dass der Flachlautsprecher auch als Bilderrahmen oder als Projektionsfläche verwendet werden kann, sodass er im Raum nicht mehr wahrgenommen wird [10].



Abbildung 11: Flachlautsprecher „ZsonicPanels“ der Firma sonicEmotion [10]

4.3 Anwendungsmöglichkeiten

Nachdem in den vorherigen beiden Abschnitten erläutert wurde, wo die Grenzen der Theorie liegen und was beim Aufbau einer WFS-Anlage zu beachten ist, werden in diesem Abschnitt nun einige Anwendungsgebiete vorgestellt, innerhalb derer die WFS großes Potential besitzt.

4.3.1 Theater- und Operaufführungen

In diesem Bereich ist die WFS sinnvoll, da der Zuhörer mit ihrer Hilfe die Sänger auf der Bühne nicht nur optisch, sondern auch akustisch orten kann. Bei großen Bühnen ist die Gefahr sehr groß, dass der Zuhörer schnell abgelenkt wird, wenn er die Stimme des Sängers aus einer anderen Richtung, als dessen tatsächlicher Position, wahrnimmt. Hier zeichnet sich die WFS dadurch aus, dass sie dafür sorgt, dass optischer und akustischer Richtungseindruck nicht divergieren. Auch während Positionsveränderungen der Sänger kann die Stimme mit dem Sänger mitwandern. Bei der Realisierung muss darauf geachtet werden, dass das Lautsprecherarray, welches theoretisch vor der Bühne positioniert werden muss, die Sicht nicht beschränken darf. Zudem erfordert die Realisierung leistungsfähige Recheneinheiten mit geringen Latenzzeiten, da eine Echtzeitberechnung erforderlich ist [12].

4.3.2 Kino

Herkömmlichen Mehrkanal-Kinoformaten gelingt es, trotz der teils sehr hohen Kanalzahlen, immer noch nicht, einen räumlichen Höreindruck auf allen Zuschauerplätzen zu erzeugen. Dialoge zwischen den Darstellern werden fast immer nur auf den Center-Kanal gelegt, da sonst die Sprachverständlichkeit auf vielen Plätzen beeinträchtigt würde. Die Surround-Kanäle werden dabei meist nur für Effekte verwendet. Hier wird sich die WFS wohl früher oder später durchsetzen. Man denke dabei vor allem an 3D-Filme, da hier der Schall mit den Bildern durch den Raum wandern kann. So könnte die WFS ebenso dazu beitragen, auch die Menschen, die sich aktuelle Filme normalerweise über das Internet herunterladen, wieder in

die Kinos zu locken. Auch die Installation der Lautsprecher ist, anders als in der Oper, nicht sehr problematisch, da sie einfach an der Wand angebracht werden können, ohne die Kinobesucher zu stören. Das vordere Array kann hinter der Leinwand entlanggeführt werden und beeinträchtigt somit nicht die Sicht. Allerdings muss beachtet werden, dass die Lautsprechersignale durch ein Filter entzerrt werden müssen, da die Installation hinter der Leinwand zu Klangverfärbungen führt [13].

4.3.3 Diskotheken

In diesem Bereich birgt die WFS das Potential, den Diskobesucher in das musikalische Geschehen besser einbinden zu können, was bisher vor allem dadurch geschieht, dass die Musik sehr laut und bassbetont wiedergegeben wird, damit die Musik „spürbar“ wird. Mit der WFS wird dem Besucher darüber hinaus ein Klangerlebnis angeboten, das er in dieser Form bis jetzt nur in sehr wenigen Clubs erfahren kann. Ein Problem bei der Installation ist allerdings, dass die Lautsprecher nicht auf Kopfhöhe montierbar sind, da sonst der Zutritt zur Tanzfläche behindert würde. Hier müssen die Lautsprecher in einer größeren Höhe angebracht werden, was unter Umständen zu Problemen bei der Schallquellenlokalisierung führen kann.

4.3.4 Präsentationen

Bei Produktpräsentationen oder auch bei Modeschauen werden WFS-Systeme hin und wieder eingesetzt, um dem Zuschauer einen qualitativ hochwertigen Höreindruck und eine beeindruckende Präsentation bieten zu können. Hier tritt das Problem auf, dass es sehr aufwändig ist, eine WFS-Anlage aufzubauen, da diese meist im Raum nicht fest installiert ist.

4.3.5 Heimkinoanwendungen

Schon seit Einführung des Fernsehers existiert der Trend, immer größere Geräte, die immer schärfere Bilder liefern, auf den Markt zu bringen. Diese Entwicklung hatte ihren letzten Hö-

hepunkt vor einigen Jahren, als HDTV eingeführt wurde. Der nächste Schritt zeichnet sich im Moment dahingehend ab, 3D-fähige Geräte in die Wohnzimmer zu bringen. Also wäre auch hier, wie im Kinobereich, eine Einführung der WFS erstrebenswert. Das Problem der Lautsprecheraufstellung kann recht gut mit Flachlautsprechern gelöst werden. Das weitaus größere Hindernis für eine Verbreitung sind die enormen Kosten, die bei der Anschaffung eines solchen Systems anfallen würden. Hier kann also erst ein neuer Markt erschlossen werden, wenn die Systeme preiswerter geworden sind.

4.4 Aktuelle Installationen

Im Moment sind WFS-Systeme noch nicht allzu häufig anzutreffen, was wohl vor allem an den hohen Kosten und dem mangelnden Bekanntheitsgrad dieser Technologie liegt. Die eine oder andere Installation gibt es in den oben genannten Anwendungsgebieten dennoch schon, von denen an dieser Stelle einige vorgestellt werden sollen.

4.4.1 Bregenzer Seebühne²

Eines der ersten und größten WFS-Systeme befindet sich auf der Bregenzer Seebühne des Festspielhauses Bregenz. Hier wurden um die Zuschauertribüne herum insgesamt ca. 800 Lautsprecher installiert, die die virtuellen Schallquellen im Zuschauerraum positionieren können, in dem bis zu 7000 Personen Platz haben. Hier wird die WFS in erster Linie dazu verwendet, den einzelnen Instrumenten des Orchesters den akustischen Platz zu geben, den sie auch optisch vor der Bühne hätten [12]. Der große Vorteil dieser Installation ist, dass sich die gesamte Anlage im Freien befindet, was eine Raumentzerrung nahezu überflüssig macht. Um die Sänger auf der Bühne lokalisieren zu können, wird allerdings nicht die WFS, sondern die Delta-Stereophonie verwendet. Bei der Delta-Stereophonie wird die Bühne in einzelne sogenannte Richtungsgebiete aufgeteilt. Um das Richtungsgebiet herum und im Richtungsgebiet selbst sind dann mehrere Lautsprecher aufgestellt, die nur den Schall aus dem eige-

² <http://www.bregenzerfestspiele.com/de/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

nen Richtungsgebiet wiedergeben [2]. Die Richtungswahrnehmung wird dadurch erreicht, dass der Schall von den einzelnen Lautsprechern unterschiedlich stark verzögert abgestrahlt wird, wobei der Lautsprecher, der dem Sänger am nächsten ist, als erstes angesteuert wird. Das Lautsprecherarray um die Zuschauertribüne herum wird außerdem für Spezialeffekte eingesetzt, um beispielsweise einzelne Instrumente durch das Publikum wandern zu lassen, oder um einen Donner hinter den Zuschauern zu realisieren [12]. Ein ähnliches System kommt auch bei den Seefestspielen Mörbisch³ am Neusiedler See zum Einsatz.

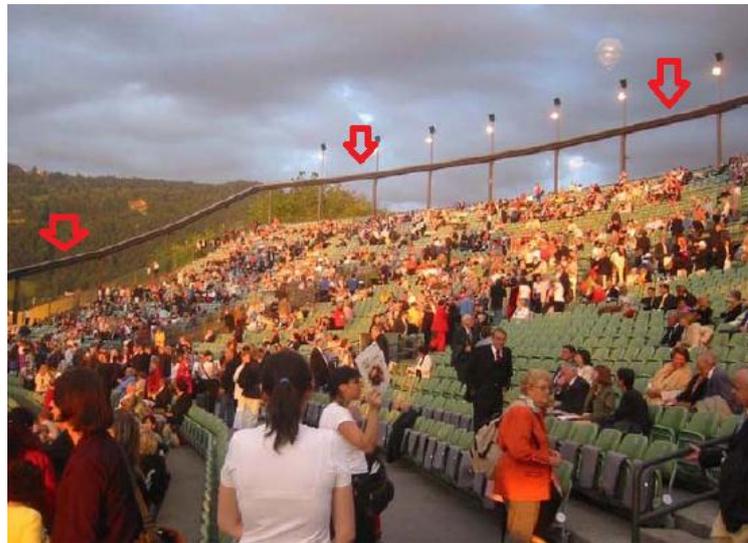


Abbildung 12: Seebühne des Bregenzer Festspielhauses; das Lautsprecherarray ist rot gekennzeichnet [14]

4.4.2 Linden Lichtspiele Ilmenau⁴

Eines der ersten kommerziellen Systeme überhaupt wurde 2003 im Ilmenauer Kino, den Linden Lichtspielen Ilmenau, eingebaut. An diesem wurde auch nach der Eröffnung noch nach Verbesserung geforscht. Das Kino bietet 89 Sitzplätze, die mit insgesamt 192 Lautsprechern beschallt werden [15].

³ <http://www.seefestspiele-moerbisch.at/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

⁴ http://www.kino-ilmenau.de/atcont_v3/exc/ [letzter Zugriff am 12.06.2012]

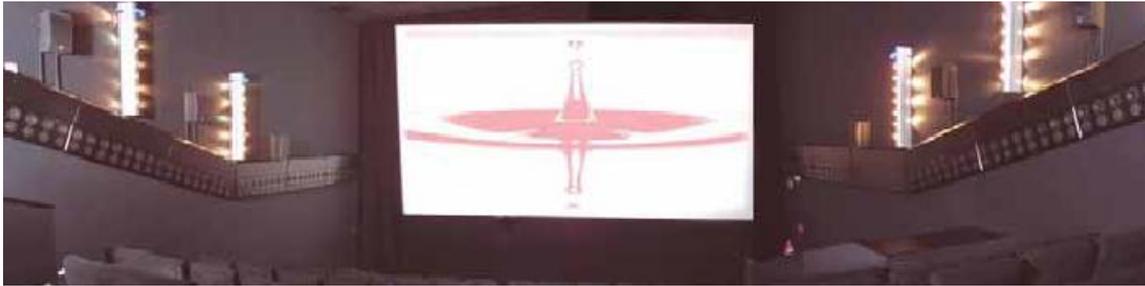


Abbildung 13: Kinosaal der Linden Lichtspiele Ilmenau [14]

4.4.3 Diskotheken

Vor wenigen Jahren haben zwei bekannte deutsche Diskotheken in ein WFS-System investiert, namentlich die Münchner Diskothek *P1*⁵ [16] und der Berliner Technoclub *Tresor*⁶. Die Betreiber hatten hier jeweils das Ziel, dem Besucher ein außergewöhnliches Klangerlebnis bieten zu können, das sie andernorts nicht finden. Bei diesen Systemen ist es sogar möglich, Licht- und Videosysteme mit der WFS-Anlage zu verbinden. Seit Anfang dieses Jahres kommt auch in der Stuttgarter Diskothek *Zapata*⁷ ein WFS-System zum Einsatz.

4.4.4 Konzertsäle

Bereits in mehreren Konzertsälen und Theaterhäusern wurden WFS-Systeme eingebaut. Exemplarisch seien hier das *Theatre du Chatelet* in Paris, der *Palais de Festival* in Cannes und im deutschsprachigem Raum ein Konzertsaal an der Hochschule für Musik in Detmold genannt.⁸

4.4.5 Sonstige Installationen

Ergänzend seien hier noch einige weitere Installationen angeführt, bei denen WFS zum Einsatz kommt. Im 4D Erlebniskino der *Bavaria Filmstadt* in München⁹ und im Planetarium Je-

⁵ <http://www.p1-club.de/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

⁶ <http://tresorberlin.com/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

⁷ <http://zapata.de/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

⁸ <http://www.sonicemotion.com/professional> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

⁹ <http://www.filmstadt.de/filmstadt-entdecken/4-d-erlebnis-kino.html> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

na¹⁰ ist ebenfalls eine WFS-Anlage zu finden. Premiere hatte WFS auf der letzten *Mercedes Benz Fashion Week*, wo sich sowohl Publikum als auch Veranstalter sehr beeindruckt von den neuen Möglichkeiten zeigte.¹¹ Das größte System weltweit ist derzeit in einem Hörsaal der TU Berlin zu finden, in dem insgesamt 644 Plätze mit einem 86m langen Array, aus insgesamt 832 Kanälen beschallt werden. Dieses System wird sowohl für Forschungszwecke als auch für die Beschallung verschiedenster Veranstaltungen verwendet [17].



Abbildung 14: Installation an der TU Berlin [17]

¹⁰ <http://www.planetarium-jena.de/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

¹¹ <http://www.iosono-sound.com/fashionweek> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

5. Marktanalyse

Nachdem im vorherigen Kapitel nun schon erläutert wurde, welche Anwendungsgebiete für die WFS prädestiniert sind und exemplarisch einige Installationen aufgezeigt wurden, ist bisher noch kein Name einer Forschungseinrichtung oder Firma gefallen, die WFS-Systeme vertreiben oder erforschen. Dies soll nun nachgeholt werden.

5.1 Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie¹²:

Die von deutscher Seite bekannteste Forschungseinrichtung ist das *Fraunhofer Institut für digitale Medientechnologie* (IDMT) mit Sitz im thüringischen Ilmenau. Das IDMT betreibt schon lange Forschung im Bereich der WFS und hat die Entwicklung maßgeblich beeinflusst. Aktuell sind zwei verschiedene Systeme auf dem Markt erhältlich, mit denen ein räumliches Schallfeld erzeugt werden kann. Das eine System ist das *Spatial Sound Wave*, welches auch in der Münchner Diskothek *P1* zum Einsatz kommt. Dieses System bietet bis zu 32 Eingangskanäle, die alle unabhängig voneinander als virtuelle Punktschallquellen in der Hörzone positioniert werden können. Ausgangsseitig benötigt das System mindestens acht Lautsprecher [16].

Die andere Entwicklung des IDMT ist das *Spatial Sound Stage*, welches für die richtungsgetreue Beschallung bei Theater-, Musical-, oder Opernaufführungen konzipiert ist. Allerdings beruht dieses System nicht auf den Ideen der WFS, sondern auf denen der Delta-Stereophonie. Dieses System kann als Standard- oder Premiumversion erworben werden und ist beispielsweise bei den Bregenzer Festspielen verantwortlich für die richtungsgetreue akustische Abbildung der Sänger. Das System bietet je nach Modell bis zu 64 Eingangskanäle. Die Bewegungsabläufe können hier manuell, vorprogrammiert oder, da die Anbindung eines

¹² <http://www.idmt.fraunhofer.de/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

Tracking-Systems möglich ist, automatisiert erfolgen. Zur Beschallung können sowohl beim *Spatial Sound Stage* als auch beim *Spatial Sound Wave* handelsübliche PA-Lautsprecher zum Einsatz kommen [18]/[19].

Das erste WFS-System, das vom IDMT entwickelt wurde, nennt sich *IOSONO* und wird von der vom IDMT gegründeten *IOSONO-GmbH*¹³ vermarktet.

5.2 IOSONO-GmbH:

Das wichtigste Produkt der *IOSONO-GmbH* ist das WFS-Rendering System namens *IPC 100*. Das *IPC 100* bietet 64 Eingangskanäle, die ausgangsseitig auf bis zu 128 Lautsprecher verteilt werden können. Der Anschluss der Lautsprecher und der Eingänge erfolgt über MADI-Verbindungen. Das Gerät kann entweder über ein integriertes Display oder über einen PC, mit dem es via Netzwerkkabel verbunden wird, bedient werden [20]. Die Software, über die das *IPC 100* über einen PC gesteuert werden kann, ist die *Spatial Audio Workstation* [21]. Die *IOSONO-GmbH* ist mit dem *IPC 100* unter anderem verantwortlich für die Installation des Audiosystems im Stuttgarter *Zapata* und für die Beschallung der *Mercedes Benz Fashion Week 2012*. Außerdem sorgt die *IOSONO-GmbH* für die Beschallung des deutschen Pavillons auf der Expo 2012, die im koreanischen Yeosu stattfindet.¹⁴ Eine weitere Entwicklung der *IOSONO-GmbH* ist ein Lautsprecherarray, das speziell für die WFS entwickelt wurde und unter anderem im oben erwähnten Ilmenauer Kino zum Einsatz kommt [13]. Des Weiteren wird viel Entwicklung im Bereich von Plug-Ins für räumliche Klangmischung betrieben. Die *IOSONO-GmbH* versucht auch schon seit längerem sich auf dem amerikanischen Markt zu etablieren. So wurde beispielsweise schon ein Kino in Hollywood von ihr mit einem WFS-tauglichen System ausgerüstet.¹⁵

¹³ <http://www.iosono-sound.com/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

¹⁴ <http://www.iosono-sound.com/world-expo-2012-with-iosono-3d-sound.html> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

¹⁵ <http://www.ziogiorgio.de/viewnews.php?id=4323> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

5.3 Institut für Rundfunktechnik¹⁶:

Eine weitere wichtige deutsche Forschungseinrichtung ist das *Institut für Rundfunktechnik* mit Sitz in München. Da viele große Rundfunkanstalten, wie ARD, ZDF und ORF, Gesellschafter dieses Institut sind, ist es in erster Linie darauf bedacht die Übertragungs- und Rundfunktechnik weiter zu entwickeln. Allerdings wird dort auch viel Wert auf Medientechnologien gelegt, weshalb auch die WFS erforscht wird. Ein Forschungsschwerpunkt diesbezüglich ist die Kombination von WFS und Stereophonie.

5.4 sonicEmotion¹⁷:

Eine weitere Firma, die in der Schweiz ansässig ist und sich vor allem auf dem französischen Markt einen Namen gemacht hat, ist *sonicEmotion*. Bei dieser Firma kommen bei der Entwicklung dreidimensionaler Wiedergabesysteme neben der WFS auch noch andere Ideen der dreidimensionalen Schallfeldreproduktion zum Einsatz. *sonicEmotion* hat unter anderem in dem oben genannten Konzertsaal der HfM Detmold und im Palais de Festival in Cannes ein Wiedergabesystem installiert. Außerdem ist sie an der Erforschung und Entwicklung von Flachlautsprechern beteiligt. Hier bietet *sonicEmotion* ein System namens *ZsonicPanels* an (siehe Abbildung 11).

5.5 Taucher Sound Environments¹⁸:

Diese Firma entwickelt keine neuen WFS-Systeme, sondern hat sich auf Klangumsetzung und akustischer Raumgestaltung mit bereits bestehenden Systemen spezialisiert. Um dies zu realisieren setzt *Taucher* verstärkt auf 3D-Audio und arbeitet in diesem Bereich eng mit der IO-

¹⁶ <http://www.irt.de/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

¹⁷ <http://www.sonicemotion.com/home> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

¹⁸ <http://www.taucher-sound.com/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

SONO-GmbH zusammen. *Taucher* war beispielsweise verantwortlich für die klangliche Gestaltung der *Mercedes Benz Fashion Week 2012*.

Dies sind die bekanntesten Forschungsinstitute und Firmen, die sich im deutschsprachigen Raum mit Entwicklung, Vertrieb und Umsetzung von WFS beschäftigen. Als wichtiges französisches Forschungsinstitut, das sich mit WFS befasst, soll das *IRCAM*¹⁹ nicht unerwähnt bleiben.

¹⁹ <http://www.ircam.fr/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

6. Kombination von Wellenfeldsynthese und Stereophonie

In Kapitel 4.1 wurden bereits die Probleme erläutert, die bei der praktischen Umsetzung der Wellenfeldsynthese entstehen. Einige dieser Probleme, wie beispielsweise das Spatial Aliasing, lassen sich durch technische Maßnahmen beheben. Bei der Übertragung räumlich stark ausgedehnter Quellen, wie beispielsweise eines Chores oder einer Kirchenorgel, würde man allerdings eine enorme Anzahl an Übertragungskanälen benötigen, wenn man der Theorie folgend jede Quelle einzeln mikrofoniert. Sollen derartig viele Quellen zusätzlich noch aufgenommen werden, benötigt man zudem enorm viel Speicherplatz. Deshalb sollen, wie schon erwähnt, in diesem Kapitel zwei Verfahren erläutert werden, die die WFS mit der Stereophonie kombinieren, um diese Schwächen der WFS mit Stärken der Stereophonie zu kompensieren.

6.1 Virtual Panning Spot

Die Idee der Virtual Panning Spots ist die, dass bei räumlich stark ausgedehnten Quellen der Direktschall nicht getrennt von der Raumimpulsantwort aufgenommen, sondern ein herkömmlicher stereophoner Mix erstellt wird, und die Quellen dann wiedergabeseitig mittels WFS im Raum positioniert werden. Dies reduziert die Anzahl der Übertragungskanäle und den Bedarf an Speicherplatz signifikant. Die Anzahl der verwendeten Mikrofone entspricht dabei der Anzahl der Virtual Panning Spots. Bei einer AB-Mikrofonierung verfügt man demnach über zwei Virtual Panning Spots. Das Problem der schlechten Lokalisation von Phantomschallquellen lässt sich dadurch verringern, dass die Anzahl der Virtual Panning Spots erhöht wird, also mehr Mikrofone verwendet werden. Vorteile dieses Verfahrens sind, dass durch die Verwendung altbekannter Mikrofonierungsverfahren der Aufwand verringert wird

und die Quellen mithilfe der WFS dennoch stabil im Raum, auch vor den Lautsprechern, positioniert werden können [1].

Abbildung 15 zeigt die Aufnahme eines Chores, der mit mehreren Stützmikrofonen zu einem stereophonen Klangbild zusammengemischt wird und dann durch die WFS im Raum positioniert wird. Bei dem Solisten dagegen wird nach den Prinzipien der WFS Direktschall und Raumimpulsantwort separat übertragen. Wiedergabeseitig wird er getrennt vom Chor im Raum positioniert.

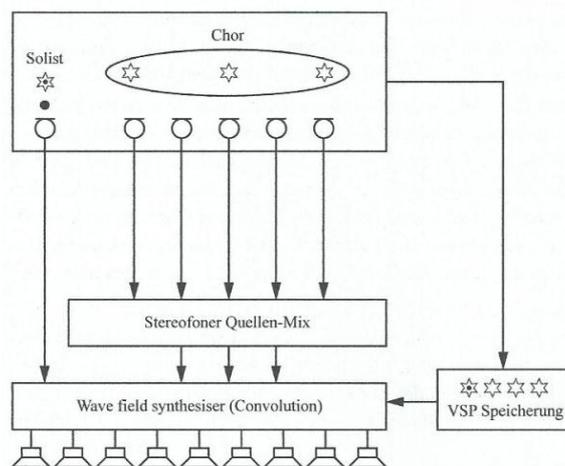


Abbildung 15: Prinzip der Virtual Panning Spots [1]

6.2 Virtuelle Lautsprecher

Eine spezielle Konfiguration von Virtual Panning Spots sind die sogenannten virtuellen Lautsprecher, durch die klassische Mehrkanalformate mithilfe der WFS simuliert werden können. Bei diesem Verfahren werden an bestimmten fixen Punkten virtuelle Punktschallquellen positioniert, die dann die Lautsprecher von klassischen Wiedergabeformaten simulieren. Die Quellsignale sind dabei keine WFS-Übertragungsformate, sondern herkömmliche Formate, wie beispielsweise beliebige 5.1-Konfigurationen. Durch Faltung der Signale mit verschiedenen Raumimpulsantworten ist es so ebenfalls möglich, jeden beliebigen Abhörraum nachzubilden, wenn die jeweilige Impulsantwort vorliegt. Durch Positionierung der virtuellen Lautsprecher vor oder hinter dem Array ist es auch möglich, die Größe des akustischen Raums zu verändern. Weitere Vorteile der virtuellen Lautsprecher sind, dass der Sweet Spot der klassi-

schen Übertragungsformate vergrößert wird und akustische Mängel des Wiedergaberaums elektronisch kompensiert werden können [1].

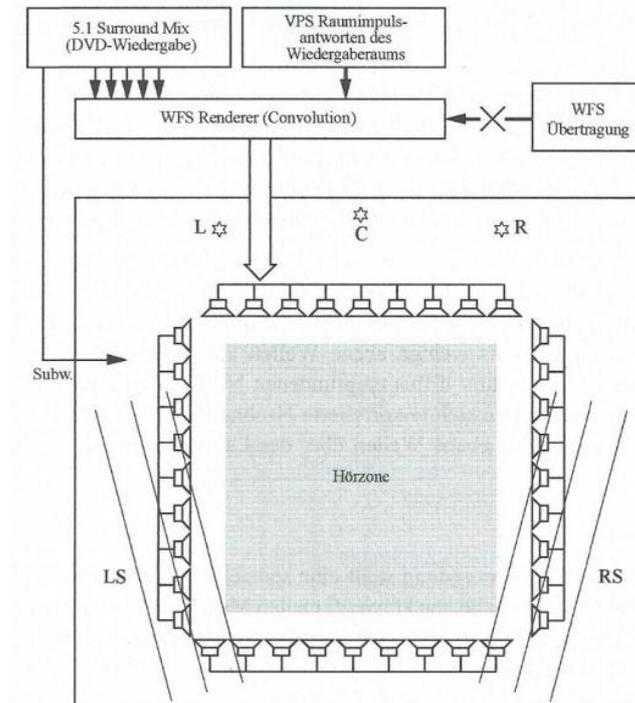


Abbildung 16: Prinzip der virtuellen Lautsprecher [1]

7. Planung eines Wellenfeldsynthese-systems für die Grazer Oper

In diesem Punkt soll ein Installationskonzept eines WFS-Systems für die Grazer Oper vorgelegt werden.

7.1 Ausgangslage

Alle technischen Daten wurden der Internetpräsenz der Grazer Oper entnommen.²⁰ Der Zuschauerraum der Grazer Oper bietet mitsamt Logen 1186 Sitzplätze und bis zu 200 Stehplätze. Die Grundfläche des Zuschauerraums beträgt 374 m² (siehe Anhang 1). Die Bühne hat eine Breite von zwölf Metern und eine Portalhöhe von neun Metern. Der Orchestergraben verfügt über drei fahrbare Orchesterpodien, die insgesamt eine Fläche von 88 m² einnehmen. Die Höhen der Orchesterpodien betragen typischerweise -180 cm, -215 cm und selten auch -145 cm. Für diesen Saal soll nun eine elektroakustische Optimierung vorgestellt werden, wobei WFS zum Einsatz kommen soll.



Abbildung 17: Zuschauersaal der Grazer Oper; links: Blick von der Bühne, rechts: Blick von der Galerie

²⁰ <http://www.oper-graz.com/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

Zunächst wird ein kurzer Blick auf die Probleme geworfen, die in der Planung berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der zahlreichen Logen, des Balkons und der Galerie ist es nicht möglich, ein Lautsprecherarray zu installieren, das den gesamten Zuhörerbereich umschließt. Es wäre maximal möglich eine geschlossene Anordnung um die Sitzplätze des Parketts herum zu installieren. Dies wäre allerdings sehr aufwändig, da eine sehr hohe Kanalzahl benötigt würde. Außerdem würde diese Lösung in dem barocken Saal optisch sehr stören. Daher beschränkt sich dieser Planungsvorschlag auf ein Lautsprecherarray vor der Bühne und somit auf eine richtungsgetreue Beschallung aus dieser Richtung. Des Weiteren ist es für eine Operaufführung normalerweise unüblich, dass sich die Darsteller im Zuschauerraum bewegen, oder dass es nötig ist, sonstige Quellen durch den Raum wandern zu lassen. Installiert man nun ein Array vor der Bühne, ist es nicht möglich, dies auf Kopfhöhe des Publikums zu platzieren, da sonst die Sicht beeinträchtigt würde. Hierfür muss eine Lösung gefunden werden. Ein weiterer Punkt, der bei der Planung berücksichtigt werden muss, ist der, dass für die Mikrofonierung des Orchesters eine fixe Installation wünschenswert wäre, da im Orchestergraben häufig Umbauten durchgeführt werden, bei denen die Mikrofone ständig neu positioniert werden müssten. Eine Mikrofonierung, die von der Decke über den Orchestergraben gehängt wird, wäre zwar theoretisch möglich, allerdings würden die herabhängenden Kabel und Seile die Sicht auf die Bühne enorm behindern und Schatten auf der Bühne verursachen. Zuletzt entstehen im Zuschauerraum ungewöhnliche akustische Effekte. So sind an bestimmten Plätzen gewisse Instrumente besonders deutlich zu hören und das übrige Orchester dagegen fast überhaupt nicht. Dafür ist wahrscheinlich die kuppelförmige Decke verantwortlich, durch die an gewissen Plätzen bestimmte Raummoden besonders verstärkt werden. Auch diese Effekte sollen, wenn möglich, mit einer neuen elektroakustischen Anlage unterdrückt werden.

7.2 Planungskonzept

Wie schon erläutert, beschränkt sich diese Planung auf eine lineare Lautsprecheranordnung vor der Bühne. Das Problem, dass die Sicht nicht behindert werden darf, kann dadurch gelöst

werden, dass die Lautsprecher entweder in die Bühnenkante eingebaut werden, wo sie nicht sichtbar wären, oder sie über dem Bühnenportal installiert werden. In der Bühnenkante sind bereits einige Lautsprecher versteckt montiert, die entweder verwendet werden oder durch gleichgroße neue ersetzt werden könnten.

Der Vorteil der Installation von Lautsprechern in der Bühnenkante ist der, dass die Richtung des erzeugten Schalls mit der des realen Schalls übereinstimmt und sie dort nicht zu sehen wären. Die Nachteile sind allerdings, dass die Musiker im Orchestergraben und die Zuschauer in den ersten Reihen durch das Array enormen Schalldruckpegeln ausgesetzt wären und die hinteren Plätze im Parterre sowie auf den Rängen nicht mit ausreichend Direktschall versorgt würden. Mikrofoniert man dann auch noch das Orchester im Graben, wird es sehr schwer, zwangsläufig entstehende Rückkopplungen zu unterdrücken.

Montiert man Lautsprecher über der Bühne, fällt das Problem der enormen Schalldruckpegel im Graben und in den ersten Reihen weg. Allerdings würden die Quellen so nicht mehr auf der Bühne, sondern darüber geortet. Das Array müsste also zeitlich verzögert werden, damit den Zuschauer zuerst der Direktschall von der Bühne erreicht, um ihm einen korrekten Richtungseindruck zu vermitteln. Das Problem von Rückkopplungen wäre bei einem Lautsprecherarray über der Bühne auch nicht allzu akut. Was allerdings aufwändiger wäre, ist die Montage der Lautsprecher und die optische Integration in den Saal.

Wie zu sehen ist, haben beide Varianten gewisse Vor- und Nachteile. Daher soll in diesem Konzept eine Kombination der beiden genannten Möglichkeiten vorgestellt werden.

In der Bühnenkante werden im Abstand von je 50 cm Lautsprecher montiert. Bei einer Portalbreite von zwölf Metern bedeutet dies also, dass 25 Lautsprecher in die Bühnenkante integriert werden. Bei einem Abstand von 50 cm liegt die Grenzfrequenz dann also bei 340 Hz. Das ist zwar nicht besonders hoch, aber da es in erster Linie darum geht, die Sänger und Instrumente aus einer bestimmten Richtung zu orten und nicht darum, Quellen durch den Raum wandern zu lassen, ist dieser Abstand völlig ausreichend. Dieser Abstand ist lediglich ein Vorschlag, bei Bedarf kann er auch erhöht werden. Allerdings sollte er nicht mehr als 1,50 m betragen, da sonst der Richtungseindruck verfälscht werden kann. Betrachtet man die Abmessungen von handelsüblichen Kleinlautsprechern, so wäre ein minimaler Lautsprecherabstand von etwa 20 cm möglich. Dies entspräche einer maximalen Grenzfrequenz von

etwa 850 Hz. Jedoch wären für hierfür 60 Lautsprecher nötig. Dieses Array würde dann die vorderen Reihen versorgen.

Damit die hinteren Reihen und die Ränge auch mit einem ausreichend richtungsgetreuen Schallfeld versorgt werden, wird über der Bühne ebenfalls ein Lautsprecherarray installiert, das allerdings zeitlich so verzögert werden muss, dass zuerst die Wellenfront der Lautsprecher in der Bühnenkante die Zuhörer erreicht, damit die Quelle nicht über der Bühne geortet wird. Hier ist ein größerer Lautsprecherabstand völlig ausreichend, da dieses Array lediglich der Unterstützung des unteren Arrays dient. Wählt man in der Bühnenkante beispielsweise einen Abstand von 50 cm, so sollte über der Bühne ein doppelter Abstand, also 1 m, völlig ausreichend sein. Man würde demnach 13 Lautsprecher benötigen.

Die Kombination der beiden Varianten sorgt dafür, dass die vorderen Zuschauerreihen und das Orchester keinen zu hohen Schalldruckpegeln ausgesetzt sind, aber dennoch im gesamten Saal ein ausreichender Richtungseindruck entsteht, sodass die Darsteller auf der Bühne auch akustisch verfolgt werden können.

Um gewisse räumliche Effekte dennoch realisieren zu können, können entweder die schon im Zuschauerraum vorhandenen Lautsprecher genutzt werden oder zusätzliche Lautsprecher an der Saalrückwand verteilt werden.

Nun zu dem Problem wie die Instrumente abgenommen werden sollen: Wie eingangs schon erwähnt, ist aufgrund der häufigen Umbauten im Orchester eine feste Installation wünschenswert. Von der Decke aus ist diese aufgrund der Sichtbeeinträchtigung allerdings nicht realisierbar. Eine andere Möglichkeit wäre, die Mikrofone in die Notenpulte zu integrieren. Das Problem an dieser Idee ist aber, dass viele Instrumente nicht nur nach vorne abstrahlen, sondern auch nach hinten. Außerdem würden die einzelnen Kanäle aufgrund des hohen Abstandes sehr stark übersprechen. Des Weiteren darf nicht vergessen werden, dass durch die Nähe zum Notenpult auch die Reflexionen, die dort entstehen, aufgenommen werden, was zu ungewollten Klangfärbungen führt, und das Geräusch beim Umblättern auch mit übertragen wird.

Eine weitere Option wäre, die Orchesterpodien auf das tiefste Niveau von -215 cm abzusenken und zwischen der Brüstung des Orchestergrabens und der Bühnenkante Seile zu spannen, an denen die Mikrofone montiert werden. Zusätzlich können an der Bühnenkante

Mikrofone angebracht werden, die in den Orchestergraben blicken, und somit den nach hinten abgestrahlten Schall der Instrumente einfangen.

Eine letzte Möglichkeit wäre, alle Instrumente einzeln mit kleinen Mikrofonen, die mittels eines Clips am Instrument befestigt werden, abzunehmen, was zwar zu sehr hohen Kanalzahlen führt, jedoch würde bei dieser Möglichkeit sehr wenig Diffusschall und fast ausschließlich Direktschall aufgenommen, was, wenn man der Theorie folgt, die beste Mikrofonierung wäre. Daher wird bei diesem Planungskonzept diese Möglichkeit bevorzugt.

Bei all diesen Vorschlägen darf man nicht vergessen, dass aufgrund der Nähe der Mikrofone zu den Lautsprechern in der Bühnenkante Rückkopplungen entstehen. Lassen sich diese durch einen Feedback Controller nicht unterdrücken, ohne dass die Klangfarbe darunter leidet, kann das Orchester nur über das obere Lautsprecherarray verstärkt werden. Der Richtungseindruck würde dabei nicht verfälscht, da das obere Array zeitlich verzögert ist, sodass erst der Direktschall aus dem Graben die Zuhörer erreicht.

Die Sänger auf der Bühne müssen dabei in jedem Fall entweder über Headset- oder Lavalier-Mikrofone abgenommen werden. Eine feste Installation an der Bühnenkante ist aufgrund der Bewegungen und des ständig variierenden Abstandes zwischen Sänger und Mikrofon nicht möglich. Darüber hinaus würden so ebenfalls sehr viele Umgebungsgeräusche, Trittschall und der Lärm bei Umbauten übertragen. Rückkopplungen wären sicherlich ebenfalls ein Problem, daher ist die einzig sinnvolle Möglichkeit, die Darsteller selbst direkt über Headset- oder Lavalier-Mikrofone zu mikrofonieren. Auch das ist, wenn man der Theorie folgt, die beste Möglichkeit, da so fast nur Direktschall übertragen wird.

Abschließend muss noch auf das Problem der ungewöhnlichen akustischen Effekte eingegangen werden. Diese Effekte treten, wie oben schon erwähnt wohl deswegen auf, da aufgrund der kuppelförmigen Decke spezielle Schallreflexionen entstehen, die bestimmte Raummoden besonders hervorheben. Daher wäre es wünschenswert, wenn diese Raummoden mittels einer neuen elektroakustischen Anlage bedämpft werden könnten, damit ein gleichmäßigeres Schallfeld im Raum entsteht.

Dies wäre auf elektronischem Wege am einfachsten zu bewerkstelligen, indem man die Nachhallzeit des Saales künstlich verlängert. Dafür ist es nötig, die Quellsignale mit einer künstlichen Raumimpulsantwort zu falten, deren Nachhallzeit länger als die des Saales ist,

damit die Raummoden zeitlich verdeckt werden. Die genaue Gestalt der Raumimpulsantwort und die optimale Nachhallzeitdauer hierfür müssten in Versuchen ermittelt werden.

Es wäre ebenso denkbar, mehrere Mikrofone im Saal zu verteilen, die den Diffusschall einfangen. Diese Signale werden dann ebenfalls mit einer künstlichen Impulsantwort gefaltet und danach wieder über die Lautsprecher, die optisch schon sehr gut in die Saaldecke integriert sind, in den Raum geschickt, da sich von dort aus das Schallfeld optimal im Saal verteilen kann.

Auf dieselbe Art wie diese Lautsprecher versteckt sind, könnte versucht werden, die Lautsprecher über dem Bühnenportal zu kaschieren.

7.3 Kostenprognose

Das wichtigste Element dieser Installation ist die Recheneinheit, die alle Signale, die zu den Lautsprechern geführt werden, berechnet und gegebenenfalls mit einer individuellen Raumimpulsantwort faltet. Hier wird das *IPC 100* der *IOSONO-GmbH* vorgeschlagen. Die technischen Details dieses Prozessors wurden oben bereits erläutert. Dieses Gerät hat einen Preis von 30 000 €. Die Software, mit der das Gerät über einen PC gesteuert werden kann, die sogenannte *Spatial Audio Workstation*, kostet ca. 300 € zusätzlich. Das ist der Kern der WFS-Installation, der zur Berechnung und Steuerung erforderlich ist.

Nun zum Preis der Lautsprecher. Da bei der derzeitigen elektroakustischen Anlage der Oper fast ausschließlich Lautsprecher der Firma *d&b audiotechnik* zum Einsatz kommen, bietet sich für die beiden Arrays in der Bühnenkante und über dem Bühnenportal das Modell *E6* der E-Serie von *d&b audiotechnik* an. Dieses Modell hat eine RMS-Leistung von 150 W an 20 Ω , einen maximalen Schalldruckpegel von 120 dB SPL und einen Frequenzgang, der von 85 Hz bis 20 kHz reicht. Außerdem wird der Schall mit einer Bündelung von ca. 100° x 55° abgestrahlt, wodurch das Übersprechen der einzelnen Kanäle nebeneinander genügend eingeschränkt werden kann.²¹ Man kann auch ein kleineres Modell, wie beispielsweise das Modell *E5* der E-Serie verwenden, insbesondere dann, wenn aufgrund von Platzmangel nur der

²¹ <http://www.dbaudio.com/de/systems/black-range/e-series/e6/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

Einbau eines kleineren Modells möglich ist. Dabei entsteht jedoch sehr schnell die Gefahr, die Lautsprecher zu übersteuern. Um dies auf jeden Fall zu verhindern, wird in diesem Planungskonzept ein Lautsprechermodell mit etwas höherer Leistung und einem höheren Schalldruckpegel verwendet. Werden die Lautsprecher, wie vorgeschlagen, in einem Abstand von 50 cm in der Bühnenkante und einem Abstand von 1 m über der Bühne montiert, so sind für das untere Array insgesamt 25 und für das obere Array 13 Lautsprecher, also insgesamt 38 Lautsprecher nötig. Damit bei beiden Arrays dasselbe Modell zum Einsatz kommt, wäre es besser die vorhandenen Lautsprecher in der Bühnenkante durch neue zu ersetzen. Der Preis der Lautsprecher würde sich mit diesem Modell bei einem Stückpreis von 1 340 € netto (siehe Anhang 2), also etwa 1 608 € brutto, auf 61 104 € belaufen. Natürlich kann auch ein preiswerteres Modell verwendet werden, allerdings kann dadurch schnell die Klangqualität leiden. Ein adäquater Ersatz wird später vorgestellt. Zur Wiedergabe der tiefen Frequenzen können die schon vorhandenen Subwoofer benutzt werden. Diese können einfach links und rechts der Bühne angeordnet werden, da das menschliche Ohr tiefe Frequenzen ohnehin nur schlecht orten kann.

Da passive Lautsprecher verwendet werden, ist pro Kanal ein separater Verstärker notwendig. Verwendet man die *E6*-Lautsprecher von *d&b audiotechnik*, ist es sinnvoll, die Lautsprecher auch mit Verstärkern des Modells *D6* dieser Firma anzusteuern. Diese Endstufe ist digital ausgeführt und bietet einen digitalen Signalprozessor. Die Ausgangsleistung beträgt $2 \times 350 \text{ W}$ an 8Ω .²² Der Preis pro Endstufe liegt hier bei 2970 € netto (siehe Anhang 2), also ca. 3 564 € brutto pro Stück. Bei 38 Lautsprechern, die angesteuert werden müssen, werden also 19 Verstärker benötigt, was einen Preis von 67 716 € für die Endstufen ausmacht. Kann man aber auf den digitalen Signalprozessor verzichten und verwendet herkömmliche, analoge Verstärker, müssen 200 bis 500 € pro Verstärker investiert werden.²³ Sofern für die Lautsprecher in der Decke keine Verstärker mehr vorhanden sind, werden für diese ebenfalls weitere Verstärker benötigt. Hier sollten herkömmliche analoge Verstärker völlig ausreichend sein, natürlich können aber auch digitale verwendet werden. Da keine technischen Angaben dieser Lautsprecher vorlagen, wird hier davon ausgegangen, dass eine Endstufe mit 150 W an 4Ω pro Kanal genügt. Als mögliche Wahl wird hier von der Firma

²² <http://www.dbaudio.com/de/systems/black-range/amplifiers/d6/> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

²³ http://www.thomann.de/at/verstaerker_endstufen.html [letzter Zugriff am 12.06.2012]

Samson das Modell *Servo 300* angeführt, das knapp 200 € pro Stück kostet.²⁴ Bei insgesamt 44 Lautsprechern bedeutet dies also 22 Endstufen dieser Marke, was einem Gesamtpreis von 4400 € ergibt. Hier wäre allerdings auch zu überlegen, ob es nötig ist, alle Lautsprecher in der Decke einzeln anzusteuern, oder ob es nicht ausreichend wäre, je zwei Lautsprecher mit demselben Signal anzusteuern, was die Anzahl verringern würde.

Nun noch zu den Mikrofonen. Für die Sänger müssen keine neuen Mikrofone angeschafft werden. Dafür sollte die vorhandene 32 Kanal Mikroportanlage der Firma *Sennheiser* ausreichend sein. Bei den Mikrofonen für das Orchester kommt es darauf an, welches Konzept realisierbar ist. Sofern das Orchester über Seile, die von Brüstung zu Bühnenkante gespannt werden, mikrofoniert werden kann, wenn die Orchesterpodien auf die niedrigste Stellung gefahren werden, sollten die vorhandenen Kondensatormikrofone genügen. Realisiert man allerdings die Variante, nach der jedes Instrument einzeln über Clipmikrofone abgenommen wird, benötigt man zudem neue Clipmikrofone. Hier gibt es von der Firma *Sennheiser* bereits sehr gute, preiswerte Modelle für verschiedene Instrumente ab 250 € pro Stück.²⁵ Je nach Größe des Ensembles wird dann eine Menge von 50 Clipmikrofonen notwendig sein, was eine Investition von etwa 12 500 € bedeutet. Instrumente, die nicht oft verstellt werden, können über die im Inventar schon vorhandenen Kondensatormikrofone abgenommen werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass schnell hohe Kanalzahlen entstehen können. Das *IPC 100* hat maximal 64 Eingangskanäle. Sollte diese Anzahl nicht ausreichen, wäre die Anschaffung eines zweiten Prozessors notwendig, wobei dann beide miteinander verbunden werden können.

Ein neues Mischpult muss nicht angeschafft werden, da die in der Oper vorhandene Konsole der Firma *DiGiCo* völlig genügt.

Nicht zu vergessen ist, dass für die notwendigen Kabel und die Montage der Lautsprecher noch gewisse Kosten entstehen, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Aufgebaut und eingemessen ist das System in der Regel in etwa vier Tagen. Nach einer persönlichen Anfrage an die *IOSONO-GmbH* dauert die Montage eines solchen Systems ca. drei Tage. Für die Konfiguration des Systems wird ein weiterer Tag benötigt (siehe Anhang 3). Hier entstehen natürlich zusätzliche Kosten für das Personal.

²⁴ http://www.thomann.de/at/samson_servo_300.htm [letzter Zugriff am 12.06.2012]

²⁵ <http://www.thomann.de/at/instrumentenmikrofone.html> [letzter Zugriff am 12.06.2012]

Rechnet man nun all diese Posten zusammen, ergibt sich folgende Endsumme:

Stück	Produkt	Preis pro Stück / €	Gesamtpreis / €
1	IPC 100	30 000	30 000
1	Spatial Audio Workstation	300	300
38	d&b E6 Lautsprecher	1 608	61 104
19	d&b D6 Endstufe	3 564	67 716
22	Samson Servo 300 Verstärker	200	4 400
50	Clipmikrofone	250	12 500
			Σ 176 020

Unter Berücksichtigung der Kosten für Kabel, Montage und Einrichtung, belaufen sich die Kosten für die Anschaffung eines solchen Systems für die Grazer Oper schließlich auf ungefähr **200 000 €**.

Anstatt der Verstärker und Lautsprecher von *d&b audiotechnik* können auch preiswertere Produkte verwendet werden, wodurch sich die Kosten drastisch reduzieren. Eine qualitativ hochwertige Alternative zu den *E6* Lautsprechern sind die *Versio VL 6i* der Firma *KME*, die einen Stückpreis von 360 € haben. Die technischen Daten sind mit denen der *E6*-Lautsprecher vergleichbar. Dieses Modell hat eine Belastbarkeit von 200 W RMS an 8 Ω und liefert einen Frequenzgang von 80 Hz bis 19kHz. Lediglich die Schallbündelung mit 85° x 55° ist nicht so gut wie bei den *E6*.²⁶ Passende Verstärker wären dabei die *XLS 1000* der Firma *Crown* die eine Leistung von 2 x 215 W an 8 Ω liefern. Hier liegt der Stückpreis bei 375 €.²⁷ Verwendet man bei der Kalkulation diese Produkte, ergibt sich dann diese Endsumme:

²⁶ http://www.thomann.de/at/kme_versio_vl_6i.htm [letzter Zugriff am 12.06.2012]

²⁷ http://www.thomann.de/at/crown_xls_1000.htm [letzter Zugriff am 12.06.2012]

Stück	Produkt	Preis pro Stück / €	Gesamtpreis / €
1	IPC 100	30 000	30 000
1	Spatial Audio Workstation	300	300
38	KME Versio VL 6i	360	13 680
19	Crown XLS 1000	375	7 125
22	Samson Servo 300 Verstärker	200	4 400
50	Clipmikrofone	250	12 500
			Σ 68 005

Mit Kabeln, Montage und Systemeinrichtung kann man für die Installation in der Grazer Oper dann mit einem Preis von etwa **80 000 €** rechnen.

8. Schlusswort

Zusammenfassend kann man sagen, dass die WFS aufgrund des physikalischen Ansatzes der Schallfeldreproduktion viele neue Möglichkeiten bietet, die aber auch mit zahlreichen Einschränkungen verbunden sind. Das größte Problem bei dem Entwurf eines WFS-Systems ist die hohe Anzahl an Lautsprechern, die alle einzeln angesteuert werden müssen, wodurch sowohl ein hoher Kostenfaktor entsteht, als auch in kleineren räumlichen Gegebenheiten sehr schnell ein Platzproblem entstehen kann. Im Moment sind erst wenige Umsetzungen von WFS zu finden, was einerseits auf die hohen Kosten einer solchen Installation zurückzuführen ist, andererseits daran liegt, dass das Verfahren selbst keine allzu große Bekanntheit in der breiten Öffentlichkeit besitzt, sondern in erster Linie nur in Expertenrunden zum Gesprächsthema wird. Die derzeitigen Realisationen erfahren dabei durchwegs positive Resonanz. Angesprochene Einschränkungen der Theorie in der Praxis lassen sich dabei durch geeignete Maßnahmen sehr gut kompensieren.

In der WFS liegt zweifelsfrei ein großes Potential und es wird spannend sein zu beobachten, welche neuen Entwicklungen in den nächsten Jahren diesbezüglich entstehen. Dort ist man bestimmt noch lange nicht am Ende angelangt. Allerdings werden sich solche Systeme erst dann auf einem größeren Markt durchsetzen können, wenn sie deutlich preiswerter geworden sind. Dies wird wohl auch erst dann geschehen, wenn sich mehrere Firmen an der Weiterentwicklung beteiligen, da im Moment nahezu ein Monopol auf diesem Markt herrscht.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Dickreiter, Michael u.a.: Handbuch der Tonstudiotechnik, 7. Auflage, K. G. Saur Verlag, München 2008.

- [2] Weinzierl, Stefan (Hrsg.), u. a.: Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag, Berlin 2008.

- [3] Strauß, Michael: Simulation und Implementation eines Audio Interface in Wellenfeldsynthese, Diplomarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, Graz 2002.
http://iem.kug.ac.at/fileadmin/media/iem/altdaten/projekte/acoustics/awt/strauss/dp_strauss.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]

- [4] Friesecke, Andreas: Die Audio-Enzyklopädie – Ein Nachschlagewerk für Tontechniker, K. G. Saur Verlag, München 2007.

- [5] Ion, Alexandra: Klangfeldsynthese – Betrachtung der Klangfeldsynthese anhand des IOSONO Systems, Bachelorarbeit, Fachhochschule Hagenberg 2009.
<http://alexandraion.com/download/Klangfeldsynthese.pdf>
[letzter Zugriff am 12.06.2012]

- [6] Theile, Günther u.a.: Wellenfeldsynthese-Verfahren: Ein Weg für neue Möglichkeiten der räumlichen Tongestaltung.
http://hauptmikrofon.de/theile/TMT_WFS_TheileWittekReisinger.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]

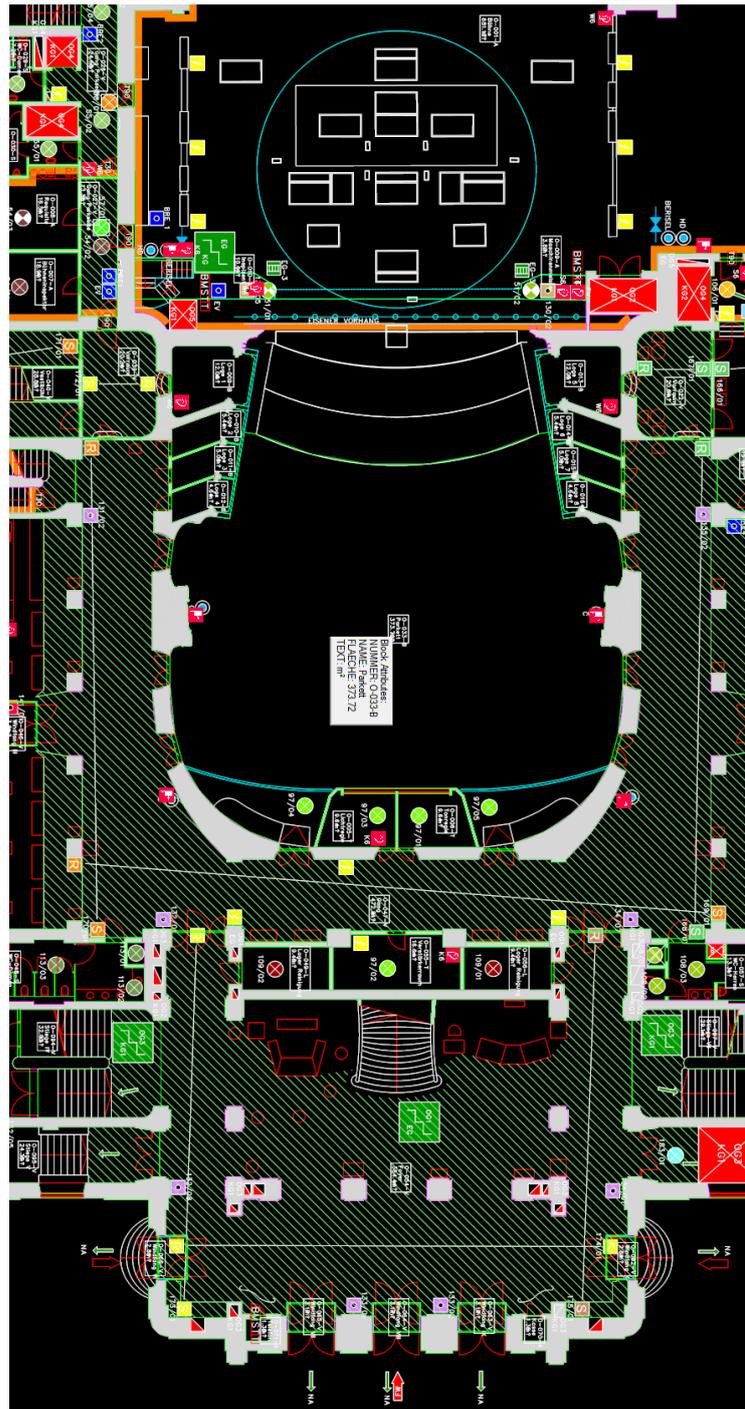
- [7] Goertz, Anselm u.a.: Zur Entzerrung von LautsprecherSignalen für die Wellenfeldsynthese, Paper zur 25. Tonmeistertagung, Leipzig 2008.
<http://www.ifaa-akustik.de/files/TMT-2008-Goertz-Makarski-Weinzierl-Moldrzyk.pdf>
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [8] Rabenstein, R. u.a.: Raumklangwiedergabe und der MPEG-4 Standard: Das CARROUSO-Projekt, Paper zur 22. Tonmeistertagung, Hannover 2002.
http://www.buchner-net.com/Int2002_23.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [9] Goertz, Anselm u.a.: Entwicklung eines achtkanaligen Lautsprechermoduls für die Wellenfeldsynthese, Paper zur DAGA 2007, Stuttgart.
www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/2007/Goertz_2007_Entwicklung_eines_achtkanaligen_Lautsprechermoduls.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [10] Wittek, Helmut: Wellenfeldsynthese – Bericht zum Workshop „Wellenfeldsynthese“ im „Forum Neues Musiktheater“ der Staatsoper Stuttgart, Artikel für das VDT-Magazin Juni 2004.
http://hauptmikrofon.de/HW/VDT-Magazin_WFS_Stuttgart.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [11] Fraunhofer Flachlautsprecher – Kraftvoller Klang und schlankes Design, Produktwerbung des IDMT.
http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Produktflyer/Flachlautsprecher/broschuere_flachlautsprecher.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]

- [12] Hoffmann, Eckhard: Bregenz Open Acoustics – neue Wege der akustischen Raumsimulation, Auszug aus der Deutschen Optiker Zeitung 9-2005.
www.htw-aalen.de/dynamic/img/content/studium/a/publikationen/doz/2005/09_05_bregenz.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [13] IOSONO, Werbung vom IDMT für IOSONO.
http://www.newsropa.de/uploads/tx_userpressemappe/IOSONO_Mappe.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [14] Klang im Raum – Die Entwicklung Wellenfeldsynthese, Vorlesungsunterlagen der Hochschule der Medien Stuttgart.
<http://www.hdm-stuttgart.de/~curdt/wfs.pdf>
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [15] IOSONO – Ein revolutionäres Soundsystem für den perfekten Hörgenuss, Produktwerbung des IDMT.
http://www.newsropa.de/uploads/tx_userpressemappe/IOSONO_deutsch.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [16] Spatial Sound Wave – Das kompakte System für räumliche Klangerlebnisse.
http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Produktflyer/SpatialSound%20Wave/spatial_sound_wave_de.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [17] Moldrzyk, Christoph u.a.: Wellenfeldsynthese für einen großen Hörsaal, Paper zur DAGA 2007, Stuttgart.
www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/2007/Moldrzyk_2007_Wellenfeldsynthese_fuer_einen_grossen_Hoersaal.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]

- [18] Fraunhofer Spatial Sound Stage – Richtungsgenaue Beschallung für Live-Events, Produktwerbung des IDMT.
http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Produktflyer/SpatialSound%20Stage/spatialsound_stage.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [19] Fraunhofer Spatial Sound Stage Premium, Produktwerbung des IDMT.
http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Produktflyer/SpatialSound%20Stage/spatialsound_stage_premium.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [20] Spatial Audio Processor – IPC 100, Produktwerbung von IOSONO.
http://www.iosono-sound.com/assets/files/IOSONO_IPC100_brochure.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]
- [21] Spatial Audio Workstation für kooperative Medienproduktion, Produktwerbung von IOSONO.
http://www2.idmt.fraunhofer.de/de/presse_medien/download/produktinformation/coop_saw_de.pdf
[letzter Zugriff am 12.06.2012]

10. Anhang

10.1 Anhang 1: BMZ-Plan der Oper Graz, EG



10.2 Anhang 2: E-Mail von d&b audiotechnik

Sehr geehrter Herr Ludwig,

vielen Dank für Ihre Anfrage und Ihr Interesse an unseren Produkten.

Die E6 in EP5 oder NL4 Version hat einen Listenpreis von EUR 1.340 netto. Die WR-Version (Wheater resistant) liegt bei EUR 1.745.

Eine D6 kostet Liste 2.970,- und die D12 4.860,- .

Für ein entsprechendes Angebot bitte ich Sie mit unserem Sales-Partner, der Firma Klangfarbe in Wien, Kontakt aufzunehmen.

Bitte sprechen Sie dort mit Herrn Martin Plötzener: +43 1 545 17 17 - 100; proaudio@klangfarbe.com

Sollten Sie noch Fragen haben oder wir Ihnen in irgendeiner Form behilflich sein können scheuen Sie bitte nicht mich zu kontaktieren.

Mit freundlichen Grüßen

Markus Hammerschmid

-

Markus Hammerschmid, Sales Support Specialist Central Europe

T +49-7191-9669-253, M +49-160-8493709,

M in Österreich +43-676-3453636

markus.hammerschmid@dbaudio.com, www.dbaudio.com

d&b audiotechnik GmbH, Eugen-Adolff-Str. 134, 71522 Backnang, Germany

Geschäftsführer: Frank Bothe, Markus Strohmeier

Finanzen: Kay Lange; Marketing: Simon Johnston

Sitz: Backnang; Amtsgericht - Registergericht - Stuttgart, HRB 725789

10.3 Anhang 3: E-Mail der IOSONO-GmbH

Hallo Herr Ludwig,

bitte entschuldigen Sie die sehr lange Antwortzeit. Ihre Anfrage lag lange bei einem Ingenieur, der im letzten Monat sehr beschäftigt war.

Viele Grüße
Robert Steffens

Hier Antworten auf Ihre Fragen (beantwortet unter dem Gesichtspunkt Live/Richtungsbeschallung/Frontbezug):

#Wie groß ist die Hörfläche bei einer gewissen Anzahl an Lautsprechern?

Umfang des Lautsprecher setups/Anzahl der Lautsprecher = Lautsprecherabstand

Breite der Hörfläche = Breite des Lautsprecher setups - 2x Lautsprecherabstand

Länge der Hörfläche = Länge des Lautsprecher setups - 2x Lautsprecherabstand

#Was ist die maximal erzeugbare Größe einer Hörfläche?

50m Diagonale

#Welche Lautsprecher werden verwendet?

Lautsprecher sind angepasst an Beschallungsaufgabe. Jeder Lautsprecher muss ganze Hörfläche beschallen können-> Directivityanforderungen hängen von Systemgeometrie ab. Möglichst gute Lautsprecher.

#Wie werden die Lautsprecher im Raum angeordnet (-> bei Theatern ist die Anordnung auf Kopfhöhe vor der Bühne ja nicht möglich,...)?

Entweder gleichabständiger Ring aus gleichberechtigten Lautsprechern + Decke oder Auftrennung in Frontarray mit hoher Lautsprecherdichte für korrekte Richtungsbeschallung und wenige Lautsprecher an Seiten und Rückseite für Raumsimulation und Effekte + Decke
Damit die Beschallungsaufgabe gelöst wird, müssen Lautsprecher nach oben ausweichen.
Live: Für Zuhörer nahe einer Bühne gibt es Konzepte aus der Beschallung z.B. Nearfills, um Ranbereiche zu beschallen.

#Wie lange dauert die Installation eines solchen Systems, in welcher
> Höhe liegen die Kosten bei einer Installation für beispielsweise ein
> Theater mit 500 Sitzplätzen?

Ca. drei Tage physische Installation und dann ein Tag Systemeinrichtung

--

Director of Software Development

robert.steffens@iosono-sound.com

Office: +49 (361) 511 43 675

Fax: +49 (361) 511 43 677

www.iosono-sound.com

IOSONO GmbH

Erich-Kaestner-Str. 1

99094 Erfurt / Germany

Registergericht: Amtsgericht Jena

Registernummer: HRB 306742

Geschäftsführer: Olaf Stepputat
