

Facharbeit

# **Der plastische Klang**

## **3D-Audio ein Überblick über Konzepte und Technologien**

von Georg Bauer  
Audio Engineering Diploma AED 912  
Sae Institut Berlin  
betreuender Dozent: Boris Kummerer  
Abgabedatum: 09.09.2013  
9447 Wörter

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	4
2. Psycho- und Elektroakustischer Exkurs.....	9
2.1 Räumliches Hören.....	9
2.1.1 Horizontalebene.....	10
2.1.2 Medianebene.....	12
2.1.3 Frontalebene.....	13
2.1.4 Entfernungswahrnehmung.....	13
2.1.5 Außenohr-Übertragungsfunktion.....	13
2.2 Elektroakustische Wiedergabe.....	14
2.2.1 Kopfhörerwiedergabe.....	15
2.2.2 Lautsprecherwiedergabe und Phantomschallquellen.....	16
3. Rückblick.....	17
3.1 Von Mono bis Stereo.....	17
3.2 Quadrophonie (4.0).....	18
3.3 Dolby Surround.....	19
3.4 3/2 - und 5.1 - Format.....	20
3.5 7.1-Format .....	22
4. Wegweiser in die 3. Dimension.....	24
4.1 10.2 Format.....	24
4.2 2+2+2.....	25
4.3 Tetraphonie.....	26
5. Die Wellenfeldsynthese.....	27
5.1 Funktionsweise.....	27
5.2 Vorteile.....	30
5.3 Probleme.....	31
6. Konzepte der Zukunft (?).....	32
6.1 Binaural Sky.....	32
6.1.1 BRS – Binaurale Raumsynthese.....	32
6.1.2 Virtuelle Kopfhörer.....	33
6.1.3 Binaural Sky.....	35
6.2 Spatial Sound Wave.....	37

6.2.1 System.....	37
6.2.2 Aufbau des SSW-Systems im Zeiss-Planetarium Jena.....	38
6.2.3 Funktionsweise .....	38
6.2.4 Vorteile.....	39
6.3 Auro 3D.....	39
6.3.1 Aufbau .....	40
6.3.2 Funktionsweise.....	41
6.3.3 Vorteile.....	43
6.4 Dolby Atmos.....	44
6.4.1 Funktionsweise.....	45
6.4.2 Aufbau.....	48
6.4.3 Vorteile.....	52
7. Fazit und Ausblick.....	55
Quellenverzeichnis.....	60
Abbildungsverzeichnis.....	63
Eigenständigkeitserklärung.....	64

## 1. Einleitung

Der Begriff „3D-Audio“ mag im ersten Moment neuartig klingen. Doch genau genommen ist dies in unserer Realität allgegenwärtig. Das Wort Audio kommt aus dem Lateinischen und heißt „ich höre“, abgeleitet von *audire* (hören). Es geht also um das dreidimensionale, sprich räumliche, Hören.

Genau das geschieht in jeder Sekunde unseres Lebens. In jedem Moment wirken aus allen Richtungen Schallereignisse auf uns ein. Und auch der Schall an sich breitet sich in allen drei Dimensionen aus.

„3D – Audio“ ist also eher ein umgangssprachlich verwendeter Ausdruck, der keinen Anspruch auf wissenschaftliche Korrektheit erhebt und als vereinfachtes Modell zu betrachten ist. Doch was genau versteht man eigentlich unter diesem Begriff? Warum verwendet man ihn erst seit kurzem, und warum gewinnt er immer mehr an Bedeutung?

Seit Beginn der Aufzeichnung von Ton und Bild versucht der Mensch die Qualität der Aufnahmen und derer Wiedergabe zu optimieren. Dabei ist ein Kriterium stets die möglichst originalgetreue Abbildung der Realität. Zu Beginn der tontechnischen Entwicklung ging es mehr darum die klanglichen Eigenschaften eines Signals möglichst originalgetreu aufzunehmen, und Audiomaterial wurde über *einen* Lautsprecher wiedergegeben.

Die Information wurde gewissermaßen „eindimensional“ vom Sender zum Empfänger übertragen. Natürlich passiert all dies in einem dreidimensionalen System. Der Schall breitet sich, wie gesagt, in allen uns bekannten Dimensionen aus. Außerdem verfügt z.B. der Mensch über zwei Empfänger (die Ohren) an zwei verschiedenen Orten, die mehr oder weniger unterschiedliche Signale aufnehmen, was zu einem dreidimensionalen Höreindruck führt. Doch lassen wir das beiseite, wir befinden uns ja, wie gesagt, in einem Betrachtungsmodell. Dazu dann mehr im Psychoakustischen Exkurs in Kapitel 2.

Schnell begann man dann, immer komplexere Audiosignale aufzunehmen. Doch die Tatsache, dass, zum Beispiel, der Klang eines ganzen Orchesters aus nur einer Richtung, also aus einem Lautsprecher, kam (was nicht dem realen Hören entspricht), lies die Menschen nach Lösungen suchen, diesen Höreindruck der Realität ähnlicher zu machen.

Recht schnell hat der Mensch dann mit der Erfindung der Stereophonie die Wiedergabe von Audio in zwei Dimensionen ermöglicht. Das Klangbild wurde räumlicher, plastischer. Hier werden unterschiedliche Informationen von einem Empfänger aus verschiedenen Richtungen auf der Horizontalebene empfangen.

Der Begriff Stereophonie hat im Griechischen seinen Ursprung und kann frei übersetzt als „der plastische Klang“ verstanden werden. Er steht für die Wiedergabe von Audiomaterial über *mehrere* Lautsprecher, nicht, wie oftmals angenommen, für die Wiedergabe über genau zwei Lautsprecher.<sup>1</sup>

Verwendet werden also 2 oder mehrere Lautsprecher, die links und rechts vor dem Hörer, beziehungsweise, wie in der Mehrkanalstereophonie, um den Hörer herum aufgestellt werden. Auf diese Weise kann man natürlich naturgetreuere Abbildungen ermöglichen als es mit der Wiedergabe über nur einen Lautsprecher realisierbar ist. Mit Hilfe gewisser Aufnahmetechniken ist es möglich, ein Orchester nicht nur klanglich, sondern auch räumlich darzustellen. Sind die Kontrabässe auf der Bühne, vom Zuschauer gesehen, rechts positioniert, so sind sie das auch in der stereophonen Aufnahme.

Die 2-Kanal-Stereophonie hat die Menschheit viele Jahrzehnte begleitet und birgt ein enormes Potential an Gestaltungsmöglichkeiten. Unzählige Menschen hatten bereits große Freude mit ihr und es wird sicher noch sehr lange dauern, bis sie nicht mehr genutzt wird. Doch kommt sie der Realität nur bedingt nahe. Denn man hört gewissermaßen nur in den Aufnahmeraum hinein, und es können nur Schallquellen, die offenbar von vorne kommen, abgebildet und wahrgenommen werden. Es gibt zwar Möglichkeiten mit nur 2 Kanälen sehr räumliche Klangbilder zu erschaffen und sogar Schallquellen von hinten oder von der

---

<sup>1</sup> Vgl. Birkner, 2002, S.13

Seite kommend erscheinen zu lassen, doch sind dem natürlich Grenzen gesetzt.

Also wurden dann mit der Mehrkanal-Stereophonie weitere Lautsprecher um den Hörer herum angeordnet, um Audio-Informationen auch aus anderen Richtungen wiedergeben zu können. Das führte zu einem enormen Anstieg der Plastizität des Klangbildes. Denn in einem Konzertsaal, beispielsweise, wird der, vom Orchester abgegebene, Schall auch an den Wänden reflektiert. Diese, von hinten und den Seiten kommenden, Reflexionen konnten nun abgebildet werden.

Doch auch an der Decke des Konzertsaaes wird Schall reflektiert. Und kommt man aus dem Konzerthaus heraus und tritt auf die Straße, stellt man fest, das auch von oben einiges an Audio-Informationen eintrifft. Vögel, Flugzeuge oder eine Unterhaltung auf dem Balkon im zweiten Stock.

Der nächste Schritt zu möglichst realistischer Wiedergabe von Audio, und zu unserem Begriff „3D-Audio“, ist also folglich die zusätzliche Wiedergabe von Audio-Informationen von oben oder unten, beziehungsweise aus der 3. Dimension.

Man mag denken, hier ist man an einem Punkt angekommen, an dem man nun alle Werkzeuge hat, um die Realität abzubilden. Und in der Tat. Es ist möglich, Klangbilder zu schaffen, die der Realität verblüffend ähnlich sind. Doch dies beschränkt sich auf Klangbilder, in denen sich alle wiedergegebenen Schallquellen in einer Zone jenseits der Lautsprecher befinden.

So verwundert es nicht, dass weitere Technologien entwickelt wurden. Als einen der größten tontechnischen Meilensteine der Moderne kann wohl das Konzept der Wellenfeldsynthese bezeichnet werden. Damit sind bereits sehr realistische Abbildungen möglich, jedoch ist es sehr aufwendig in der Umsetzung. Zur Anwendung kommen sehr viele Lautsprecher, die dicht an dicht rundum im Raum aufgestellt werden und alle einzeln von einem Computersystem ansteuerbar sind. Damit lassen sich virtuelle Schallquellen im Raum verteilen, die auch bei Veränderung der Abhörposition, vom selben Ursprungsort kommend, wahrge-

nommen werden. Das heißt, Schallquellen können damit nun innerhalb der Hörzone positioniert werden. Zum Beispiel könnte man ein ganzes Orchester in der Hörzone verteilen und sich dann zwischen den virtuellen Musikern bewegen! Mehr zur Wellenfeldsynthese dann im Kapitel 5.

Auf all diesen Erkenntnissen aufbauend sind nun einige Konzepte entstanden, die zwar aufwendig, jedoch recht gut umsetzbar sind. Einige dieser Konzepte und Technologien werden dann in Kapitel 6 beschrieben.

In der Kinowirtschaft sind recht hohe Umsätze üblich, und sie ist schon immer der Motor der Entwicklung des plastischen Klanges gewesen. Also ist es nicht verwunderlich, dass hier die fortschrittlichste Beschallungstechnik zum Einsatz kommt, die derzeit der Öffentlichkeit zugänglich ist.

Das kreative Potenzial, das in den neuen Konzepten liegt, ist enorm, und sollte genutzt werden. Dafür ist es wichtig, über die bereits erreichten Fortschritte zu informieren und ein Bewusstsein und eine Nachfrage in der Bevölkerung zu entwickeln.

In dieser Facharbeit soll es darum gehen, einen Überblick zu verschaffen, welche Konzepte und Wiedergabesysteme im Laufe der Zeit entwickelt wurden und diese in ihrer Funktionsweise für jedermann verständlich vorzustellen und den Aufbau zu beschreiben. Sie richtet sich sowohl an Semiprofessionelle, aber auch an Laien.

Die Audiowiedergabe wird sehr oft in Räumen umgesetzt, was zur Wahrnehmung von Reflexionen an den Wänden führt. Dieser Aspekt ist in der Umsetzung oft sehr störend, kann aber durch entsprechende Maßnahmen unterbunden werden. Deshalb wird dies in dieser Facharbeit keine Beachtung finden.

Außerdem soll noch darauf hingewiesen werden, dass es noch viele andere Aspekte, diese Thema betreffend, gibt. Zum Beispiel gibt es für nahezu jedes Wiedergabesystem auch ein spezielles Aufnahmeverfahren. Diese Arbeit konzentriert sich jedoch auf die, nach dem Ermessen des Autors, wichtigsten Wiedergabesysteme und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Im Vorfeld wird auf einige psychoakustische Vorgänge eingegangen, die für das Verstehen der Materie wichtig sind.

## 2. Psycho- und Elektroakustischer Exkurs

Was ist Schall? Jedes mal, wenn Materialien miteinander interagieren, also zum Beispiel aufeinandertreffen, aneinander entlang reiben oder durch äußere Einwirkung in Schwingung geraten, werden Luftmassen in Bewegung gesetzt.

Im Laufe der Evolution hat sich ein äußerst erstaunliches System zur Auswertung dieser hin und her schwingenden Luftmassen entwickelt. Das sogenannte Gehör, bestehend aus den zwei Ohren und Teilen des Gehirns, in dem die Informationen ausgewertet werden. Auf den genauen anatomischen Aufbau soll hier nicht eingegangen werden, das würde den Rahmen sprengen und ist zur Verständlichkeit des Themas nicht von Bedeutung. Wichtig ist vielmehr, die Mechanismen zu verstehen, die zur räumlichen Wahrnehmung führen, denn darauf bauen alle Wiedergabesysteme auf.

### 2.1 Räumliches Hören

Die Richtungswahrnehmung, also die Zuordnung der wahrgenommenen Hörereignisrichtung zur tatsächlichen Schallereignisrichtung, und die Entfernungswahrnehmung bilden gemeinsam die räumliche Wahrnehmung des Gehörs.<sup>1</sup> Dabei unterscheidet man die Richtungswahrnehmung in der Horizontalebene, der Median- beziehungsweise Vertikalebene und der Frontalebene.<sup>2</sup> Für jede dieser Ebenen sind jeweils verschiedene Mechanismen zuständig, die sich gegenseitig unterstützen.

---

<sup>1</sup> Vgl. Dickreiter u. a., 2008, S. 117

<sup>2</sup> Vgl. ebd.

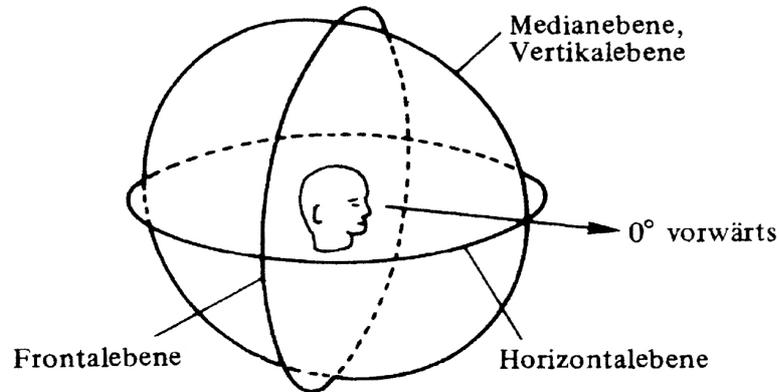


Abb. 1: Kopfbezogenes Koordinatensystem für die Beurteilung der Hörereignisrichtungen

### 2.1.1 Horizontalebene

Für die Lokalisation in der Horizontalebene, werden hauptsächlich Pegel- und Laufzeitdifferenzen zwischen den Ohren ausgewertet.<sup>1</sup> Dabei nimmt die Lokalisationsunschärfe von vorne nach hinten zu.<sup>2</sup> Vorn beträgt sie etwa  $2^\circ - 3^\circ$ , seitlich etwa  $4,5^\circ$  und hinten bis zu  $10^\circ$ .

Liegt die Schallquelle zum Beispiel schräg vor dem Hörer, erreicht der Schall das zugewandte Ohr früher als das der Schallquelle abgewandte Ohr.<sup>3</sup> Diese Laufzeitunterschiede betragen bis zu  $630 \mu\text{s}$ , je nach Einfallswinkel und Größe des Kopfes, und müssen  $30 \mu\text{s}$  überschreiten bevor eine Verschiebung der Hörereignisrichtung wahrnehmbar ist.<sup>4</sup> Allerdings ist ab etwa  $1600 \text{ Hz}$  die Wellenlänge der Schallwellen zu klein, um sich um den Kopf zu beugen und wird reflektiert, was zu einer Abschattung führt.

Bei höheren Frequenzen kommt dann die Auswertung von Pegelunterschieden zum Tra-

<sup>1</sup> Vgl. Friesecke, 2007, S. 133

<sup>2</sup> Vgl. Dickreiter u.a., 2008, S. 120

<sup>3</sup> Vgl. Friesecke, 2007, S. 133

<sup>4</sup> Vgl. ebd.

gen, die durch eben diese Abschattung verursacht werden.<sup>1</sup> Pegeldifferenzen werden auch in tieferen Frequenzen wahrgenommen, doch durch die Beugung der Schallwellen nimmt dieser Effekt mit der Frequenz ab.<sup>2</sup> Kommt also das gleiche Signal auf dem einen Ohr lauter als auf dem Anderen an, wird die Hörereignisrichtung zur Seite verschoben wahrgenommen. Und zwar zu der Seite des Ohres, das den höheren Pegel empfangen hat. Da die Pegeldifferenzen jedoch frequenzabhängig sind und verschiedene Klänge zum Teil extrem unterschiedliche Frequenzspektren mit sich bringen ist keine allgemeingültige Zuordnung zwischen Pegelunterschieden und Schallereignisrichtung möglich.

Daraus folgt, dass nur beide Mechanismen gemeinsam zu einem Höreindruck führen, bei dem die Hörereignisrichtung weitestgehend der Schallereignisrichtung entspricht.

Dazu kommen sehr frühe Reflexionen (100 -200  $\mu$ s) an der Ohrmuschel. Durch die Überlagerung der identischen, jedoch aber phasenverschobenen Signale, werden Einbrüche im Frequenzgang verursacht, welche vom Gehirn einer Richtung zugeordnet werden können.<sup>3</sup>

---

1 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.119

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. Görne, 2008, S. 103

### 2.1.2 Medianebene

Lokalisation in der Medianebene ist die Bestimmung der Elevation (Höhe) einer Schallquelle und die Unterscheidung zwischen vorne und hinten.<sup>1</sup> Da es in dieser Ebene keine Laufzeit- und Pegelunterschiede gibt, kommt hier mehr die Auswertung der frühen Reflexionen an den Ohrmuscheln zur Geltung.<sup>2</sup> Außerdem erfolgt dies über die sogenannten „richtungsbestimmenden Bänder“,<sup>3</sup> oder auch „blauertschen Bänder“, benannt nach Jens Blauert, der durch seine Experimente das Fundament in diesem Fachgebiet gelegt hat. Form und Beschaffenheit von Kopf und Ohren verursachen je nach Einfallrichtung die Anhebung bestimmter Frequenzbänder. Dies führt zu einer unbewusst wahrgenommenen Klangfärbung, die vom Gehirn ausgewertet wird.<sup>4</sup> Die Lokalisationsunschärfe in der Medianebene nimmt mit der Höhe zu und bewegt sich zwischen  $9^\circ$  -  $17^\circ$ .<sup>5</sup>

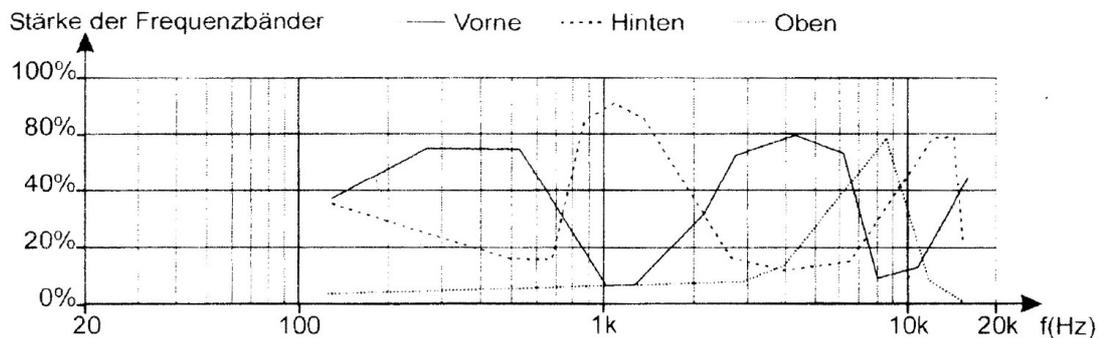


Abb. 2: Richtungsbestimmende Frequenzbänder für die Lokalisation in der Medianebene (y-Achse zeigt Häufigkeit der Richtungsbestimmungen von Probanden in Prozent)

1 Vgl. Friesecke, 2007, S. 134

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.121

5 Vgl. ebd.

### 2.1.3 Frontalebene

Die Lokalisation in der Frontalebene erfolgt mit Hilfe der Mechanismen zur Richtungsbestimmung in den anderen Ebenen.

### 2.1.4 Entfernungswahrnehmung

Für die Entfernungswahrnehmung im Freifeld werden hauptsächlich Lautstärke, Frequenzgang und das Mischungsverhältnis zwischen Direkt- und Diffusschall ausgewertet. Je leiser und mittiger ein Signal, desto größer wird die Entfernung eingeschätzt. Das ist auf die Absorptionseigenschaften der Luft zurückzuführen, welche auch für die Veränderung des Frequenzgangs verantwortlich sind. Hohe Frequenzen werden stärker von der Luft absorbiert als die Mitten.<sup>1</sup> Und da sich tiefe Frequenzen eher kugelförmig ausbreiten, verteilt sich die Schallenergie im Raum, während mit zunehmender Frequenz die Abstrahlung immer gerichteter wird. Das führt zu einer Abschwächung der tieferen Frequenzen im Spektrum.<sup>2</sup>

In Räumen kommt die Auswertung von frühen Reflexionen an den Wänden dazu, welche Aufschluss über die Größe des Raumes und die eigene Position in diesem geben.

### 2.1.5 Außenohr-Übertragungsfunktion

Die Außenohr-Übertragungsfunktion, kurz HRTF (engl. head related transfer function) beschreibt ein charakteristisches Interferenzmuster, welches durch die (oben schon kurz erwähnte) Überlagerung von Direktschall und Ohrmuschel-Reflexionen an der Öffnung des Gehörgangs entsteht. Das Frequenzspektrum des einfallenden Schalles, wird also vom Außenohr mit einem richtungsspezifischen Kammfilter mit Pegeldifferenzen von bis zu 20 dB bearbeitet.<sup>3</sup> Die Auswertung der HRTF unterstützt die Lokalisation in der Horizontal- und

---

1 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.122

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. Görne, 2008, S. 103

Medianebene.<sup>1</sup>

Aus diesen Erkenntnissen, ist die Kunstkopf-Stereofonie hervorgegangen. Ein Kunstkopfmikrofon ist die Nachbildung eines menschlichen Kopfes. Dabei wurde den Außenohren besondere Beachtung geschenkt. Etwa 3 mm im inneren der künstlichen Gehörgänge werden Mikrofone installiert.<sup>2</sup>

Solche Aufnahmen führen jedoch nur während der Kopfhörerwiedergabe zu der erwünschten realistischen Abbildung von Räumlichkeit und Tiefe und zu der hervorragenden Lokalisation.<sup>3</sup> Bei der Lautsprecherwiedergabe werden die aufgenommenen HRTF durch, am Ohr des Hörers neu entstehende, Übertragungsfunktionen verzerrt und nur noch als Klangfärbung im Hochfrequenzbereich wahrgenommen.<sup>4</sup>

## 2.2 Elektroakustische Wiedergabe

Bei der Lautsprecherwiedergabe werden die psychoakustischen Erkenntnisse genutzt um dem Gehirn räumliche Klangsituationen zu vermitteln. Einerseits gab es da schon immer die Motivation, ein Klangbild zu erschaffen, das einer „natürlichen“ Situation entspricht. Nehmen wir, zum Beispiel, die Abbildung einer klanglichen Atmosphäre in einem Wald oder in einem Restaurant. Doch auch künstliche Räume und Szenarien sind möglich und werden auch erschaffen, wie, zum Beispiel, in der Produktion von elektronischer Musik oder auch teilweise in der Pop-Musik.

---

1 Vgl. Görne, 2008, S. 103

2 Vgl. Birkner, 2002, S. 49

3 Vgl. Birkner, 2002, S. 49

4 Vgl. Görne, 2008, S. 123

### 2.2.1 Kopfhörerwiedergabe

Bei der Kopfhörerwiedergabe wird jedem Ohr ein elektroakustischer Wandler zugeordnet.<sup>1</sup> Und es entstehen keine Außenohr-Übertragungsfunktionen.<sup>2</sup> Dies bringt einige Probleme mit sich, bietet aber auch einige Möglichkeiten zur räumliche Abbildung.

Bei Stereo-Audiomaterial für die Lautsprecherwiedergabe spielen zur Richtungsbestimmung oft nur entweder Pegeldifferenz *oder* Laufzeitdifferenzen eine Rolle (raumbezügli- che Stereophonie). Dies ist auf gewisse Stereo-Aufnahme- und Abmischverfahren zurückzu- führen. Dies entspricht jedoch nicht dem natürlichen Hören.<sup>3</sup> Spielt man dieses Material über Kopfhörer ab, kommt es zur Im-Kopf-Lokalisation. Die Phantomschallquellen (siehe unten) werden dabei auf einer Linie zwischen den Ohren wahrgenommen, was sehr ermü- dend sein kann.<sup>4</sup>

Deshalb sollte Material für die Kopfhörerwiedergabe Signale beinhalten, die Laufzeit- *und* Pegeldifferenzen enthalten und mit einer HRTF versehen sind. Dies erreicht man, zum Beispiel, durch die Aufnahme mit einem Kunstkopfmikrofon, oder durch die Bearbeitung eines raumbezüglichen Signals. Man erhält dann sogenannte binaurale Signale (kopfbezü- gli- che Stereophonie).<sup>5</sup>

Dies birgt enormes Potenzial zur räumlichen Abbildung unter Kopfhörern. Man kann ei- nem Stereosignal eine HRTF (zum Beispiel mit Hilfe eines Plug-Ins) aufprägen und somit einer Richtung zuordnen. Mischt man verschiedene solcher Signale, kann man erstaunlich räumliche akustische Szenarien kreieren oder reale Situationen imitieren.

---

1 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.131

2 Vgl. Görne, 2008, S. 122/123

3 Vgl. Görne, 2008, S. 122

4 Vgl. Görne, 2008, S. 123

5 Vgl. Görne, 2008, S. 122/123

### 2.2.2 Lautsprecherwiedergabe und Phantomschallquellen

Bei der Wiedergabe einer Monoaufnahme über nur einen Lautsprecher gelten weitestgehend die Gesetze zur Wahrnehmung von natürlichen Schallquellen. Nur die Lautstärke der Wiedergabe könnte die Entfernungswahrnehmung beeinflussen.<sup>1</sup> Bei der Wiedergabe über zwei oder mehrere Lautsprecher wird die Sache ein wenig komplizierter.

Bei der stereophonen Lautsprecherwiedergabe überlagern sich zwei oder mehr Schallsignale. Davon erhalten beide Ohren jeweils einen bestimmten Schallanteil, wodurch dann der Richtungseindruck einer fiktiven Schallquelle entsteht.<sup>2</sup> Wird über zwei identische Lautsprecher das exakt gleiche Signal wiedergegeben, und bildet der Hörer mit den Lautsprechern ein gleichseitiges Dreieck, entsteht zwischen diesen in der Mitte eine sogenannte Phantomschallquelle.<sup>3</sup> Verändert man nun den Pegel eines der Signale, hätte dies zur Folge, dass der Hörer eine Verschiebung der Phantomschallquelle zu der Seite des Lautsprechers mit dem höheren Pegel wahrnimmt. Gleiches würde passieren, wenn man eins der beiden Signale um  $30\ \mu\text{s}$  bis  $630\ \mu\text{s}$  zeitlich verzögert abspielen würde. Die Hörereignisrichtung würde zu dem früher abgestrahlten Signal verschoben werden.<sup>4</sup> Eine Verschiebung der Abhörposition hätte den gleichen Effekt, da auch dadurch Pegel- und Laufzeitdifferenzen entstehen.<sup>5</sup> Die optimale Abhörposition nennt man Sweet Spot.

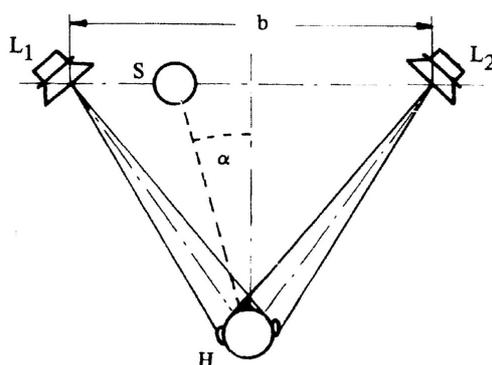


Abb. 3: Lautsprecheranordnung für 2-Kanal-Stereowiedergabe

1 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.124

2 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.125

3 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.124

4 Vgl. ebd.

5 Vgl. Dickreiter u.a., 2007, S.126

## 3. Rückblick

### 3.1 Von Mono bis Stereo

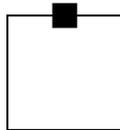


Abb. 4:  
Zeichen für  
Mono

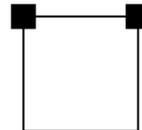


Abb. 5:  
Zeichen für  
Stereo 2.0

Mitte des 19. Jahrhunderts kamen mit Phonograf, Telefon und, etwas später, dem Grammophon die ersten Audiowiedergabesysteme in die Welt.<sup>1</sup> Trotz früher Experimente mit mehrkanaliger Übertragung blieb die Tontechnik vorerst Monofon, also einkanalig.<sup>2</sup> Erst Alan Dower Blumlein begann mit der genauen Untersuchung der stereophonen Aufnahme und Wiedergabe und erklärte in seiner Patentschrift von 1931 recht präzise, was den Quantensprung von der Mono- zur Stereophonie ausmacht: die Lokalisation von Phantomschallquellen und die Abbildung eines Raumes durch seitliche Reflexionen.<sup>3</sup> Es waren plötzlich Schallquellen und Räume wahrzunehmen, wo eigentlich keine waren!

In der Zweikanal-Stereophonie werden vor dem Hörer zwei Lautsprecher in einem bestimmten Abstand, der sogenannten Stereobasis, aufgestellt. Der Sweet Spot bildet mit den Lautsprechern, wie gesagt, ein gleichseitiges Dreieck.

---

1 Vgl. Birkner, 2002, S. 20, 21

2 Vgl. Görne, 2008, S. 294

3 Vgl. Görne, 2008, S. 294, 295

### 3.2 Quadrophonie (4.0)

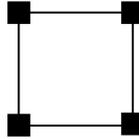


Abb. 6:  
Zeichen für  
4.0

Ein logischer Gedankenschritt zu mehr Räumlichkeit ist natürlich die ausgiebigere Nutzung der 2. Dimension. Also die Aufstellung von Lautsprechern um den Zuhörer herum. Die Quadrophonie ermöglicht mit nur 2 weiteren Lautsprechern die Erweiterung des Schallfeldes durch drei weitere Stereobasen, und somit schon sehr realistische Abbildungen.

Die vier Lautsprecher werden im  $90^\circ$  - Winkel zueinander angeordnet<sup>1</sup>, wobei darauf zu achten ist, dass sie kein Quadrat, sondern ein Rechteck bilden, um Schallstau bei direkt aufeinander treffenden Wellenfronten zu verhindern.

Voraussetzung für die möglichst exakte Wahrnehmung des Materials ist auch hier die Positionierung des Hörers im Sweet Spot, welcher auf der Schnittstelle der Diagonalen liegt.<sup>2</sup> Jede Abweichung von dieser führt zu einer Verzerrung der gewünschten Darstellung.

Mitte der 70er Jahre versuchte man die Quadrophonie in der Musikindustrie zu etablieren. Dies scheiterte jedoch einerseits an dem hohen Aufwand, und andererseits daran, dass sich kein Standard für den Heimgebrauch durchsetzte.<sup>3</sup>

1 Vgl. Birkner, 2002, S. 51

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. Birkner, 2002, S. 50, 51

### 3.3 Dolby Surround

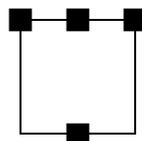


Abb. 7:  
Zeichen für  
3/1

Der treibende Faktor für den plastischen Klang ist wie gesagt der Filmtton. Eins der führenden Unternehmen in dieser Branche ist „Dolby Laboratories“ aus den USA. So wurde 1977 Dolby Stereo in den Kinos eingeführt.<sup>1</sup> 1982 wurde das gleiche System als Dolby Surround für den Heimbereich auf den Markt gebracht.<sup>2</sup>

Dieses Format wird auch 3/1 - Format genannt. Es gibt einen linken und einen rechten Kanal, wie bei dem Zweikanal - Stereoverfahren, und zusätzlich einen Centerkanal in der Mitte, sowie einen Surroundkanal hinten.<sup>3</sup> Der Center- und der Surroundkanal wurden in den anderen Kanälen matriziert und dafür frequenzbandbegrenzt.<sup>4</sup> Zur Übertragung waren also nur zwei diskrete Kanäle erforderlich.

Der Center - Kanal wurde eingeführt, weil im Kino bei sehr großen Leinwänden die Lokalisation ungenau wurde.<sup>5</sup> Um die optimale Abhörposition zu vergrößern wurde oftmals der Surroundkanal über zwei Lautsprecher (einer rechts, einer links) wiedergegeben. Daher die Kompatibilität zum 3/2 - Format.<sup>6</sup>

1 Vgl. Görne, 2008, S. 297

2 Vgl. Birkner, 2002, S. 52

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. Görne, 2008, S. 298

5 Vgl. Birkner, 2002, S. 54

6 Vgl. Birkner, 2002, S. 52

### 3.4 3/2 - und 5.1 - Format

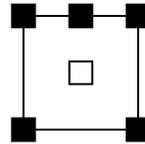


Abb. 8:  
Zeichen für  
5.1

Als dann die Digitaltechnik und, Mitte der Neunziger, die DVD aufkamen, war es möglich, Mehrkanalton auf diskrete Kanäle aufzuteilen und die Anzahl dieser zu erhöhen.<sup>1</sup> Das führte zu einer besseren Klangqualität, da die zusätzlichen Kanäle nicht mehr unter der Matrixierung litten.<sup>2</sup> Seit Anfang der Neunziger ist das 5.1-Format in Kino und digitalem TV Standard.

Das 3/2 - und das 5.1 - Format, die bis auf den zusätzlichen Subwooferkanal bei 5.1 identisch sind, bilden die Basis der Mehrkanalton-Formate, die in der ITU 755 - eine Mehrkanalton-Umsetzungsempfehlung der International Telecommunication Union (Genf 1992-1994) - geregelt werden, und stellen den momentanen Standard im Heimbereich dar.<sup>3</sup>

In der ITU 755 werden die Lautsprecher wie folgt angeordnet.

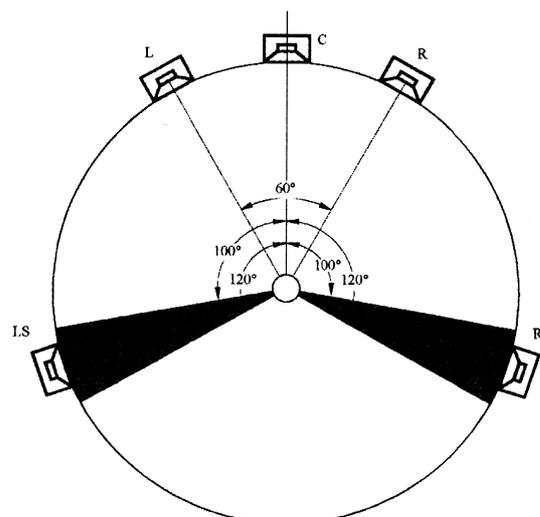


Abb. 9: Referenz-Lautsprecheranordnung für das 3/2-Format

1 Vgl. Görne, 2008, S. 298

2 Vgl. Görne, 2008, S. 298

3 Vgl. Birkner, 2002, S. 53

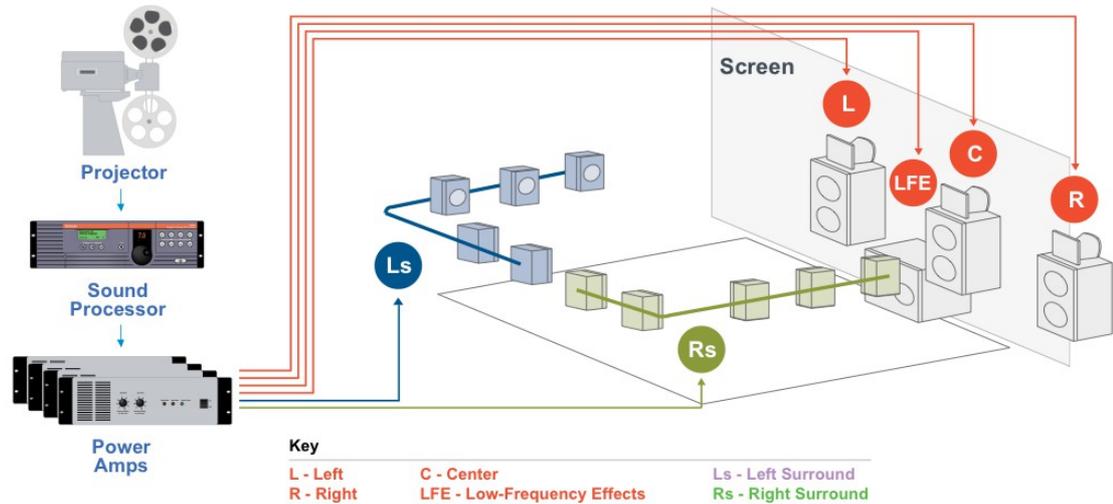


Abb. 10: Dolby 5.1-System in einem Kino

Kurzeitig kam auch ein 6.1-Format auf, bei dem hinten ein Centerkanal hinzugefügt wurde um die rückwertige Lokalisation zu verbessern. Dieses Format entspricht zwar nicht der ITU-755 Empfehlung, ist jedoch mit dieser kompatibel, da der zusätzliche Kanal in die beiden Surroundkanäle matriziert wird.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Birkner, 2002, S. 56

### 3.5 7.1-Format

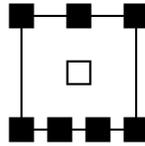


Abb. 11:  
Zeichen für  
7.1 (3/4/1)

Das 7.1-Format gibt es in zwei verschiedenen Versionen.<sup>1</sup>

Zum Einen wurde für sehr große Leinwände ebenfalls Anfang der Neunziger das 5/2/1-Format entwickelt, welches ein reines Kinoformat ist. Es werden 2 weitere Frontkanäle hinzugefügt (ein linker und ein rechter Centerkanal), um die Lokalisation von, zum Beispiel, Sprache zu verbessern.<sup>2</sup>

Zum Anderen wurde das 3/4/1-Format entwickelt, um abermals die rückwertige Lokalisation zu verbessern. Dazu werden zwei weitere Surroundkanäle hinzugefügt.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Birkner, 2002, S. 57

<sup>2</sup> Vgl. Birkner, 2002, S. 58

<sup>3</sup> Vgl. Birkner, 2002, S. 57, 58

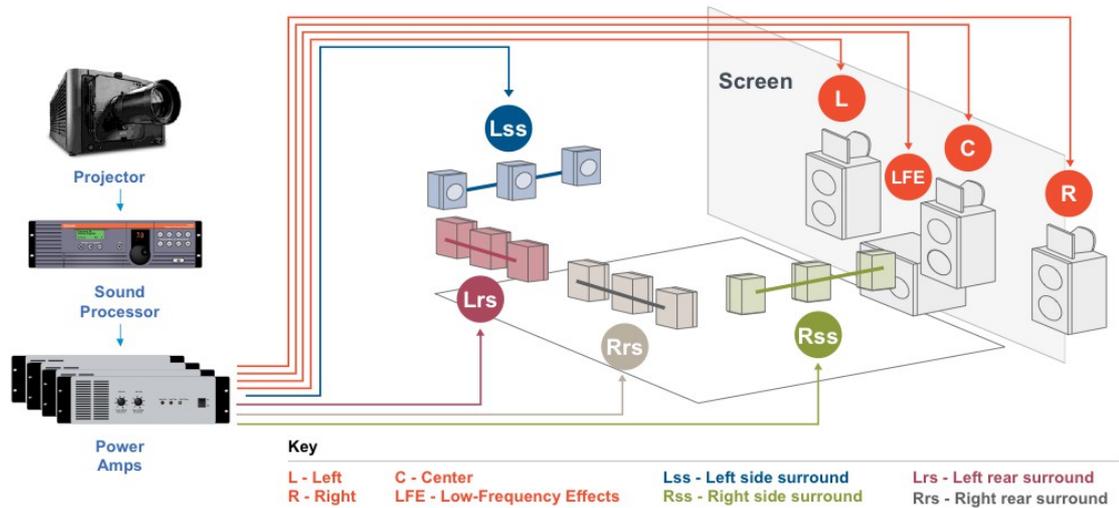


Abb. 12: Dolby 7.1-System in einem Kino

Daraus folgten dann ein 9.1-Format, welches die Kombination der beiden 7.1-Formate darstellt und ein 10.1-Format, bei dem dann wiederum ein hinterer Centerkanal hinzugefügt wurde.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Birkner, 2002, S. 60, 61

## 4. Wegweiser in die 3. Dimension

Der Weg zur möglichst originalgetreuen Abbildung führt, wie gesagt, über die Verbesserung von zwei Aspekten. Lokalisation und Räumlichkeit. Letzteres führt zwangsläufig zu dem Punkt, dass eine Abstrahlung aus der dritten Dimension in Betracht gezogen werden sollte, wie es in der Realität eben der Fall ist. So verwundert es nicht, dass schon seit geraumer Zeit damit experimentiert wird. Im folgenden Kapitel sollen einige dieser Versuchsanordnungen kurz vorgestellt werden.

### 4.1 10.2 Format

Die THM Laboratories haben auf die 7.1 - Version 5/2 aufgebaut. Dazu kamen dann 2 Subwoofer ,links und rechts vom Hörer platziert, ein hinterer Centerkanal und 2 obere Frontlautsprecher ca. 1 m über den Hauptlautsprechern, welche die Besonderheit an diesem Format darstellen.<sup>1</sup> Diese übertragen entweder diskrete Signale, in diesem Fall sollen sie auf die Hörposition gerichtet sein, oder Diffussschall, dann um 45° nach außen gedreht um die Reflexionen der Wände zu nutzen.<sup>2</sup>

Der eigentliche Zweck dieser Anordnung sollte die Vergrößerung der Hörzone sein, dieser wurde jedoch nicht erfüllt. Doch die Testpersonen bescheinigten eine räumliche Verbesserung.<sup>3</sup>

---

1 Vgl. Birkner, 2002, S. 61, 62

2 Vgl. Birkner, 2002, S. 62

3 Vgl. ebd.

## 4.2 2+2+2

Dieses Format ist ein Vorschlag des deutschen Tonmeisters Werner Dabringhaus. Hier werden die sechs gleichwertigen Kanäle des 5.1 - Formates und des DVD-Standards genutzt. Center - und Subwoofersignal werden jedoch weg gelassen um die beiden nun freien Kanäle für eine weitere Stereobasis zu verwenden, die einen Meter über den Hauptlautsprechern zu positionieren sind.<sup>1</sup> Ähnlich wie bei dem 10.2 - Format werden diese Lautsprecher bei diskreten Signalen nach vorne gerichtet und bei diffusen Signalen um 90° nach außen gedreht um die frühen Reflexionen an den Wänden zu nutzen.<sup>2</sup> Der Vorteil dieses Formates liegt in der Kompatibilität zu den gängigen Übertragungsformaten und der vorhandenen technischen Geräte im Heimbereich. So könnte man zum Beispiel zum vorhandenen 5.1-System zusätzlich die zwei erhöhten Lautsprecher installieren und dann beide Formate wahlweise geniessen.<sup>3</sup>

Es heißt, die räumliche Abbildung bei Aufnahmen in diesem Format würde deutlich besser sein.

---

1 Vgl. Birkner, 2002, S. 66

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. Birkner, 2002, S. 67

### 4.3 Tetraphonie

Eine weitere interessante Versuchsanordnung ist die Tetraphonie, entwickelt von Gerhard Woywod. Vier Mikrofone beziehungsweise Lautsprecher bilden eine dreiseitige Pyramide, also ein Tetraeder. Der vierte Lautsprecher über dem Kopf baut die dritte Dimension auf und führt laut den Aussagen von Versuchspersonen zu einer verblüffend realistischen Abbildung.<sup>1</sup> Hier stehen nun 6 Stereobasen zur Verfügung, die einem Mixing Engineer sicher viel Spass bereiten könnten. Doch bleibt dieses Verfahren wohl der Wiedergabe von entsprechendem Tonmaterial vorbehalten, da es experimenteller Natur ist und keine Schnittstelle zwischen Audio Workstation und Lautsprechersystem vertrieben wird.

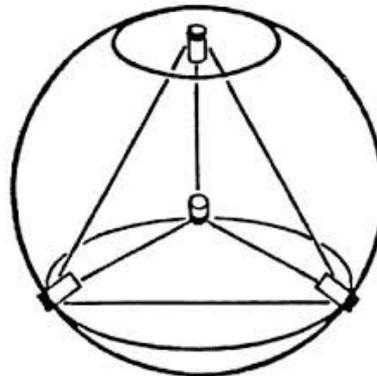


Abb. 13: Mikrofon- und Lautsprecheranordnung in der Tetraphonie

<sup>1</sup> Vgl. Selig, [www.tetraphonie.de](http://www.tetraphonie.de)

## 5. Die Wellenfeldsynthese

In den späten 1980er Jahren wurde an der niederländischen TU Delft begonnen, intensiv an einem sehr bemerkenswerten Konzept zu arbeiten: die Wellenfeldsynthese, oder auch als Wellenfrontsynthese bezeichnet.

Diese nimmt eine etwas gesonderte Rolle ein. Daher wird ihr ein eigenes Kapitel gewidmet. Sie sollte durchaus als Wegweiser betrachtet werden, doch wurde Klangmaterial aufgrund des sehr hohen Aufwandes bisher „nur“ zweidimensional wiedergegeben. So ist sie in dem Sinne kein wirklicher Wegweiser in die dritte Dimension, auch wenn theoretisch eine dreidimensionale Anordnung denkbar wäre. Allerdings würde dies enorm hohe Rechenleistung erfordern und erheblichen materiellen Aufwand bedeuten.

Die wegweisende Wirkung liegt vielmehr darin, dass hier nun das objektbasierte Prinzip zur Verteilung von Schallquellen im Raum genutzt wurde. Die Signale werden nicht (zu gewissen Anteilen) Kanälen zugewiesen, sondern mit Koordinaten versehen. Ein Computersystem errechnet dann, welche Lautsprecherkanäle genutzt werden müssen.

### 5.1 Funktionsweise

Der entscheidende Punkt ist jedoch der Fakt, dass nicht, wie bei der Stereophonie, mit dem Konzept der Phantomschallquellenlokalisierung gearbeitet wird,<sup>1</sup> sondern virtuelle Schallquellen und Räume erzeugt werden.<sup>2</sup> Die Positionierung und Lokalisierung wird nicht über künstlich erzeugte Pegel- und Laufzeitdifferenzen realisiert, sondern erfolgt, wie bei der Wahrnehmung realer Schallquellen, über die Auswertung der Pegel- und Laufzeitdifferenzen der, an den beiden Ohren eintreffenden, Wellenfronten.

---

1 Vgl. Görne, 2008, S. 299

2 Vgl. Birkner, 2002, S. 65

Diesem zugrunde liegt das Huygens'sche Prinzip, welches besagt, dass eine Wellenfront in sogenannte Elementarwellen zerlegt werden kann<sup>1</sup>. Daraus folgt die Möglichkeit, mit Hilfe vieler Elementarwellen wiederum eine Wellenfront zu bilden. Nichts anderes passiert in der Wellenfrontsynthese. Verwendet werden viele Lautsprecher, die, jeder für sich, einen Punkt darstellen, von dem eine Elementarwelle ausgeht. Ein Computersystem errechnet, wann welcher Lautsprecher welches Signal ausgibt, um die gewünschte Wellenfront zu erzeugen. Wichtig ist dabei, dass die Wellenlänge größer als der Abstand zwischen zwei benachbarten Lautsprechern ist!



Abb. 14: Elementarwellen bilden eine Wellenfront



Abb. 15: Lautsprecherzeile (Line Array) eines Wellenfeldsynthese-Systems

In der Praxis bedeutet dies einen enormen Aufwand. Benötigt werden sehr viele kleine Lautsprecher, typischerweise über einhundert<sup>2</sup>, die nebeneinander als Line Arrays rundum, entweder im Rechteck oder im Kreis, angeordnet werden.

<sup>1</sup> Vgl. Görne, 2008, S. 299

<sup>2</sup> Vgl. ebd.



Abb. 16: Wellenfeldsynthese-Labor (mit 3D-Erweiterung)

## 5.2 Vorteile

Einer der größten der resultierenden Vorteile ist die Möglichkeit, Schallquellen nicht nur hinter der Lautsprecherebene, sondern auch davor, also im Hörraum, abzubilden.<sup>1</sup> Klänge werden nun als Objekte angesehen, denen Koordinaten zugewiesen werden können, welche also in, oder außerhalb des Hörraumes liegen. Diese Koordinaten können statisch sein oder sich ändern, was eine Bewegung der virtuellen Schallquelle durch den Raum bedeuten würde!

Ein weiterer Punkt ist die Abbildung verschiedener Räume. Bei optimaler Umsetzung kann jede beliebige akustische Umgebung simuliert werden<sup>2</sup>. Sei es nun ein bereits existierender Opernsaal, der mit Hilfe von Impulsantworten, welche mit dem Klangmaterial gefaltet werden, nachgebildet wird, oder ein fiktiver Raum, dessen Simulation einem Architekten helfen soll, das Klangverhalten im Voraus einzuschätzen. Hierfür werden dem System Parameter wie Ausmaße und Beschaffenheit eingegeben.

Ein anderer Vorteil ist die gute Lokalisation. Einen Sweet Spot, wie in der Stereophonie, gibt es nicht. Der Hörer kann sich im Hörraum (mit gewissen Einschränkungen) bewegen und nimmt die Schallquelle immer vom gleichen Ort kommend wahr. Man kann sich sogar durch verschiedene Schallquellen hindurch bewegen, gerade so, als wäre man auf der Bühne Live dabei.

Aus all diesen Gründen wird die Wellenfeldsynthese oft auch als Holophonie bezeichnet.<sup>3</sup>

Da es möglich ist, virtuelle Schallquellen zu erzeugen, ist die Wellenfeldsynthese praktisch zu jeder beliebigen zweidimensionalen Mehrkanal-Anordnung kompatibel!

---

1 Vgl. Görne, 2008, S. 300

2 Vgl. Birkner, 2002, S. 65

3 Vgl. Görne, 2008, S. 299

### 5.3 Probleme

Das Hauptproblem ist der große Aufwand. Mit höherem Aufwand könnten die meisten anderen Probleme gelöst werden, doch dem sind Grenzen gesetzt.

Da, zum Beispiel, mit horizontalen Line Arrays die Synthese auf die Horizontalebene beschränkt ist, werden Zylinderwellen erzeugt<sup>1</sup>. Es gilt das -3-dB-Abstandsgesetz, das heißt der Pegel der Wellenfront nimmt pro Entfernungsverdopplung um 3 dB ab,<sup>2</sup> da sich die Schallenergie im Raum verteilen kann. Sie wird also, einfach gesagt, schneller leiser als eine echte ebene Welle. Dieses Problem könnte man minimieren, indem man über und unter dem Array weitere Arrays installiert. Doch steigert sich der materielle Aufwand dann schnell ins Unermessliche!

Eine weitere Problematik tritt auf, wenn die Wellenlänge klein wird, gegen den Abstand zwischen den Lautsprechern. Das führt zur Bildung vieler, sich überlagernder Wellenfronten und damit zu einer räumlichen Mehrdeutigkeit (engl. spatial aliasing).<sup>3</sup> Um dem entgegen zu wirken, sollte man also sehr viele kleine, jedoch leistungsstarke Hochtöner verwenden, was wiederum den Aufwand steigert.

Außerdem sollten mögliche Wandreflexionen, welche die Wellenfrontsynthese erheblich beeinträchtigen können, bedacht werden.<sup>4</sup> Steht kein reflexionsarmer oder schalltoter Raum zur Verfügung, besteht jedoch die Möglichkeit die Wandreflexionen bei der Berechnung der Wellenfeldsynthese-Signale zu kompensieren.<sup>5</sup>

---

1 Vgl. Görne, 2008, S. 300

2 Vgl. Görne, 2008, S. 36

3 Vgl. Görne, 2008, S. 300

4 Vgl. ebd.

5 Vgl. ebd.

## 6. Konzepte der Zukunft (?)

### 6.1 Binaural Sky

„Binaural Sky“ ist der Name einer Technologie, die am „Institut für Rundfunktechnik“ unter der Leitung von Dr.-Ing. Günther Theile entwickelt wurde. Sie baut auf die Prinzipien der Wellenfeldsynthese und der „Binauralen Raumsynthese“ auf und ist ein System, mit dem es möglich ist, virtuelle Schallquellen in virtuellen Räumen zu erzeugen. Es werden weder Kopfhörer verwendet, noch Lautsprecher im Sichtfeld aufgestellt. Hier formt sich der Begriff der virtuellen Akustik.

#### 6.1.1 BRS – Binaurale Raumsynthese

Am Anfang dieses Konzepts stand die sogenannte „Binaurale Raumsynthese“, welches ebenfalls vom Institut für Rundfunktechnik entwickelt wurde. Es handelt sich um die Simulation von realen Räumen und Lautsprecher-Anordnungen per Kopfhörerwiedergabe. Realisiert wird dies durch die digitale Faltung\* des Signals mit Raum-Impulsantworten, die für jeden Lautsprecher der gewünschten Anordnung mit einem Kunstkopfmikrofon aufgenommen wurden.<sup>1</sup> Dies wird viele Male wiederholt, den Kunstkopf jeweils um einige Grad gedreht. Auf diese Weise entsteht ein Datensatz, mit dessen Hilfe es möglich ist, unter Kopfhörern einen virtuellen Raum wahrzunehmen, unter Berücksichtigung der Ausrichtung des Kopfes. Ein Headtracking-System am Kopf des Hörers ermittelt die Kopfausrichtung und übermittelt diese an das Computersystem, welches daraufhin die entsprechenden Impulsantworten zur Faltung heranzieht.<sup>2</sup> Säße man, zum Beispiel, im Sweet Spot einer 5.1-Anordnung und würde sich dann um 180° drehen, würde man die Surround-Lautsprecher (mehr oder weniger unbewusst) anders wahrnehmen, da, beispielsweise, hohe Fre-

---

\* Faltung hier zu erläutern, würde den Rahmen sprengen. Es reicht wohl, zu sagen, dass das ein Berechnungs-Algorithmus ist, mit dem es möglich ist Abbilder (Impulsantworten) auf ein Audiosignal zu rechnen. Oftmals z.B. für digitale Hallgeräte verwendet. Vgl. Görne, 2008, S. 133

1 Vgl. Dr.-Ing. Theile, 2007, S. 1

2 Vgl. ebd.

quenzen in den Ohrmuscheln nun anders reflektiert werden, was leichte, spektrale Veränderungen verursacht (eine andere HRTF). Mit Hilfe der binauralen Raumsynthese kann dies nun unter Kopfhörern simuliert werden.

Die Vorteile dieser Technik liegen auf der Hand. Mit einem Datensatz von Impulsantworten eines akustisch optimalen Studios mit einer 5.1-Anordnung, könnte man an Orten, an denen so etwas nicht realisierbar ist, wie ,zu Beispiel, in einem Rundfunk-Übertragungswagen, jederzeit eine Surround-Mischung erstellen. Der Misch-Tonmeister trägt dann Kopfhörer, nimmt aber die Akustik des 5.1-Studios war.

### 6.1.2 Virtuelle Kopfhörer

Das BRS-Prinzip funktioniert, soweit möglichst hochwertige Kopfhörer mit einem linearen Frequenzgang genutzt werden, recht gut. Möchte man allerdings, aus welchen Gründen auch immer, Lautsprecher anstatt der Kopfhörer nutzen, treten Probleme auf, welche auf psychoakustische Vorgänge der Richtungswahrnehmung zurückzuführen sind.

Es ist zu beachten, dass es sich um Kunstkopfsignale handelt. Es sind also bereits Außenohr-Übertragungsfunktionen in das Signal integriert (binaurale Signale). Dies führt zu einer räumlichen Wahrnehmung und stellt auch den Vorteil der Kunstkopfstereofonie dar. Das heißt aber auch , dass diese Signale auf dem Weg vom Mikrofon bis zum Trommelfell spektral nicht verändert werden dürfen. Anderenfalls könnte es zu Fehlinterpretationen kommen. Kopfhörer gewährleisten dies weitestgehend. Bei der Lautsprecherwiedergabe wird es, wie gesagt, komplizierter.

Zum einen es kommt zum Übersprechen der Signale zum jeweils gegenüber liegenden Ohr. Das rechte binaurale Signal der Kunstkopfaufnahme sollte eigentlich nur vom rechten Ohr wahrgenommen werden. Genauso anders herum. Dies umgeht man mit Hilfe eines sogenannten „Crosstalk-Constellation-Filters“, welches das Übersprechen an den Ohren

kompensiert.<sup>1</sup>

Da der Schall nicht, wie mit Kopfhörern, am Trommelfell anliegt, sondern einen Weg durch den Raum zurück legt, entstehen wiederum Außenohr-Übertragungs-Funktionen, je nach Stellung des Kopfes.

Fällt der Schall aus der Blickrichtung ( $0^\circ$ ) ein, greift das Crosstalk-Constellation-Filter. Dies ist jedoch selten der Fall, und somit weisen die zwei Signale immer spektrale Unterschiede auf, welche vom Gehirn zur Richtungsbestimmung ausgewertet werden.<sup>2</sup> Möchte man also Lautsprecher statt der Kopfhörer verwenden, wäre man auf eine feste Kopfposition und -ausrichtung beschränkt,

Deshalb wurde nun versucht, HRTF-Invers-Filter vorzuschalten, die, je nach Position des Kopfes, die entstandenen HRTF kompensieren. Dafür wurde wiederum ein Headtracking-System eingesetzt, um dem Computer mitzuteilen, in welcher Stellung sich der Kopf befindet.<sup>3</sup>

Doch die praktische Umsetzung dieses Ansatzes bringt einige technische Schwierigkeiten mit, die sich in wahrnehmbaren Beeinträchtigungen der Klangfarbe und Abbildungsschärfe äußern.<sup>4</sup>

Mit Hilfe der Wellenfeldsynthese lassen sich diese Probleme umgehen, indem sogenannte „fokussierte Schallquellen“ (Fokusquellen) erzeugt werden.<sup>5</sup> Das sind virtuelle Schallquellen, die die Lautsprecher ersetzen und an einem beliebigen Ort in der Nähe des Hörortes platziert werden können. Dies wird über eine kreisrunde Lautsprecherzeile direkt über dem Hörerplatz realisiert.<sup>6</sup> Dreht der Hörer seinen Kopf, wird die virtuelle Schallquelle nun an einen anderen Ort bewegt, so dass das räumliche Verhältnis zwischen den Ohren und den

---

1 Vgl. Dr.-Ing. Theile, 2007, S. 2

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. ebd.

5 Vgl. Dr.-Ing. Theile, 2007, S. 3

6 Vgl. ebd.

Fokusquellen beibehalten wird.<sup>1</sup> Auch hier kommt wieder ein Headtracking-System zum Einsatz. Mit anderen Worten: die virtuellen Schallquellen bewegen sich analog zu den Bewegungen des Kopfes. Das führt dazu, dass die Einstellungen des HRTF-Invers-Filters nicht mehr dynamisch geändert werden müssen,<sup>2</sup> da nur noch eine Einstellung für die 0°-Ausrichtung benötigt wird.

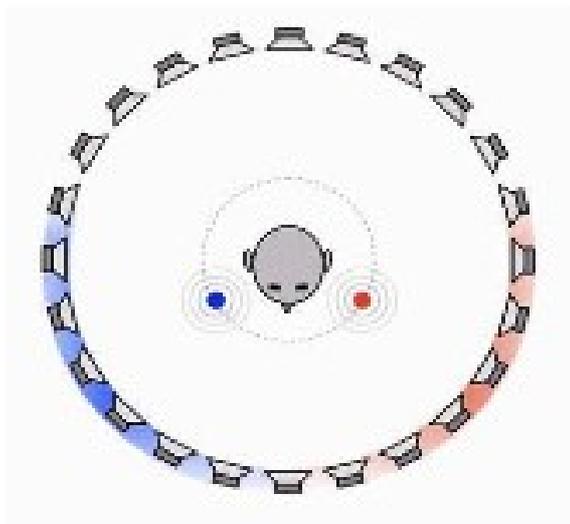


Abb. 17: Virtuelle Kopfhörer. Dreht sich der Kopf, bewegen sich die virtuellen Schallquellen mit.



Abb. 18: Binaural Sky - Versuchslabor

### 6.1.3 Binaural Sky

Die binaurale Raumsynthese und das Konzept des virtuellen Kopfhörers, werden nun vereint und bilden den „Binaural Sky“. Beide Systeme werden von den gleichen Headtracking-Daten gesteuert.<sup>3</sup> Es eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten zur Surround-Sound-Wiedergabe. Anordnungen aller Art in jedem beliebigen Raum können emuliert werden.

Hörversuche zeigten, dass die virtuellen Schallquellen sehr präzise wahrgenommen werden, vergleichbar mit echten Schallquellen.<sup>4</sup> Die Höhe der virtuellen Schallquellen wurde

1 Vgl. Dr.-Ing. Theile, 2007, S. 3

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. ebd.

um etwa 10° nach oben verschoben lokalisiert und auch die Klangfarbe wich leicht vom Original ab, was jedoch von den Versuchspersonen als „nicht störend“ eingestuft wurde. Entfernungswahrnehmungen waren überraschend korrekt und stabil und die virtuellen Kopfhörer saßen immer „fest am Ohr“.<sup>1</sup>

Denkbare Anwendungen finden sich im Bereich Computerspiel und „Augmented Reality“ (aufgesetzte Realität), aber auch in Autos oder im Heimkinobereich könnte sich, unter Umständen, eine Vermarktung entwickeln.<sup>2</sup>

---

1 Vgl. Dr.-Ing. Theile, 2007, S. 3/4

2 Vgl. Dr.-Ing. Theile, 2007, S. 4

## 6.2 Spatial Sound Wave

Dies ist ein Produkt des Fraunhofer-Instituts für digitale Medientechnologie und stellt ein dreidimensionales, skalierbares Beschallungs- und Produktionssystem dar, welches sich an räumliche Begebenheiten anpassen lässt, und den Sweet Spot zu einem großen Bereich ausdehnt.<sup>1</sup> Es wurde zur Wiedergabe objektbasierten Inhalts entwickelt, ist aber auch in der Lage kanalbasierte Formate wie 2-Kanal-Stereo oder 5.1 wiederzugeben.<sup>2</sup>

### 6.2.1 System

Herzstück der Anlage ist ein „PC-basierter Audio-Server auf Linux-Basis“,<sup>3</sup> welcher per MADI\* über RME-Soundkarten standardmäßig 32 Ein- und 64 Ausgangskanäle bereitstellt.<sup>4</sup> Neben der Rendering-Software ist die Steuerungsapplikation auf dem Rechner installiert. Diese wird mit dem sogenannten User Interface „SpaMix“ bedient. Zusätzlich stehen weitere Module zu Verfügung, wie das 3D-Modul zur Höhendarstellung oder das OSC\*\* Video Connection Modul zur Ankopplung an externe Videoquellen.<sup>5</sup>

Über die Digital-Analog-Wandler wird das System direkt an die Verstärker und Lautsprecher angeschlossen. Ein zusätzliches Lautsprecher-Management wird nicht benötigt, da das System entsprechende Filter mitbringt um diese Aufgabe zu übernehmen.<sup>6</sup>

Eingangsseitig werden 32 Inputs verarbeitet, welche über MADI beziehungsweise Analog-Digital-Wandler angeschlossen werden. Dies ermöglicht eine einfache Integration in jede beliebige Audioumgebung.<sup>7</sup>

---

1 Vgl. Fraunhofer IDMT, SpatialSound Wave, S. 2

2 Vgl. Fraunhofer IDMT, 2011, Referenz Zeiss Planetarium Jena, S.2

3 Fraunhofer IDMT, SpatialSound Wave, S. 3

\* Multi Channel Audio Digital Interface (MADI) ist eine digitale Schnittstelle zur mehrkanaligen [Audioübertragung](#)

4 Vgl. Fraunhofer IDMT, SpatialSound Wave, S. 3

\*\* Open Sound Control ist ein Kommunikationsprotokoll für die Echtzeitverarbeitung von Audio über Netze

5 Vgl. Fraunhofer IDMT, SpatialSound Wave, S. 3

6 Vgl. ebd.

7 Vgl. ebd.

### 6.2.2 Aufbau des SSW-Systems im Zeiss-Planetarium Jena

Im Zeiss-Planetarium in Jena wurden, zum Beispiel, 60 Lautsprecher in der Kuppel und 4 Subwoofer installiert, die alle einzeln ansteuerbar sind. Dabei bilden 36 Lautsprecher ein Ring in der Horizontalebene, während 23 Lautsprecher in der Kuppel rundum, auf unterschiedlichen Höhenniveaus, installiert wurden und einer im Zenit seinen Platz gefunden hat. Die 4 Subwoofer wurden in alle 4 Raumrichtungen verteilt, um die differenzierte Positionierung von Klangquellen mit Tieffrequenzanteil zu unterstützen.<sup>1</sup>

### 6.2.3 Funktionsweise

Wird nun Audiomaterial mit der Steuerungs-Software an bestimmten Koordinaten positioniert, errechnet das System, welche Lautsprecher des Lautsprechergitters genutzt werden müssen, um an entsprechender Stelle eine Phantomschallquelle zu erzeugen. Das ist ein objektbasiertes Prinzip, welches wir schon von der Wellenfeldsynthese kennen. Es ermöglicht die relativ exakte Positionierung von Schallquellen, unabhängig vom Ort des Hörers. Diese Schallquellen können statisch sein, oder auch bewegt werden. Und zwar sowohl automatisiert als auch in Echtzeit.<sup>2</sup>

---

1 Vgl. Fraunhofer IDMT, 2011, Referenz Zeiss Planetarium Jena, S.2

2 Vgl. Fraunhofer IDMT, SpatialSound Wave, S. 2

### 6.2.4 Vorteile

Dieses System ist extrem flexibel. Es ist nicht auf eine Lautsprecheranordnung beschränkt, sondern kann sich an jede räumliche Begebenheit anpassen lassen. Jede Anordnung lässt sich realisieren, mit oder ohne Abstrahlung aus der dritten Dimension, je nach Lautsprecher-Layout. Auch die Wahl der Audio-Schnittstellen ist frei und die Anzahl der Kanäle ist im Prinzip frei konfigurierbar, da es sich um einen Computer handelt, welcher modular aufgebaut und programmierbar ist. Mit einem Hardwaregerät ist man diesbezüglich eingeschränkt.

Der Sweet Spot dehnt sich mit diesem System zu einem großen Bereich und die Lokalisation in allen Richtungen verbessert sich erheblich. Die Lautsprecher über dem Hörer ermöglichen eine sehr realistische Abbildung einer realen Umgebung des Menschen, erlauben aber auch die Erschaffung künstlicher und effektvoller Audio-Szenarien.

Die Fähigkeit ebenfalls kanalbasiertes Material, wie 5.1, wiederzugeben führt zu einer Kompatibilität zu Klangmaterial anderer Formate hohen Ausmaßes.

All das macht die SpatialSound Wave zu einem vielfältig einsetzbaren System für Veranstaltungen und Festinstallationen aller Art<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Vgl. Fraunhofer IDMT, SpatialSound Wave, S. 3

### 6.3 Auro 3D

Auro 3D ist ein Konzept der Firma Auro Technologies, welches auf das Surround-Format 5.1 aufbaut und bereits für den Kino- und den Heimbereich zur Verfügung steht.<sup>1</sup> Derzeit (2013) sind bereits über 50 Säle mit einem Auro 3D-System ausgestattet. Auro Technologies hat die Abstrahlung von Schall aus der dritten Dimension fest in das System integriert. Es wird aus drei verschiedenen Höhenebenen Schall abgestrahlt. Dabei werden zwei 3/2-Anordnungen übereinander und ein Deckenkanal genutzt.<sup>2</sup> Es ist ein kanalbasiertes System und wird, je nach Ausmaß des Raumes, in verschiedenen Formaten installiert.<sup>3</sup>

#### 6.3.1 Aufbau

Unterschieden wird in zwei Größenordnungen. Die Formate Auro 9.1 und Auro 10.1 sind für eher kleine Räume, wie Heimkinos oder ähnliches, konzipiert worden. Auro 11.1 und Auro 13.1 sind für große Kinosäle gedacht.<sup>4</sup>

Grundlage ist eine 5.1-Anordnung nach ITU 755 in der Bodenebene. Vom Sweet Spot aus gesehen, beträgt der Höhenwinkel zu den Lautsprechern in der Höhenebene 30°. <sup>5</sup> Dort oben wird die gleiche Anordnung noch einmal installiert. Auro 9.1 verzichtet dabei auf den Centerkanal in der Höhenebene und den Deckenkanal. Auro 10.1 dagegen beinhaltet dann jedoch Letzteren.<sup>6</sup>

In den größeren Räumen wird dann mit Auro 11.1 ein Centerkanal in der Höhenebene hinzugefügt. Auro 13.1 bringt jeweils einen Center-Surroundkanal in der Boden- und in der Höhenebene mit. Die Surroundkanäle sind dann üblicherweise als Lautsprecherzeilen aus-

---

1 Vgl. <http://www.auro-technologies.com/professional/industries> (letzte Abfrage: 28.08.2013)

2 Vgl. <http://www.auro-technologies.com/system/concept> (letzte Abfrage: 28.08.2013)

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. ebd.

5 Vgl. Auro Technologies, 2011, Professional Workflow, S. 13

6 Vgl. <http://www.auro-technologies.com/system/concept> (letzte Abfrage: 28.08.2013)

geführt.<sup>1</sup>

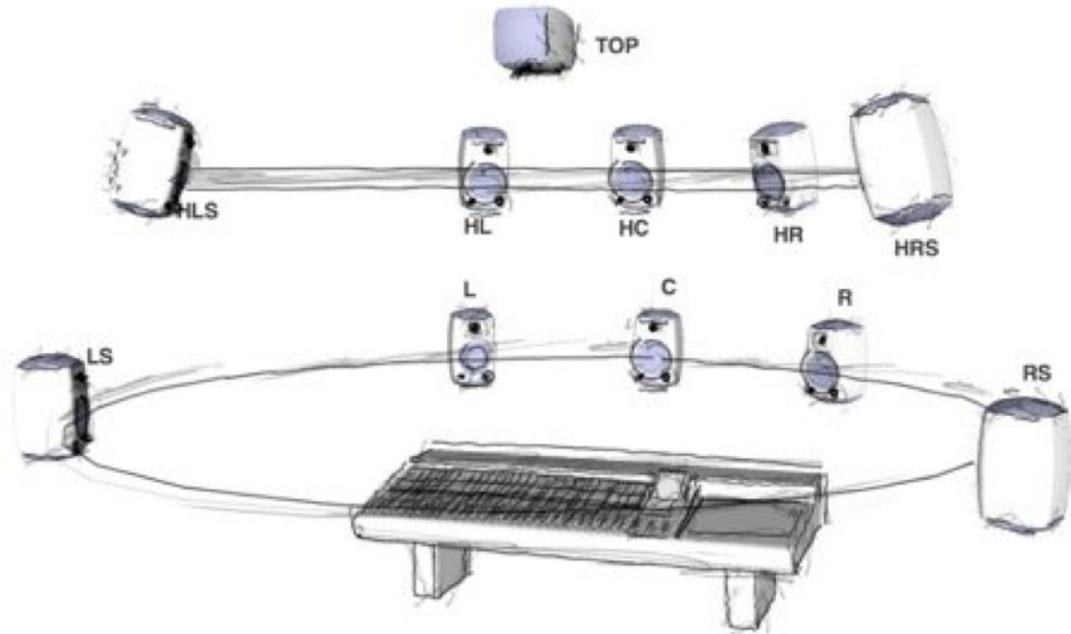


Abb. 19: Auro-3D Monitoring setup

### 6.3.2 Funktionsweise

Kern der Anlage ist die Auro-3D-Engine, welche nicht nur Auro-3D-codiertes Material auslesen, sondern auch Mono-, Stereo-, und 5.1-Surroundmaterial zu 3D-Audio transformieren kann. Dafür hat Auro Technologies einen Algorithmus entwickelt, der Auro-Matic genannt wird und in die Auro-3D-Engine integriert ist. Das Gerät steuert dann das Lautsprechersystem, stellt aber auch ein Signal für Kopfhörer bereit, welches, laut Hersteller, die gleiche 3D-Erfahrung mit sich bringt.<sup>2</sup>

Um Abwärtskompatibilität zu gewährleisten, hat Auro Technologies einen speziellen Codec, genannt Octopus, entwickelt, der es ermöglicht, Mehrkanal-Audio in eine PCM\*-Datei mit weniger Kanälen zu codieren.<sup>3</sup> So besteht eine Auro 3D-Master-Datei aus einer 5.1-P-

1 Vgl. ebd.

2 Vgl. <http://www.auro-technologies.com/system/concept> (letzte Abfrage: 28.08.2013)

\* PCM

3 Vgl. Auro Technologies, 2011, Octopus, S. 2

CM-Datei, in der, zum Beispiel, eine Auro 3D 11.1 codiert ist.<sup>1</sup> Dies erfolgt, so Auro Technologies, ohne klangliche Einbußen und bietet beste Audioqualität.<sup>2</sup>

Mit Hilfe des Auro-Codec-Plug-Ins ist es möglich, 5.1-Mischungen und Mischungen der anderen Auro-3D-Formate parallel zu mischen, was Zeit spart und die Möglichkeit bietet, während des Mischens einer Auro 11.1-Version, die 5.1-Version abzuhören und optimal anzupassen.<sup>3</sup> In der Auro-3D Creative Tool Suite ebenfalls enthalten sind die Plug-Ins Auro-Panner, der Auro-Verb und Auro-Matic-Pro. Letzteres dient zur Aufarbeitung von komplexem Audiomaterial zu Auro-3D-Material.<sup>4</sup>

Erstellt werden zwei verschiedene Versionen des 5.1-Masters. Eine mit dem Kino-Master-Encoder für die Kinos mit den codierten Auro 11.1 oder 13.1-Mischungen, und eine mit dem Konsumenten-Master-Encoder für DVD und BlueRay, in der dann eine Auro 9.1-Mischung verpackt ist.<sup>5</sup>

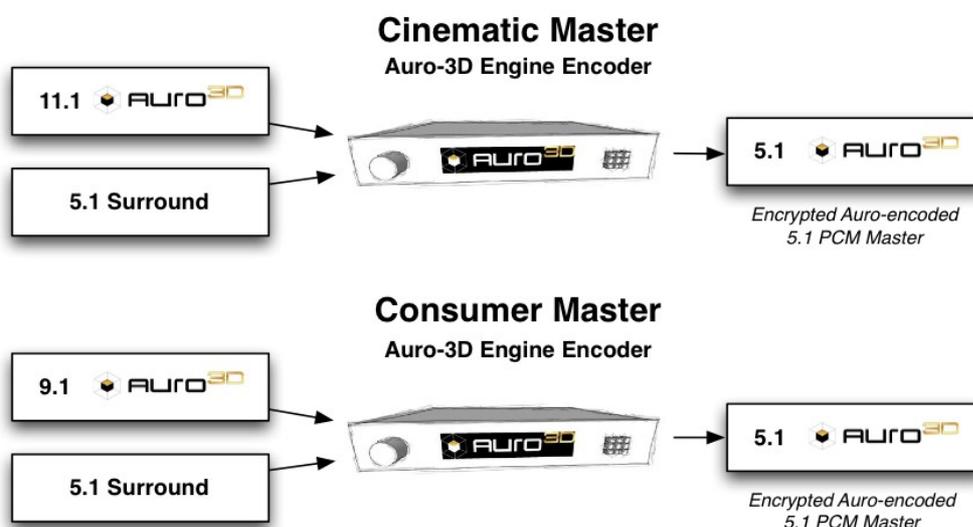


Abb. 20: Auro-3D Encoding mit dem Auro-3D-Encoder (Hardware oder Plugin)

Zum abspielen dieser Auro 5.1-Master-Datei ist es nicht zwingend erforderlich, einen Auro-3D Decoder zu verwenden. Andere Geräte erkennen schlicht die 5.1-Mischung und

1 Vgl. Auro Technologies, 2011, Professional Workflow, S. 15

2 Vgl. <http://www.auro-technologies.com/system/concept> (letzte Abfrage: 28.08.2013)

3 Vgl. Auro Technologies, 2011, Professional Workflow, S. 10

4 Vgl. <http://www.auro-technologies.com/professional/creative-tools>

5 Vgl. Auro Technologies, 2011, Professional Workflow, S. 15

spielen diese ab.<sup>1</sup>



Abb. 21: Auro-codierter PCM Stream mit und ohne Decoding

### 6.3.3 Vorteile

Der größte Vorteil dieses Systems ist die Abwärtskompatibilität zu dem im Heimbereich vorherrschenden Standard 5.1 und zu allen anderen Decodern und Geräten, die fähig sind 5.1 zu lesen. Das schließt so ziemlich alle Geräte ein, die derzeit in Gebrauch sind. Das heißt, es wird ein Produkt vertrieben, und jeder bekommt das, was er braucht, je nach dem welches System installiert ist.

Ein weiterer Punkt ist die einfache Integration in die üblichen Produktionsabläufe, ein entsprechendes Monitor-Set Up vorausgesetzt. Mit den mitgelieferten PlugIns ist es schon mit einer handelsüblichen DAW\*, wie ProTools oder ähnlichem, möglich, Auro-3D-Mischungen zu erstellen.<sup>2</sup>

Der Deckenkanal ermöglicht eine Positionierung einer Schallquelle über den Zuschauern. Und die Lautsprecher in der Höhenebene ermöglichen eine verbesserte Höhenabbildung in den Surround-Zonen und eine enorm präzise Lokalisation auf der Leinwand. Horizontal und vertikal!

Der neu entwickelte Codec Octopus, der quasi komplexe Formate in Dateien für kleinere

<sup>1</sup> Vgl. Auro Technologies, 2011, Professional Workflow, S. 15

\* Digital Audio Workstation

<sup>2</sup> Vgl. Auro Technologies, 2011, Professional Workflow, S. 15

Formate verstecken kann, ohne dass weder das eine, noch das andere Format in der Klangqualität leidet, und ohne, dass die Datei enorm anwächst, stellt eine Vereinfachung in den Vertriebsprozessen dar.

Der Konsument im Heimbereich bekommt ein System, welches einfach zu installieren ist und keinen großen Materialaufwand mit sich bringt.

Auch die Integration des Auro-Matic und des Auro-3D Headphones-Modul in die Auro-3D-Engine ist hier zu erwähnen. Denn auch wenn kein Auro-3D-Materiel vorliegt, kann man so in den Genuss eines dreidimensionalen Klangerlebnisses kommen.

## 6.4 Dolby Atmos

Dolby Atmos ist die Bezeichnung für das neuste Kinobeschallungssystem von den Dolby Laboratories, welches seit 2012 vertrieben wird und derzeit (2013) Einzug in immer mehr Kinos in der ganzen Welt hält. Man kann davon ausgehen, dass dies der Kinostandard der nächsten Jahre sein wird, denn die räumliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Systemen ist beachtenswert!

Dolby setzt mit diesem System auf die Kombination von Fortschritt und Altbewehrtem. Auch Atmos ist 100 % kompatibel mit dem aktuellen DCP – Standard: Ein DCP mit einer Atmosmischung verfügt immer auch über eine reguläre 5.1 oder 7.1 Tonspur, somit kann das selbe DCP sowohl in Atmos-Kinos als auch in herkömmlichen Kino-Sälen wiedergegeben werden. Dies reduziert den Distributionsaufwand.<sup>1</sup>

### 6.4.1 Funktionsweise

Man kann Dolby Atmos als (sehr umfassende) Erweiterung von Dolby Surround 7.1 verstehen. Das 3/4/1 Konzept dient als Grundlage. Die zwei neuen und entscheidenden Elemente sind zum einen zusätzliche Lautsprecherzeilen, die von oben, also aus der dritten Dimension, abstrahlen.<sup>2</sup> Zum anderen werden zusätzliche Surround-Lautsprecher bis vor zur Leinwand installiert. Es gibt insgesamt bis zu 64 Lautsprecherkanäle,<sup>3</sup> die einzeln angesteuert werden können.<sup>4</sup>

---

1 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 6

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 9

4 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 8

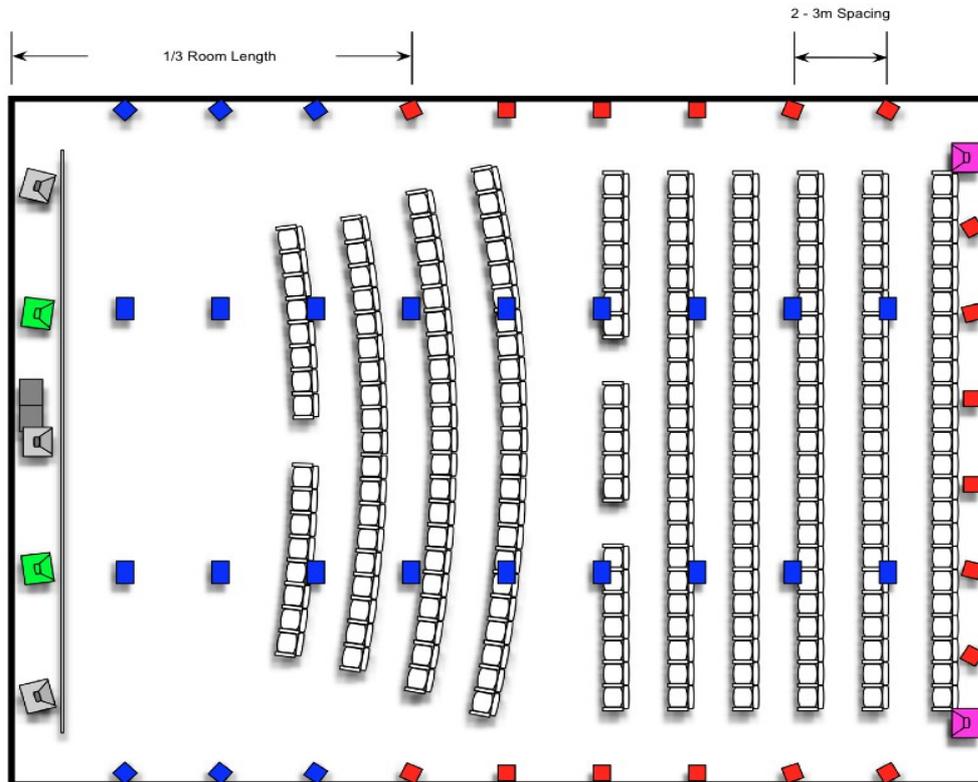


Abb. 22: Ein Dolby Atmos-Kinosaal von oben. Die roten und grauen Lautsprecher stellen den herkömmlichen 7.1-Aufbau dar.

Das System ist skalierbar.<sup>1</sup> Vor der Installation wird entschieden, wie viele Lautsprecher in dem jeweiligen Saal benötigt werden, um die Atmos-Spezifikationen zu erfüllen. Dann wird die benötigte Anzahl Lautsprecher installiert. Das System kann also an jeden Saal angepasst werden.

Für die Tonmischung wurde ein Hybridkonzept herangezogen. Ein Teil der Mischung wird in einem Format gemischt, das an 7.1 angelehnt ist. Zusätzlich gibt es 2 Deckenlautsprecher-Kanäle, welche dann mit den 7.1 Kanälen das sogenannte „9.1 Bed“ bilden.<sup>2</sup> Dialoge, Hallsignale, die meisten Atmosphären und einen Großteil der Musik können damit schon sehr gut umgesetzt werden.<sup>3</sup> Klänge, die sich durch den Raum bewegen oder eine exakte Position im Raum einnehmen sollen, werden dann als „Objekte“ bezeichnet.<sup>4</sup> Diese stellen

1 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S.18

2 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 9

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 8

gemeinsam den zweiten Teil der Atmos-Mischung da. Dadurch ist das System in der Lage 5.1, 7.1 und andere ältere Formate abzuspielen, da ein 7.1-System integriert ist.<sup>1</sup> Außerdem erfordert es somit keine große Umstellung für den Misch-Tonmeister.

Die Audiodaten der Objekte und „9.1-Beds“ werden gemeinsam mit den Metadaten, die Informationen über Positionen und Zeitpunkt der Objekte enthalten,<sup>2</sup> zu einem „Print Master“ zusammengefasst. Dieser enthält dann einen Dolby Atmos-Mix und weitere Mischungen für andere Dolby Surround-Formate, wie 7.1 oder 5.1. Diese „Print Master“-Datei wird dann zur Auslieferung an die Kinos in einem DCP\* (digital cinema package) verpackt.<sup>3</sup>

Im Kino wird dann das DCP über den hauseigenen Kino-Server zum „Dolby Atmos Cinema Processor CP850“ gestreamt, welcher die Daten dann decodiert und rendert.<sup>4</sup> Die Signale der „Beds“ werden an die Kanäle der entsprechenden Surround-Zonen geleitet und die Lautsprecher der zuständigen Arrays mit den nötigen Delays versehen. Die Audiodaten der Objekte und ihre Metadaten werden ausgelesen und, den in den Metadaten enthaltenen Koordinaten entsprechend, „in den Raum gerendert“. Dabei passt sich der CP850 an das vor Ort installierte Lautsprecher-System an. Das heißt, die Audiodaten werden nicht schon während des Misch-Vorganges an konkrete Kanäle geschickt, sondern erstmal nur an Koordinaten gebunden. Der Prozessor errechnet dann vor Ort, während der Wiedergabe, welche Lautsprecher genutzt werden.<sup>5</sup>

---

1 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 9

2 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 8

\* DCP

3 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 11

4 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 17

5 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 8

### 6.4.2 Aufbau

Da nicht jeder Kinosaal wie der andere ist, ist Dolby Atmos so konzipiert worden, dass es sich an jeden Kinosaal und an jedes zur Verfügung stehende Budget anpassen kann. Damit trotzdem in jedem der Säle die Performance die gleiche ist, gibt es einige Empfehlungen den Aufbau des Systems betreffend. Auch wenn es mit Dolby Atmos eine sehr große optimale Hörzone gibt, gibt es einen Punkt im Saal, der quasi den Sweet Spot darstellt. Dies ist die Referenzposition, auf die die Lautsprecher ausgerichtet werden und an dem im Mischatlier (ein Kinosaal, in dem die Endmischung bearbeitet wird) der Misch-Tonmeister seinen Arbeitsplatz hat. Dieser Punkt liegt auf der Mittellinie des Raumes, zwei Drittel des Weges von der Leinwand aus Richtung Rückwand.<sup>1</sup>

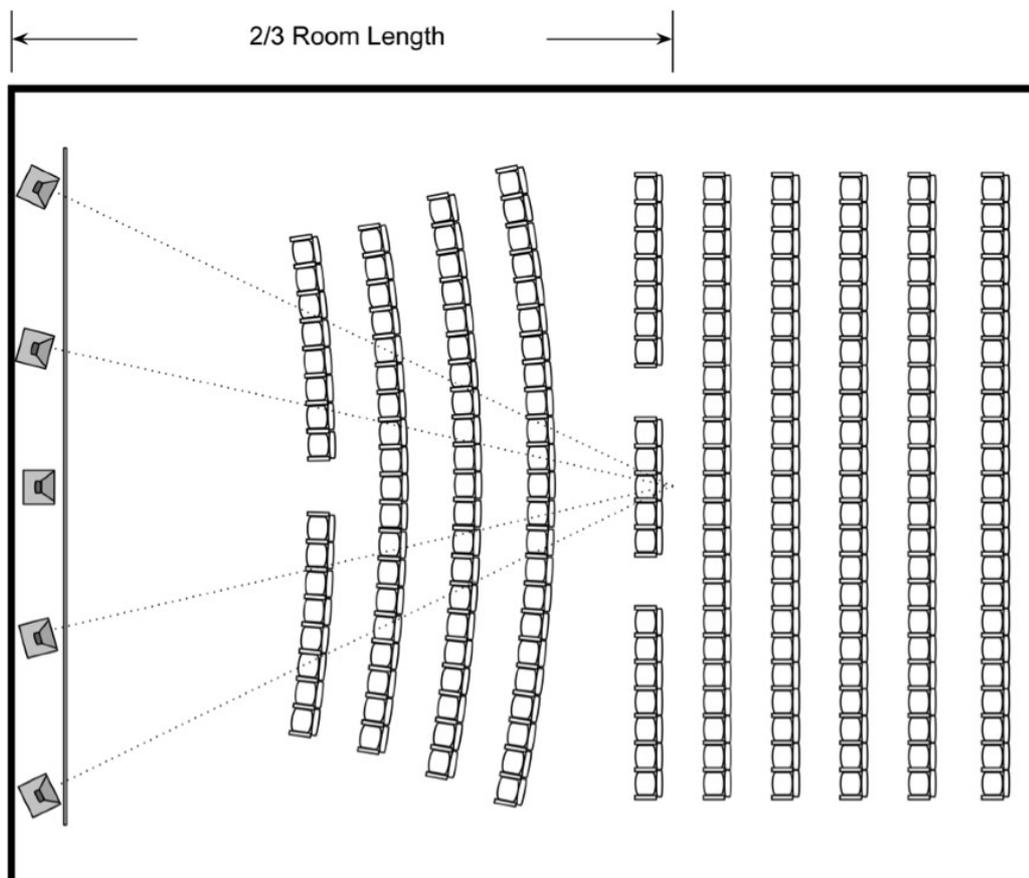


Abb. 23: Referenzposition ("Sweet Spot") in einem Dolby Atmos-Saal

<sup>1</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 18

Wie man es schon aus dem 7.1-Format 5/2/1 kennt, werden weitere Frontlautsprecher, also linker und rechter Centerkanal, installiert. Diese sind nicht zwingend erforderlich, doch sie werden ab einem Leinwand-Ausmaß von über 12 m ausdrücklich empfohlen. Die Front-Lautsprecher werden alle auf die Referenzposition ausgerichtet.<sup>1</sup>

Außerdem wird ebenfalls hinter der Leinwand ein Basslautsprecher aufgestellt, so wie man es schon von den herkömmlichen Beschallungssystemen in den Kinos kennt.<sup>2</sup> Zusätzlich werden nun zwei zusätzliche Basslautsprecher in den hinteren Ecken des Raumes aufgestellt, welche die tiefen Frequenzen aller linken, beziehungsweise rechten, Surroundlautsprecher übernehmen, damit auch in den Surround-Zonen das volle Frequenzspektrum abgebildet werden kann.<sup>3</sup>

Die Surround-Lautsprecher sollten in der Lage sein, einen sehr hohen Schalldruckpegel zu erzeugen. Diese Leistung wird nicht auf Dauer gebraucht. Doch denkbar wäre, zum Beispiel, eine Action-Szene, in der nicht nur Musik, sondern auch die Geräusche eines Kampfes, oder ähnliches, zu hören sind. Soll nun ein einzelnes Geräusch genau positioniert werden, wird es als Objekt einem Lautsprecher zugewiesen. Dieser Lautsprecher muss sich nun gegen die gesamte Anlage durchsetzen. Es sollte möglichst das gesamte Spektrum linear wiedergegeben werden und eine möglichst komplette Abdeckung des Zuschauerbereichs gegeben sein.<sup>4</sup>

Der Abstand zwischen zwei Lautsprechern beträgt zwischen 2 – 3 m und die Anordnung sollte auf jeden Fall symmetrisch sein. Die Distanz ergibt sich aus einer Vorgabe in Bezug auf den Winkel zwischen zwei nebeneinander liegenden Lautsprechern. Der zentral Hörbereich, gewissermaßen die „Sweet Area“, beginnt ein Viertel der Raumbreite von den Wänden entfernt. Von seiner Kante aus zu den Lautsprechern blickend, sollte der Winkel zwischen den Blicklinien zu zwei benachbarten Lautsprechern höchstens 30° betragen, um eine optimale Wiedergabe zu gewährleisten. Doch auch bei Winkeln von bis zu 50° sind

---

1 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 19

2 Vgl. ebd.

3 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 18

4 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 20

noch gute Ergebnisse möglich.<sup>1</sup> Grundsätzlich gilt, je kleiner der Winkel und damit der Abstand desto besser die Lokalisation.

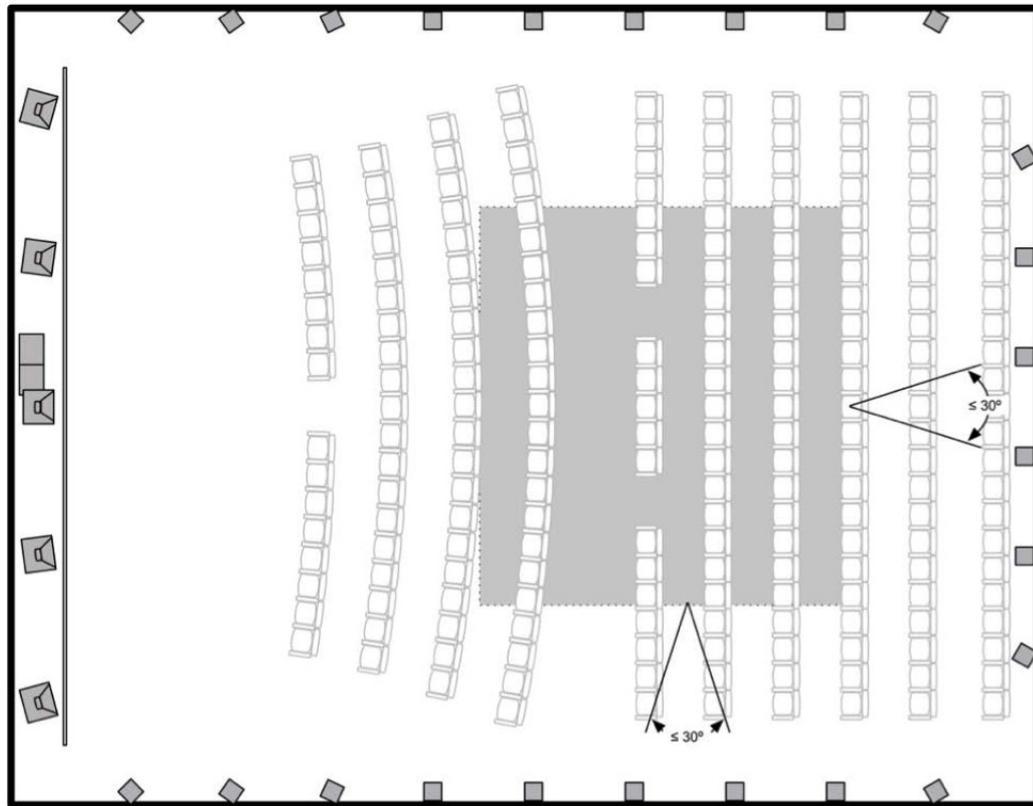


Abb. 24: Vom Rand der "Sweet Area" aus sollte der Winkel zwischen den BlickRichtungen 30° betragen

Bei den früheren Surround-Formaten wurden die Lautsprecher links und rechts ab einem Punkt, ein Drittel der Raumlänge von der Leinwand Richtung Rückwand gesehen, montiert. Die Lücke zwischen der Leinwand und der Surround-Zone wird bei Dolby Atmos nun gefüllt, damit sich bewegende Objekte von vorne nach hinten eindeutiger und schärfer lokalisiert werden können (siehe Abb. 22).<sup>2</sup>

Vorne sollten die Seitenlautsprecher möglichst in der gleichen Höhe wie die Leinwandlautsprecher montiert sein, dabei aber trotzdem den gesamten Zuschauerbereich beschallen können. Steigt nun die Höhe der Sitzposition nach hinten hin an, wie es in den meisten Kinos der Fall ist, sollten die Lautsprecher dieser Steigerung nach hinten hin folgen, sodass

<sup>1</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 20

<sup>2</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 21

der vertikale Abstand zu den Sitzen immer der gleiche ist.

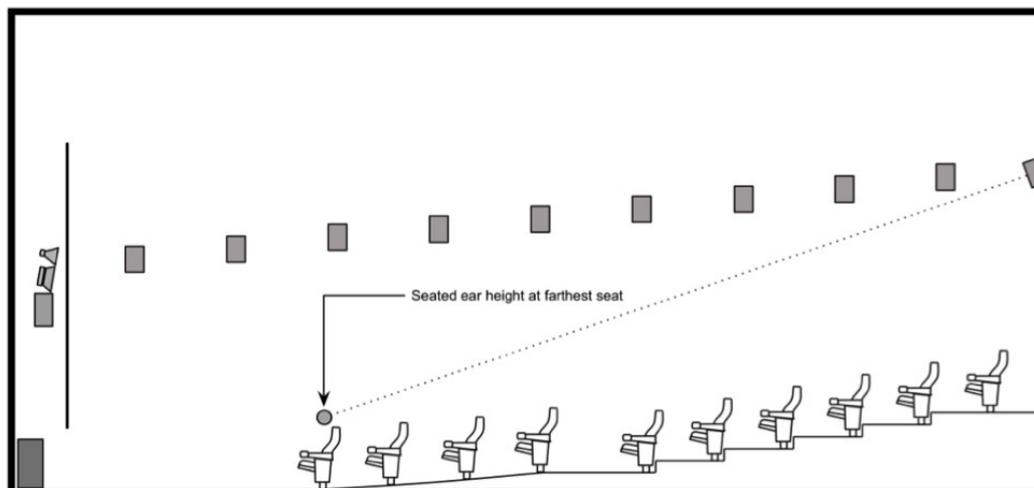


Abb. 25: Die Höhe der Lautsprecher richtet sich nach der Steigung der Zuschauersitze

Um sicher zu stellen, dass jeder Lautsprecher den gesamten Zuschauerbereich beschallt, werden sie wie folgt ausgerichtet. Vertikal werden sie leicht nach unten, auf den letzten Sitz auf der gegenüber liegenden Seite zeigend, ausgerichtet. Meist sind das circa  $20^\circ$ . Horizontal werden sie auf die Referenzposition ausgerichtet. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass keiner der vorderen Lautsprecher mehr als  $45^\circ$  aus der  $0^\circ$ -Positionen heraus gedreht wird. Lautsprecher neben den Sitzen sollten  $30^\circ$  nicht übersteigen, und direkt neben der „Sweet Area“ bleiben die Lautsprecher bei  $0^\circ$ .<sup>1</sup>

Für die Surround-Lautsprecher an der Rückwand des Kinosaales, gelten größtenteils die gleichen Vorgaben. Unter Umständen ist es nötig, die Dichte der Lautsprecher im Vergleich zu den Seiten etwas zu erhöhen, um die Vorgaben die Winkel betreffend einhalten zu können. Ausgerichtet werden sie auf den Sitz in der ersten Reihe, der auf der Mittellinie des Raumes liegt.<sup>2</sup>

In einem üblichen Kinosaal, in dem die Leinwand bis zur Decke und bis an die Wände reicht, liegen die Lautsprecherzeilen an der Decke jeweils auf einer Linie mit dem linken oder rechten Center-Lautsprecher. Ist der Zuschauerraum erheblich breiter oder höher als

<sup>1</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 21/22

<sup>2</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 22

die Leinwand, sollte man vielleicht die Lautsprecherzeilen etwas zu den Seiten verschieben. Wie weit sie verschoben werden ergibt sich aus den folgenden Vorgaben. Der Höhenwinkel von der Referenzposition zu den Deckenlautsprechern sollte mindestens  $45^\circ$  plus die Hälfte des Höhenwinkels zu dem Seiten-Surround-Lautsprecher, der am nächsten liegt, betragen.<sup>1</sup>

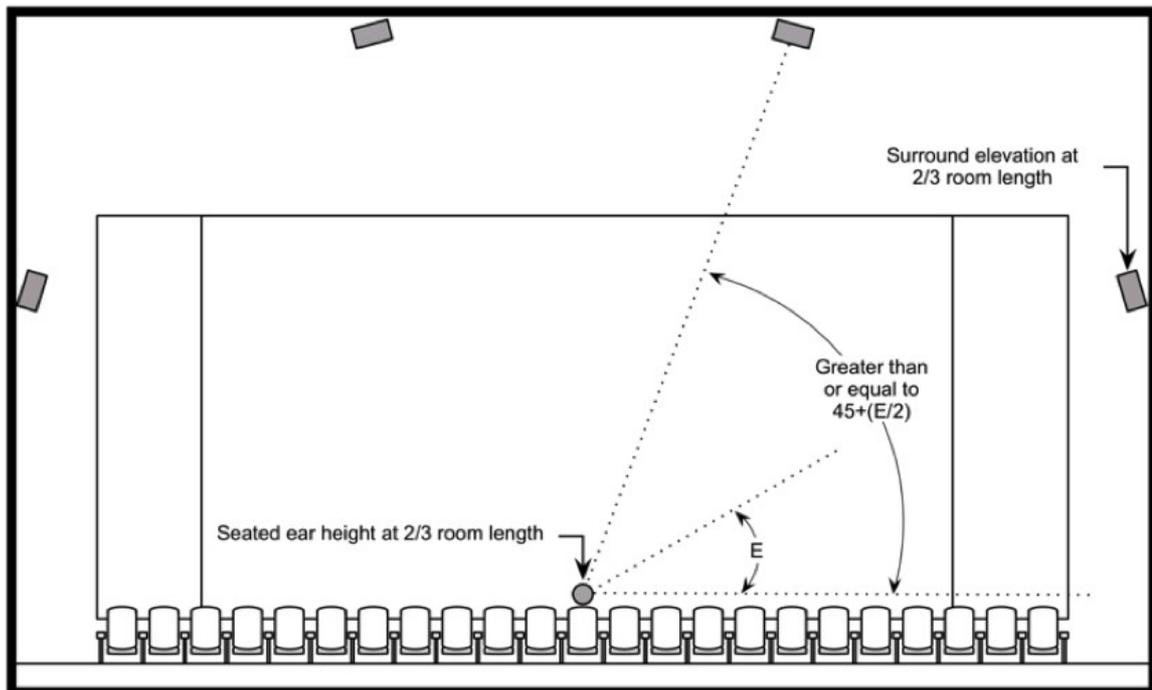


Abb. 26: Gleichung zur Bestimmung der Position der Overhead-Lautsprecher

Die Anordnung sollte möglichst symmetrisch zu den Seiten-Surround-Lautsprechern sein. Ist dies jedoch nicht möglich, kann die Anzahl und die Position der Deckenlautsprecher vor oder zurück etwas von der Anordnung der Seiten-Surround-Lautsprecher abweichen. Wichtig ist jedoch, dass die Lautsprecherzeile ebenfalls bis an die Leinwand heranreicht, dabei jedoch nicht im Weg des Projektorlichts hängt.<sup>2</sup>

#### 6.4.3 Vorteile

Als erstes sollte hier wohl die enorme Erweiterung des Sweet Spot genannt werden. Nun

<sup>1</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc., 2013, S. 22/23

<sup>2</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc., 2013, S. 22

gibt's es einen großen Bereich, in dem alle Zuschauer mehr oder weniger das gleiche wahrnehmen.

Der Vorteil der Overhead-Lautsprecher liegt auf der Hand. Signale, die im wahren Leben ihren Ursprung über dem Hörer haben, können nun auch genau dort wiedergegeben werden. Bisher wurden solche Signale über die Surround-Zonen wiedergegeben. Der Eindruck der Elevation wurde dann im Gehirn erzeugt, im Optimalfall durch eine räumlich definierende Bearbeitung des Tonmaterials unterstützt. Doch das ist bestenfalls eine Skizze der Realität. Mit Dolby Atmos klingt die Welt über den Köpfen nun erstaunlich realistisch.

Durch die hohe Anzahl an Surround-Kanälen ist nun eine deutlich höhere Surround-Auflösung möglich. Der erste Schritt in diese Richtung war damals der Centerlautsprecher, und später dann zusätzlich der linke und der rechte Center-Lautsprecher hinter der Leinwand, die es ermöglichen Geräusche oder Sprache in einer konkreten Region der Leinwand genau zu platzieren. Ohne diese Centerkanäle hätte eine Person, die links am Rand des Kinosaales sitzt, den Eindruck, die Sprache käme von links, obwohl die sprechende Person in der Mitte der Leinwand zu sehen ist. Genau so verhält es sich nun im Surround-Bereich. In realen Situationen kommen jederzeit aus allen Richtungen akustische Information. In einem Restaurant beispielsweise ist man völlig von Geräuschen umgeben. Dieses akustische Bild kann nun viel realistischer wiedergegeben werden, da Geräusche, Sprache oder Klänge nun konkreten Lautsprechern zugeordnet werden können.<sup>1</sup> Wird ein Signal zwischen zwei Lautsprechern positioniert, wird dieses zwar immer noch als Phantomschallquelle wahrgenommen, doch sind die Lautsprecher dann zumindest von der optimalen Abhörregion weit genug entfernt und die Stereobasis der beiden betreffenden Lautsprecher zu klein, als dass es zu einer Fehllokalisierung führen könnte.

Außerdem führt dies zu einer Verbesserung der Kohärenz zwischen Bild und Ton. Wenn eine auf der Leinwand zu sehende Person eine andere, sprechende, Person ansieht, die sich hinter oder neben dem Zuschauer befindet, nimmt der Zuschauer in einem 5.1- oder 7.1-Kinosaal bestenfalls im Sweet Spot eine Übereinstimmung zwischen Blickrichtung und

---

<sup>1</sup> Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 7

Sprache war, da eine Abweichung vom Sweet Spot die Laufzeit- und Pegelunterschiede verändert und somit die Phantomschallquelle verschiebt. Mit Dolby Atmos und seiner Fähigkeit, Signale genau zu platzieren, nehmen nun so gut wie alle Zuschauer die Sprache am selben Ort wahr: dort, wo die Person auf der Leinwand hinsieht.<sup>1</sup>

Betrachten wir ein anderes Problem herkömmlicher Surround-Systeme. Da Surround-Kanäle im Kino bisher über Lautsprecher-Arrays wiedergegeben wurden um die Hörzone zu vergrößern, wurden nicht-diffuse Signale also über mehrere Lautsprecher mehr oder wenig gleichzeitig wiedergegeben. Beim Hörer kommen dann zwei identische Signale leicht zeitverzögert an. Dies führt zu Auslöschungen verschiedener Frequenzen durch Phasenverschiebungen. Die Klangqualität leidet. Da man mit Dolby Atmos solche Signale nun als Objekt konkret einem Lautsprecher zuordnen kann, ist dieses Problem behoben und die Klangqualität wurde verbessert.<sup>2</sup>

Ein weiteres Problem war bisher, dass Surround-Lautsprecher selten den gleichen Frequenzgang hatten wie die ,meist auch kraftvolleren, Full-Range-Lautsprecher hinter der Leinwand. Somit war es nicht möglich einen Klang von vorne nach hinten zu bewegen, ohne dass sich die Klangfärbung änderte.<sup>3</sup> Dazu kommt, dass die Entfernung zwischen Front- und Surround-Lautsprechern relativ groß ist. Der zu bewegene Klang würde als Phantomschallquelle über eine recht weite Strecke bewegt werden. Das heißt, von verschiedenen Orten nimmt man diese Bewegung unterschiedlich und nur unscharf wahr. Die seitlichen Arrays wurden nun bis an die Leinwand verlängert,<sup>4</sup> und Dolby Atmos verfügt über ein intelligentes Raumkorrektur- und Bass-Management-System, das dafür sorgt, dass jedes beliebige Signal an jedem beliebigen Ort im Raum positioniert werden kann, ohne dass sich die Klangfärbung ändert. Somit ist es nun auch möglich, Klangobjekte durch den Raum zu bewegen, ohne große Einbußen in den Punkten Klangqualität und Lokalisations-schärfe hinnehmen zu müssen.<sup>5</sup>

---

1 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 7

2 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 8

3 Vgl. ebd.

4 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 10

5 Vgl. Dolby Labs, Inc. , 2013, S. 8

## 7. Fazit und Ausblick

Was sich in der Tontechnik derzeit entwickelt, stellt einen Quantensprung in der Realität der Menschen da. Der Mensch ist auf dem besten Weg zur Fähigkeit, virtuelle Realitäten erschaffen zu können. Was vor einigen Jahren noch Science Fiction war, wie das Holodeck in Star Trek, ist heute in nicht all zu weiter Ferne zu erblicken. Sicher gibt es da noch einige Hürden zu nehmen, doch ich denke, über die brauchen wir uns keine Sorgen zu machen. Auch wenn noch nicht alle Lösungen für die noch bestehenden Probleme gefunden wurden, sie liegen bereit und warten darauf, entdeckt zu werden. In den Kinos wurde die visuelle 3D-Technik bereits etabliert und macht große Fortschritte. Mit den hier vorgestellten Technologien wird nun die nächste Hürde in Richtung virtuelle Realität genommen.

Jedes dieser Systeme weist seine eigenen Stärken auf. Das wird sicher dazu führen, dass sie sich früher oder später alle gut vermarkten lassen und sich weiter entwickeln. Auch wenn Dolby Atmos und Auro 3D im ersten Moment wie Konkurrenzprodukte erscheinen mögen, werden sie sich wahrscheinlich sogar eher gut ergänzen. Dolby Atmos wird wohl nicht ganz so gut im Heimkinobereich durchzusetzen sein, während Auro Technologies ein System entwickelt hat, welches beim Konsumenten einfacher unterzubringen ist. Im Gegenzug bringt Dolby Atmos mit dem objektbasierten System und seiner hohen Lautsprecherdichte eine Lokalisationsschärfe mit, die Auro 3D wohl nur schwer erreichen wird, was unter Umständen dazu führen kann, dass sich Dolby Atmos im Bereich Kinobeschallung durchsetzen wird. Allerdings ist dieses System darauf ausgelegt und wird für Anwendungen in Räumen, die anders beschaffen sind als Kinosäle, voraussichtlich der Spatial-Sound Wave (die ja dem Atmos-System sehr ähnlich ist) weichen, da diese flexibler strukturiert ist und sich sehr gut an gegebene Situationen anpassen lässt.

Es ist jedoch abzusehen, dass sich das objektbasierte Prinzip im 3D-Audio-Bereich durchsetzen wird, da Raummaße und Koordinaten nicht systemspezifische Informationen sind, und quasi von jedem objektbasierten System verstanden werden. Außerdem lässt das die Skalierung eines Raumes zu und löst die Audiodaten von einer festgelegten Lautsprecher-Anordnung.

Die Wellenfeldsynthese, aus der das objektbasierte Prinzip im Audibereich hervorgegangen ist, wird zwar derzeit schon kommerziell vertrieben. Wie, zum Beispiel, von der Firma IOSONO. Doch fehlt es noch an Audiomaterial und Bewusstsein in der Bevölkerung dafür. Dazu kommt, dass es ein sehr aufwendiges Format ist und wahrscheinlich nicht so schnell im Heimbereich ankommen wird. In dem Projekt „Carrouso“ bündeln Vertreter aus Industrie, Forschung und Universitäten ihre Kompetenzen, um eine multimediale Technologie zu erschaffen, in der bewegte Bilder und die Wellenfeldsynthese eine Einheit bilden und gemeinsam abgespeichert und übertragen werden können.<sup>1</sup> Vielleicht stellt dies das Fernsehen der Zukunft da.

Binaural Sky wird vielleicht noch ein wenig warten müssen, bis es seine Stärken voll ausspielen kann, da es seiner Zeit leicht voraus ist. Man sollte sich verdeutlichen, dass es mit dieser Technologie möglich ist, (ohne Kopfhörer zu nutzen oder Lautsprecher zu sehen) einen Raum akustisch wahrzunehmen (und zwar je nach Kopfstellung anders, wie in der Realität), in dem man sich *nicht* befindet. Man befindet sich - zumindest akustisch – in einem virtuellen Raum. Eine mehr oder weniger naturgetreue Abbildung der Realität, welche in Interaktion mit dem Hörer steht, da sich der Höreindruck mit der Bewegung des Kopfes ändert. Wenn man sich dessen bewusst wird, lässt sich das enorme Potenzial erkennen.

Vorerst gibt uns Binaural Sky die Möglichkeit, dem Konsumenten zuhause eine Vielzahl von verschiedenen Surround-Anordnungen (auch dreidimensionale!!) in einem beliebigen (virtuellen) Raum erfahrbar zu machen. Zum Beispiel in einer virtuellen Abbildung des Studios, in dem die Surround-Mischung erstellt wurde (um, beispielsweise, Verzerrungen des gewünschten Klangbildes zu verhindern). Aber auch eine Atmos-Mischung in einem Kinosaal ist theoretisch imitierbar. Allerdings bleibt dieses Vergnügen derzeit nur der Person vorbehalten, die unter dem Ring-Array sitzt und Headtracking-Daten übermittelt.

Wenn jedoch bald die Holographie ihrerseits weiter entwickelt wurde, werden sich sehr interessante Möglichkeiten auftun. Denkbar wäre ein Fernsehformat, bei dem das Bild nicht

---

<sup>1</sup> Vgl. <http://emt.emt.iis.fhg.de/projects/carrouso/>

mehr auf ein Gerät beschränkt ist, welches eine zweidimensionale Fläche zur Darstellung bereitstellt, sondern dreidimensional in den Raum projiziert wird. Man säße dann visuell und akustisch mitten im Geschehen und könnte sich im Raum umsehen. Dank des Binaural Sky, würde sich dieser audiovisuell virtuelle Raum akustisch wie ein wirklicher Raum verhalten.

Gäbe es in diesem Raum nun eine Schallquelle, zum Beispiel ein sprechender Mensch, müsste man mit einem Kunstkopf für nahezu jede Ausrichtung des Kopfes eine Impulsantwort des Raumes aufnehmen, wie wir es von der Binauralen Raumsynthese kennen. Soll diese Schallquelle sich jedoch bewegen, wäre dies für nahezu alle Punkte auf der Bewegungslinie notwendig. Für jeden Ort (der Schallquelle) und für jede Kopfstellung wäre ein anderer Datensatz von Impulsantworten zuständig.

Diese, sich bewegende, Schallquelle könnte man auch selbst sein. Außerdem ist es auch möglich, Schallquellen über dem Kopf darzustellen!

Schon jetzt (2013) gibt es Hologramme, die auf Berührung reagieren. Durchaus denkbar, dass es in Freizeitparks ,oder ähnlichem, bald Spielstationen existieren, die mit Hilfe des Binaural Sky, interaktiver Holographie, Spracherkennung und künstlicher Intelligenz (all diese Fachbereiche entwickeln sich derzeit parallel und rasant), zum Beispiel, virtuelle Autofahrten mit virtuellen Fahrgästen, mit denen man sich unterhält, ermöglichen. Denkbar wäre auch die Aufwertung eines Flugsimulators.

Da die Nutzung allerdings vorerst an eine Position mit geringer Abweichung – also auf den Bereich unterhalb des Lautsprecherrings – gebunden ist, wäre es zu erforschen, welchen maximalen Durchmesser der Lautsprecherring haben könnte, ohne dass die Qualität der virtuellen Kopfhörer leidet. Mit viel Aufwand könnte man eine Vorrichtung konstruieren, die den Lautsprecherring, gemäß der Positionsänderung einer sich im Raum bewegenden Person, verschiebt (per Headtracking).

Verbindet man die, in den vorangegangenen Absätzen beschriebenen, Ansätze miteinander,

ist man von einem sogenannten Holodeck nicht mehr weit entfernt. Hier könnten sich, nicht wirklich existente, aber sichtbare Objekte in einem, ebenfalls nicht wirklich existenten, Raum bewegen und Geräusche von sich geben, während man selbst Bewegungsfreiheit hat und von einem anderen Standpunkt aus die gleiche Situation aus einer anderen akustischen und visuellen Perspektive wahrnimmt.

Natürlich ist das alles Zukunftsmusik. Und es wäre eine extrem aufwendige Angelegenheit. Denn wenn man sich nun selbst ebenfalls bewegt, bräuchte man für jede mögliche Konstellation der Aufenthaltsorte des Objekts und der eigenen Person einen Satz von Impulsantworten. Es müssten Millionen von Dateien bereit stehen (und erstellt werden!) für ein System, bestehend aus einem Sender (Audioobjekt), einem Empfänger (die eigene Person) und einem Raum.

Möchte man sich nun sogar mit einem fiktiven, virtuellen Menschen unterhalten, wird die Sache noch komplizierter und aufwändiger. Man müsste ein Mikrofon benutzen und stellt dann ein zweites Audioobjekt da, welches in die Gleichung einfließt.

Technisch gesehen wird dies möglich sein. Doch es wird sehr zeitaufwändig, all diese Impulsantworten zu erstellen, selbst wenn man es automatisieren würde. Doch wahrscheinlich wird es bald schon Computer geben, die in der Lage sind, solche Vorgänge zu simulieren und die entsprechenden Impulsantworten selbst zu erstellen.

Nicht nur die Unterhaltung, wie Computerspiel und Fernsehen, sondern auch die Telekommunikation könnte maßgeblich davon beeinflusst werden. In der Zukunft kann man sich wahrscheinlich virtuell „treffen“.

Es wird nun klar, dass hier eine Technologie entwickelt wurde, die bahnbrechende Veränderungen mit sich bringen kann. Die Tontechnik widmet sich neuen Aufgaben, erforscht neue Horizonte und tritt mehr und mehr in Kommunikation mit anderen Fachbereichen, angetrieben von der Motivation, unsere Realität naturgetreu abzubilden.

## Quellenverzeichnis

### Literatur

Birkner, Christian. *Surround: Einführung in die Mehrkanalton-Technik. Das Audioformat der Zukunft. Standards - Aufnahmepraxis - Weiterverarbeitung*. Ppv Medien, 2002.

Dickreiter, Michael, Wolfgang Hoeg, Volker Dittel, und Martin Wöhr. *Handbuch der Tonstudiotchnik. 2 Bände. 7. Bearb. u. erg.* De Gruyter Saur, 2008. (auch Abb. 1 u. 3)

Friesecke, Andreas. *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*. 1. Aufl. Saur, K G, 2007. (auch Abb. 2)

Görne, Thomas. *Tontechnik: Schwingungen und Wellen, Hören, Schallwandler, Impulsantwort, Faltung, Sigma-Delta-Wandler, Stereo, Surround, WFS, Regiegeräte, tontechnische Praxis*. 3., neu bearbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.

### Internetquellen

Analog-Service, *Planung und Konstruktion: IOSONO 3D Audio Akustiklabor*;

Zugegriffen: 05.09.2013 [http://analog-service.com/bilder\\_testlab.html](http://analog-service.com/bilder_testlab.html)

(Abb. 16)

Auro Technologies , *Auro-3D / Three dimensional sound*

Zugegriffen 11. Mai 2013

<http://www.auro-technologies.com/>

Auro Technologies, *Octopus*

Zugegriffen 30. August 2013

<http://www.auro-technologies.com/uploads/Auro3D-Octopus-White-Paper-v2-7-20111117.pdf>

Auro Technologies, *Professional Workflow*

Zugegriffen 30. August 2013

<http://www.auro-technologies.com/uploads/Professional-Workflow-White-Paper-v0-6-20120228.pdf>

(auch Abb. 19,20 u. 21)

Carrouso, *About Carrouso*, Zugegriffen: 02.09.2013

<http://emt.emt.iis.fhg.de/projects/carrouso/>

Dolby Laboratories, Inc. , *Dolby Atmos – Next Generation Audio for Cinema*

Zugegriffen 12. August 2013

<http://www.dolby.com/uploadedFiles/Assets/US/Doc/Professional/Dolby-Atmos-Next-Generation-Audio-for-Cinema.pdf>.

(auch Abb. 10,12,22,23,24,25 u. 26)

Fraunhofer IDMT, *SpatialSound Wave*

Zugegriffen 8. Mai 2013

[http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Publikationen/Produktinformationen/SpatialSound%20Wave/SpatialSound%20Wave\\_de.pdf](http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Publikationen/Produktinformationen/SpatialSound%20Wave/SpatialSound%20Wave_de.pdf).

Fraunhofer IDMT, *Referenz\_Zeiss Planetarium\_Jena*

Zugegriffen 8. Mai 2013.

[http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Publikationen/Referenzflyer/Referenz\\_Zeiss%20Planetarium\\_Jena.pdf](http://www.idmt.fraunhofer.de/content/dam/idmt/de/Dokumente/Publikationen/Referenzflyer/Referenz_Zeiss%20Planetarium_Jena.pdf).

Genuin, *Genuin News*, 2013, Zugegriffen 05.09.2013

<http://www.genuin.de/de/0501.php?k=447>

(Abb.14 u. 15)

G. Theile, IRT GmbH, *Neue Anwendung der Wellenfeldsynthese: Binaural Sky*.

Zugegriffen 11. Mai 2013.

[http://www.irt.de/fileadmin/media/downloads/Produktion/Neue\\_Anwendung\\_der\\_Wellenfeldsynthese.pdf](http://www.irt.de/fileadmin/media/downloads/Produktion/Neue_Anwendung_der_Wellenfeldsynthese.pdf).

(auch Abb. 17 u. 18)

Carol Selig, *Tetraphonie - Der Schall ist dreidimensional - Eine elektroakustische Aufnahme und Wiedergabeordnung für natürlichen Klang*,

Zugegriffen 29. Juli 2013

<http://www.tetraphonie.de>

(auch Abb. 13)

Wikipedia, *Die freie Enzyklopädie*, Zugegriffen: 04.09.2013

<http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Hauptseite>

(!nur Abb. 4,5,6,7 u. 8!)

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kopfbezogenes Koordinatensystem für die Beurteilung der Hörereignisrichtungen .....	10
Abb. 2: Richtungsbestimmende Frequenzbänder für die Lokalisation in der Medianebene (y-Achse zeigt Häufigkeit der Richtungsbestimmungen von Probanden in Prozent) .....	12
Abb. 3: Lautsprecheranordnung für 2-Kanal-Stereowiedergabe.....	16
Abb. 4: Zeichen für Mono.....	17
Abb. 5: Zeichen für Stereo 2.0.....	17
Abb. 6: Zeichen für 4.0.....	18
Abb. 7: Zeichen für 3/1.....	19
Abb. 8: Zeichen für 5.1.....	20
Abb. 9: Referenz-Lautsprecheranordnung für das 3/2-Format.....	20
Abb. 10: Dolby 5.1-System in einem Kino.....	21
Abb. 11: Zeichen für 7.1 (3/4/1).....	22
Abb. 12: Dolby 7.1-System in einem Kino .....	23
Abb. 13: Mikrofon- und Lautsprecheranordnung in der Tetraphonie.....	26
Abb. 14: Elementarwellen bilden eine Wellenfront.....	28
Abb. 15: Lautsprecherzeile (Line Array) eines Wellenfeldsynthese-Systems.....	28
Abb. 16: Wellenfeldsynthese-Labor (mit 3D-Erweiterung).....	29
Abb. 17: Virtuelle Kopfhörer. Dreht sich der Kopf, bewegen sich die virtuellen Schallquellen mit.....	35
Abb. 18: Binaural Sky - Versuchslabor.....	35
Abb. 19: Auro-3D Monitoring setup.....	41
Abb. 20: Auro-3D Encoding mit dem Auro-3D-Encoder (Hardware oder Plugin).....	42
Abb. 21: Auro-codierter PCM Stream mit und ohne Decoding.....	43
Abb. 22: Ein Dolby Atmos-Kinosaal von oben. Die roten und grauen Lautsprecher stellen den herkömmlichen 7.1-Aufbau dar. ....	46
Abb. 23: Referenzposition ("Sweet Spot") in einem Dolby Atmos-Saal.....	48
Abb. 24: Vom Rand der "Sweet Area" aus sollte der Winkel zwischen den BlickRichtungen 30° betragen.....	50
Abb. 25: Die Höhe der Lautsprecher richtet sich nach der Steigung der Zuschauersitze....	51
Abb. 26: Gleichung zur Bestimmung der Position der Overhead-Lautsprecher.....	52

## **Eigenständigkeitserklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Ich erkläre weiterhin, dass ich alles gedanklich, inhaltlich oder wörtlich von anderen (z.B. aus Büchern, Zeitschriften, Zeitungen, Lexika, Internet usw.) Übernommene als solches kenntlich gemacht, d.h. die jeweilige Herkunft im Text oder in den Anmerkungen belegt habe. Dies gilt auch für die Abbildungen.

Ort, Datum .....

Unterschrift .....