



BACHELORARBEIT

IM STUDIENGANG AUDIOVISUELLE MEDIEN

VON KANALBASIERTEN- ZU OBJEKTBASIERTEN- WIEDERGABESYSTEMEN, HERAUSFORDERUNGEN UND WORKFLOW IN DER PRODUKTION AM BEISPIEL VON DOLBY ATMOS

VORGELEGT VON **ALEXIS ARGIROPOULOS** MATRIKEL-NR. 38106

AN DER **HOCHSCHULE DER MEDIEN STUTTGART**

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES BACHELOR OF ENGINEERING

EINGEREICHT AM **09.01.2023**

ERSTPRÜFER: **PROF. OLIVER CURDT**

ZWEITPRÜFER: **PROF. DR. FRANK MELCHIOR**

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

„Hiermit versichere ich, Alexis Argiropoulos, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor - SPO (6 Semester), § 2 4 Abs. 2 Bachelor - SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master - SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master - SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.“

Stuttgart, 09.01.2023

Ort, Datum

38106, Alexis Argiropoulos,

Matrikelnummer, Name, Unterschrift

KURZFASSUNG

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit dem Prinzip der kanalbasierten und objektbasierten Wiedergabe. Je nach verwendetem Wiedergabeformat, sind andere Herangehensweisen zu beachten und es ergeben sich verschiedene Möglichkeiten und Herausforderungen in der Produktion und Aufnahme von Audiomaterial.

Der Fokus dieser Arbeit soll im Besonderen auf dem Unterschied des Stereoworkflows im Vergleich zu einem objektbasierten Workflow liegen, hierbei bildet der Stereoworkflow die Grundlage, ausgehend hiervon soll der Schritt in die objektbasierte Produktion erfolgen.

Dabei soll besonders Bezug auf das Format Dolby Atmos gelegt werden, dass aufgrund seiner besonders ausgeprägten Verbreitung im Kino, sowie bei Endkunden zum zeitlichen Stand dieser Arbeit am meisten Relevanz in der Kategorie der objektbasierten Formate hat.

Dazu sollen nötige Arbeitsschritte für die Produktion von objektbasiertem Audio besprochen werden, sowie auf aktuelle Probleme und Herausforderungen bei der Arbeit mit Dolby Atmos eingegangen werden.

Das Ende bildet der Vergleich der zwei Wiedergabeformate, im Hinblick auf den Workflow.

ABSTRACT

The following work deals with the principle of channel-based and object-based playback. Depending on the playback format used, different approaches have to be taken into account and there are different possibilities and challenges in the production and recording of audio material.

The main focus of this work is the difference between the stereo workflow and an object-based workflow.

The starting point should be the workflow of a stereo file. In order to take the step into object-based production.

Particular reference should be made to the Dolby Atmos format, which is most relevant in the category of object-based formats due to its distribution in cinemas and among end customers.

In addition, necessary work steps for the production of object-based audio are to be discussed. As well as current problems and challenges when working with Dolby Atmos.

The end is the comparison of the two rendering formats in terms of workflow.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	3
ABSTRACT	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
KAPITEL 1: EINLEITUNG	9
KAPITEL 2: AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE EINES 3D AUDIOSYSTEMS	11
2.1 METADATEN	14
2.2 PHANTOMSCHALLQUELLEN/PANNINGVERFAHREN	15
KAPITEL 3: WORKFLOW EINER STEREOPRODUKTION	18
3.1 AUFNAHMEMÖGLICHKEITEN	20
3.2 MIXING EINES STEREOPROJEKTS	21
3.3 MASTERING EINER STEREODATEI	23

KAPITEL 4: OBJEKTBASIERTE WIEDERGABE	26
4.1 DOLBY ATMOS	27
4.2 AUFBAU EINES DOLBY ATMOS WIEDERGABESYSTEMS	28
KAPITEL 5: PRODUKTIONSWORKFLOW IN DOLBY ATMOS	33
5.1 ANLIEFERUNG/AUFNAHME VON MATERIAL	34
5.2 MIXING VON OBJEKTBASIERTEM AUDIO	37
5.2.1 DOLBY ATMOS PANNER PLUGIN	40
5.2.2 DOLBY ATMOS BEDS/OBJECTS	41
5.3 ENCODIERUNG/DISTRIBUTION	42
KAPITEL 6: VERGLEICH EINES OBJEKTBASIERTEN WORKFLOWS ZU EINER STEREOPRODUKTION	47
6.1 MÖGLICHKEITEN DER PRODUKTION	47
6.2 HERAUSFORDERUNGEN DER WIEDERGABE	49
6.2.1 LAUTHEITSMESSUNG	49
6.2.2 MASTERING VON OBJEKTBASIERTEM AUDIO	53
6.2.3 ABHÄNGIGKEIT VON RENDERER UND SOFTWARE	57
KAPITEL 7: FAZIT	60
LITERATURVERZEICHNIS	62

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Lautsprecheranordnung 4+5+1 (ITU-R, 2018).....	13
Abbildung 2: Lokalisationswinkel der Phantomschallquelle θ	17
Abbildung 3: Beispielhafter Produktionsprozess (Izhaki, 2018).....	19
Abbildung 4: Arbeitsschritte eines Stereomix (Izhaki, 2018)	22
Abbildung 5: Kanalbasierte Lautheitsmessung	25
Abbildung 6: Signalfluss zwischen der DAW und dem Dolby Renderer	29
Abbildung 7: 7.1.4 Home Entertainment Speaker Setup.....	32
Abbildung 8: Konzept einer Kanal- und Objektbasierten Produktion	33
Abbildung 9: Blauertsche Bänder	39
Abbildung 10: Distributionskette Kanal/Objektbasiert.....	43
Abbildung 11: Objektbasierte Lautheitsmessungen mittels ITU BS.1770 ..	51

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich einer kanal- und objektbasierten Wiedergabe	59
---	----

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AC4-IMS	AC4- Immersive Stereo
ADM	Audio Definition Model
ADM BWF	Audio Definition Model Broadcast Wave Format
AES	Audio Engineering Society
BWF	Broadcast Wave Format
DAMF	Dolby Atmos Master File
DAW	Digital Audio Workstation
DD+JOC	Dolby Digital Plus Joint Coding
EBU	European Broadcasting Union
EQ	Equalizer
HRTF	Head Related Transfer Function
ITU	International Telecommunication Union
LFE	Low Frequency Effects
LU	Loudness Units
LUFS	Loudness Units relative to Full Scale
VBAP	Vector Base Amplitude Panning

KAPITEL 1: **EINLEITUNG**

Für das Arbeiten und Erstellen von Stereodateien haben sich über die Jahre verschiedenste Techniken und Workflows etabliert. Durch neue Formate, die nicht wie die Stereophonie rein kanalbasierte Wiedergabeformate sind, bilden sich zunächst neue Herausforderungen und Möglichkeiten bei der Erstellung und der Post Produktion von Audiomaterial.

Dabei hat ein Format in der Kategorie der objektbasierten Wiedergabeformate zum aktuellen Stand dieser Arbeit einen Vorsprung, was die Verbreitung im Kino¹, sowie die Wiedergabemöglichkeiten und Anwendungen beim Endkunden angeht. Dolby Atmos erschien 2012 als Format, das primär für die Kinowiedergabe ausgelegt war, und hat über die Jahre immer mehr Verbreitung erlangt, sodass nun mit Dolby Atmos Music ein objektbasiertes Format für 3D Audio für Endkunden verfügbar ist. Durch Dolby Atmos Music ist es möglich, dass Endkunden bequem über ihre Streaming Dienste wie Tidal², Amazon Music³ oder ab 2021 auch Apple Music⁴, Content in Dolby Atmos von daheim aus konsumieren können. Dabei ist es unwichtig über welches Endgerät sie die Musik konsumieren und hören. Verschiedenste Produkte wie TVs, Soundbars oder einfache Kopfhörer können genutzt werden um Content in Dolby Atmos zu konsumieren⁵. Dies liegt am Konzept der objektbasierten Wiedergabe, denn mit dieser ist nun die Produktion von Audiomaterial möglich, das losgelöst von dem jeweiligen Abspielgerät oder einem genauen Lautsprechersetup ist. Der Inhalt wird damit erst am Ende der Signalkette auf das jeweilige Abspielgerät individuell gerendert. Somit ist für den Endkunden eine individuelle Auswahl des Wiedergabegeräts je nach persönlichen Anforderungen oder Budget möglich⁶.

¹ (Peter, 2020)

² (Dolby Newsroom, 2020)

³ (Dolby Laboratories Inc. Stream your Music in amazing quality with Amazon Music Unlimited, 2022)

⁴ (Apple Inc., 2021)

⁵ (Dolby Laboratories Inc. Playback Solutions for your Content in Dolby Vision and Dolby Atmos, 2022)

⁶ (SMPTE, 2012)

Aufgrund neuer Formate wie Dolby Atmos, die einen dreidimensionalen Höreindruck erwecken und der Tatsache das Content je nach verwendetem Wiedergabegerät anders gerendert wird, Verändern sich die klassischen Workflows die sich über die Zeit für Stereoproduktionen etabliert haben.

Diese Arbeit soll die Produktionsschritte einer Stereoproduktion mit einer Dolby Atmos Produktion vergleichen und besonders auf den neuen Workflow für eine Dolby Atmos Produktion eingehen. Dabei soll die Forschungsfrage: Der Vergleich der Kanal- und Objektbasierten Wiedergabe hinsichtlich des Workflows und dessen aktuelle Herausforderungen in der Produktion beantwortet werden.

Dazu soll im zweiten Kapitel ein 3D Audio System in seinem Aufbau und seiner Funktionsweise beschrieben werden. Grundlegende Themen wie Bildung von Phantomschallquellen, sowie die Bedeutung von Metadaten werden in diesem Kapitel erläutert.

Das dritte Kapitel hingegen beschäftigt sich mit der Ausgangssituation dieser Arbeit, dabei sollen besonders die Arbeitsschritte der Aufnahme, Mixing und Mastering einer Stereodatei besprochen werden. Diese bilden die notwendige Basis um später einen Vergleich zwischen beiden Formaten ziehen zu können.

Um das Konzept der objektbasierten Wiedergabe zu erläutern wird im vierten Kapitel das objektbasierte Format Dolby Atmos beschrieben.

Die neuen Arbeitsschritte einer objektbasierten Produktion werden im fünften Kapitel erläutert, sowie auf spezifische Plugins die zur Produktion notwendig sind eingegangen.

Letztlich leitet der Vergleich im sechsten Kapitel den Schluss dieser Arbeit ein. Hierbei sollen beide Workflows miteinander verglichen werden, sowie aktuelle Probleme und Lösungen beschrieben werden. Der Schluss bildet das Fazit im siebten Kapitel.

KAPITEL 2: **AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE EINES 3D AUDIOSYSTEMS**

Der Mensch ist jeden Tag täglich in Kontakt mit Klangerlebnissen, die wir dreidimensional wahrnehmen. Dabei ist es normal, dass wir Geräusche und Klänge aus allen Richtungen inklusive der sie definierenden Charakteristika wie Breite, Höhe und Tiefe wahrnehmen. Dabei bestehen die meisten natürlichen Quellen aus verschiedensten Objekten, welche sich an unterschiedlichen Stellen im dreidimensionalen Hörbereich befinden⁷.

Unter dem Begriff 3D Audio verbergen sich verschiedene Formate/Verfahren und Überlegungen, ein Klangbild dreidimensional zu erschaffen und dieses ebenso wiederzugeben⁸.

Der Schritt in die dreidimensionale Wiedergabe von Audiomaterial, der auch für den Endkunden konsumierbar sein soll, rückt mit aktuellen Produkten und Möglichkeiten für den normalen Konsumenten mehr in den Vordergrund. Mit der Weiterentwicklung von TVs, Soundbars, Kopfhörern⁹ und mittlerweile sogar Fahrzeugen wie der Mercedes S-Klasse¹⁰, welche es mittlerweile möglich machen, dass immer mehr Endkunden eine dreidimensionale Hörerfahrung erleben, verändern sich auch die Anforderungen an Toningenieure, die vor der Entscheidung stehen 3D Audio Content zu produzieren.

Dies bringt neue Herausforderungen mit sich, angefangen bei der nötigen Hardware und Aufrüstung auf eine größere Lautsprecheranordnung, falls diese noch nicht vorhanden ist.

Ein 3D Audiosystem beschreibt die Dimensionen in der Audiomaterial platziert werden kann, sodass mit ihm Inhalte in kanalbasierter, szenenbasierter oder auch objektbasierter Form wiedergegeben werden können.

⁷ (Rumsey, 2001)

⁸ (Weinzierl, 2008)

⁹ (Dolby Laboratories Inc. Playback Solutions for your Content in Dolby Vision and Dolby Atmos, 2022)

¹⁰ (Mercedes-Benz Group Media, 2021)

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen eines 3D Audiosystems aufgezeigt werden, dies geschieht unabhängig von dem verwendeten Format.

Anders als die bisherigen Surroundformate, wie 5.1 oder 7.1 Surround, wie sie im Kino weit verbreitet sind, und nur in der horizontalen Ebene arbeiten, basiert ein 3D Audiosystem auf dem Ansatz die Höhen-Ebene mit in die Wiedergabe einzuschließen.

Bei einem 3D Audiosystem kann neben der bereits bestehenden horizontalen Ebene, wie man sie bei den Surround Formaten wiederfindet, auch die Höhenebene für die Positionierung von Audiomaterial während der Produktion verwendet werden. Je nach verwendetem Format, variieren die dazu empfohlenen Lautsprecherkonfigurationen für die Produktion. So gibt es Empfehlungen für Lautsprecheranordnungen, beispielsweise kann hier die Empfehlung der ITU (International Telecommunication Union) genannt werden.

In der ITU-R BS2051-2 sind zehn Lautsprecheranordnungen beschrieben für die Wiedergabe von Kanal-, Szenen- und Objektbasiertem Audio.

Dabei befinden sich die 10 Systeme alle auf einer Kugeloberfläche, sodass ein gleicher Abstand zum Hörer immer gegeben ist.

Dabei wird zwischen drei verschiedenen Ebenen unterschieden. Dem Upper Layer, Middle Layer und dem Bottom Layer.

Der Middle Layer bildet hierbei die Basis. Er befindet sich genau auf Ohrhöhe des Hörers. Ausgehend hiervon befindet sich der Bottom Layer 30° unterhalb des Middle Layers, der Upper Layer 30° überhalb des Middle Layers¹¹.

Innerhalb dieser drei Ebenen werden Lautsprecher angeordnet, und die jeweilige Lautsprecheranordnung mit Hilfe von drei Zahlen benannt.

¹¹ (ITU-R, 2018)

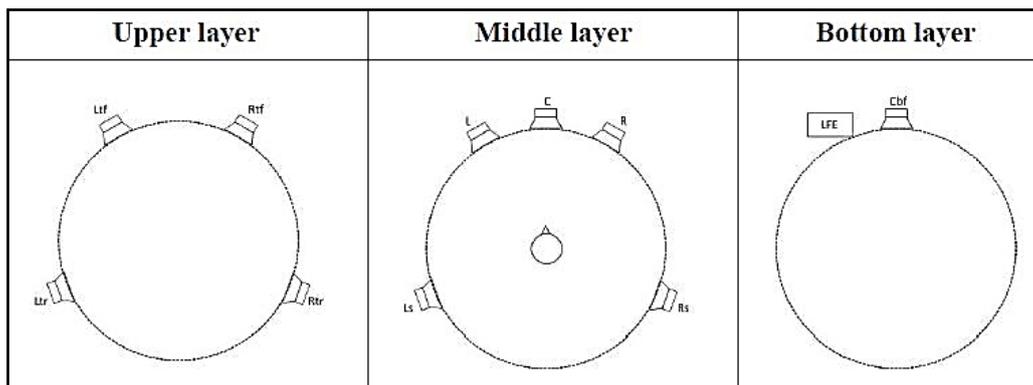


Abbildung 1: Lautsprecheranordnung 4+5+1 (ITU-R, 2018)

Anhand der Lautsprecheranordnung 4+5+1, ergibt dies 4 Lautsprecher auf dem Upper Layer, 5 Lautsprecher auf dem Middle Layer und nur 1 Lautsprecher auf dem Bottom Layer (siehe Abbildung 1).

Für die Produktion von 3D Audio gibt es verschiedenste Lautsprecheranordnungen, die je nach verfügbarem Budget und Bedarf erweitert werden können.

Die empfohlene Lautsprecheranordnung für die Produktion in Dolby Atmos, ist eine 7.1.4 Lautsprecheraufstellung, dabei steht die 7 für die Lautsprecher im Middle Layer, die 1 für den LFE (Low Frequency Effects) Kanal und die 4 für die Lautsprecher im Upper Layer.

Es können jedoch auch weniger Lautsprecher verwendet werden, sodass ein 5.1.4 System als Mindestanforderung für die Produktion und Arbeit in Dolby Atmos gilt. Dadurch können bereits bestehende 5.1 Surround Regien oder Abhörräume mit nur überschaubarem Aufwand auf Dolby Atmos umgerüstet werden. Je nach Möglichkeit und Bedarf kann auch auf ein 11.1.10 System erweitert werden¹².

¹² (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 1.2 Components of a Dolby Atmos Content Creation Studio, 2022)

2.1 METADATEN

Bereits in der oben genannten Empfehlung der ITU-R BS2051-2, wird die Wichtigkeit und Notwendigkeit von Metadaten zum Ausdruck gebracht. So heißt es:

„An advanced sound system uses audio data in combination with an appropriate set of metadata to specify a sound scene to be delivered/broadcasted.“ (ITU-R BS2051-2,2018)

Metadaten übernehmen in 3D Audiosystemen die wichtige Aufgabe, die Audiosignale zu beschreiben und dafür zu sorgen, dass sie korrekt reproduziert werden.

Dabei ist ein Modell wie das von der ITU vorgeschlagene ADM (Audio Definition Model), beschrieben in der Empfehlung ITU-R BS.2076-2, ein Standard zur Beschreibung eines Metadaten Modells zur Definition von Audioinhalten.

Ein einheitliches Modell, wie dieses ADM-Modell, zur Beschreibung von Audiometadaten wäre wünschenswert, sodass dieses Modell von Streaming Formaten entweder gänzlich übernommen werden kann, oder durch geeignete Schnittstellen eine Kompatibilität erreicht werden könnte.

Das ADM sorgt hierbei dafür, dass jeder Track innerhalb einer Datei oder eines Streams, korrekt gerendert, verteilt sowie verarbeitet wird, gemäß den dazugehörigen Metadaten.

Dazu besteht das ADM aus zwei Teilen. Der Erste wird als Contentteil bezeichnet. Der zweite hingegen stellt den Format Teil dar. Der Content Teil bezieht sich hierbei auf den Audioinhalt, so können hier verschiedene Sprachen oder Lautstärken für unterschiedliche Dialoge hinterlegt sein. Damit das Audio korrekt gerendert sowie dekodiert werden kann, befinden sich hierfür alle nötigen Informationen im Format Teil des ADMs. Die Aufgabe der Umsetzung dieser Informationen auf eine Lautsprecheranordnung ist Aufgabe des jeweiligen Renderes. Zu den wichtigsten Parametern von Audioobjekten zählen die Position, Pegel, Ausdehnung, Diffusion sowie die Divergenz.¹³

¹³ (ITU-R, 2019)

2.2 PHANTOMSCHALLQUELLEN/PANNINGVERFAHREN

Bei der Wiedergabe von Audioinhalten über Lautsprecher, werden sich bestimmte Funktionen des menschlichen Hörens zunutze gemacht. So soll in diesem Abschnitt auf die Bildung von Phantomschallquellen eingegangen werden, da Sie in Stereoproduktionen sowie Audioproduktionen in einem 3D Audiosystem Relevanz haben.

Von einer Phantomschallquelle ist die Rede, wenn ein Schallereignis aus einer Richtung lokalisiert wird an der kein Lautsprecher steht.¹⁴ Dies ist nur möglich, wenn mindestens zwei Lautsprecher vorhanden sind, und diese jeweils das gleiche Signal abstrahlen. Das abgestrahlte Signal kann jedoch Pegel- sowie Laufzeitunterschiede enthalten¹⁵. Phantomschallquellen werden sich häufig bei Stereoproduktionen zu Nutze gemacht, indem beispielsweise zwei Signale, jeweils auf einen der linken sowie rechten Lautsprecher gelegt wird. Obwohl eine Phantomschallquelle aus zwei Lautsprechern weniger klar und räumlich ungenauer ist als ein Signal aus einem dedizierten Lautsprecher, können sie für Zuhörer die sich exakt in der Mitte der beiden Lautsprecher befinden, dem sogenannten Sweet Spot, sehr realistisch klingen¹⁶. Zur Erstellung von Phantomschallquellen, also zur Positionierung von Audiomaterial zwischen zwei Lautsprechern gibt es mehrere Möglichkeiten. Die erste und einfachste Möglichkeit eine Quelle zwischen zwei Lautsprechern zu positionieren ist die mittels Pegelunterschieden. Hierfür wird ein gegenläufiger Pegelsteller, ein sogenannter Panoramaregler oder auch Panoramapotiometer genannt, benötigt. Für die Positionierung der Quelle in der Mitte werden hierfür beide Signale in gleicher Lautstärke wiedergeben. Soll eine Verschiebung beispielsweise um 50% nach links erfolgen so ist hierfür ein Pegelunterschied von 6.5 dB notwendig.¹⁷ Eine weitere Möglichkeit der Positionierung einer Quelle stellt die Verwendung von Laufzeitunterschieden dar.

¹⁴ (Dickreiter et al., 2014)

¹⁵ (Friesecke, 2014)

¹⁶ (Geluso, 2018)

¹⁷ (Friesecke, 2014)

Da dieses Verfahren aufwändiger zu realisieren ist als eine einfache Pegeländerung, und dessen Monokompatibilität aufgrund von notwendigen Delays nicht mehr für alle Frequenzen gegeben ist, findet dieses Verfahren weniger Einsatz in der Praxis.

Die nötigen Delays die zum Einsatz kommen befinden sich in der Größenordnung von bis zu 1,5ms. Um ebenso eine Verschiebung von 50% entweder nach links oder rechts bei einem Stereosystem zu erreichen, ist ein Delay von 0,48ms notwendig¹⁸.

Aufgrund der im Vergleich zur Verwendung von nur zwei Lautsprechern und der Nutzung der Horizontalen in Stereosystemen unterschiedlichen Audioplatzierung in 3D Systemen, welche beispielsweise wie in der 7.1.4 Lautsprecheranordnung 11 Lautsprecher auf und über der Ohrhöhe verwenden, sind andere Verfahren notwendig.

Als eine Erweiterung des oben beschriebenen Panoramameters in den 3-dimensionalen Raum, kann VBAP (Vector Base Amplitude Panning) angesehen werden. Wie auch der Panoramameter nutzt VBAP-Amplitudenunterschiede für zwei oder drei Lautsprecher zur Positionierung von Audioquellen¹⁹. Es handelt sich hierbei um eine mathematische Formalisierung des Panoramameters. Dabei können Signalpegel für Lautsprecherpaare im 2-dimensionalen Raum berechnet werden, oder für ein Lautsprechertriplet im 3-dimensionalen Raum. Diese Berechnung geschieht in Abhängigkeit der gewünschten Abbildungsrichtung der Schallquelle. Hierfür werden die Verstärkungsfaktoren der jeweiligen Audiosignale mit Hilfe der vektoriellen Beziehungen zwischen den einzelnen Lautsprecherpositionen und der gewünschten Position der Phantomschallquelle kalkuliert.

Dazu dient als Grundlage das Tangent Law (Gleichung (1))²⁰:

$$\frac{\tan \theta}{\tan \theta_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2} \quad (1)$$

¹⁸ (Friesecke, 2014)

¹⁹ (Rumsey, 2001)

²⁰ (Weinzierl, 2008)

Dieses sagt den Ort der entstehenden Phantomschallquelle, beschrieben durch den Vektor p , in Abhängigkeit der zwei Verstärkungsfaktoren g_1 und g_2 der benachbarten zwei Lautsprecher und deren Winkel θ_0 der Lautsprecherbasis voraus, Abbildung 2 zeigt die vektoriellen Beziehungen bei einer Anwendung im zweidimensionalen Bereich.

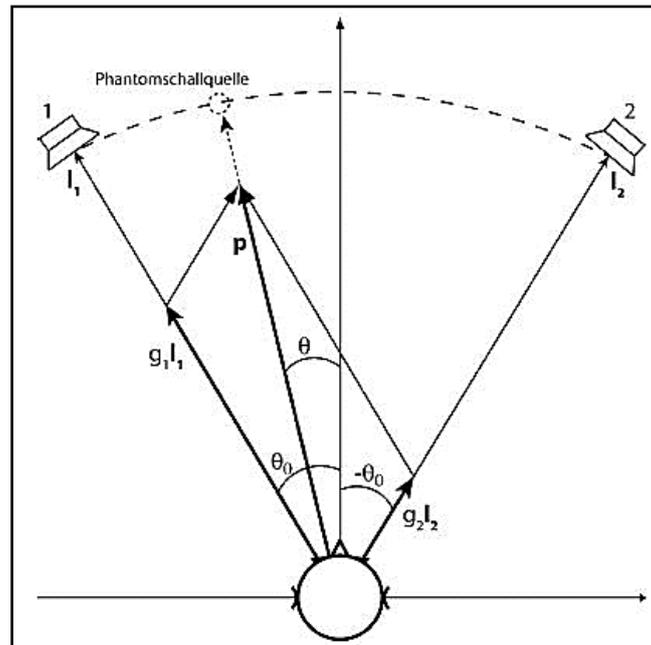


Abbildung 2: Lokalisationswinkel der Phantomschallquelle θ und Versatzwinkel θ_0 (Weinzierl, 2008)

Hierbei zeigen die beiden Einheitsvektoren l_1 und l_2 in Richtung der Lautsprecher. Der entstehende Vektor p kann als lineare Kombination aus den zwei Einheitsvektoren l_1 und l_2 dargestellt werden. G_1 und g_2 stellen hierbei die zwei Gewichtungsfaktoren dar, siehe Gleichung (2).

$$p = g_1 l_1 + g_2 l_2 \quad (2)$$

Für eine dreidimensionale Anwendung von VBAP, werden die Signalpegel für ein Lautsprechertriplet berechnet. Dabei wird der Vektor p aus einer linearen Kombination aus den drei Einheitsvektoren l_1 , l_2 und l_3 gebildet²¹.

²¹ (Weinzierl, 2008)

KAPITEL 3: **WORKFLOW EINER STEREOPRODUKTION**

Im Bereich der kanalbasierten Formate, sowie im Bereich der Musikproduktion zum aktuellen Stand dieser Arbeit, ist die Stereophonie das am weitesten verbreitete Format. Auf Grund dessen wurde es als Grundlage ausgewählt, auf der diese Arbeit aufbauen soll.

Kanalbasierte Formate wie die Stereophonie, beruhen auf dem Prinzip, dass der Inhalt der Produktion, auf eine vordefinierte Anzahl an Signalkanälen gemischt wird. Dabei wird jeder Signalkanal auf eine exakte Lautsprecherposition im Lautsprecherlayout zugeordnet²².

Somit ist für kanalbasiertes Audio, für jedes Wiedergabesystem (Bsp. Stereo, 5.1, 7.1) eine angepasste und individuelle Mischung auf das jeweilige Lautsprecherlayout notwendig.

Verfahren wie das Upmixing eines Mix auf ein größeres Lautsprecherlayout, sowie das Downmixing also das Heruntermischen einer Mischung für ein kleineres Lautsprecherlayout z.B. 5.1 auf ein kleineres Format wie z.B. Stereo sind verfügbare Techniken, auf die zurückgegriffen werden kann.

Sie bieten somit die Möglichkeit aus einem bereits bestehenden Stereomix durch Upmixing ein Mix für ein 5.1 Lautsprecher Layout zu erstellen. Sie sind jedoch bei weitem keine optimale Lösung, sodass ihre Ergebnisse oft schlecht vorhersehbar sind und es in beiden Varianten zu Qualitätsverlusten kommen kann.

Es sollte daher vorgezogen werden einen eigenen Mix für jedes Format zu erstellen.

Für die Produktion von Stereomaterial haben sich seit seiner Erfindung 1931²³ viele verschiedene Workflows etabliert. So ist in Abbildung 3 ein Produktionsprozess beschrieben, welcher dem Großteil der heutigen Produktionen entspricht.

²² (ITU-R, 2018)

²³ (Owsinski, 2007)

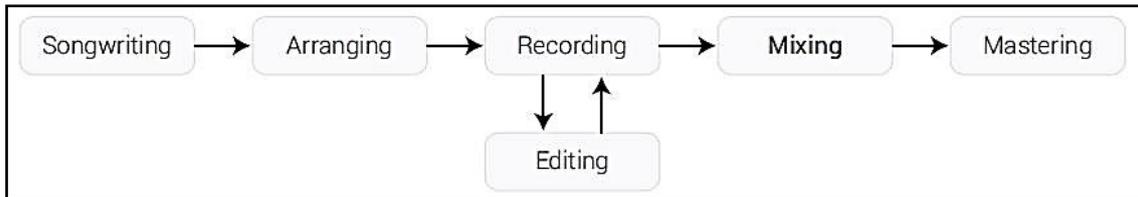


Abbildung 3: Beispielhafter Produktionsprozess (Izhaki, 2018)

Auf Ausschnitte aus dem Workflow der in Abbildung 3 zu sehen ist, soll in diesem Kapitel mehr eingegangen werden um somit eine Grundlage zu schaffen auf die zu einem späteren Zeitpunkt in dieser Arbeit Bezug genommen werden kann, wenn der Workflow einer objektbasierten Wiedergabe verglichen wird.

Die zwei Schritte des Songwriting und Arranging bilden die Grundlage einer Musikproduktion und bereits hierbei sollte das Endprodukt visualisiert und im Erstellungsprozess im Hinterkopf behalten werden.

Heutzutage ist die Stereoproduktion der Standard in der Produktionstechnik, sodass das Endprodukt, eine Stereodatei von Anfang an bereits feststeht.

Soll ein anderes Format beispielsweise in Dolby Atmos produziert werden, so können sich die nachfolgenden Arbeitsschritte verändern oder Abweichungen sinnvoll sein, mehr hierzu in Kapitel 5.

Nachfolgend werden die Arbeitsschritte der Aufnahme, des Mixings und des Masterings einer Stereoproduktion näher untersucht.

Sie bilden die Hauptbestandteile einer Produktion und sind in Bezug auf den Workflow Unterschied beider Formate von besonderer Bedeutung.

3.1 AUFNAHMEMÖGLICHKEITEN

Für die Wiedergabe von Stereodateien stehen zwei Lautsprecher zur Verfügung, zwischen denen eine Klangbühne geschaffen werden kann. Zwischen den zwei Lautsprechern kann wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, eine Phantomschallquelle erstellt werden und mit verschiedenen Panningverfahren Audiomaterial zwischen den zwei Lautsprechern bewegt werden.

Für die Aufnahme von Audiomaterial für die Stereoproduktion haben sich verschiedenste Zweikanalaufnahmeverfahren entwickelt. Die meisten von ihnen beruhen auf dem Prinzip der Intensitätsstereofonie, der Laufzeitstereofonie oder basieren auf einer Mischung dieser beiden Prinzipien.

Wie auch beim Panning mittels Pegelunterschieden, nutzt die Intensitätsstereofonie Pegelunterschiede im linken sowie im rechten Kanal. Instrumente, welche beispielsweise stärker im Pegel auf dem rechten Kanal erscheinen, werden auch in der Stereobasis rechts lokalisiert. Die am weitesten verbreiteten Aufnahmeverfahren in dieser Kategorie sind die XY – sowie die MS Anordnung.

Die Laufzeitstereofonie nutzt hingegen wie auch das Laufzeitpanning, Unterschiede in der Laufzeit der Signale. Dabei unterscheiden sich nur die Laufzeiten der Signale, die Pegel beider Signale unterscheiden sich hierbei nicht. Die Laufzeitunterschiede entstehen im Unterschied zu den künstlich erstellten Delays beim Panningverfahren, rein natürlich. Ein Aufnahmeverfahren für die Laufzeitstereofonie ist beispielsweise das AB-Verfahren²⁴²⁵.

Informationen zu den genauen Mikrofonverfahren können in Standardwerken der Audiotechnik nachgelesen werden, und sollen hier nicht weiter behandelt werden.

Bei Aufnahmen mittels Stereoaufnahmeverfahren werden somit die Positionsdaten, Lautstärke sowie andere Eigenschaften der einzelnen Instrumente in den linken und rechten Kanal, über Laufzeit- sowie Intensitätsunterschiede codiert.

²⁴ (Weinzierl, 2008)

²⁵ (Dickreiter et al., 2014)

Dies kann erwünscht sein, dabei sollte aber bedacht werden, dass z.B. eine Änderung der Position eines Instruments in der Stereobasis nicht einfach über den Panoramameter geschehen kann.

Hierfür kann die separate Aufnahme gewisser Instrumente oder Gruppen mittels einer Stützmikrofonierung oder getrennter Studioräume hilfreich sein, sodass eine spätere Bearbeitung der einzelnen Instrumente im Hinblick auf deren Frequenzgang sowie Amplitude oder deren Positionierung über den Panoramameter noch möglich ist. Um eine möglichst große Flexibilität in der Post-Produktion zu erreichen, bietet es sich an alle Signale möglichst sauber und ohne Positionierung im Stereobild aufzunehmen, sodass andere Bearbeitungsschritte und Verwendung für Formate wie Dolby Atmos möglich sind.

3.2 MIXING EINES STEREOPROJEKTS

Die Aufgabe des Mixings ist das Zusammenfügen und Abstimmen mehrere Spuren eines Projektes. Dabei lässt sich dieser Mixing-Prozess in 3 Unterabschnitte einteilen.

1. Zunächst erfolgt dabei das Erstellen einer Ausgewogenheit zwischen den verschiedenen Spuren und Instrumenten einer Produktion, hierbei spielt die Balance sowie die Pegelverhältnisse der einzelnen Spuren zueinander eine wichtige Rolle.

2. Das Erschaffen einer Räumlichkeit und den Eindruck von wahrnehmbarer Tiefe ist ebenso Aufgabe des Mixing Prozesses.

3. Sowie die Frequenzbearbeitung und Dynamikbearbeitung der einzelnen Spuren und Gruppen.²⁶²⁷

In welcher Reihenfolge welche Aufgaben ausgeführt werden, ist je nach Mix-Ingenieur unterschiedlich. In Abbildung 4 ist eine gut etablierte Reihenfolge dargestellt.

²⁶ (Owsinski, 2007)

²⁷ (Izhaki, 2018)

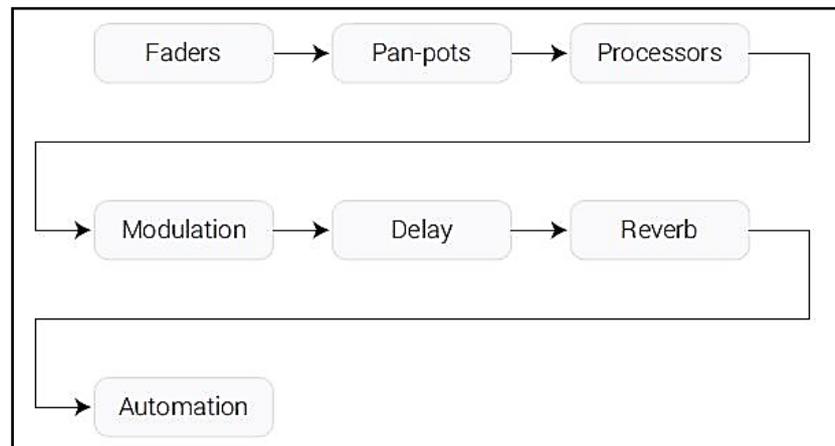


Abbildung 4: Arbeitsschritte eines Stereomix (Izhaki, 2018)

In Abbildung 4 ist der „dry-wet approach“ beschrieben bei dem zuerst alle Tracks und Signale trocken, also ohne Effekte und weitere Bearbeitung gemischt und positioniert werden (Faders, Pan-Pots, Processors) und erst dann Wet-Signale hinzukommen, wie es eine Modulation/Delay oder ein Reverb sein kann.²⁸

Für die oben genannten Aufgaben stehen dem Mix-Ingenieur eine Vielzahl von Effekten/Werkzeugen zur Verfügung, die als Plug-Ins in jeder modernen und zum Teil auch kostenlosen DAW (Digital Work Station) verfügbar sind. Die wichtigsten stellen hierbei Equalizer (EQ), Kompressoren, Limiter, Hall/Delay Plugins und der Panoramameter dar²⁹.

Dabei ist das Ziel des Mixes, alle Instrumente bei einer Musikproduktion unter Berücksichtigung der oben genannten Kriterien, in die zwei zu Verfügung stehenden Kanäle zu bringen.

Dabei wird beim Panning die Position einzelner Gruppen oder Instrumente mittels der Panningverfahren, welche genauer in Kapitel 2.2 beschrieben sind, in der Stereobasis positioniert. Die Stereobasis zwischen den zwei Lautsprechern bildet hierbei die zur Verfügung stehende Abbildungsbreite.

²⁸ (Izhaki, 2018)

²⁹ (Owsinski, 2007)

Alle Signale werden nach der individuellen Bearbeitung auf den sogenannten Master Bus geleitet/geroutet. Dieser bildet mit einem linken und rechten Kanal die endgültige Stereoverision.

Die Positionen der einzelnen Instrumente, sowie auch deren Eigenschaften, wie Amplitude und Frequenzgang liegen alle codiert in dem rechten, sowie linken Kanal vor und sind somit nur noch als ein Frequenzgang eingeschränkt bearbeitbar, siehe Kapitel 3.3 Mastering einer Stereodatei. Auf Änderungswünsche und Anpassungen im Mix selbst kann nur in der DAW-Datei selbst reagiert werden, da hier alle Spuren und Elemente einzeln vorliegen. Ebenso muss eine individuelle Anpassung des Mixes in der DAW geschehen, sofern ein anderes kanalbasiertes Format wie z.B. 5.1/7.1 ohne eine Upmix Verfahren zu nutzen, bespielt werden will.

3.3 MASTERING EINER STEREO DATEI

Der letzte Schritt, zwischen der Abnahme des vorher erstellten Mixes eines Songs und dessen Distribution, befindet sich der Schritt des Mastering. Er kann als letzter Schritt angesehen werden, bevor das Audiomaterial veröffentlicht wird.

Hierbei liegt der Fokus auf dem Optimieren und Vollenden der vorhergegangenen Mischung eines Songs oder gar eines ganzen Albums. Im Falle eines Albums oder mehrerer zusammengehöriger Songs wird hierbei darauf geachtet, dass der Sound, die Lautstärke, sowie das Timing zwischen den Songs, ein zusammengehöriges Endprodukt bilden³⁰. Neben der reinen Qualitätskontrolle des Audiomaterial bezüglich technischer Fehler, sowie dessen klangliche Veränderung, wird hierbei ebenso darauf geachtet, dass die Produktion möglichst gut auf möglichst vielen Wiedergabesystemen klingt³¹ und ein gewisser Industriestandard im Hinblick auf andere Produktionen und ihrer Lautheit erreicht wird.³²

³⁰ (Izhaki, 2018)

³¹ (Dickreiter et al., 2014)

³² (Owsinski, 2009)

Für diese Arbeiten stehen dem Mastering Ingenieur zwei Arten von Audio-Prozessoren zur Verfügung: Filter und Regelverstärker. Dabei werden Filter, wie beispielsweise Equalizer (EQ) verwendet, um die Klangfarbe eines Stückes zu beeinflussen, Regelverstärker wie z.B. Limiter, Kompressoren und Expander werden dafür eingesetzt, um damit den Dynamikbereich eines Songs zu verändern³³. Dabei komprimiert ein Kompressor die Dynamik, ein Expander vergrößert die Dynamik und ein Limiter begrenzt den Höchstpegel.³⁴

Dabei dient als Grundlage der zuvor erstellte Mix, der entweder als einzelne Musik-Stems, also als einzelne Instrumenten-Gruppen aufgeteilt z.B. in Vocals, Schlagzeug, Bass, angeliefert wird, und somit dem Mastering Ingenieur beim Stem-Mastering etwas mehr Flexibilität bietet als eine Stereodatei. Oder als einzelne zweikanalige Stereodatei angeliefert, wobei hierbei die Summe aus dem linken und rechten Kanal mithilfe der oben genannten Audio-Prozessoren als eine Summe bearbeitet werden, da das komplette Audiomaterial in ihr enthalten ist, und beim Endverbraucher genau diese zwei Kanäle über ein Stereowiedergabesystem wiedergegeben werden.

Ebenso kann die Lautstärkeberechnung an dieser Summe durchgeführt werden. Sie ist ein wichtiger Bestandteil bei der Distribution von Audiomaterial. Sie stellt sicher, dass es zu keinen Lautheitssprüngen zwischen aufeinanderfolgenden Audioprogrammen kommt. Daraus resultiert, dass der Endkonsument ein einheitliches Hörerlebnis bekommt, ohne den Pegel eigenständig anpassen zu müssen.

Hierfür hat die ITU (International Telecommunication Union) bereits 2006 in der ITU-R BS.1770 ein Algorithmus entwickelt, der zur Berechnung einer Programmlautstärke für Audiomaterial dient. Die hierfür neu eingeführten zwei Einheiten, LU (Loudness Units) sowie LUFs (Loudness Units relative to Full Scale) beschreiben somit die Lautstärke eines Audioprogramms. Dabei handelt es sich bei LU (Loudness Units) um eine relative Einheit, die den Lautheitsunterschied eines Audiosignals zu einem anderen Signal oder einem bestimmten Lautheitswert beschreibt³⁵.

³³ (Owsinski, 2009)

³⁴ (Dickreiter et al., 2014)

³⁵ (ITU-R, 2006)

Dabei besteht der Algorithmus aus vier Grundkomponenten. Filterung des Eingangssignals, Mittelwertbildung, je nach Eingangssignal eine gewichtete Summation und zuletzt ein Gating³⁶. Abbildung 5 zeigt die beschriebenen einzelnen Elemente des Algorithmus der ITU-R BS.1770.

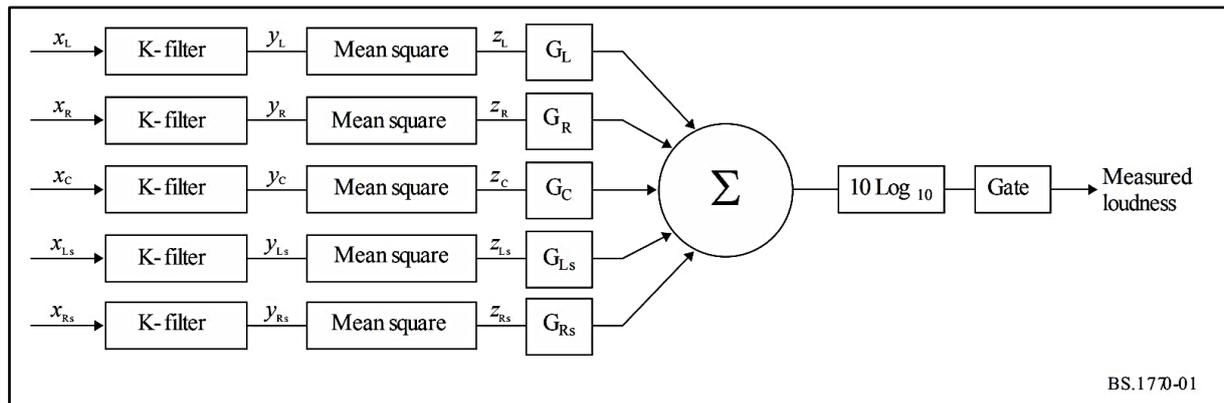


Abbildung 5: Kanalbasierte Lautheitsmessung

nach ITU-R BS.1770 (ITU-R, 2006)

Als Eingangssignale X_L , X_R , X_C , X_{LS} und X_{RS} dienen hierbei die diskreten kanalbasierten Signale einer Stereodatei oder die diskreten Signale der kanalbasierten Surroundformate Bsp. 5.1/7.1.

Auf Grundlage dieses Algorithmus veröffentlichte die EBU (European Broadcasting Union) in seiner Richtlinie R128, dass die Audioprogrammlautstärke auf -23.0 LUFS³⁷ normalisiert sein sollte, seit 2012 wird sie daher von deutschen Fernsehsendern als Standard verwendet. Dabei zielt die EBU R128 auf den Rundfunkbereich ab, die AES (Audio Engineering Society) empfiehlt speziell für Audio Streaming von Musik eine Normalisierung auf -16.0 LUFS³⁸.

³⁶ (ITU-R, 2006)

³⁷ (EBU, 2020)

³⁸ (AES, 2021)

KAPITEL 4: **OBJEKTBASIERTE WIEDERGABE**

Die objektbasierte Wiedergabe unterscheidet sich in verschiedenen Punkten von der bisher besprochenen kanalbasierten Wiedergabe und dessen Ansatz.

So ist bei der Produktion von kanalbasiertem Audio bereits das Endformat und dessen Lautsprecheranzahl klar. Das Ende der Produktion bildet das Zusammenfassen zu den jeweiligen Lautsprechersignalen. Hierbei liegt einer der großen Unterschiede zu einer objektbasierten Wiedergabe.

Die Signale werden am Ende der Produktion nicht wie bisher als Lautsprechersignale zusammengefasst, sie liegen zum Teil weiterhin als sogenannte Audioobjekte vor. Diese Audioobjekte werden mittels Metadaten (Kap. 2.1), beispielsweise der Lautstärke und Position im dreidimensionalen Raum, beschrieben.

Die endgültige Zusammenfassung, das sogenannte Rendern zu Lautsprechersignalen erfolgt im jeweiligen Endgerät. Somit ist eine optimale Anpassung an die individuelle Abhörbedingung des Endkonsumenten möglich³⁹.

Neben dem individuellen Rendering an die jeweilige Abhörsituation sind die Vorteile einer objektbasierten Wiedergabe die deutlich höhere räumliche Auflösung einer Audioszene, dies ermöglicht mehr Anpassungsfähigkeit und die Möglichkeit reichhaltigere und immersivere Audioerlebnisse in jeder Audioumgebung bereitzustellen.⁴⁰ Hierfür wird objektbasiertes Audio ebenso wie kanalbasierte Formate bereits während der Produktion positioniert, der Unterschied bei objektbasierten Audiodarstellungen ist, dass die Audioobjekte nicht auf spezifische Lautsprecherpositionen gepannt/positioniert werden, sondern frei im dreidimensionalen Raum bewegt⁴¹. Dies führt zu einer Erhöhung der Komplexität in der Manipulation, Codierung und Übertragung solcher objektbasierten Audiodarstellungen.⁴²

³⁹ (ITU-R, 2018)

⁴⁰ (Tsingos, 2017)

⁴¹ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 0.1 Preface, 2022)

⁴² (Tsingos, 2017)

4.1 DOLBY ATMOS

Mit der Veröffentlichung 2012 brachte Dolby ein neues Format auf den Markt, welches sich als Hybrid zwischen den beiden besprochenen Ansätzen der kanalbasierten und objektbasierten Wiedergabe sieht⁴³.

Dolby Atmos nutzt hierfür bis zu 128 Audiokanäle bestehend aus 10 sogenannten Audio Beds (Klangbett) und 118 Audioobjekten. Dabei können die bestehenden 118 Audioobjektkanäle für weitere Audio Beds bei Bedarf verwendet werden.

Die 10 Audio Beds haben eine kanalbasierte Audiowiedergabe als Grundlage. Diese Audio Beds können verwendet werden um Audioinhalte an den Positionen der bisher besprochenen kanalbasierten Formate wie Bsp. Stereo/5.1/7.1 zu positionieren.

Die Verwendung von diesen kanalbasierten Audio Beds ist nicht vorgeschrieben und eine Verwendung kann frei entschieden werden. Dabei endet die unterstützte Lautsprecherkonfiguration für die Audio Beds bei einem 7.1.2 Setup.

Bei den restlichen 118 Kanälen die zur Verfügung stehen, handelt es sich um sogenannte Audioobjekte die wie bereits besprochen frei im dreidimensionalen Raum bewegt und positioniert werden können. Sie sind nicht an eine genaue Lautsprecherposition bzw. an einen Kanal gebunden. Somit kann entschieden werden, wo sich ein Audioobjekt im dreidimensionalen Raum befinden soll, wie statt bisher aus welchem Kanal ein Signal kommen soll.⁴⁴

Dabei werden Audioobjekte mittels Metadaten eindeutig in ihrer Position (X-Achse (Links/Rechts), Y-Achse (Vorne/Hinten), Z-Achse (Oben/Unten)) sowie andere Eigenschaften wie Bsp. die Größe und Pegel bestimmt, sodass ein späteres Rendern auf die genaue Lautsprecherposition mit allen Eigenschaften möglich ist.⁴⁵

⁴³ SMPTE (2012).

⁴⁴ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 0.1 Preface, 2022)

⁴⁵ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.1 Beyond Multichannel Audio, 2022)

Die Audio Objekt Metadaten sind dynamisch und werden nach einer Änderung der Panning Position aktualisiert, da eine Synchronisation des Dolby Atmos Renderer mit der jeweils verwendeten DAW erfolgt.

Der Mixing Ingenieur kann hierbei selbstständig entscheiden, ob er nur Audioobjekte nutzt oder ob er diese in Kombination mit den Audio Beds verwenden möchte.⁴⁶

4.2 AUFBAU EINES DOLBY ATMOS WIEDERGABESYSTEMS

Um in Dolby Atmos zu produzieren, muss spezielle Software ggf. Hardware angeschafft werden, sodass nicht jede DAW wie bisher als Produktionsumgebung genutzt werden kann um in Dolby Atmos zu arbeiten. Für eine Produktion in Dolby Atmos wird der Dolby Atmos Renderer benötigt. Hierfür kann der Renderer auf unterschiedliche Art und Weisen integriert werden. Der Signalfluss zwischen dem Dolby Atmos Renderer und der DAW ist in Abbildung 6 beschrieben. Dabei übernimmt der Renderer 9 wichtige Aufgaben bei der Produktion:

1. Zeichnet Bed sowie Objektaudiodaten und deren Metadaten auf.
2. Beinhaltet die Down Mix und Binaurale Metadaten für das Encodieren und Monitoren in Masterdateien.
3. Exportiert Masterdateien in verschiedenen verfügbaren Formaten (Bsp. ADM BWF).
4. Exportiert .mp4 Dateien zur Qualitätskontrolle auf Konsumentengeräten.
5. Echtzeit und Offline-Lautheitsmessung an 5.1 Re-Renders.
6. Monitoring des Dolby Atmos Mixes.
7. Monitoring von Down Mixen (7.1/5.1/2.0).
8. Monitoring von Stereo und Binauralen Wiedergabe.
9. Echtzeit sowie Offline-Erstellung von Re-Renders.⁴⁷

⁴⁶ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 0.1 Preface, 2022)

⁴⁷ (Dolby Professional Dolby Atmos Content Creation Dolby Atmos Renderer, 2022)

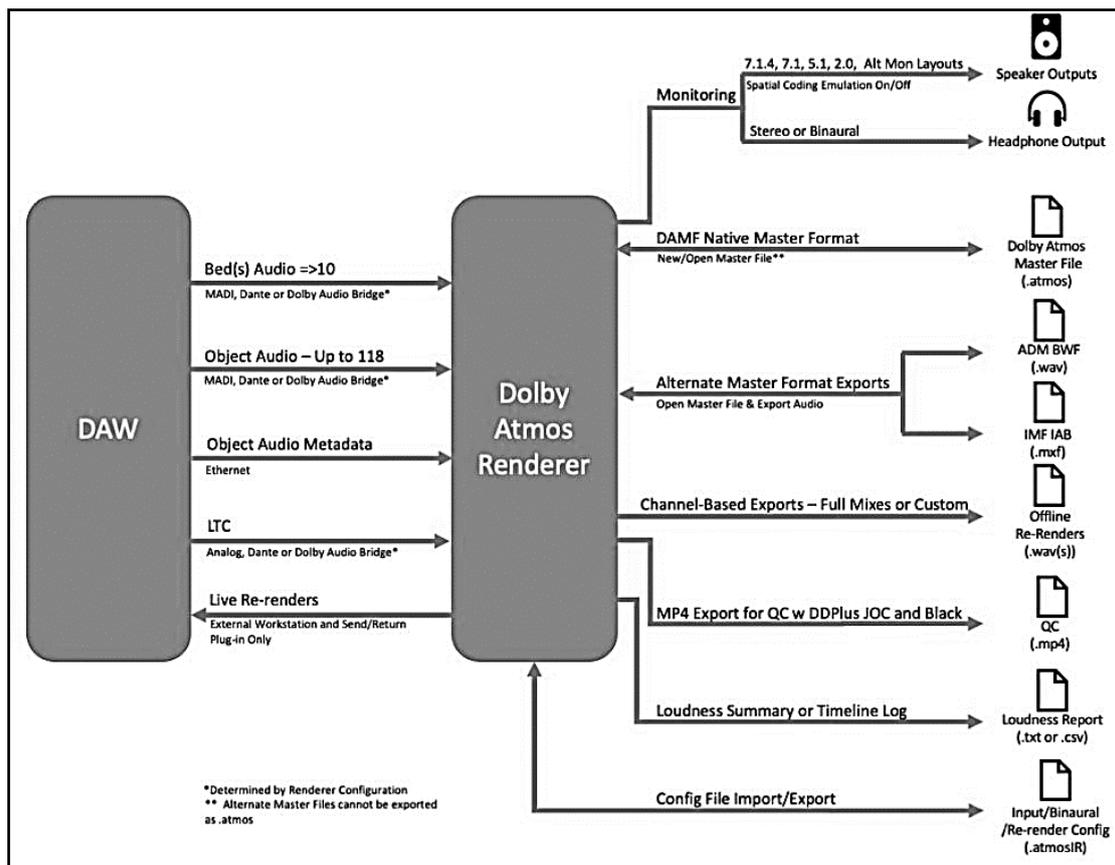


Abbildung 6: Signalfluss zwischen der DAW und dem Dolby Renderer
 (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.3
 Signal Flow, 2022)

Eine Möglichkeit der Implementierung ist die Dolby Atmos Mastering Suite. Sie beinhaltet alle Lieferumfänge um in Dolby Atmos zu arbeiten, sowie erweiterte Einstellungen, beispielsweise Tools für eine individuelle Lautsprecherkalibrierung je nach Abhörbedingung.

Das Grundkonzept besteht hierbei, die Mastering Suite auf einem externen Rechner zu haben, der dann über ein MADI oder Dante Netzwerk mit dem Produktionsrechner verbunden werden kann. Ebenso beinhaltet die Mastering Suite, 3 Lizenzen für die Dolby Production Suite, sodass ein Workflow, bestehend aus Vor-Mix-Räumen, welche dann alle in einem Main-Mix Raum enden, möglich ist.⁴⁸

⁴⁸ (Dolby Laboratories Inc. Dolby Atmos Music & Post: What ist the Dolby Atmos Mastering Suite, 2021)

Die Dolby Production Suite ist dafür ausgelegt auf dem gleichen Rechner wie die DAW zu laufen. Sie bietet ebenso alle Umfänge für das Arbeiten in Dolby Atmos. Der in der Production Suite enthaltene Renderer ist hierbei, wie auch in der Mastering Suite, eine eigenständige Anwendung, die neben der DAW läuft.

Für die Verbindung des Dolby Atmos Renderers zur DAW wird die Dolby Audio Bridge verwendet. Sie kann dafür genutzt werden, Audio an den Renderer zu routen sowie Audio vom Renderer an die DAW zu routen.⁴⁹

Bei der Verwendung des Dolby Atmos Renderers als externe Anwendung neben der DAW muss außerdem berücksichtigt werden, dass selbst darauf zu achten ist, dass Renderer und DAW synchron laufen. Ebenso muss das Routing über die Dolby Audio Bridge selbst vorgenommen werden. Das Panning/Platzieren der Audioobjekte geschieht bei beiden Varianten (Mastering/Production Suite) beispielsweise über den Dolby Atmos Music Panner oder einen anderen Surround Panner innerhalb der DAW.

Neben dem externen Dolby Atmos Renderer gibt es mittlerweile DAWs die nativ einen Dolby Atmos Renderer zu Verfügung stellen. Diese Variante bietet vor allem für Einsteiger eine günstige und einfache Möglichkeit Dolby Atmos auszuprobieren und zu produzieren.

Zum Stand dieser Arbeit sind Logic Pro⁵⁰ und Nuendo⁵¹ ein Beispiel für DAWs, welche bereits einen integrierten Renderer für Dolby Atmos besitzen. Dies bedeutet, dass kein externer Renderer, wie beispielsweise in der Production Suite benötigt wird.

Vorteile dieser Variante sind neben der Einsparung von Kosten, falls bereits ein DAW in Besitz ist, auch dass diverse Aufgaben, wie beispielsweise das Synchronisieren mit dem Renderer oder das komplexe Routing sehr vereinfacht werden. Ein integrierter Renderer bietet jedoch nicht ausschließlich Vorteile. Ein Nachteil stellt der im Vergleich zu einer Production oder Mastering Suite verringerte Lieferumfang dar.

⁴⁹ (Dolby Laboratories Inc. Dolby Atmos Music & Post: How do I get the Dolby Audio Bridge to return to Pro Tools, 2021)

⁵⁰ (Dolby Laboratories Inc. Dolby Atmos Music & Post: Getting Started with Logic Pro, 2022)

⁵¹ (Steinberg Media Technologies GmbH, 2022)

In Logic Pro v10.7 sind zum Stand dieser Arbeit Funktionen wie die Unterstützung der Abhörlautsprecheranordnung 11.1.10 auf 7.1.4 beschränkt. Auch können keine DAMF (Dolby Atmos Master File) geladen werden, sodass nur ein Import von ADM BWF (Audio Definition Model Broadcast Wave Format) Dateien möglich ist. Funktionen, wie die in der Mastering Suite enthaltenen Lautsprecherkalibrierung und Bass Management Funktionen, sind ebenfalls nicht in der aktuellen Version in Logic Pro v10.7 enthalten.

Neben den beschränkten Funktionen bietet solch eine Integration jedoch viele Möglichkeiten auch ohne großes Wissen über Routing und Synchronisation, Dolby Atmos zu produzieren. Nutzt man jedoch aktuell eine andere DAW, die keinen integrierten Renderer bietet, so lässt sich mittels Audio Bridge und Dolby Atmos Renderer, trotzdem in Dolby Atmos produzieren. So besitzen ProTools und Ableton-Live, verschiedenste Funktionen und Tools mit denen in Dolby Atmos gearbeitet werden kann.

Nur Audioworkstations die über keinerlei grundlegende Mehrkanal-Routing-Audioarchitektur verfügen, die notwendig ist, um mit dem externen Dolby-Renderer zu kommunizieren, sind aktuell ausgeschlossen aus der Produktion und können somit nicht verwendet werden um in Atmos zu produzieren. Ein Beispiel hierfür stellt die Software GarageBand, welche von Apple entwickelt wurde, dar.⁵²

Neben der Software, die eventuell neu angeschafft werden muss, ist die Abhörsituation von besonderer Relevanz, wenn in hoher Qualität Dolby Atmos produziert werden soll. Um in Dolby Atmos zu produzieren, braucht es mindestens eine DAW mit Renderer Integration oder die Production/Mastering Suite sowie ein paar Kopfhörer.

Dies stellt das Mindeste dar, was benötigt wird um in Atmos zu produzieren. Um jedoch eine Produktion in hoher Qualität zu gewährleisten und die volle räumliche Auflösung beurteilen zu können, empfiehlt Dolby eine 7.1.4 Lautsprecheranordnung (7 Lautsprecher auf Ohr Höhe, 1 LFE-Kanal, 4 Höhen Lautsprecher) für die Produktion von Inhalten.⁵³

⁵² (Rothemich, 19.01.2022)

⁵³ (Dolby Laboratories Inc., Dolby Atmos Home Entertainment Studio Technical Guidelines, 06.05.2021)

Dabei gilt die 7.1.4 Lautsprecheranordnung als empfohlen (siehe Abbildung 7), bildet aber nicht das Ende der unterstützten Lautsprecheranordnungen. So kann bei Bedarf bis zu einer maximalen Lautsprecheranzahl von 22 Lautsprechern aufgerüstet werden (11.1.10), um in Dolby Atmos für Home Entertainment und Music zu produzieren.



Abbildung 7: 7.1.4 Home Entertainment Speaker Setup
(Dolby Atmos Home Entertainment Studio Technical Guidelines, 06.05.2021)

Dabei sollten die verwendeten Lautsprecher möglichst alle baugleich sein und möglichst der gleichen Marke angehören, sodass eine ausgeglichene und gleichmäßige Wiedergabe ermöglicht wird. Ausnahmen sind zulässig, so können bei Bedarf kleinere Lautsprecher Baugrößen für die Höhenkanäle genutzt werden.

Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass alle Lautsprecher einen Pegel von 85 dB SPL (C) an der Abhörposition erreichen, mit einem zusätzlichen Headroom von 20 dB.

Zusätzlich sind in der Guideline von Dolby, die Abstände der Lautsprecher untereinander, sowie Decken und Bodenabstände definiert, sowie alle Winkel und Positionen der Lautsprecher bis zu einer Lautsprecheranordnung von 11.1.10 definiert und können dort bei Bedarf nachgelesen werden.^{54 55}

⁵⁴ (Dolby Laboratories Inc., Dolby Atmos Home Entertainment Studio Technical Guidelines, 06.05.2021)

⁵⁵ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

KAPITEL 5: PRODUKTIONSWORKFLOW IN DOLBY ATMOS

Der Workflow einer Dolby Atmos Produktion unterscheidet sich bezüglich gewisser Arbeitsweisen und Vorgängen. Das Wichtigste ist jedoch, dass die Arbeit an der Produktion wie auch bei einer kanalbasierten Produktion in der DAW selbst geschieht. So bleiben gewisse Workflows gleich und können übernommen werden. Andere Arbeitsschritte und Aufgaben müssen abgewandelt und überarbeitet werden.

Bei der Arbeit in Dolby Atmos wird nur eine End-Datei erstellt, die sogenannte Dolby Atmos Master File (DAMF). Diese wird dann nach der Codierung, im jeweiligen Endgerät auf die zu Verfügung stehenden Lautsprecher gerendert, siehe Abbildung 7. Dazwischenliegende Codierungsvorgänge werden in Kapitel 5.3 beschrieben.

Dies stellt eine erhebliche Erleichterung und eine Zeitersparung in der Produktion von Audiomaterial dar, da so keine extra Mischungen für unterschiedliche kanalbasierte Formate angefertigt werden müssen.⁵⁶ In diesem Kapitel soll auf den Workflow einer Produktion eingegangen werden. Angefangen wird hierbei bei der Aufnahme sowie Anlieferung von Audiomaterial bis hin zur Distribution und dessen Unterschiede bei der Auslieferung und Codierung der Dateien.

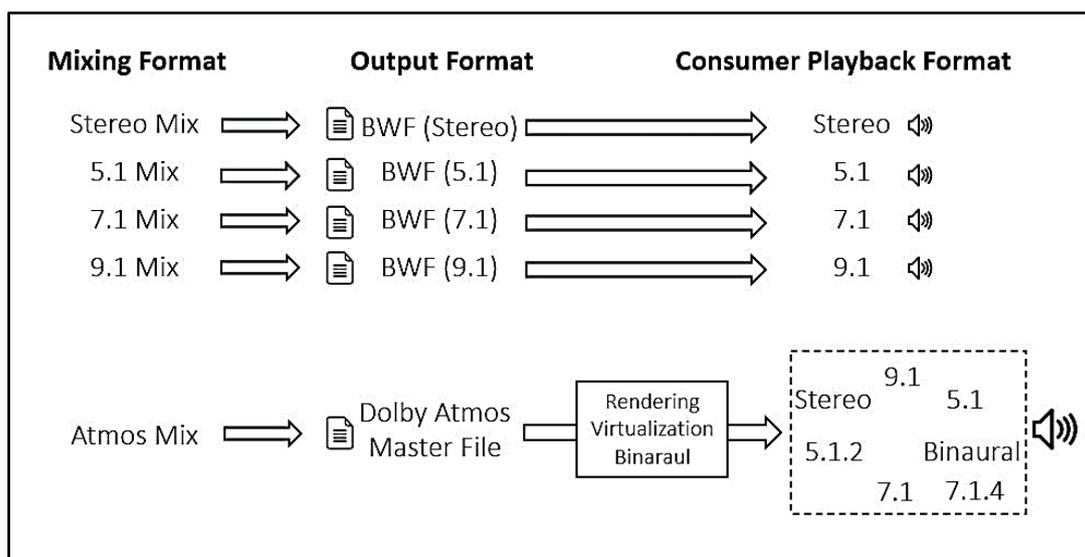


Abbildung 8: Konzept einer Kanal- und Objektbasierten Produktion
(Anlehnung an Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

⁵⁶ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.1 Beyond Multichannel Audio, 2022)

5.1 ANLIEFERUNG/AUFNAHME VON MATERIAL

Der erste Schritt in einer Produktion ist die Ausarbeitung des Konzepts. Hierbei wird festgelegt, was produziert und wie das Endprodukt klingen soll. Wird hierbei bereits eine immersive Produktion angestrebt, kann somit noch im vollen Umfang bei der Aufnahme und Produktion von Material auf die besonderen Bedürfnisse einer immersiven Audioproduktion eingegangen werden.

So kann sich der Künstler bereits im Vorhinein überlegen, wo er sich seine Instrumente beim Arrangement des Tracks im dreidimensionalen Raum vorstellt. Auch der Aufnahmeingenieur kann die Aufnahme anders angehen und bereits überlegen wie sich Mikrofonpositionen später als Objekte platzieren lassen.⁵⁷ Somit kann bereits auf die spätere Arbeit in Dolby Atmos Rücksicht genommen werden und eine solide Grundlage für die Arbeiten geschaffen werden. So können auch für eine Produktion in Dolby Atmos, die in Kapitel 3.1 beschriebenen Aufnahmeverfahren zum Einsatz kommen. Hierbei ist darauf zu achten, dass es zu möglichst wenig Übersprechen zwischen Instrumenten kommen sollte, sodass ein späteres Platzieren von Instrumenten im dreidimensionalen Raum sauber und exakt möglich ist. Für die Verwendung von Audio Beds sind Stereosignale oder bereits vorhergegangene Signale aus einem Surround Mix geeignet. Die Verwendung von Audioobjekten setzt ein Mono Signal voraus. Soll ein Stereo-Signal als Objekt verwendet werden, so werden zwei Objekte genutzt. Um eine möglichst immersives Klangbild zu erstellen sind vor allem dekorrelierte Signale von Bedeutung. Dies bedeutet, dass eine Klangquelle nicht vergrößert wird, wenn das exakt gleiche Signale auf mehrere Lautsprecher gepannt/positioniert wird. Dies hat nur eine Verteilung des Signals zur Folge was auch als „Big Mono“ bezeichnet wird. Soll die Klangquelle akustisch vergrößert werden und der Eindruck eines immersiven Klangbildes erzeugt werden, so müssen die wiedergebenden Signale Unterschiede aufweisen, also dekorrelierte Signale sein. Dabei kann bereits bei der Aufnahme darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Signaltrennung erfolgt.

⁵⁷ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

So lässt sich bei der Aufnahme eine Unterteilung in Direktschall, Early Reflections und diffusem Nachhall vornehmen.

Direkt Schall ist der direkt von einer Schallquelle ausgestrahlte Schall. Bei einer Musikaufnahme beispielsweise das direkte Signal einer Gitarre⁵⁸. Als Early Reflections beschreibt man sehr frühe Erstreflexionen (ca. 15 Millisekunden) von Direktschall, die an Oberflächen wie Wänden, Decken und Böden oder an Gegenständen im Raum zurückgeworfen werden⁵⁹. Early Reflections dienen dem menschlichen Gehör vor allem zur Bestimmung der Richtung und Entfernung einer Schallquelle.

Neben den sehr frühen Erstreflexionen, gibt es den sogenannten diffusen Nachhall. Als Nachhall werden die vielen restlichen Reflektionen im Raum, die sich zu einem Nachhallgemisch überlagern, bezeichnet⁶⁰. Die Art (Bsp. Frequenzverteilung und das Abklingverhalten von unterschiedlichen Frequenzen), sowie die Dauer des Nachhalls in einem Raum bestimmt maßgeblich seinen Klang und unsere räumliche Wahrnehmung bezogen auf die wahrgenommene Größe.

Bei der Aufnahme von Audiomaterial, welches in Dolby Atmos verwendet werden soll, kann mithilfe dieser Unterscheidung Rücksicht auf die Anforderungen genommen werden, um ein immersives Klangerlebnis zu gestalten.

So gibt es Methoden zur Aufnahme von Audiomaterial, die möglichst alle drei oben beschriebenen Raumkomponenten einzeln aufnehmen. Hierzu werden für den Direktschall die bisherigen üblichen Aufnahmemethoden verwendet, wie sie auch für eine Stereoproduktion zum Einsatz kommen. Der Direktschall einer Quelle übernimmt auch in immersiven Tonformaten eine wichtige Rolle und bildet gewissermaßen das Fundament. Nachhall und Raumklang bilden die Umhüllung der Audio-Produktion. Soll der Raumklang eines Raumes aufgenommen werden, um in dann später in der Produktion in Dolby Atmos zu verwenden, können Einzelmikrofone verwendet werden.

⁵⁸ (Buff, 2020)

⁵⁹ (Weinzierl, 2008)

⁶⁰ (Dickreiter et al., 2014)

Diese werden im Raum verteilt und möglichst so platziert, dass kein Direktschall sowie Early Reflections die Mikrofonkapsel erreicht.

Dies kann erzielt werden, indem ausreichender Abstand zu schallharten Begrenzungsflächen wie Wände, Decken und Böden eingehalten wird. Außerdem können Trennwände oder andere Möglichkeiten zur Trennung des akustischen Pfades mit dem Mikrofon eingesetzt werden, um somit möglichst wenig von Direktschall und Early Reflections, und dafür viel Raumklang und Nachhall aufzunehmen⁶¹.

Die aufgenommenen Signale liefern somit eine gute Grundbasis und viel Flexibilität in der Post Produktion und Mixing des Projektes.

Auch kann die Verwendung von Mehrkanalmikrofonsystemen sinnvoll sein. Diese Art von Mikrofonen wird für die Aufnahme von ganzen Audioszenen verwendet.

Sie nehmen hierfür Direktschall, Early Reflections und den Nachhall eines Raumes zeitgleich in einer Sequenz auf.

Sie bestehen aus mehreren Einzelkapseln, die in verschiedenen Richtungen zeigen und die somit den Raumklang komplett aufzeichnen, wobei hier zum Teil eine hohe Signaltrennung vorhanden ist. Beispiele hierfür sind Soundfield/Ambisonic Mikrofone wie das Sennheiser Ambeo⁶² oder das ORTF Surround/3D ORTF von Schoeps⁶³.

Die entstehenden Signale müssen dann jedoch noch umgerechnet werden, sodass eine Verwendung in Dolby Atmos möglich ist.

Durch die nicht getrennte Aufnahme der einzelnen Raumkomponenten bietet solch ein Mikrofonsystem aber keine hohe Flexibilität und eine Bearbeitung einzelner Klänge in der Post Produktion ist sehr aufwändig.

Je nach Einsatzgebiet und Verwendung, kann ein Einsatz eines solchen Systems aber auch sinnvoll sein und Vorteile aufweisen.

⁶¹ (Buff, 2020)

⁶² (Sennheiser electronic GmbH, 2022)

⁶³ (Schoeps GmbH, 2022)

Stehen keine speziellen 3D-Mikrofonsysteme zur Verfügung, so können Einzelmikrofone verwendet werden, und oben beschriebene Aufnahmemethoden eingesetzt werden. Auch bietet sich die Aufnahme von mehreren Dopplungen und Takes an, sodass später genug Material zur Positionierung im dreidimensionalen Raum zur Verfügung steht. Im Allgemeinen gilt je differenzierter und unterschiedlicher das Ausgangsmaterial zur Verfügung steht, desto mehr Freiheiten und Möglichkeiten gibt es später in der Post Produktion.

Dies gilt ebenso bei der Anlieferung von Audiomaterial, welches bereits als kanalbasiertes Format Bsp. als Stereo oder Surround Mix vorliegt. Für die Arbeiten in Dolby Atmos sollten hierfür Mono oder Stereo-Stems angefordert werden.

Diese sollten möglichst getrennt von jeglicher Audioeffektbearbeitung wie z.B. Hall oder Delays vorliegen. Dies ermöglicht eine größtmögliche Flexibilität, sodass Hall oder Delays später im dreidimensionalen Raum frei unabhängig von den trockenen Signalen positioniert werden können.⁶⁴

5.2 MIXING VON OBJEKTBASIERTEM AUDIO

Durch die neuen Konzepte der objektbasierten Wiedergabe ergeben sich beim Mixing von Audioproduktionen neue Überlegungen und Möglichkeiten.

Grundlegende Aufgaben wie das Mixing sowie das Bearbeiten von Audiosignalen, geschieht wie auch bei der Arbeit an kanalbasierten Formaten innerhalb der DAW.

Anders als bei Arbeiten in Stereo, bei der nur die Basisbreite zwischen dem linken und rechten Lautsprecher zum Positionieren und Bewegen von Audioinhalten zur Verfügung steht, sind bei Dolby Atmos keine Begrenzungen mehr spürbar. Audioinhalte können wie in einer Kugelanordnung um den Hörer herum, an jeglicher Stelle im Raum positioniert sowie bewegt werden.

⁶⁴ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Dies bietet komplett neue Möglichkeiten aber auch gewisse Probleme. Durch die enorme Vergrößerung des möglichen Positionierungsbereichs, stellt sich nun die Frage, wie und wo etwas im dreidimensionalen Bereich am besten positioniert werden sollte.

Grundsätzlich sollte beim Positionieren von Audioinhalten und besonders beim Bewegen dieser durch Automationen, der Content und dessen Grundidee an erster Stelle stehen.

So sollte eine Stück Musik in Dolby Atmos nicht komplett in seine Einzelbestandteile zerfallen und immer noch als ein homogenes Gesamtstück wahrgenommen werden.⁶⁵

Um den Zuhörer in eine immersive Audioumgebung zu versetzen, kann es sich ebenso anbieten die Höhenkanäle sowie eventuell Seitenkanäle erst nach und nach zu bespielen und somit die immersive Räumlichkeit Stück für Stück aufzubauen.

Dies bietet viele Möglichkeiten und ist am Ende eine Gestaltungsfrage, welche individuell für jedes Musikstück und Projekt einzeln beantwortet werden muss.

In einem 3D Audiosystem spielen bei der Frage, wo Klänge und Sounds am besten positioniert werden sollten, auch psychoakustische Phänomene eine entscheidende Rolle.⁶⁶

Sie können helfen die Ortung von Sounds zu unterstützen und eine natürliche immersive Klangwahrnehmung deutlich verbessern.

So empfindet es der Mensch als deutlich schwieriger, die Quelle zu lokalisieren je niederfrequenter das Signal ist. Außerdem werden Audioelemente die vermehrt hohen Frequenzen besitzen, besser und häufiger von Oben wahrgenommen.

Nutzt man die beiden beschriebenen Phänomene und entfernt tiefere Frequenzen eines Signals, sowie fügt weitere hohe Frequenzanteile hinzu, so kann dies die Richtungswahrnehmung bei einer Positionierung oberhalb des Zuhörers unterstützen.⁶⁷

⁶⁵ (Harvey, 2020)

⁶⁶ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

⁶⁷ (Lee, 2017)

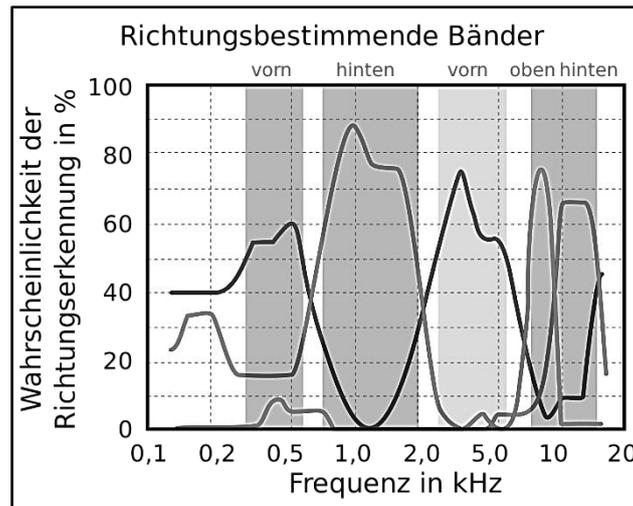


Abbildung 9: Blauertsche Bänder
(https://de.wikipedia.org/wiki/Blauertsche_B%C3%A4nder, 2022)

Bei einer Positionierung können ebenso die Blauertschen Bänder berücksichtigt werden. Sie geben Frequenzbänder an, die nur im Pegel angehoben werden und somit vom menschlichen Gehör für die räumliche Richtungslokalisation von besonderer Bedeutung sind.⁶⁸ Sie können genutzt werden, um die Richtung und Positionierung eines Objektes zu unterstützen und sollten bei der Positionierung von Audioobjekten und deren Inhalt beachtet werden, wenn ein möglichst natürlicher Richtungseindruck entstehen soll.

Neben den psychoakustischen Phänomenen, die eine Position eines Audioobjektes mitbestimmen können, spielen technische Überlegungen ebenso eine Rolle. So sollten Audioobjekte die Zentral/Mittig gehört werden sollen, möglichst nicht in die Mitte eines 3D Audiosystems positioniert werden.

Wird dies getan, so kommt das Signal gleichzeitig aus allen verfügbaren Lautsprechern, diese Art der Beschallung ist sehr unnatürlich und bietet kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Das Resultat wird auch als „Big Mono“ bezeichnet und kann später beim Downmix auf kleinere Lautsprecheranordnungen zu Balanceproblemen im Mix führen.⁶⁹

⁶⁸ (Weinzierl, 2008)

⁶⁹ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Wird ein nahes oder zentrales Objekt gewünscht bietet es sich an, dieses trocken auf den Center- oder als Phantomschallquelle zwischen dem linken und rechten Lautsprecher zu positionieren. Werden dann die Binaural Render Einstellungen auf AUS oder NAH gestellt, so bietet dies eine nähere/in Ohr Lokalisation wie sie auch bei einem Stereomix zu finden ist.

5.2.1 DOLBY ATMOS PANNER PLUGIN

Zur Positionierung innerhalb der DAW stehen mehrere Möglichkeiten zur Auswahl. So kann ein bestehender Surround-Panner genutzt werden, der dann Metadaten und Einstellungen wie: X, Y, Z-Position des Audioobjekts, Größe des Objektes: Wie viel Signalanteile verteilen sich um die Objektposition herum auf andere Lautsprecher, Snap to Speaker: Parameter beschreibt an welcher einzelnen diskreten Lautsprecherposition das Objekt wiedergegeben wird, anstatt als Phantomschallquelle aus mehreren Lautsprechern zu erklingen, ermöglicht.

Hat eine DAW keinen integrierten Surround Panner der mit Dolby Atmos funktioniert, steht hierfür das Dolby Atmos Music Panner Plugin zur Verfügung. Hierbei handelt es sich nicht um einen gewöhnlichen Panner.⁷⁰ Denn er verarbeitet keine Audiodaten und ist nur für die Erstellung von Metadaten geeignet, wenn er auf eine Audiospur der 118 Audioobjekte eines Dolby Atmos Mixes geladen wird. Je nach individueller Einstellung der Parameter werden Metadaten erzeugt und diese direkt an den Dolby Atmos Renderer geschickt, der dann die Audioverarbeitung übernimmt. Ebenso bietet er zusätzliche Features, die eventuell kein integrierter Surround Panner besitzt. So lassen sich mit Hilfe des integrierten Sequenzers, Audioobjekte in Abhängigkeit des eingestellten DAW-Tempos bewegen und automatisieren.⁷¹ Eine Einstellung speziell für den LFE-Kanal ist bei dem Dolby Atmos Music Panner Plugin nicht vorhanden, da Audio Objekte keinen Zugang auf den LFE-Kanal haben.

⁷⁰ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

⁷¹ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 9.4 The Dolby Atmos Music Panner, 2022)

5.2.2 DOLBY ATMOS BEDS/OBJECTS

Durch die Möglichkeit von Audio Beds und Audio Objekten, sowie dessen Mischung und einzelne Verwendung, stellt sich die Frage, wann welche Form wie genutzt werden sollte. So gibt es bereits Workflows, die nur Audioobjekte nutzen, und diese an den exakten Kanalbasierten Lautsprecherpositionen fest positioniert belassen, und somit kein Bedarf an den 10 Audio Beds besteht. So haben Audio Beds und Objekte aber verschiedenste Vorteile sowie Nachteile, die je nach Verwendung individuell berücksichtigt werden müssen. So lassen sich Audioobjekte mit Hilfe des Dolby Atmos Music Panner Plugins frei im Raum bewegen und auf das DAW-Tempo bei Bedarf abgestimmt automatisieren. Ebenso bieten Audioobjekte den Vorteil einer sehr genauen Positionierung im dreidimensionalen Raum mittels derer Positions-Metadaten (X, Y, Z) sowie die genaue Positionierung bei Endkunden mittels Rendering auf das exakte Gerät.⁷² Wie bereits beschrieben haben Audioobjekte jedoch keine Möglichkeit auf den LFE-Kanal gepannt zu werden. Dies bezieht sich auch auf die Empfehlung an die Bauart der verwendeten Lautsprecher von Dolby. Da in Musik häufig Signale, die im gesamten Frequenzbereich ausgeprägt sind auf Seiten- und Höhenkanäle gelegt werden, sollten hier baugleiche Lautsprecher zum Einsatz kommen, die die Wiedergabe solcher Full-Range Signale den Anforderungen entsprechend ermöglicht.⁷³ Jedoch bieten Audio Beds ebenso Vorteile in der Produktion. So sind vorproduzierte Inhalte in den kanalbasierten Surroundformaten sehr gut geeignet für Audio Beds.⁷⁴ Ebenso lassen sich bei der Verwendung von mehreren Audio Beds, spezifische Audiospuren Bsp. Drums, Vocals separat auf Gruppen verteilen und so übersichtlicher gestalten. Auch die Bearbeitung als Gruppe ist mit Audio Beds möglich, da sie kanalbasiert sind und somit ein Mix Bus oder ein Master Bus möglich ist. Da Audioobjekte direkt an den Dolby Renderer geroutet werden, ist hier nur eine Bearbeitung der individuellen Audiospur im Vergleich zu Audio Beds möglich.

⁷² (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

⁷³ (Dolby Laboratories Inc., 06.05.2021).

⁷⁴ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 9.1 Single an Multiple Bed Configurations, 2022)

5.3 ENCODIERUNG/DISTRIBUTION

Durch den neuen Workflow einer objektbasierten Audioproduktion im speziellen hier Dolby Atmos, ändern sich auch die Codierungs- und Distributionsvorgänge zum Teil sehr stark im Vergleich zu einer Stereo Produktion. So sollen in diesem Kapitel vor allem die Encodierung der Datei beschrieben werden, um somit ein besseres Verständnis für die Vorgänge zu erlangen, von der Produktion bis zum Endkunden. So wird das Endprodukt nicht wie bisher in eine kanalbasierte Datei exportiert (Bsp. als WAV), sondern als sogenannte Dolby Atmos Master File (DAMF) exportiert. Eine kanalbasierte Datei enthält je nach verwendetem Format die spezifischen Audiokanäle für z.B. Stereo 2 Kanäle oder für größere Formate wie 5.1 Surround mehrere Audiospuren. Neben den Audiospuren die in der Datei enthalten sind können auch hier Metadaten je nach verwendetem Format in der Datei hinterlegt sein.

Aufgrund seiner bis zu 128 Audiokanäle finden sich auch in der Dolby Atmos Master File bis zu 128 Audiokanäle wieder. Neben dieser bereits um ein vielfaches höheren Audiospuranzahl befinden sich auch deutlich mehr Metadaten in der DAMF-Datei. So sind die X, Y, Z Koordinaten, der Binaurale Render Modus, die Audio Input Zuweisung (Object oder Bed), Audio Input Namen, Audio Input Gruppen Zuweisung, die Trim und Downmix Einstellungen sowie andere Metadaten in dem Metadaten Packet enthalten.⁷⁵

Dabei generiert der Dolby Atmos Renderer die Metadaten selbst, ausgeschlossen sind hiervon die Audiosignale und derer X, Y, Z Koordinaten, diese werden in der DAW generiert. Um eine DAMF-Datei zu erhalten, muss sie aufgenommen werden. Dies funktioniert mit Hilfe der Recording Funktion im Renderer selbst. Die erstellte DAMF-Datei kann dann in den Dolby Atmos Renderer geladen werden und eine gewünschte Datei für die Distribution an Bsp. Streaming Anbieter erstellt werden. Hierbei können auch kanalbasierte Formate wie z.B. für 5.1/7.1 Systeme generiert werden sogenannte Re-Renders.⁷⁶

⁷⁵ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.1 Beyond Multichannel Audio, 2022)

⁷⁶ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

In Abbildung 9 sind die unterschiedlichen Exportformate sowie der Unterschied in der Distributionskette im Vergleich zu einer kanalbasierten und objektbasierten Produktion dargestellt.

Als Masterfile wird bei einer kanalbasierten Produktion Bsp. eine kanalbasierte WAV-Datei exportiert. Diese wird mit Hilfe eines Encoders in die verschiedenen codierten Formate überführt. Beispiele sind hierfür in Abbildung 9 zu sehen. Dabei haben sich unterschiedlichste Dateiformate als Zielformate für Streaming-Anwendungen aber auch für die Weiterverarbeitung auf Physikalischen Wiedergabemedien beispielsweise die CD etabliert.

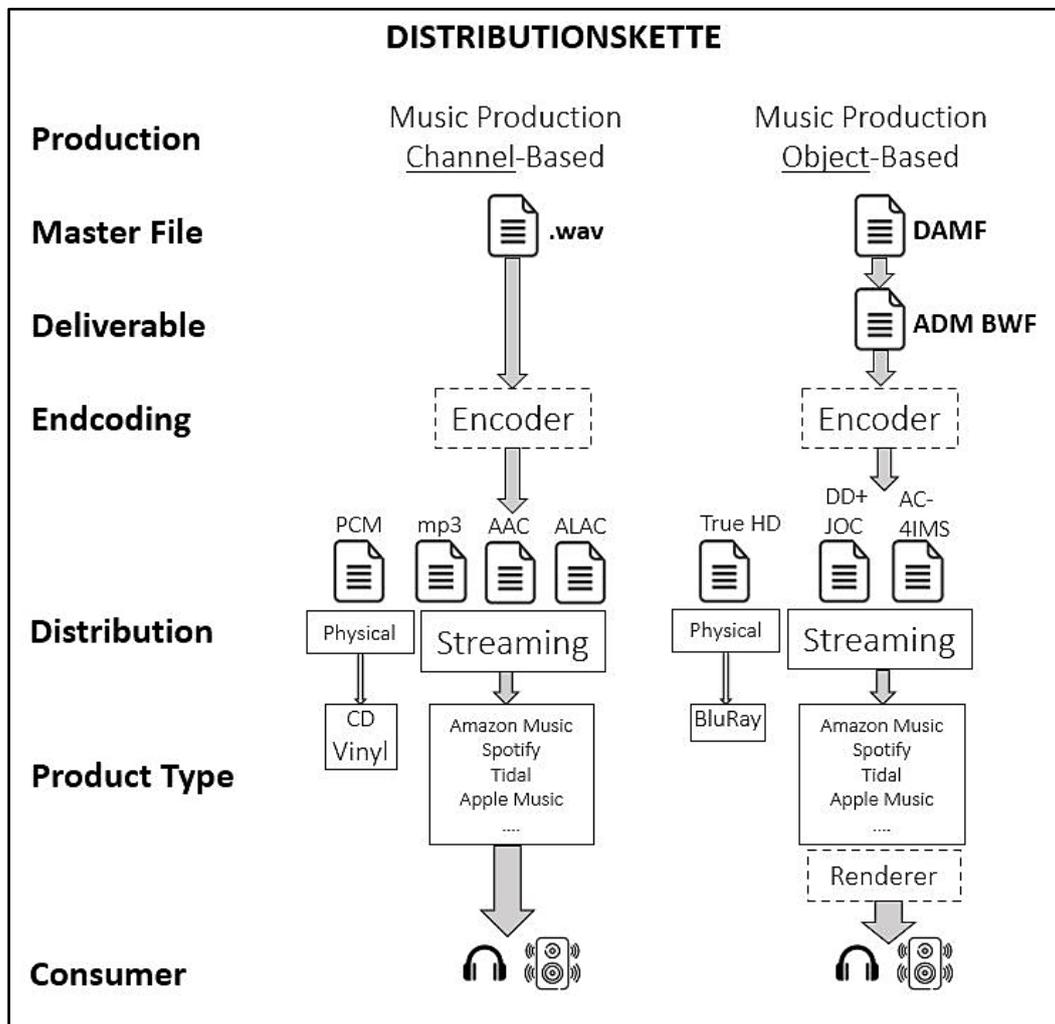


Abbildung 10: Distributionskette Kanal/Objektbasiert
(Anlehnung an Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Nach der Encodierung in das jeweilige Zielformate und Übermittlung an den beispielsweise Streaming Anbieter, kann der Endkonsument diese codierte Datei über ein Wiedergabesystem abspielen.

Wie bereits beschrieben wird der Dolby Atmos Mix als eine Dolby Atmos Master File gespeichert. Hierbei liegen alle Audiospuren sowie Metadaten getrennt voneinander vor. Diese DAMF-Datei kann in den Dolby Atmos Renderer geladen werden und in verschiedenste Zielformate exportiert werden.

Das meist genutzte Format für die Auslieferung an verschiedenste Endkunden ist die ADM BWF-Datei (Audio Definition Model Broadcast Wave Format). Sie enthält die PCM Audio Daten aller Audio Kanäle, sowie dessen Metadaten in einem XML Metadaten Chunk. Neben der BWF-Datei gibt es noch die Option in eine IMF.IAB-Datei zu exportieren. Dieses Format findet häufiger als Zwischenformat Verwendung⁷⁷, da ADM BWF Dateien als Zielformat für die meisten Distributionswege benötigt werden, sollen sie gesondert betrachtet werden.

Dabei enthält die BWF ADM Datei nicht wie die DAMF-Datei drei Dateien (.atmos, .atmos.metadata, .atmos.audio), sondern enthält alle notwendigen Informationen in nur einer Datei, und ist wie die Dolby Atmos Master File objektbasiert, sodass die Audiodaten getrennt von den Metadaten vorliegen.

Dabei kann die BWF-Datei auch als Austausch Format angesehen werden. Da sie beispielsweise in Pro Tools oder anderen DAWs importiert werden kann, um somit einen Dolby Atmos Mix direkt in der DAW zu öffnen. Zusätzlich kann sie im Dolby Atmos Renderer geöffnet werden, wobei sie hier nicht bearbeitet werden kann, sondern nur ein Abspielen möglich ist.⁷⁸

Wie die kanalbasierte WAV-Datei wird auch die BWF ADM Datei durch einen Encoder in die Endformate für die jeweilige Anwendung codiert.

⁷⁷ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.1 Beyond Multichannel Audio, 2022)

⁷⁸ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Durch das Konzept der objektbasierten Wiedergabe und somit dem getrennten Vorliegen der bis zu 128 Audiokanäle sowie dessen Metadaten, ist eine Reduzierung der Dateigröße notwendig. Der erste Schritt der Verarbeitung für die Wiedergabe bei Endkunden ist das Spatial Coding, hierbei werden aus den 128 Audiokanälen, 12, 14 oder 16 Elemente/Gruppen. Für den Prozess werden nahegelegene Audiodaten von Audio Beds sowie Audioobjekten mit Hilfe von Lautstärke- sowie Position-Algorithmen als sogenannte Elemente zusammengefasst. Dies geschieht dynamisch und die entstandenen Elemente enthalten ihre eigenen Metadaten. Dabei kann die Anzahl der Elemente zwischen 12, 14 und 16 variiert werden. Da hierbei klangliche Änderungen entstehen können, kann im Dolby Atmos Renderer eine Simulation dieses Prozesses simuliert werden, sodass bereits während des Mixing und Produktionsarbeit dessen Auswirkungen berücksichtigt werden können und bei Bedarf sofort während der Produktion Änderungen vorgenommen werden können.⁷⁹

Die Endformate für den jeweiligen Anwendungsbereich sind Dolby TrueHD, DD+JOC und AC4-IMS. Für das Streaming des Endprodukts auf Streaming Plattformen wie Amazon Music, Tidal, Apple Music, ... kommen beispielsweise Formate wie DD+JOC sowie AC4-IMS zum Einsatz.

Hier wird für die Wiedergabe über Lautsprecher das Format DD+JOC (Dolby Digital Plus Joint Object Coding) (Mehrkanal Datei mit Objektmetadaten) eingesetzt.

Wird Dolby Atmos über Kopfhörer konsumiert so kommt das Format AC4-IMS (AC4 - Immersive Stereo) (Zweikanal Binaural Datei) zum Einsatz. Dieses Format wurde speziell für die optimierte Übertragung auf mobile Endgeräte entwickelt.⁸⁰ Dabei unterstützt AC4-IMS objektbasierte Inhalte entweder als diskret vorliegende Objekte oder als Spatial Objekt Gruppen, siehe Spatial Coding. Dabei können auch die Binauraleinstellungen, die während des Mix vorgenommen wurden beinhaltet werden, sodass sie, wenn Inhalte über Kopfhörer konsumiert werden, hörbar sind.⁸¹

⁷⁹ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.1 Beyond Multichannel Audio, 2022)

⁸⁰ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

⁸¹ (Nair, 2021)

Neben den bisherigen Codierungen, die sich je nach Streaming Anbieter und Verwendung unterscheiden können, gibt es je nach Endgeräte-Hersteller ebenso andere Codierungsabläufe. So hat Apple 2021⁸² angekündigt, dass sie Spatial Audio mit Dolby Atmos support einführen. Dies hat zur Folge, dass beim Endkunden das Rendering nicht über dem Dolby eigenen Renderer erfolgt, sondern über Apples eigene Renderer-Technologie.

Dieser eigene Apple Spatial Renderer kommt zum Einsatz, wenn Dolby Atmos Inhalte über ein Apple Geräte abgespielt werden. Dessen Auswirkungen auf den Mix können aktuell zum Stand dieser Arbeit nur in der DAW Logic Pro in einer Version ab 10.7.3 überprüft werden. Hierbei ist eine Renderer Auswahl im integrierten Dolby Atmos Renderer möglich, bei der ausgewählt werden kann zwischen: Dolby Renderer, Apple Renderer, Apple Renderer (Head Tracking) und Renderer for Built-in Speakers.⁸³

Nutzt man aktuell eine andere DAW und möchte überprüfen, wie sich dieser eigene Apple Rendere auf das Endresultat auswirkt, so muss eine Mp4 Datei von einer DAMF-Datei erstellt werden, diese an ein Apple Gerät geschickt und auf dem Endgerät gespeichert werden, sowie anschließend über das Apple Gerät angehört werden.⁸⁴ Dieser Vorgang ist nötig, wenn man aktuell eine DAW außer Logic Pro in der Version ab 10.7.3 nutzt um einen Mix über Apples eigenen Renderer zu monitoren.

Alle diese Distributionsvorgänge haben Einfluss auf die Qualität und wie sich der End Mix auf das jeweilige Endgerät transportiert.

Mit neuen Entwicklungen wie Apple Spatial, die eigene Renderer Software für ihre Geräte verwendet, sowie eine aktuell nur sehr begrenzte Möglichkeit, unterschiedliche Renderer und deren Auswirkungen auf das Endprodukt zu überwachen, sollten bei der Produktion gegebenenfalls berücksichtigt werden.

⁸² (Apple Inc., 2021)

⁸³ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

⁸⁴ (Nair, 2021)

KAPITEL 6: VERGLEICH EINES OBJEKTBASIERTEN WORKFLOWS ZU EINER STEREOPRODUKTION

Neben den bisher besprochenen Unterschieden der kanalbasierten sowie objektbasierten Wiedergabe von Audiomaterial, beginnend bei der Aufnahme von Material bis zur Distribution bis zum Endkunden, gibt es besondere Vorteile, aber auch aktuelle Herausforderungen dieser Wiedergabetechnik. Dieser Vergleich der aktuellen Möglichkeiten sowie Probleme die aktuell von Belangen sind, sollen in diesem Kapitel thematisiert werden.

6.1 MÖGLICHKEITEN DER PRODUKTION

Dolby Atmos bietet durch seine hybride Struktur aus kanalbasierten Audio Beds und objektbasierten Audioobjekten viele Möglichkeiten und Optionen, die bei einer Stereoproduktion nicht in Frage kommen oder gar nicht überdacht wurden. Dies bietet viel Freiraum für die Gestaltung und Produktion von immersiven Audioproduktionen.

So kann bereits beim Mixing von Audiomaterial von dieser Freiheit profitiert werden, sodass der komplette dreidimensionale Raum kreativ genutzt werden kann. Technisch vereinfacht dies zum Teil auch den Mixing Prozess, da Instrumente die sich im gleichen Frequenzspektrum befinden, einfacher durch eine unterschiedliche Positionierung im dreidimensionalen Raum kontrolliert werden können.⁸⁵

Neben den beschriebenen Möglichkeiten während der Produktion bietet Dolby Atmos durch seine zugrunde liegende objektbasierte Form, aber auch die große Möglichkeit und Chance, dass Immersive Musikmischungen für jeden erreichbar sind.

Dies war bisher nicht der Fall, da für kanalbasierte Formate wie 5.1 oder 7.1 Surround immer eine spezielle Lautsprecheranordnung, siehe Kapitel 2, Abbildung 1, für das korrekte Abspielen einer solchen Surroundmischung nötig war.

⁸⁵ (O’Toole, 2020)

Diese Abhängigkeit von einer genauen Lautsprecheraufstellung war auch der Grund weshalb sich aktuelle Surroundformate außerhalb des Kinos nur schwer etablieren konnten. Mit den nun neuen Möglichkeiten, sodass keine explizite Lautsprecheranordnung mehr nötig ist steht der Weg frei, sodass Endkunden die Möglichkeiten besitzen, Dolby Atmos Inhalte zu konsumieren.

In wie weit sich Dolby Atmos gegenüber der bisherigen etablierten Stereodatei durchsetzen wird, kann zum aktuellen Stand nicht gesagt oder beurteilt werden. So werden in der Regel Dolby Atmos Inhalte über Kopfhörer als Binaurale Mischung konsumiert.

Was zur Folge hat, dass erheblich mehr Daten auf das Endgerät übertragen werden, sodass hieraus wieder eine zweikanalige binaurale Stereodatei entsteht. Solche binauralen Stereodateien lassen sich auch durch andere Tools und ohne Dolby Atmos Produktionsumgebung ebenso produzieren, und über die bereits existierenden Stereovertriebswege vertreiben.⁸⁶

Binaurale Mischungen können jedoch nur eingeschränkt über Lautsprecher wiedergegeben werden.

Durch die Möglichkeit Binaurale Mischungen für die Kopfhörerwiedergabe aber ebenso mit der gleichen Atmos Datei, eine Lautsprecherwiedergabe über Bsp. eine Soundbar oder TV zu ermöglichen, stellt hierbei einen deutlichen Vorteil in der Flexibilität dar.⁸⁷

Da Objektbasierte Produktionen, hier im speziellen Dolby Atmos erst seit kurzer Zeit in der Musikindustrie und somit auch von Streaming Anbietern Beachtung findet, muss sich zeigen in wie weit die Vorteile in der Produktion von Inhalten, speziell für dieses Format, sowie dessen Möglichkeiten in der Distribution von Audiomaterial, in der Praxis Anwendung findet.

⁸⁶ (Thiers, 2022)

⁸⁷ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

6.2 HERAUSFORDERUNGEN DER WIEDERGABE

Neben den vielen Möglichkeiten in der Produktion und Wiedergabe von Audiomaterial, gibt es aktuell zum Stand dieser Arbeit speziell beim Umgang mit den Audioobjekten und derer objektbasierten Form, Probleme und Herausforderungen. Bei einer kanalbasierten Stereoproduktion haben diese aktuellen Herausforderungen keine Relevanz, da hier Tools und Workflows für die kanalbasierte Form einer Stereoproduktion bereits bestehen und speziell entwickelt wurden.

Bei dem Versuch diese bestehenden Workflows einer Stereoproduktion auch auf das objektbasierte Format zu übernehmen ergeben sich besondere Herausforderungen. So sollen hierbei die Lautheitsmessung, sowie das Mastering einer objektbasierten Produktion betrachtet werden.

6.2.1 LAUTHEITSMESSUNG

Die Lautheitsmessung stellt bei der Distribution von Audiomaterial einen wichtigen Schritt dar. Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, dient sie einer einheitlichen Programmlautstärke und ist somit von besonderer Bedeutung.

Die Lautstärkeberechnung für kanalbasierte Inhalte wird in der ITU-R BS.1770 definiert. Sie nutzt hierfür die kanalbasierten Signale der jeweiligen Datei, beispielsweise für Stereodateien den linken sowie rechten Kanal und summiert diese zu einer Summe auf, siehe Kapitel 3.3, Abbildung 5.⁸⁸

Durch das Konzept der objektbasierten Wiedergabe und der einhergehenden Problematik das Lautsprecher signale erst als letzter Schritt im Renderer auf die zur Verfügung stehenden Lautsprecher gerendert werden siehe Abbildung 9, stellen die Lautheitsmessung für Objektbasierte Inhalte vor eine Herausforderung.⁸⁹

⁸⁸ (ITU-R, 2006)

⁸⁹ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Die objektbasierte Wiedergabe beruht auf dem Prinzip, losgelöst von einem speziellen Wiedergabesystem zu sein, dies bedeutet jedoch auch, dass keine diskreten Lautsprechersignale vorliegen, welche zu einer Summe aufsummiert werden könnten.

Da aber die Lautheitsmessung, sowie dessen Einhaltung und das gezielte Arbeiten auf einen speziell geforderten Lautheitswert Relevanz in der Produktion von Audiomaterial besitzen, ist ein Messverfahren zur Messung von objektbasiertem Audio notwendig.

Für die Lautheitsmessung, sowie dessen Monitoring während der Arbeit an einem Dolby Atmos Mix, verfügt der Dolby Atmos Renderer über verschiedenste Anzeigen speziell für die Lautheitsmessung.

Aktuell wird hierfür jedoch nicht die objektbasierte Audioszene für die Messung genutzt, sondern je nach individueller Auswahl ein kanalbasierter 5.1 Re-Render (ohne LFE-Kanal), ein Stereo-Render oder eine binaurale Version. Ebenso Neben der Auswahl des kanalbasierten Formats für die Lautheitsmessung kann die Messung ebenso in Echtzeit, an einem Re-Render oder Offline erfolgen⁹⁰.

Für die Echtzeit Lautheitsmessung kann der Input der DAW oder ein Dolby Atmos Master File, welches im Renderer geöffnet wird, als Quelle dienen.

Für das Monitoring der Lautheit eines Audioprogrammes stehen im Renderer verschiedenste Anzeigen zur Verfügung. So wird die Lautheit in den bekannten Zeitintervallen Short, Momentary und Integrated, der kanalbasierten Lautheitsmessung gemessen und in den Anzeigen im Dolby Atmos Renderer angegeben.

So gibt die Short Term Messung einen Lautheitswert an, der ein 3 Sekunden Fenster/Intervall verwendet. Es findet sich auch die Lautheitsmessung mit einem 400 Millisekunden Zeitfenster, dieser Wert ist unter Momentary zu finden. Ebenso kann über die gesamte Laufzeit des Programms gemessen werden, sodass dieser Wert als Integrated Loudness zu finden ist.⁹¹

⁹⁰ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 6.5 Offline Loudness Analysis, 2022)

⁹¹ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Aktuell findet die Lautheitsmessung wie soeben beschrieben an einem kanalbasierten Renderer statt und nicht an der tatsächlichen objektbasierten Audioszene. Die Messung der Lautheit der objektbasierten Audioszene stellt aktuell eine Herausforderung dar.

So formuliert Tsingos (2017), dass die Erweiterung des bisherigen kanalbasierten Lautheitsmessverfahren der ITU BS.1770 auf eine beliebige Anzahl X_N an Eingangskanälen für die Messung beliebiger kanalbasierter Systeme, als Grundlage und Basis für eine objektbasierte Lautheitsmessung dienen könnte.

So gibt es keine Beschränkung mehr auf eine gewisse Anzahl an Eingangskanälen X . Somit könnte die Lautstärke aus Summierung der Frequenzgewichteten Energien aller Audioobjekte abgeleitet werden.⁹²

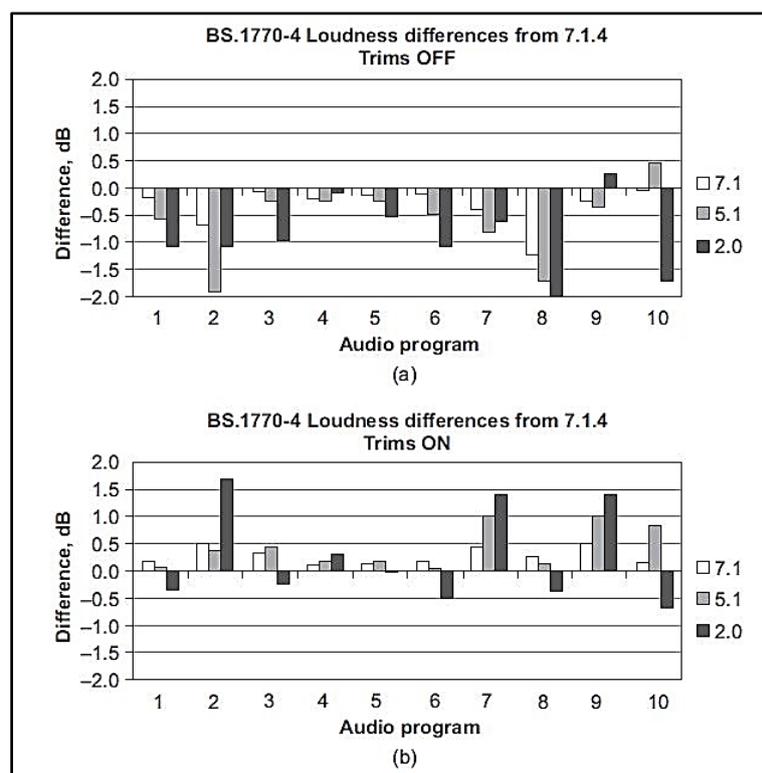


Abbildung 11: Objektbasierte Lautheitsmessungen mittels ITU BS.1770 (Tsingos, 2017)

⁹² (Tsingos, 2017)

Abbildung 10 (a) zeigt einen Vergleich bei dem eine objektbasierte Audioszene in Stereo (2.0), 5.1 sowie 7.1 gerendert wurden, im Vergleich zu einem Rendering in eine immersive 7.1.4-Kanalkonfiguration. Hierbei wurde das Lautheitsmessverfahren der ITU BS.1770 für eine beliebige Anzahl an Eingangssignalen X_N verwendet.

So zeigt sich in Abbildung 10 (a), dass die gemessene Lautheit, im Allgemeinen mit abnehmender Anzahl an zur Verfügung stehender Wiedergabekanäle, zunimmt und bei einer Wiedergabe über Stereo maximal ist.

Um ein verbessertes Ergebnis zu erhalten und die Unterschiede in den Abweichungen der gemessenen Lautheitswerte zu minimieren, sowie bessere ästhetische Ergebnisse zu liefern, kann sogenanntes „Level Trimming“ in den Renderer integriert werden, das durch Metadaten kontrolliert wird.

Ein Beispiel bei dem objektbasierte Pegelanpassungen (Level Trim) verwendet werden um die Kernenergie zu ändern ist in Abbildung 10 (b) zu sehen. Dabei könnte das Level Trimming wie beispielsweise aktuelle Surround-Downmix Trim Koeffizienten in aktuellen kanalbasierten Codecs eingesetzt werden, um bessere Ergebnisse zu erhalten.

Dabei wird für jedes Objekt eine Verstärkung abhängig von dessen X, Y, Z Position und der zur Verfügung stehenden Wiedergabelautsprecher verwendet, diese werden vor dem Rendern auf die Audioobjekte angewandt und erhöhen somit die Komplexität des Renderers nicht.⁹³ Eine Entwicklung eines generischen Verfahrens zur Lautheitsmessung von objektbasierten Audioszenen mit einer möglichst hohen Kompatibilität zum aktuellen kanalbasierten Lautheitsmessverfahren der ITU BS.1770, kann in der Abschlussarbeit „Lautheitsmessung von Objektbasierten Audioszenen – Maik Richter“ nachgelesen werden. Im Zuge dieser Arbeit wurden die Objekteigenschaften der Audioobjekte und deren Einfluss auf eventuelle Auswirkungen in der Lautheitsmessung untersucht. Die Audioobjekteigenschaft Gain ist hierbei besonders zu betrachten, da sie einen relevanten Einfluss auf die Lautheitsmessung hat und somit bei einer Implementierung eines objektbasierten Lautheitsmessverfahren von Relevanz ist.⁹⁴

⁹³ (Tsingos, 2017)

⁹⁴ (Richter, 2019)

Da aktuell noch an einem Re-Render in kanalbasierter Form die Lautheitsmessungen vorgenommen werden, gibt es hier auch Vorgaben und Empfehlungen für die Lautheit eines Dolby Atmos Mixes. So ist die Vorgabe für die Distribution von Dolby Atmos Inhalten ein integrierter Lautheitswert von -18 LUFS. Der bei einer Abgabe von einem Album speziell für jeden einzelnen Track erfüllt werden muss.⁹⁵

6.2.2 MASTERING VON OBJEKTBASIERTEM AUDIO

Ebenso wie auch die Lautheitsmessung bei objektbasiertem Audio, ist das Mastering von objektbasiertem Audio schwierig und stellt eine Herausforderung dar, da keine Lautsprechersumme wie bei einer kanalbasierten Produktion beispielsweise der Master Bus zur Verfügung steht. Ebenso wie die Lautheitsmessung, ist das Mastering einer Audioproduktion ein wichtiger Schritt in der Fertigstellung einer Produktion. Das Mastering einer objektbasierten Produktion im Vergleich zu einer Stereoproduktion beinhaltet häufig die gleichen Aufgaben und Anforderungen, sie müssen jedoch anders als bisher umgesetzt werden. Bisher reichte ein Mastering Studio mit einem Stereolautsprechersystem aus um zuverlässig Inhalte für die Stereophone Wiedergabe zu mastern und Objektiv Korrekturen vorzunehmen.

Mit den neuen immersiven Audioformaten und hier besonders Dolby Atmos, ist ein deutlicher Mehraufwand nötig, um Mixe in Dolby Atmos zuverlässig und in einer professionellen Umgebung bewerten zu können. So empfiehlt Dolby selbst, mindestens ein 7.1.4 System besser noch ein 9.1.4 System für die letzte Kontrolle des Atmos Mixes, bevor dieser an die verschiedensten Abnehmer übermittelt wird.⁹⁶

⁹⁵ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 10.2 Dolby Atmos Music Delivery Specification, 2022)

⁹⁶(Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Music Module 1.2 Components of a Dolby Atmos Content Creation Studio, 2022)

Dies stellt einen deutlichen Mehraufwand dar, der rein von den benötigten Kosten für die Lautsprecher eines 9.1.4 Systems weit über denen eines Stereosystems liegt. Bestehende Surround Mastering Setups können zwar aufgerüstet werden, jedoch müssen auch hier zum Teil mehrere Lautsprecher neu angeschafft werden sowie deutlich mehr Rechenleistung, eine höhere Anzahl an physischen Ausgängen und einen höheren Anspruch an die Raumakustik gestellt werden. Dies entspricht einer deutlichen Investition, um an neuen Inhalten in Dolby Atmos zu arbeiten.

Da für die Produktion in Dolby Atmos bereits ein paar Kopfhörer, sowie ein Dolby Atmos Renderer ausreichen, um in Dolby Atmos zu produzieren und die Einstiegshürde somit sehr gering ausfällt, verleiht dem Mastering in einem professionellen Studio mit entsprechendem Lautsprechersystem deutlich mehr Relevanz im Vergleich zu einer Stereoproduktion. So ist dies die letzte Chance den Mix vor der Veröffentlichung durch eine unabhängige Meinung, in einem entsprechendem Lautsprechersystem Korrektur zu hören und bei Bedarf Änderungen vorzunehmen, sowie Feedback für eventuelle nächste Produktionen zu erlangen.⁹⁷

Dabei sind die Aufgaben die gleichen, wie sie auch im Vergleich zu einer Stereoproduktion anfallen:

„So, what is Immersive Mastering? Exactly the same thing. It is receiving mixes, listening very carefully to them, then deciding what, if any, adjustments need to be made with regards to balance, levels, tonality, etc.—for all of the songs. Once the artistic decisions have been made and approved, the next step is to create the correct masters for distribution. The main difference between stereo and immersive mastering is in the complexities of the channels and the delivery.“ (Steve Harvey, 2020)

Neben den im Zitat genannten Aufgaben, die wichtig sind, um beispielsweise bei einer Album Produktion mehrere Mixe aus verschiedenen Studios homogen und zusammengehörig klingen zu lassen, gibt es weitere Aufgaben, die durch die Produktion in Dolby Atmos anfallen.

⁹⁷ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

So kann eine Aufgabe des Mastering Ingenieur sein die Downmix und Trim Einstellungen des Mixes fein zu justieren, diese sind von Relevanz für die korrekte Übertragung und Abspielung auf die jeweilige Lautsprecheranzahl des Endkunden. Ebenso sind die Binarual Render Einstellungen von Relevanz, sodass diese überprüft und gegebenenfalls Änderungen vorgenommen werden.

Einen Eingriff in den Pegel, die Verteilung im Raum sowie die Bearbeitung von Objekten würde mit Sicherheit in die Arbeit eines Mixing Ingenieurs fallen, in besonderen Fällen ist solch ein Eingriff aber denkbar um eine Lösung zu erzielen, sollte aber mit Sicherheit eine Ausnahme bleiben, die nicht dem Mastering Ingenieur überlassen wird.

Das Verständnis für die Distribution und Codierung der Produktion bis zum Endkunden und allen dazwischenliegenden Phasen sollte ein Mastering Ingenieur für Dolby Atmos beherrschen, sodass richtige Anpassungen und Einstellungen erfolgen können.

Die aktuellen Arbeitsweisen und Workflows sind in einer stetigen Entwicklung, ebenso stellt die aktuelle Verfügbarkeit an Plugins und Werkzeugen für die Mastering Arbeit an objektbasierten Audioproduktionen eine Herausforderung dar.

So konnten für die Mastering Arbeit an einer Stereoproduktion Werkzeuge wie Equalizer, Limiter und Kompressoren genutzt werden. Sie wurden hierbei auf die Summe der Audiokanäle angewandt, siehe Kapitel 3.3 Mastering einer Stereodatei.

Diese Arbeitsweise kann nur bedingt übernommen werden. So bieten die Audio Beds mit ihrer kanalbasierten Grundlage, immer noch die Möglichkeit eine Summenbearbeitung, wie sie bisher bei Stereoproduktionen eingesetzt wurde, zu übernehmen.

Eine Herausforderung stellen aktuell die Audioobjekte dar, da eine Summenbearbeitung aller Audioobjekte nur eingeschränkt möglich ist und somit neue Arbeitsweisen erforderlich sind. ⁹⁸⁹⁹

⁹⁸ (Harvey, 2020)

⁹⁹ (Rothemich, Mixing in Dolby Atmos, 2021)

Aktuell steht nur eine sehr begrenzte Anzahl an Plugins für die Bearbeitung von Audioobjekten zur Verfügung, die die entsprechenden Tools anbieten. So ist eine Bearbeitung aller Objekte nur möglich, wenn auf jeder einzelnen Objektspur das gleiche Plugin Bsp. ein Equalizer geladen wird und die Einstellungen bei allen Instanzen gleich sind. Somit wäre eine einheitliche Bearbeitung aller Objekte mit einem Equalizer möglich, unter der Bedingung das alle Einstellungen manuell und bei Änderungen an allen Instanzen vorgenommen werden müssen. Jedoch werden beim Mastering von Audio auch Limiter und Kompressoren eingesetzt, die durch ihre Funktionsweise und ihre Einstellungen im Mastering in der Regel nicht auf einzelne Audiospuren angewandt werden, sondern auf gesamte Summen.¹⁰⁰ Ein Workflow, bei der ein Kompressor auf jeder Spur eines Audioobjekts liegt, fordert neben der immensen Rechenleistung bei vielen verwendeten Audioobjekten, ein Umdenken in der Bearbeitung und Mastering von Audioobjekten, da eine Summenkompression so nicht umgesetzt werden kann, anstatt dessen werden nur alle Audioobjekte mit den gleichen Kompressoreinstellungen bearbeitet. Hierbei wird jeder einzelne Kompressor von dem spezifischem Audioobjekt der Spur kontrolliert, sodass andere Audioobjekte einer anderen Spur keinen Einfluss auf die Parameter und spezifische Aussteuerung des Kompressors haben.

Ein Mix Bus oder eine Summe aller Objekte gibt es im Dolby Renderer aktuell nicht, sodass eine Summenbearbeitung der Objekte anders vorgenommen werden muss.

So gibt es aktuell zum Stand dieser Arbeit nur sehr begrenzte Möglichkeiten dies umzusetzen. Eine Möglichkeit besteht in der Nutzung von Plugins die einen virtuellen Master Bus (Master Summe) zur Verfügung stellen. Hier ist das Plugin HoRNet SAMP zu erwähnen, welches einen solchen Master Bus für Dolby Atmos zur Verfügung stellt.

Dabei wird auf jeder Audioobjekt Spur eine Instanz des Plugins geladen. Hierbei unterstützt das Plugin HoRNet SAMP Plugin bis zu 160 Instanzen die miteinander kommunizieren. Für die Bearbeitung stehen ein Equalizer, ein Clipper, ein Kompressor sowie ein Limiter zur Verfügung.¹⁰¹

¹⁰⁰ (Harvey, 2020)

¹⁰¹ (HoRNeT Plugins, 2022)

Alle vier zur Verfügung stehenden Tools können gleichzeitig und ohne eine weitere Instanz einzufügen, verwendet werden. Die Reihenfolge/Anordnung der vier Tools kann individuell je nach persönlichem Workflow innerhalb des Plugins eingestellt und geändert werden.

Das Plugin bietet somit die Möglichkeit an einer Instanz eine Einstellung vorzunehmen, die dann auf die anderen Instanzen übertragen wird. Eine Einstellung jeder einzelnen Audioobjekt Instanz ist somit überfällig. Eine Summenbearbeitung unter Berücksichtigung anderer Audioobjekt Signale ist ebenso mit dem Plugin möglich. So kann beispielsweise im Kompressor ein Sidechain-Signal ausgewählt werden, welches dann das Plugin speist. Neben der Auswahl einzelner Audioobjekt Spuren, können aber auch mehrere Audioobjekte oder auch alle Audioobjekt Spuren als Input des Kompressors dienen. Sodass dieser dann durch alle Audioobjektspuren, wie auch bei der Summenbearbeitung von Stereomaterial, angesteuert wird. Die Auswahl des Sidechain-Signals kann ebenso für den EQ, Limiter und Clipper ausgewählt werden. Werden nun Änderungen der Einstellungen vorgenommen, ändern sich diese auch bei den anderen Instanzen.¹⁰² Wie solche Plugins wie das HoRNet SAMP in Zukunft Anwendung finden und ob durch Updates in der Zukunft Optionen für das Mastering in den Dolby Renderer integriert werden, muss sich zeigen.

6.2.3 ABHÄNGIGKEIT VON RENDERER UND SOFTWARE

Neben den vielen verschiedenen Varianten Dolby Atmos Content zu produzieren, gilt eine Grundvoraussetzung immer, die gegeben sein muss. So muss immer der Dolby Atmos Renderer für die Arbeit an Dolby Atmos Inhalten genutzt werden. Wie dieser Renderer jeweils in den Workflow integriert wird, ob er über Dolby Production Suite oder über eine Integration in einer DAW verwendet wird, ist hierbei egal. Dies unterscheidet den Workflow einer Stereoproduktion immens von einer Produktion in Dolby Atmos.

¹⁰² (HoRNet Plugins, 2022)

So kann bei einer Stereoproduktion jede moderne DAW genutzt werden, um die Produktionsschritte durchzuführen sowie nach der Produktion das Endformat beispielsweise eine WAV oder Mp3 Datei zu exportieren. Hierfür ist keine weitere Software als die DAW nötig.

Bereits für das Monitoring der Produktion, sowie beim abschließenden Schritt, wenn aus der Produktion eine DAMF-Datei oder eine kanalbasierte Datei beispielsweise 5.1/7.1 Datei gerendert werden soll, ist der Dolby Atmos Renderer nötig. Dies stellt einen Unterschied in der bisherigen Produktionsarbeit von Audiomaterial dar.

Werden Inhalte in Dolby Atmos produziert, so wird die gleiche Renderer Technologie auch beim Endkunden zum Abspielen des Dolby Atmos Mixes verwendet. Mit den Einstellungen zur Überwachung und Monitoring von Spatial Coding, kann ebenso der Einfluss dieses Vorgangs überwacht und abgehört werden. Ebenso können verschiedenste Ausgabeformate beispielsweise 5.1 oder Stereo in Echtzeit abgehört werden, sodass vor der Abgabe sichergestellt werden kann, dass der Mix in gewünschter Qualität den Endkunden erreicht.¹⁰³ Jedoch gibt es hierbei auch Bedenken, so könnten aktuelle Dolby Atmos Produktionen, durch eine in der Zukunft abgeänderte Rendere Technologie anders wiedergegeben werden. Das neue Rendere zum Einsatz kommen können oder bestehende Renderer abgeändert werden, zeigt auch die Entwicklung von Spatial Audio von Apple.

Mit der Einführung von Spatial Audio von Apple und ihrer eigenen Rendertechnologie zur Wiedergabe beim Endkunden, besteht hier ebenso eine weitere Abhängigkeit und Ungewissheit, wie der Dolby Atmos Mix beim Endkunden ankommt und wiedergegeben wird. Da aktuell zum Stand dieser Arbeit nur Logic Pro eine Spatial Audio Renderer Integration besitzt, muss bei Verwendung einer anderen DAW darauf verzichtet werden den Mix über den Spatial Audio Rendere abzuhören oder ein Umweg wie in Kapitel 5.3 beschrieben genutzt werden.

¹⁰³ (Dolby Professional Content Creation Dolby Atmos Post Production Module 1.1 Beyond Multichannel Audio, 2022)

Abschließend sind alle in dieser Arbeit besprochenen Unterschiede als Vergleich der zwei Formate in der Tabelle 1 zu finden. Hierbei werden die wichtigsten und markantesten Unterschiede beider Verfahren gegenübergestellt. Aufgrund von stetigen Weiterentwicklungen, an Formaten wie Dolby Atmos, gelten die beschriebenen Unterschiede in Tabelle 1, aber auch in den vorhergegangenen Kapiteln nur zum aktuellen Stand dieser Arbeit.

	Kanalbasierte Wiedergabe	Objektbasierte Wiedergabe
Aufnahme	Einzelmikrofonierung Stereo-Aufnahmeverfahren.	(Spezielle)-Einzelmikrofonierung Stereo-Aufnahmeverfahren Mehrkanalmikrofonsysteme.
Mixing	Basisbreite zwischen zwei Lautsprechern für die Abbildung von Quellen.	Kompletter dreidimensionaler Raum zur Positionierung von Quellen vorhanden.
Mastering	Bestehende und ausgereifte Workflows mit vielen vorhandenen Tools.	Aktuell beschränkte Möglichkeiten, Nutzung von dritt Anbieter Software/Plugins ggf. nötig.
Lautheitsmessung	Bestehende und ausgereifte Verfahren zur Lautheitsmessung vorhanden, siehe ITU-R BS.1770.	Nutzung der Kanalbasierten Lautheitsmessung an 5.1 Re- Rendern → aktuell keine objektbasierte Lautheitsmessung.
Endformate	Jedes individuelle Lautsprechersystem (Bsp. 2.0/5.1/7.1) bedarf einer individuellen Mischung.	Eine Mischung, die an das jeweilige Lautsprechersystem angepasst wird.
Software	Jede DAW.	Ausgewählte DAW's + ggf. kostenpflichtige Software.
Abhörsituation	Stereo-Lautsprechersystem Kopfhörer.	Für professionelles Arbeiten: Min. 5.1.4 Lautsprechersystem Max. 11.1.10 Lautsprechersystem.
Distribution	Bestehende Stereovertriebswege.	Aktuell nur ausgewählte Streaming Anbieter.

Tabelle 1: Vergleich einer kanal- und objektbasierten Wiedergabe.

KAPITEL 7: **FAZIT**

Durch das objektbasierte Format Dolby Atmos, das durch seine große Flexibilität in der Produktion, sowie in der Distribution von Audiomaterial, viele neue Möglichkeiten bietet, hat aber auch zum aktuellen Stand dieser Arbeit Herausforderungen, welche gelöst werden müssen. So müssen bestehende kanalbasierte Workflows an die neuen objektbasierten Gegebenheiten angepasst werden, sowie neue Lösungen für aktuelle Probleme gefunden werden. Diese Arbeit beschäftigte sich mit den Unterschieden im Workflow einer kanalbasierten Produktion im Vergleich zu einer objektbasierten Produktion in Dolby Atmos. So wurden die Grundlegenden Unterschiede beider Formatarten, angefangen bei der Aufnahme, Mixing sowie Mastering und der anschließenden Distribution verglichen.

Aktuelle Probleme des objektbasierten Formats Dolby Atmos wurden als letzter Schritt in Kapitel sechs ausgearbeitet, sie zeigen die noch bestehenden Herausforderungen bei einer aktuellen Produktion in Dolby Atmos.

Durch neue Weiterentwicklungen, sowie Updates des bestehenden Dolby Renderer und dessen Funktionsumfangs, können aktuelle Herausforderungen und Workflows vereinfacht werden. So gibt es bereits aktuell Plugins, die versuchen Workflows zu vereinfachen und Lösungen anzubieten, siehe Kapitel 6.2.2 Mastering von Objektbasiertem Audio.

So werden stetig durch neue Updates an bestehender Software, neue Funktionen hinzugefügt. So ist es aktuell möglich durch die Dolby Atmos Personalized Rendering Beta eigene HRTF-Funktionen (Head Related Transfer Function) für das Abhören des Immersiven Dolby Atmos Mixes über Kopfhörer zu verwenden.¹⁰⁴ Dies kann die Ortung und Lokalisierung über Kopfhörer zum Teil durch die personalisierte HRTF deutlich verbessern, sodass Inhalte zuverlässiger über Kopfhörer produziert werden können.

¹⁰⁴ (Rodgers, 2022)

In wie weit neue Updates des Dolby Atmos Renderer für Herausforderungen, wie in dieser Arbeit das Mastering von objektbasiertem Audio erfolgen, kann nicht beantwortet werden, so müssen aktuell dritt Anbieter Plugins für diese Funktionen genutzt werden.

Aktuelle Workflows unterliegen einer kontinuierlichen Entwicklung und Anpassung. Da erst seit kurzer Zeit Dolby Atmos vermehrt Beachtung in der Produktion, sowie Distribution von Audiomaterial auch über große Streaming Anbieter erfährt, ist von einer ständigen Weiterentwicklung bestehender Workflows auszugehen.

In wie weit sich das Format gegenüber den bestehenden Formaten am Markt durchsetzen wird, und zukünftige Produktionen nur in Dolby Atmos produziert werden, oder ob bestehende kanalbasierte Formate wie die Stereophonie parallel zu neuen Formaten bestehen bleibt, kann nicht beantwortet werden. So bietet Dolby Atmos die Möglichkeit für viele neue Hörer immersive Audioproduktionen außerhalb des Kinos zu konsumieren.

So wird die Nachfrage nach dem Format über den kommerziellen Erfolg entscheiden. Sollten sich immer mehr Endkunden für das Format entscheiden, so steigt auch die Nachfrage an immersiven Produktionen in Dolby Atmos, was zu einer vermehrten Optimierung sowie Entwicklung von Software und Workflows für objektbasierte Produktionen führt.

LITERATURVERZEICHNIS

AES, Audio Engineering Society (2021, 24. September 2021).

Technical Document AESTD1008.1.21-9. Recommendations for Loudness of Internet Audio Streaming and On-Demand Distribution.

<https://www.aes.org/technical/documentDownloads.cfm?docID=731>

Apple Inc. (2021, 17. Mai 2021).

Apple Music kündigt 3D-Audio mit Dolby Atmos an; gesamter Katalog in Lossless Audio [Pressemeldung].

<https://www.apple.com/de/newsroom/2021/05/apple-music-announces-spatial-audio-and-lossless-audio/>

Buff, H.-M. (2020).

Überall – Musikproduktion in 3D-Audio für Kopfhörer. Ebner Media Group GmbH & Co. KG.

Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., Wöhr, M. (2014).

Handbuch der Tonstudioteknik (8. Auflage). De Gruyter Saur.

<https://doi.org/doi:10.1515/9783110316506>

Dolby Laboratories Inc. (2022).

Playback Solutions for your Content in Dolby Vision and Dolby Atmos.

<https://www.dolbyforprofessionals.com/en/playback-solutions-for-your-content-in-dolby-vision-and-dolby-atmos>

Dolby Laboratories Inc. (2022).

Stream your Music in amazing quality with Amazon Music Unlimited.

<https://www.dolby.com/experience/amazon-music/>

Dolby Laboratories Inc. (06.05.2021).

Dolby Atmos Home Entertainment Studio, Technical Guidelines.

<https://professionalsupport.dolby.com/s/article/Dolby-Atmos-Home-Entertainment-Studio-Technical-Guidelines>

Dolby Laboratories Inc. (2021, 04.01.2021).

Dolby Atmos Music & Post: What ist the Dolby Atmos Mastering Suite.

https://professionalsupport.dolby.com/s/article/What-is-the-Dolby-Atmos-Mastering-Suite?language=en_US

Dolby Laboratories Inc. (2021, 04.01.2021).

Dolby Atmos Music & Post: How do I get the Dolby Audio Bridge to return to Pro Tools.

https://professionalsupport.dolby.com/s/article/How-do-I-get-the-Dolby-Audio-Bridge-to-return-to-Pro-Tools?language=en_US

Dolby Laboratories Inc. (2022, 03.03.2022).

Dolby Atmos Music & Post: Getting Started with Logic Pro.

https://professionalsupport.dolby.com/s/article/Dolby-Atmos-Music-Getting-Started-with-Logic-Pro?language=en_US

Dolby Newsroom (2020, 28. Mai 2020).

TIDAL and Dolby Bring Dolby Atmos Music to the Home [Pressemeldung].

<https://news.dolby.com/en-WW/189109-tidal-and-dolby-bring-dolby-atmos-music-to-the-home>

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Music (2022).

Module 0.1 – Preface.

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Music (2022).

Module 1.2 – Components of a Dolby Atmos Content Creation Studio.

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Music (2022).

Module 6.5 Offline Loudness Analysis.

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Music (2022).

Module 10.2 - Dolby Atmos Music Delivery Specification.

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Post Production (2022).

Module 1.1 Beyond Multichannel Audio

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Post Production (2022).

Module 9.1 Single an Multiple Bed Configurations.

Dolby Professional Content Creation - Dolby Atmos Post Production (2022).

Module 9.4 The Dolby Atmos Music Panner.

Dolby Professional Dolby Atmos Content Creation (2022).

Dolby Atmos Renderer.

<https://professional.dolby.com/product/dolby-atmos-content-creation/dolby-atmos-renderer/>

EBU, European Broadcasting Union (2020, August).

R 128-2020. Loudness Normalisation and Permitted Maximum Level of Audio Signals.

<https://tech.ebu.ch/docs/r/r128.pdf>

Friesecke, A. (2014).

Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker (2. Auflage). De Gruyter Saur.

<https://doi.org/10.1515/9783110340181>

Geluso, P. (2018).

Stereo. In Immersive Sound: The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio. (S. 66). Routledge.

<https://www.routledge.com/Immersive-Sound-The-Art-and-Science-of-Binaural-and-Multi-Channel-Audio/Roginska-Geluso/p/book/9781138900004>

Harvey, S. (2020).

After Hours On The Weeknd: Chart-Topping Stereo Mix gets Full Atmos Treatment. Mix Magazine, Future PLC.

https://issuu.com/futurepublishing/docs/mix521.digital_ns/s/10454758

HoRNeT Plugins (2022).

Plugins. HoRNeT-SAMP.

<https://www.hornetplugins.com/plugins/hornet-samp/>

International Telecommunication Union (2006).

Recommendation ITU-R BS.1770 Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level.

<https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1770-0-200607-S/en>

International Telecommunication Union (2018, Juli).

Recommendation ITU-R BS.2051-2. Advanced sound system for programme production.

<https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.2051/en>

International Telecommunication Union (2019, Oktober).

Recommendation ITU-R BS.2076-2. Audio definition model.

<https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.2076>

Izhaki, R. (2018).

Mixing Audio: Concepts, Practices and Tools (3. Auflage). Routledge.

<https://www.routledge.com/Mixing-Audio-Concepts-Practices-and-Tools/Izhaki/p/book/9781138859784>

Lee, H. (2017, 09.09.2017).

Sound Source and Loudspeaker Base Angle Dependency of Phantom Image Elevation Effect. AES: Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 65.

<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19203>

Mercedes-Benz Group Media (2021, 28.10.2021).

Die Mercedes-Benz AG bietet mit Dolby Atmos Music in ihren Modellen ein herausragendes neues Klangerlebnis [Pressemeldung].

<https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/ko/de/51745258>

Nair, S. (2021, 11.08.2021).

Dolby Atmos Music – After the Mix. Avid Resource Center.

<https://www.avid.com/de/resource-center/encoding-and-delivering-dolby-atmos-music>

O'Toole, J. (2020, 09.11.2020).

3 Takeaways on Immersive Music Mixing with Grammy® Winner Darrell Thorp. Avid Resource Center.

<https://www.avid.com/de/resource-center/3-takeaways-on-immersive-music-mixing-with-grammy-winner-darrell-thorp>

Owsinski, B. (2007).

Mischen wie die Profis. Das Handbuch für Toningenieure. (T. L. Agency Translation). GC Carstensen Verlag.

https://www.gccarstensen.de/buecher/mischen_wie_die_profis

Owsinski, B. (2009).

Mastern wie die Profis. Das Handbuch für Toningenieur. (T. L. Agency Translation). GC Carstensen Verlag.

https://www.gccarstensen.de/buecher/mastern_wie_die_profis

Peter, A. (2020).

Grundlagen der Kinobeschallung. Schüren Verlag.

<https://www.schueren-verlag.de/programm/titel/651-grundlagen-der-kinobeschallung.html>

Richter, M. (2019, 18.11.2019).

Lautheitsmessung von Objektbasierten Audioszenen. Hochschule der Medien.

Rodgers, J. (2022, 16.03.2022).

New Dolby Atmos Personalized Rendering Announced. Production Expert.

<https://www.pro-tools-expert.com/production-expert-1/new-dolby-atmos-personalized-rendering-announced>

Rothemich, E. (19.01.2022)

Pros and Cons of the Integrated Dolby Atmos Renderer in Logic Pro.

<https://www.pro-tools-expert.com/production-expert-1/pros-and-cons-of-the-integrated-dolby-atmos-renderer-in-logic-pro>

Rothemich, E. (2021)

Mixing in Dolby Atmos - #1 How it Works (2021-0928).

Rumsey, F. (2001).

Spatial Audio. Focal Press.

<https://www.lehmanns.de/shop/kunst-musik-theater/39695454-9781138406568-spatial-audio>

Schoeps GmbH (2022).

Surround & 3D.

<https://schoeps.de/produkte/surround-3d.html>

Sennheiser electronic GmbH (2022).

AMBEO VR Mic - 3D AUDIO Mikrofon.

<https://de-de.sennheiser.com/mikrofon-3d-audio-ambeo-vr-mic>

SMPTE (2012).

Scalable Format and Tools to extend the possibilities of Cinema Audio. SMPTE Meeting Presentation.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7308512>

Steinberg Media Technologies GmbH (2022).

Audio Authoring for Dolby Atmos.

<https://www.steinberg.net/de/nuendo/dolby-atmos/>

Thiers, C. (2022).

Musik in Dolby Atmos – Wie funktioniert Mixing in 3D? HOFA-College.

<https://hofa-college.de/post/musik-in-dolby-atmos-wie-funktioniert-mixing-in-3d/>

Tsingos, N. (2017).

Object-Based Audio. In Immersive Sound: The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio. (S. 244). Routledge.

<https://www.routledge.com/Immersive-Sound-The-Art-and-Science-of-Binaural-and-Multi-Channel-Audio/Roginska-Geluso/p/book/9781138900004>

Weinzierl, S. (2008).

Handbuch der Audiotechnik. Springer Berlin.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-34301-1>