

Bachelorarbeit
im Bachelorstudiengang
Game-Produktion und Management
an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm

***In welchem Ausmaß stimmen die mit Artificial Impulse Response erzeugten
akustischen Parameter mit den tatsächlich gemessenen Werten in realen Räumen
überein? – Eine experimentelle Untersuchung***

Erstkorrektor/-in: Prof. Dr. Erica Weilemann
Zweitkorrektor/-in: Prof. Dr. Antje Wild

Verfasser/-in: Khai, Nghiem (Matrikel-Nr.: 323992)

Thema erhalten: 21.01.2026
Arbeit abgegeben: 20.04.2026

Abstract

Zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Räumen werden häufig Impulsantworten verwendet, da sie das vollständige zeitliche Verhalten eines Raumes auf einen ideal kurzen Schallimpuls beschreiben. Die Messung solcher Impulsantworten ist jedoch oft zeitaufwändig, insbesondere wenn Räume schwer zugänglich oder stark frequentiert sind. Als Alternative werden zunehmend simulationsbasierte Verfahren eingesetzt, um Impulsantworten effizient zu generieren, beispielsweise für Anwendungen in der Film-, Serien- oder Videospielproduktion. Das Programm BOOM Artificial IR nutzt dabei Methoden des Sound Propagation Modelling auf Basis der geometrischen Akustik zur synthetischen Erzeugung von Impulsantworten. Ziel dieser Arbeit ist es, die mit BOOM Artificial IR generierten Impulsantworten mit in realen Räumen gemessenen Impulsantworten zu vergleichen und zu evaluieren, inwieweit die daraus abgeleiteten akustischen Parameter übereinstimmen. Auf dieser Grundlage wird beurteilt, ob das Verfahren für den Einsatz in der Videospielentwicklung geeignet ist.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Inhaltsverzeichnis.....	ii
Abbildungsverzeichnis	iv
Eingesetzte Hilfsmittel	vi
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Raumakustik-Grundlagen	3
2.2. Raumakustik in Videospielen	4
2.3. Synthetische vs. reale Impulsantworten	5
2.4. BOOM Artificial IR (Produktionskontext)	6
2.4.1 Akustisches Raytracing.....	7
2.4.2 Diffuse Rain	11
2.4.3 Vereinfachte Beugung.....	11
2.4.4 Image Source Model.....	11
2.4.5 Beam Tracing	14
2.4.6 Mikrofone.....	17
3. Methodik	19
3.1. Studiendesign – Überblick.....	19
3.2. Phase A: Bestimmung typischer geschlossener Raumtypen	19
3.2.1 Auswahl der Spiele	19
3.2.2 Definition „geschlossener Raum“	20
3.2.3 Raumtyp-Kategorien.....	20
3.2.4 Sampling-Verfahren.....	22
3.2.5. Datenerfassung.....	22
3.3. Phase B: Auswahl und Analyse von drei Test-Räumen.....	24
3.3.1. Auswahl der Raumtypen	24
3.3.2. Beschreibung der virtuellen Räume.....	25
3.3.3. Erstellung synthetischer Impulsantworten.....	26
3.3.4. Auswahl realer Vergleichs-Impulsantworten.....	28
4. Analyse und Ergebnisse.....	30
4.1 Ergebnisse Phase A: Raumtyp-Häufigkeiten	30
4.2 Ergebnisse Phase B: Akustischer Vergleich	31
4.2.1 Kleiner Raum.....	34
4.2.2 Korridor.....	41
4.2.3 Mittelhgroßer Raum.....	49
5. Diskussion.....	59

5.1. Interpretation der Raumtyp-Verteilung.....	59
5.1.1 Bedeutung für Game-Audio	59
5.1.2 Typische akustische Problemzonen.....	61
5.2. Eignung von BOOM Artificial IR für Games.....	65
5.2.1 Stärken	65
5.2.2 Limitationen	68
5.2.3 Besonders geeignete Raumtypen	70
5.3. Zukunftsaussichten für BOOM Artificial IR	72
5.4. Methodische Limitationen.....	73
5.4.1 Stichprobengröße.....	73
5.4.2 Technische Limitationen	75
5.4.3 Grenzen der subjektiven Vergleichbarkeit	77
6. Fazit	79
Literaturverzeichnis	vii
Anhang.....	ix
Artificial IR Instructions	ix
Marktanalyse von relevanten Videospielen der letzten 10 Jahre	ix
1. Zielsetzung	ix
2. Umsetzung	ix
.....	xvii
.....	xvii
.....	xvii
.....	xvii
3. Auswertung	xxi
Raumtabelle	xxiii
Hörbeispiele der gefalteten Testsignale	xxxvi

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Simulationsmodelle von Schallausbreitung (vgl. Vorländer 2008)	5
Abbildung 2: Veranschaulichung von entsandten Rays von einer Quelle zu einem Empfänger (BOOM Library, 2026)	7
Abbildung 3: Veranschaulichung der Berechnung mithilfe baryzentrischer Koordinaten (BOOM Library, 2026)	7
Abbildung 4: Darstellung der Ray-Sphere Intersection (BOOM Library, 2026)	8
Abbildung 5: Gleichzeitiger Schnitt von Rays auf verschiedenen Empfängern und Reflektoren (BOOM Library, 2026)	9
Abbildung 6: Darstellung von Streuung und Absorption in BOOM Artificial IR (BOOM Library, 2026) ...	10
Abbildung 7: Spiegelung von einer Quelle an einer reflektierenden Fläche (BOOM Library, 2026)	12
Abbildung 8: Darstellung mehrerer Reflexionspfade zwischen Quelle und Empfänger (BOOM Library, 2026)	12
Abbildung 9: Darstellung der Position von Q' (BOOM Library, 2026)	12
Abbildung 10: Verdeutlichung gültiger Reflexionspfade anhand von zwei Reflektoren (BOOM Library, 2026)	13
Abbildung 11: Ungültige Reflexionspfade bei ungünstiger Positionierung von Reflektoren (BOOM Library, 2026)	13
Abbildung 12: Darstellung zur Erzeugung eines Beams (BOOM Library, 2026)	14
Abbildung 13: Relevanz eines Reflektors für eine nächste Reflexion (BOOM Library, 2026)	14
Abbildung 14: Entstehung eines neuen gültigen Schallpfads (BOOM Library, 2026)	15
Abbildung 15: Blockierung des Schallwegs durch einen zusätzlichen Reflektor (BOOM Library, 2026)	15
Abbildung 16: Entstehung neuer Reflexionspfade abhängig von der Reflexionsordnung (BOOM Library, 2026)	16
Abbildung 17: Richtcharakteristik des Empfängers abhängig von s (BOOM Library, 2026)	17
Abbildung 18: Grafische Abbildung von eintreffenden Ray-Treffern auf einem Empfänger (BOOM Library, 2026)	18
Abbildung 19: Erstellung einer Szene in BOOM Artificial IR (BOOM Library, 2026)	26
Abbildung 20: Raumtypen-Tabelle (Phase A)	30
Abbildung 21: Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums	34
Abbildung 22: Frequenzbasierte-Auswertung der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums ..	35
Abbildung 23: Decay-Darstellung der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums	36
Abbildung 24: Spektrogramm der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums	36
Abbildung 25: Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums	37
Abbildung 26: Frequenzbasierte-Auswertung der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums	37
Abbildung 27: Decay-Darstellung der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums	38
Abbildung 28: Spektrogramm der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums	39
Abbildung 29: Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort des Korridors	41
Abbildung 30: Frequenzbasierte-Auswertung der synthetischen Impulsantwort des Korridors	41
Abbildung 31: Decay-Darstellung der synthetischen Impulsantwort des Korridors	42
Abbildung 32: Spektrogramm der synthetischen Impulsantwort des Korridors	43
Abbildung 33: Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors	43
Abbildung 34: Frequenzbasierte-Auswertung der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors	44
Abbildung 35: Decay-Darstellung der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors	45
Abbildung 36: Spektrogramm der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors	45
Abbildung 37: Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums ...	49
Abbildung 38: Frequenzbasierte-Auswertung der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums	50

Abbildung 39: Decay-Darstellung der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums	51
Abbildung 40: Spektrogramm der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums	51
Abbildung 41: Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums	52
Abbildung 42: Frequenzbasierte-Auswertung der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums.....	53
Abbildung 43: Decay-Darstellung der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums	54
Abbildung 44: Spektrogramm der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums	55

Eingesetzte Hilfsmittel

Für die Erstellung der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene digitale Hilfsmittel eingesetzt, die die experimentellen Prozesse sowie die Analyse-, Forschungs- und Schreibprozesse unterstützten.

BOOM Artificial IR: Erstellung digitaler Innenräume sowie Generierung von Impulsantworten, auf die sich die Arbeit stützt.

Room EQ Wizard: Erstellung von verschiedenen grafischen Darstellungen von Impulsantworten.

MIsTool: Aufnahme und Deconvolution von Impulsantworten.

Reaper: Rendering von Audiodateien für den Vergleich der Impulsantworten.

ReaVerb: Einsatz der Impulsantworten auf verschiedenen Audiodateien.

Resonic: Abspielen der in der Arbeit verwendeten Hörbeispiele.

ChatGPT: Erarbeitung der Struktur der gesamten Arbeit, sowie Generierung von inhaltlichen Ansätzen.

Elicit: Recherche von relevanter wissenschaftlich fundierter Literatur für die Kapitel 1 bis 3.

Zotero: Literaturverwaltung und -erstellung.

Google Scholar: Recherche von Literatur und ihrer Eckdaten.

Microsoft Word: Texterstellung und Formatierung der Arbeit.

Microsoft Excel: Tabellarische Dokumentation von vorkommenden Raumtypen und Berechnung ihrer Häufigkeit.

Alle Ergebnisse, die durch eine künstliche Intelligenz generiert wurden, sind kritisch geprüft und eigenständig angepasst.

1. Einleitung

Die Raumakustik in Videospielen ist eine wichtige Komponente für die Immersion der Spieler*innen, da das Hören einen der zentralen Sinne des Menschen darstellt. Einerseits erwecken Geräusche echte Emotionen, andererseits transportieren sie essenzielle Informationen über die Umgebung. In einem interaktiven Medium wie Videospielen sind akustische Signale somit maßgeblich für die Glaubwürdigkeit der dargestellten Szenen. Folglich sollte die Akustik eines virtuellen Raumes zumindest annähernd realistisch abgebildet werden, um Aspekte wie Raumgröße, Materialeigenschaften und räumliche Tiefe überzeugend zu vermitteln.

Bisher werden in Spielen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren eingesetzt, um Schallausbreitung zu simulieren. Diese reichen von einfachen heuristischen Ansätzen, wie statischen Hall-Effekten und Filtertechniken, bis hin zu komplexeren geometrischen Methoden wie Ray-Tracing oder physikbasierten Simulationen (Amengual Garí et al., 2019). Dabei zeigt sich jedoch ein zentrales Spannungsfeld: Während physikalisch exakte Modelle eine realitätsnahe Abbildung ermöglichen, sind sie aufgrund ihres hohen Rechenaufwands nur eingeschränkt für Echtzeitanwendungen geeignet (Godin et al., 2019). Aus diesem Grund greifen viele Produktionen auf approximative oder hybride Lösungen zurück, die eine Balance zwischen akustischer Genauigkeit und Performance herstellen.

In der Praxis spielen zudem Middleware-Lösungen wie Wwise oder FMOD eine entscheidende Rolle, da sie es Sound Designer*innen ermöglichen, akustische Effekte flexibler zu steuern und an die Anforderungen des Gameplays anzupassen (Firat et al., 2022). Dabei steht häufig nicht die physikalische Korrektheit im Vordergrund, sondern die wahrgenommene Glaubwürdigkeit der Klangkulisse. Diese Herangehensweise unterstreicht, dass Sound Propagation in Videospielen nicht ausschließlich ein technisches Problem ist, sondern auch stark von gestalterischen und produktionstechnischen Entscheidungen geprägt wird.

Außerdem sind Impulsantworten ein zentrales Mittel, um realistischen Raumklang zu simulieren. Sie beschreiben das zeitliche und energetische Verhalten eines Raumes auf einen kurzen Schallimpuls und enthalten Informationen über Direktschall, frühe Reflexionen sowie den Nachhall (Stewart and Sandler, 2007). Auf dieser Grundlage lassen sich essenzielle akustische Parameter bestimmen. Zur Generierung dieser Impulsantworten kann beispielsweise im gewünschten Raum ein kurzes Testsignal abgespielt und aufgezeichnet werden, bis der Nachhall vollständig abgeklungen ist. Diese Methode ist jedoch für die Videospielentwicklung sehr unflexibel, da man die Raumbeschaffenheit für jede Szene neu nachbauen müsste, was zeitliche sowie finanzielle Kosten und einen hohen Arbeitsaufwand mit sich bringen würde (Lübeck et al., 2020). Durch die teilweise massive Anzahl möglicher Räume, die ein Videospiel beinhalten kann, stellen sich deshalb Programme, die Impulsantworten durch Synthetisierung generieren, als nützliches Mittel in der Gameindustrie dar. Der organisatorische Aufwand für reale Messungen wird dabei durch die Möglichkeit, Räume virtuell im Programm abzubilden, reduziert, wodurch Kosten und Zeitaufwand verringert werden.

Vor diesem Hintergrund stellt sich insbesondere die Frage, inwieweit sich BOOM Artificial IR als Verfahren zur Generierung künstlicher Impulsantworten für die Spieleproduktion eignet. Während das Programm eine effiziente Alternative zu aufwendigen Messungen darstellt, ist bislang unklar, wie stark die daraus abgeleiteten akustischen Parameter von real gemessenen Werten abweichen.

Das Ziel der Arbeit ist es somit, zu untersuchen, ob sich BOOM Artificial IR für die Computerspielentwicklung eignet, indem reale Impulsantworten mit den von der BOOM Artificial IR generierten Impulsantworten anhand ausgewählter Räume verglichen werden.

Die vorliegende Arbeit untersucht daher experimentell, in welchem Ausmaß die mit BOOM Artificial Impulse Responses erzeugten akustischen Parameter mit den tatsächlich gemessenen Werten in realen Räumen übereinstimmen.

Dabei werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Raumakustik beleuchtet, die Methodik zur experimentellen Untersuchung definiert und ausgeführt, die Ergebnisse analysiert und abschließend diskutiert.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Raumakustik-Grundlagen

Impulsantworten bilden die zentrale Grundlage zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften eines Raumes. Sie beschreiben das zeitliche und energetische Verhalten eines Raumes als Reaktion auf einen ideal kurzen Schallimpuls und enthalten damit Informationen über Direktschall, frühe Reflexionen und Nachhall. Eine Impulsantwort kann somit als akustische Signatur eines Raumes verstanden werden (Khokhlov et al., 2024).

Aus systemtheoretischer Sicht lässt sich ein Raum näherungsweise als lineares zeitinvariantes System auffassen. Sein Übertragungsverhalten wird durch die Impulsantwort beschrieben. Wird ein beliebiges Eingangssignal mit dieser Impulsantwort gefaltet, ergibt sich das Ausgangssignal so, wie es in dem entsprechenden Raum wahrgenommen wird. Genau dieses Prinzip ist auch für die vorliegende Arbeit relevant, da die untersuchten Impulsantworten sowohl analytisch ausgewertet als auch zur Faltung mit Hörbeispielen verwendet werden (Stewart and Sandler, 2007).

Zur Analyse des Energieverlaufs einer Impulsantwort wird häufig die Energy Time Curve (ETC) betrachtet. Sie stellt den zeitlichen Verlauf der Schallenergie dar und bildet die Grundlage für die Berechnung zentraler raumakustischer Parameter. Die Qualität einer Impulsantwort hängt dabei wesentlich von den Messbedingungen ab, insbesondere vom Signal-Rausch-Verhältnis und vom verfügbaren Abklingbereich. Diese Aspekte sind für die vorliegende Arbeit besonders wichtig, da Unterschiede in der Qualität realer und synthetischer Impulsantworten die spätere Parameterberechnung unmittelbar beeinflussen können (Hak et al., 2012).

Der zeitliche Verlauf einer Impulsantwort lässt sich grob in drei Bereiche unterteilen. Zunächst tritt der Direktschall auf, also der Schallanteil, der ohne Reflexion direkt von der Quelle zum Empfänger gelangt. Danach folgen die frühen Reflexionen, die durch erste Reflexionen an Wänden, Boden oder Decke entstehen. Sie beeinflussen maßgeblich die Wahrnehmung von Klarheit, Präsenz und räumlicher Orientierung. Im Anschluss daran entsteht der späte Nachhall, der durch eine Vielzahl überlagerter Reflexionen geprägt ist und stärker zur Wahrnehmung von Raumgröße und Atmosphäre beiträgt (Schissler and Manocha, 2011).

Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die frequenzabhängigen Nachhallparameter EDT, T20 und T30 relevant, die in der späteren Auswertung verwendet werden. Die Early Decay Time (EDT) beschreibt das frühe Abklingverhalten der Impulsantwort und wird aus dem Pegelabfall der ersten 10 dB bestimmt. Sie korreliert stark mit dem subjektiven Ersteindruck eines Raumes, da das Gehör besonders empfindlich auf frühe Schallanteile reagiert. Die Parameter T20 und T30 beschreiben die Nachhallzeit auf Basis späterer linearer Abschnitte des Energieabfalls. Da ein vollständiger Pegelabfall von 60 dB in der Praxis oft nicht direkt messbar ist, werden Teilbereiche der Abklingkurve ausgewertet und auf 60 dB extrapoliert. T20 basiert dabei auf dem Bereich von -5 dB bis -25 dB, T30 auf dem Bereich von -5 dB bis -35 dB. Beide Parameter liefern damit eine Abschätzung des linearen Nachhallverhaltens eines Raumes (Hak et al., 2008).

Zwischen den objektiven Parametern einer Impulsantwort und der subjektiven Wahrnehmung besteht ein enger Zusammenhang. Frühe Reflexionen beeinflussen vor allem Klarheit, Nähe und Lokalisation, während der spätere Nachhall stärker zur Wahrnehmung von Raumgröße, Distanz und Atmosphäre beiträgt. Für Anwendungen in Videospielen ist dies besonders relevant, da dort nicht allein die

physikalische Exaktheit eines Raumes entscheidend ist, sondern vor allem seine glaubwürdige und funktionale Wahrnehmbarkeit innerhalb einer interaktiven Umgebung.

2.2. Raumakustik in Videospielen

Die Anwendung von Raumakustik unterscheidet sich grundlegend zwischen linearen Medien wie Film und interaktiven Medien wie Videospielen. In Filmproduktionen wird Audio in der Regel vorab gestaltet und exakt auf ein festes Bild abgestimmt. Die akustische Umgebung ist somit statisch und kann im Voraus vollständig kontrolliert und optimiert werden. Im Gegensatz dazu ist Audio in Videospielen dynamisch und muss in Echtzeit an die Interaktionen der Spieler*innen angepasst werden. Die akustische Wahrnehmung hängt dabei von Faktoren wie der Position der Spielfigur, deren Bewegung sowie den Eigenschaften der virtuellen Umgebung ab. Dadurch entsteht die Notwendigkeit, Schallausbreitung in Echtzeit zu berechnen oder zumindest approximativ darzustellen. Diese Interaktivität stellt eine zentrale Herausforderung dar, da die akustische Simulation nicht nur plausibel, sondern auch performant werden muss. Während im Film physikalisch aufwendige Simulationen oder aufgenommene Impulsantworten ohne Echtzeitbeschränkung eingesetzt werden können, erfordern Videospiele effiziente Lösungen, die unter begrenzten Rechenressourcen funktionieren. Ein wesentliches Merkmal von Raumakustik in Videospielen ist ihre dynamische Natur. Da sich Spieler*innen frei in der virtuellen Umgebung bewegen können oder sich die Umgebung durch spielerische Handlungen ändern kann, wandelt sich die akustische Wahrnehmung. Die Schallausbreitung hängt dabei von der relativen Position zwischen Schallquelle und Zuhörer sowie von der Geometrie und Materialbeschaffenheit der Umgebung ab (Godin et al., 2019).

Moderne Spiele versuchen, die Dynamik durch Verfahren der Sound Propagation abzubilden, bei denen Effekte wie Reflexion, Absorption und Beugung (Diffraktion) berücksichtigt werden. Dabei muss das System in der Lage sein, fließende Übergänge zwischen unterschiedlichen akustischen Umgebungen zu gewährleisten, sodass keine abrupten Veränderungen im Klangbild auftreten. Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass diese Berechnungen in Echtzeit erfolgen müssen. Daher kommen häufig vereinfachte oder hybride Ansätze zum Einsatz, die physikalische Modelle mit heuristischen Methoden kombinieren. Ziel ist es, eine möglichst realistische Klangwahrnehmung zu erzeugen, ohne die Leistungsfähigkeit des Systems zu überlasten (Davari and Verbrugge, 2021).

Geschlossene Räume spielen eine zentrale Rolle für die Wahrnehmung von Raumakustik in Videospielen. Innerhalb solcher Räume entstehen komplexe Schallphänomene wie Reflexionen, Nachhall sowie Abschattungseffekte, die zur akustischen Charakteristik beitragen. Reflexionen an Wänden, Decken und anderen Oberflächen führen dazu, dass Schall mehrfach im Raum verteilt wird. Dies erzeugt sowohl frühe Reflexionen als auch späten Nachhall, welche zusammen den wahrgenommenen Raumklang bestimmen. Darüber hinaus beeinflussen Hindernisse im Raum die direkte Schallausbreitung, indem sie den Schall teilweise blockieren oder abschwächen (Amengual Garí et al., 2019).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass geschlossene Räume eine wesentliche Herausforderung für die akustische Simulation in Videospielen darstellen. Sie erfordern eine präzise Modellierung von Schallinteraktionen, um eine glaubwürdige und immersive Klangumgebung zu erzeugen.

2.3. Synthetische vs. reale Impulsantworten

Reale Impulsantworten werden durch Messungen in physikalischen Räumen gewonnen und stellen eine direkte Abbildung der tatsächlichen akustischen Eigenschaften eines Raumes dar. Hierfür wird ein definiertes Testsignal, beispielsweise ein Impuls oder ein Sinus-Sweep, in einem Raum abgespielt und mit einem Mikrophon aufgezeichnet. Die resultierende Aufnahme enthält Informationen über Direktschall, frühe Reflexionen und Nachhall und bildet damit das akustische Verhalten des realen Raumes ab (Guidorzi et al., 2015).

Der zentrale Vorteil realer Impulsantworten liegt in ihrer hohen physikalischen Nähe zur tatsächlichen Raumakustik. Sie erfassen reale Effekte wie Reflexion, Streuung, Beugung und materialabhängige Absorption unmittelbar im konkreten Raum. Dadurch eignen sie sich besonders für Anwendungen, in denen ein möglichst authentischer Raumklang benötigt wird. Gleichzeitig sind reale Impulsantworten jedoch mit praktischen Einschränkungen verbunden. Ihre Aufnahme ist zeitaufwändig, erfordert geeignetes Equipment und hängt stark von äußeren Bedingungen wie Hintergrundgeräuschen, Signal-Rausch-Verhältnis und verfügbarem Abklingbereich ab. Zudem sind sie stets an einen bestimmten Raum und eine konkrete Messposition gebunden. Änderungen an Raum, Quelle oder Empfänger erfordern in der Regel eine neue Messung.

Synthetische Impulsantworten werden dagegen rechnerisch erzeugt. Ihr Ziel besteht darin, das akustische Verhalten eines Raumes modellhaft zu approximieren, ohne eine reale Messung durchführen zu müssen. Solche Verfahren sind besonders für Anwendungen interessant, in denen viele unterschiedliche Räume benötigt werden oder in denen ein flexibler und iterativer Workflow erforderlich ist, etwa in der Games-, Film- oder Audioproduktion.

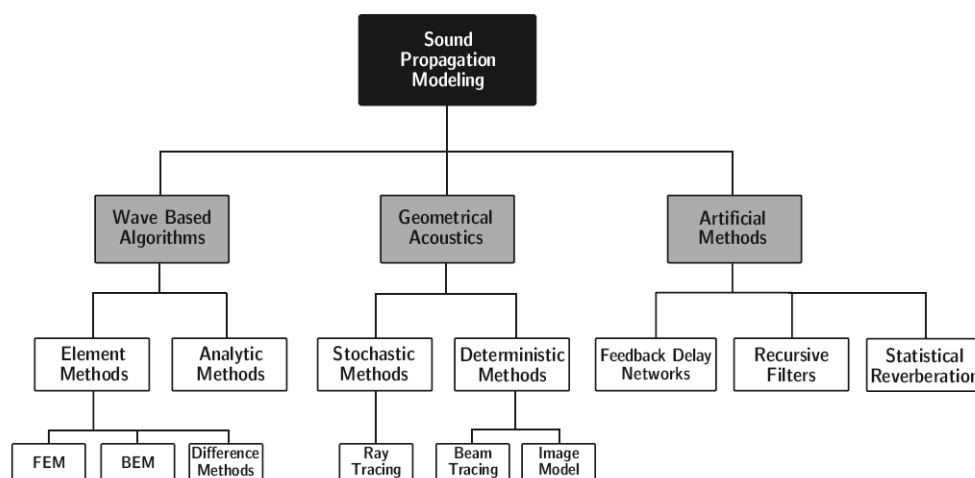


Abbildung 1: Simulationsmodelle von Schallausbreitung (vgl. Vorländer 2008)

Grundsätzlich lassen sich, wie in Abbildung 1 gezeigt, synthetische Verfahren in drei größere Gruppen unterteilen: geometrische Verfahren, wellenbasierte Verfahren und signalbasierte beziehungsweise künstliche Verfahren.

Geometrische Verfahren basieren auf der Annahme, dass sich Schall näherungsweise wie Licht entlang geradliniger Pfade ausbreitet und an Flächen reflektiert wird. Zu den wichtigsten Verfahren dieser Gruppe zählen die Image Source Method, Ray Tracing und Beam Tracing. Ihr Vorteil liegt vor allem in der vergleichsweise guten Effizienz bei gleichzeitig plausibler Modellierung von Direktschall und frühen Reflexionen. Gerade für komplexere virtuelle Räume und produktionsnahe Anwendungen

stellen sie deshalb einen wichtigen Ansatz dar. Ihre Einschränkung besteht darin, dass sie reale Welleneffekte wie Beugung, Interferenz oder diffuse Streuung nur vereinfacht oder gar nicht erfassen (Sikora et al., 2018).

Wellenbasierte Verfahren lösen demgegenüber die zugrunde liegende Wellengleichung direkt und gelten deshalb als physikalisch besonders genau. Hierzu zählen etwa die Finite-Element-Method (FEM), die Boundary-Element-Method (BEM) und die Finite-Difference Time Domain Method (FDTD). Diese Verfahren können auch komplexe Welleneffekte realitätsnah abbilden, sind jedoch mit einem sehr hohen Rechenaufwand verbunden und daher für Echtzeitanwendungen oder produktionsnahe Workflows meist nur eingeschränkt praktikabel (Yu et al., 2023).

Signalbasierte oder künstliche Verfahren verzichten weitgehend auf eine explizite geometrische Raumsimulation und erzeugen stattdessen einen plausiblen Raumeindruck durch algorithmische Signalverarbeitung. Beispiele hierfür sind Schroeder-Reverberatoren (Prof. Dobrian, 2005) oder Feedback Delay Networks (FDN) (Menzer, 2014). Solche Verfahren sind recheneffizient und flexibel einsetzbar, zielen jedoch eher auf eine wahrnehmungsbasierte Annäherung als auf eine physikalisch genaue Rekonstruktion eines konkreten Raumes.

Für die vorliegende Arbeit sind vor allem geometrische beziehungsweise hybride Verfahren relevant, da BOOM Artificial IR auf genau solchen Ansätzen basiert. Wellenbasierte und rein signalbasierte Verfahren sind für die theoretische Einordnung zwar wichtig, stehen jedoch nicht im Zentrum der Untersuchung. Im folgenden Kapitel wird daher der produktionspraktische und technische Kontext von BOOM Artificial IR näher erläutert.

2.4. BOOM Artificial IR (Produktionskontext)

BOOM Artificial IR ist ein softwarebasiertes System zur synthetischen Erzeugung von Impulsantworten. Im Unterschied zu klassischen raumakustischen Messverfahren werden Impulsantworten nicht durch eine reale Aufnahme im Raum gewonnen, sondern rechnerisch aus einem virtuellen Szenenmodell abgeleitet. Das im Link des Anhangs hinterlegte Handbuch beschreibt die Arbeitsweise, die dabei im Kern auf Verfahren der geometrischen Akustik basiert. Im Mittelpunkt stehen Schallstrahlen, Reflexionspfade, Schnittberechnungen mit Szenenobjekten sowie zusätzliche Verfahren zur Annäherung diffuser Reflexionen und vereinfachter Beugung.

Neben der rein geometrischen Bestimmung möglicher Schallpfade berücksichtigt das Programm auch deren energetische Gewichtung. Für Reflexionen wird der Schalldruckbeitrag eines Pfades dabei in vereinfachter Form in Abhängigkeit von Materialeigenschaften wie Streuung und Absorption berechnet. Dies wird unter anderem durch die Beziehung

$$P_{out} = P_{in} \sqrt{(1 - s)(1 - \alpha)}$$

(BOOM Library, 2026)

beschrieben. Dabei bezeichnet P_{in} den eingehenden Schalldruck, P_{out} den ausgehenden Schalldruck nach der Reflexion, s den Streukoeffizienten und α den Absorptionskoeffizienten der Oberfläche. Die Formel verdeutlicht, dass ein berechneter Schallpfad nicht nur geometrisch gültig sein muss, sondern zusätzlich in seiner Intensität von den Materialeigenschaften der beteiligten Fläche beeinflusst wird. Die folgenden Unterkapitel erläutern die dafür im Benutzerhandbuch beschriebenen Teilverfahren (BOOM Library, 2026).

2.4.1 Akustisches Raytracing

Ein zentrales Grundprinzip von BOOM Artificial IR ist das akustische Raytracing. Dabei wird Schall nicht als kontinuierliches Wellenbild modelliert, sondern durch eine große Anzahl einzelner Strahlen angenähert, die sich von einer Schallquelle aus in unterschiedliche Richtungen im Raum ausbreiten. Das Nutzerhandbuch beschreibt diesen Ansatz anschaulich als eine Art Expansion einer Schallwelle um eine Punktquelle: Wird die Oberfläche dieser in sich ausbreitenden Welle mit einer Anzahl N von Punkten abgetastet, lassen sich diese Punkte als Ausgangspunkte einzelner Rays interpretieren. Je höher die Zahl der ausgesandten Strahlen ist, desto dichter wird die räumliche Abtastung der Schallausbreitung.

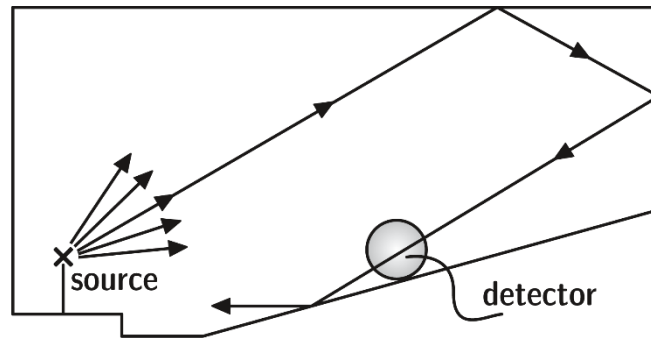


Abbildung 2: Veranschaulichung von entsandten Rays von einer Quelle zu einem Empfänger (BOOM Library, 2026)

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, werden die von der Quelle „source“ ausgesandten Strahlen durch die Szene verfolgt und auf mögliche Interaktionen mit Objekten geprüft. Treffen sie auf reflektierende Flächen, entstehen neue Strahlen, die je nach Materialeigenschaften entweder spekulär oder diffus weitergeführt werden können. Treffen sie auf einen Empfänger „detector“, wird ihre aktuelle Intensität an diesen übertragen. Die Quellenintensität I wird gleichmäßig auf die erzeugten Rays verteilt, sodass jeder einzelne Ray zunächst den Anteil

$$\frac{1}{N} \times I$$

(BOOM Library, 2026)

trägt. Dieses Prinzip dient der numerischen Annäherung der Schallausbreitung im Raum.

Für die praktische Simulation ist entscheidend, dass jeder Ray nicht nur ausgedehnt, sondern auch geometrisch ausgewertet wird. Dazu müssen Schnittpunkte mit Szenenobjekten berechnet werden. BOOM Artificial IR unterscheidet hierbei unter anderem zwischen „Ray-Triangle Intersection“ und „Ray-Sphere Intersection“. Die erste Variante wird verwendet, um Reflexionsflächen zu testen. Eine Wand wird dabei durch vier Indizes beschrieben und zur Vereinfachung in zwei Dreiecke zerlegt. Dadurch kann überprüft werden, ob und wo ein Strahl auf eine Fläche trifft.

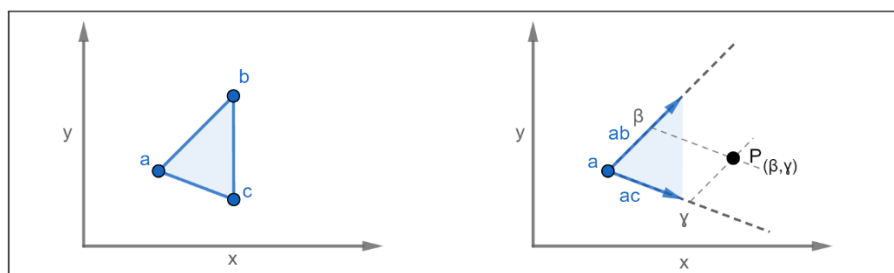


Abbildung 3: Veranschaulichung der Berechnung mithilfe baryzentrischer Koordinaten (BOOM Library, 2026)

Wie in Abbildung 3 dargestellt, erfolgt diese Berechnung mithilfe baryzentrischer Koordinaten. Jeder Punkt $\vec{P}$ innerhalb des Dreiecks kann beschrieben werden als

$$\vec{P}(\beta, \gamma) = \vec{a} + \beta(\vec{b} - \vec{a}) + \gamma(\vec{c} - \vec{a}).$$

(BOOM Library, 2026)

Dabei bezeichnen $\vec{a}$, $\vec{b}$ und $\vec{c}$ die Eckpunkte des Dreiecks. Die Variablen β und γ bestimmen die Lage des Punktes innerhalb der von diesen Eckpunkten aufgespannten Fläche. Der Schnittpunkt liegt nur dann innerhalb des Dreiecks, wenn die Bedingungen

$$0 \leq \gamma \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1, \beta + \gamma \leq 1 \text{ und } t > 0$$

(BOOM Library, 2026)

erfüllt sind. Diese Bedingungen sind wichtig, weil sie sicherstellen, dass der berechnete Schnittpunkt nicht nur auf der unendlichen Ebene des Dreiecks, sondern tatsächlich innerhalb der relevanten Reflexionsfläche liegt. Zur Lösung der entsprechenden Gleichungen werden baryzentrische Koordinaten und die Cramer-Regel verwendet.

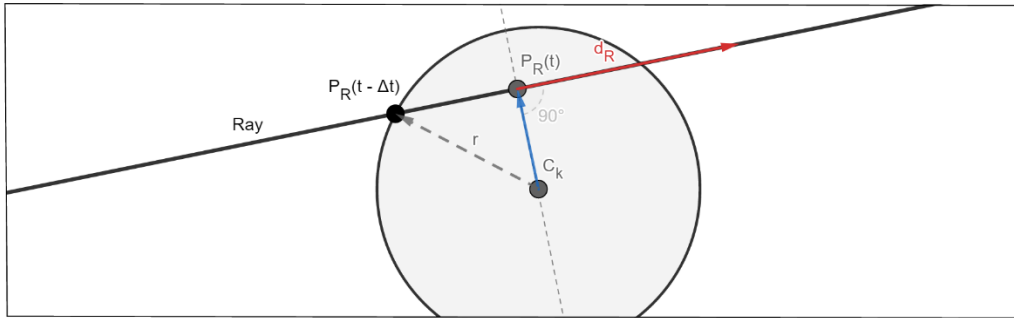


Abbildung 4: Darstellung der Ray-Sphere Intersection (BOOM Library, 2026)

Um Treffer mit kugelförmigen Empfängern zu bestimmen, verwendet BOOM Artificial eine Kugelgeometrie. Bei der Ray-Sphere Intersection wird geprüft, ob ein Ray eine solche Kugel trifft. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, wird dazu zusätzlich der Punkt auf dem Ray bestimmt, der orthogonal zum Kugelmittelpunkt $\vec{C}_K$ liegt. Der Zusammenhang wird beschrieben über die Bedingung

$$(\vec{P}_R - \vec{C}_K) \times \vec{d}_R = 0,$$

(BOOM Library, 2026)

beziehungsweise in umgeformter Schreibweise als

$$(\vec{O}_R + t\vec{d}_R - \vec{C}_K) \times \vec{d}_R = 0$$

(BOOM Library, 2026)

und daraus

$$t = \vec{d}_R \times (\vec{C}_K - \vec{O}_R).$$

(BOOM Library, 2026)

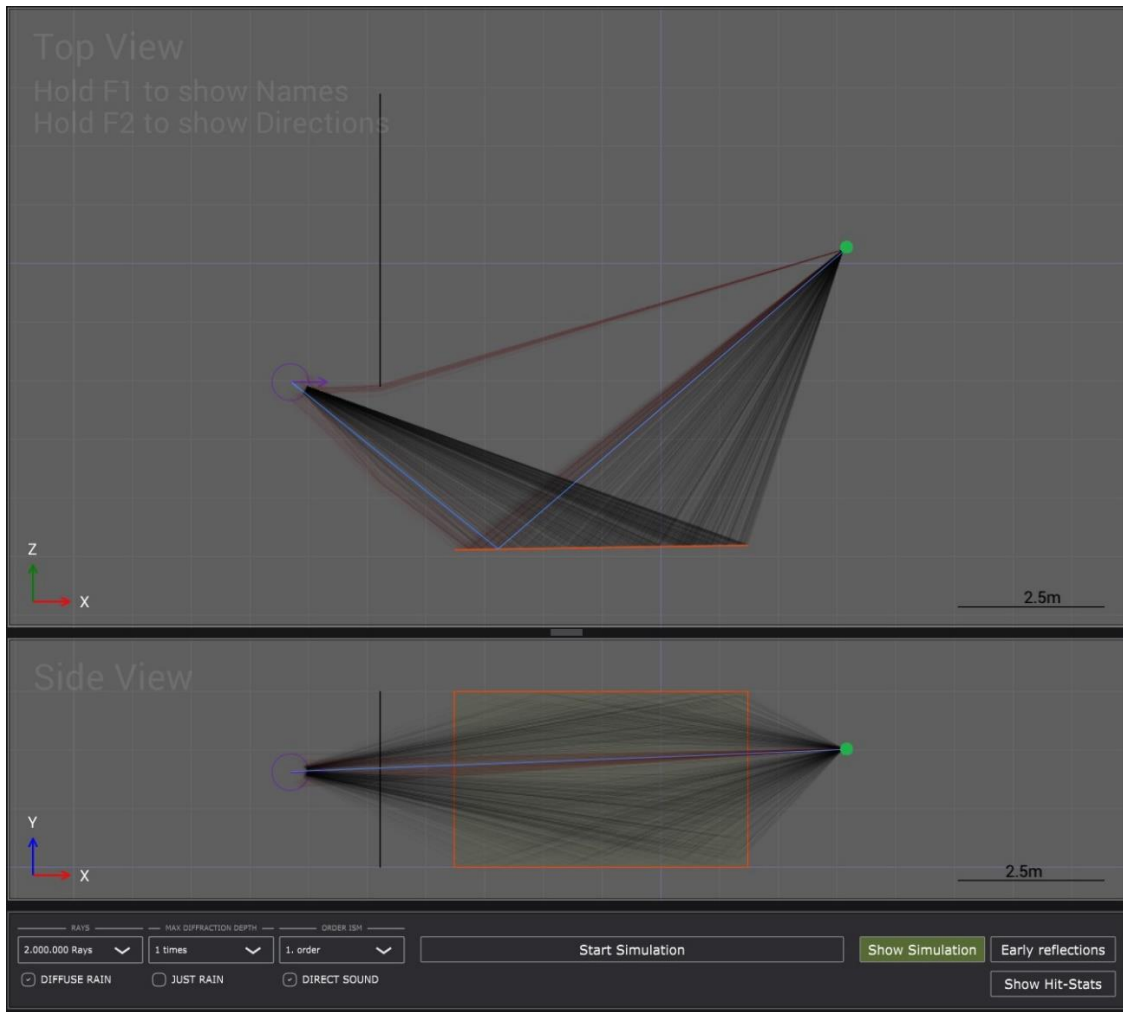


Abbildung 6: Darstellung von Streuung und Absorption in BOOM Artificial IR (BOOM Library, 2026)

Auch die Intensität der Rays wird nach jeder Interaktion angepasst. Wie in Abbildung 6 dargestellt, berücksichtigt BOOM Artificial IR dabei sowohl die Streuung s als auch die Absorption α . Unterschieden wird hier explizit zwischen spekularem und diffusem Intensitätsanteil:

$$spec: I_{out} = I_{in}(1 - s)(1 - \alpha)$$

$$diff: I_{out} = I_{in}(s)(1 - \alpha)$$

(BOOM Library, 2026)

Hierbei bezeichnet I_{in} die Intensität des einfallenden Strahls und I_{out} die Intensität der Reflexion. Der Parameter α steht für den Absorptionskoeffizienten des Materials. Ein Teil der Energie geht also durch Absorption verloren, während der verbleibende Anteil abhängig von s auf einen spekularen und einen diffusen Teil aufgeteilt wird. Diese Gleichungen machen deutlich, dass die Materialeigenschaften in BOOM Artificial IR nicht nur die Richtung, sondern auch die energetische Verteilung der reflektierenden Schallanteile bestimmen.

Die gezeigte Simulationsdarstellung in Abbildung 6 verdeutlicht dieses Prinzip grundsätzlich visuell. Dort ist eine Szene mit zwei Reflektoren zu sehen, in der direkte Schallausbreitung aufgrund der Geometrie nicht möglich ist. Dennoch entstehen über spekulare Reflexion, Diffuse Rain und Diffraction verschiedene gültige Schallpfade. Diese Anteile werden farblich gekennzeichnet. Blau steht für spekulare Reflexionen im Sinne des ISM, Schwarz für „Diffuse Rain“ und Rot für Diffractions-

Rays. Bereits diese Abbildung zeigt, dass das Raytracing in BOOM Artificial IR nicht als isolierte Technik zu verstehen ist, sondern im Zusammenspiel mit weiteren Verfahren eine komplexere und dichtere Raumantwort erzeugen soll (BOOM Library, 2026).

2.4.2 Diffuse Rain

Ein besonders wichtiger Bestandteil des beschriebenen Systems ist das sogenannte Diffuse Rain. Dieses Verfahren wird dort ausdrücklich als sehr bedeutsam hervorgehoben, weil ohne diffuse Zusatzstrahlen nur ein kleiner Teil der tatsächlich relevanten Rauminformation an den Empfängern ankommen würde. Die Impulsantworten würden dann hörbar löchriger oder stärker knisterartig wirken.

Das Prinzip von Diffuse Rain besteht darin, dass an Reflexionspunkten zusätzliche Rays erzeugt werden, die nicht nur der idealen Spiegelrichtung folgen, sondern in einem breiten Winkelbereich in den Raum verteilt werden. Für diese zusätzlichen Strahlen wird anschließend überprüft, ob ein Empfänger sichtbar ist, also nicht durch ein Objekt verdeckt wird. Ist dies der Fall, kann Energie an den Empfänger übertragen werden.

Für diese Energieverteilung wird eine kosinusbasierte Wahrscheinlichkeitsdichte verwendet, die inspiriert von akustischen Reflexionsmodellen ist. Damit wird versucht, den diffusen Energieeintrag eines Raumes besser abzubilden. Akustisch ist dieses Verfahren besonders relevant für spätere Reflexionsanteile und für eine gleichmäßigere Füllung des virtuellen Raumes mit Schallenergie. Ohne Diffuse Rain würde das Modell zu stark von wenigen geometrisch exakt getroffenen Reflexionspfaden abhängen (BOOM Library, 2026).

2.4.3 Vereinfachte Beugung

Zusätzlich enthält das System eine vereinfachte Form von Beugung. Dieses Modell ist keine vollständige physikalische Wellensimulation, sondern eine abstrahierte Näherung. Dazu erhalten Reflektoren virtuell erweiterte Kantenbereiche. Wird ein Ray nicht von der eigentlichen Fläche, aber von ihrer virtuellen Kantenumgebung getroffen, kann ein Beugungsvorgang ausgelöst werden.

Die Idee dahinter ist, dass Schall auch dann noch um Kanten herum zum Empfänger gelangen kann, wenn kein direkter spekulärer Pfad existiert. Unterschiedliche Frequenzbereiche beugen sich dabei unterschiedlich stark. Über diskrete Distanz- und Frequenzschwellen wird entschieden, welche Frequenzanteile wie stark gebeugt werden. Tiefe Frequenzen erhalten größere Beugungswinkel, hohe Frequenzen kleinere. Für das Modell bedeutet das: Beugung wird nicht kontinuierlich aus der Wellengleichung berechnet, sondern über heuristische Zusatzstrahlen angenähert. Dennoch erhöht dieses Verfahren die Plausibilität der Simulation, besonders in Situationen, in denen direkte oder einfache reflektierte Pfade verdeckt sind (BOOM Library, 2026).

2.4.4 Image Source Model

Ein weiterer Bestandteil von BOOM Artificial IR ist das Image Source Model (ISM). Dieses Verfahren dient ausschließlich der Simulation spekulärer Reflexionen. Es basiert darauf, eine reale Schallquelle gedanklich an einer reflektierenden Fläche zu spiegeln und aus dieser gespiegelten Position den Reflexionspfad zu bestimmen. Anstatt also den Reflexionspunkt direkt über Einfallswinkel und Ausfallswinkel zu suchen, wird mit einer virtuellen, gespiegelten Quelle gearbeitet. Dadurch lassen sich insbesondere frühe, geometrisch klar definierte Reflexionen effizient berechnen.

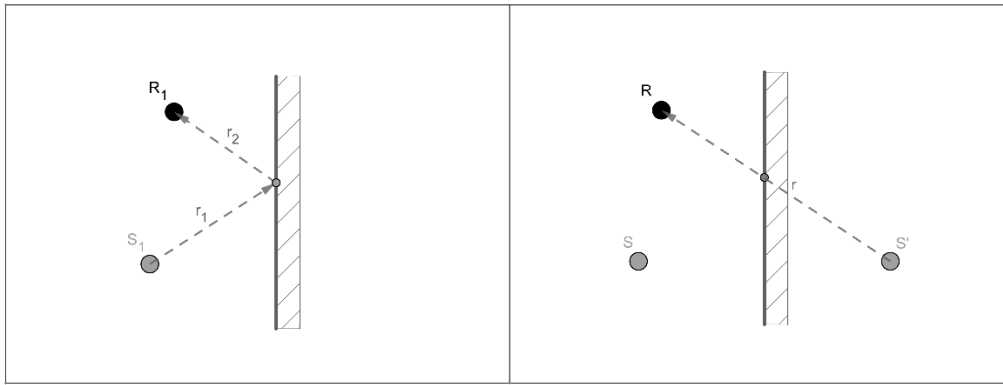


Abbildung 7: Spiegelung von einer Quelle an einer reflektierenden Fläche (BOOM Library, 2026)

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wird die Quelle S an seiner reflektierenden Fläche gespiegelt, sodass eine virtuelle Quelle S' entsteht. Der Weg von dieser virtuellen Quelle zum Empfänger R kann anschließend so interpretiert werden, als ob er einer realen Reflexion an der Wand entspräche. Der tatsächliche Reflexionspunkt ergibt sich an der Stelle, an der die Verbindung zwischen Empfänger und Bildquelle die reflektierende Fläche schneidet. Damit wird veranschaulicht, dass das ISM spekulare Reflexionen in ein geometrisch leichter lösbares Problem überführt.

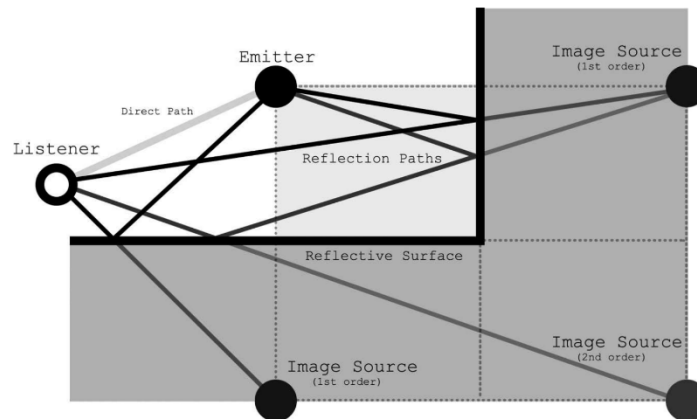


Abbildung 8: Darstellung mehrerer Reflexionspfade zwischen Quelle und Empfänger (BOOM Library, 2026)

Das Verfahren kann nicht nur für Reflexionen erster Ordnung verwendet werden. Eine bereits gespiegelte Quelle kann sich erneut an einer weiteren Fläche spiegeln, wodurch Reflexionen höherer Ordnung entstehen. Wie in Abbildung 8 dargestellt, ergeben sich dadurch mehrere mögliche Reflexionspfade zwischen Quelle „Emitter“ und Empfänger „Listener“. Das Verfahren ist besonders für frühe Reflexionen geeignet, da diese meist noch klaren geometrischen Pfaden folgen und nicht vollständig in ein diffuses Schallfeld übergehen.

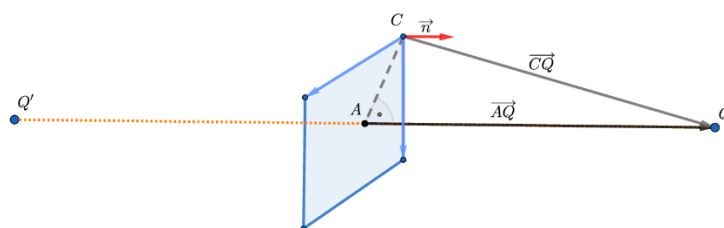


Abbildung 9: Darstellung der Position von Q' (BOOM Library, 2026)

Zur Berechnung der Position einer Bildquelle wird im Programm eine geometrische Beziehung genutzt. Dabei wird zunächst der Vektor $\overrightarrow{AQ}$ bestimmt. In dieser Schreibweise bezeichnet Q die ursprüngliche

Quelle und Q' die gespiegelte Quelle. Die Punkte A und C sowie der Normalenvektor $\vec{n}$ beschreiben die Lage der reflektierenden Fläche. Anschließend wird die Bildquelle mit (BOOM Library, 2026).

$$\vec{Q'} = \vec{Q} - 2\vec{AQ}$$

(BOOM Library, 2026)

berechnet. Diese Formel beschreibt, dass die Quelle Q entlang der Flächennormalen an der Ebene gespiegelt wird. Der Ausdruck $\vec{AQ}$ erfasst dabei den Abstand der Quelle zur Spiegelebene in die gespiegelte Position Q' . Wie in Abbildung 9 dargestellt, liegt Q' somit symmetrisch zur reflektierenden Fläche auf der gegenüberliegenden Seite. Q und Q' folgen hier der deutschen Schreibweise für „Quelle“ und werden in den kommenden Abbildungen die Variablen S und S' für „source“ entsprechen.

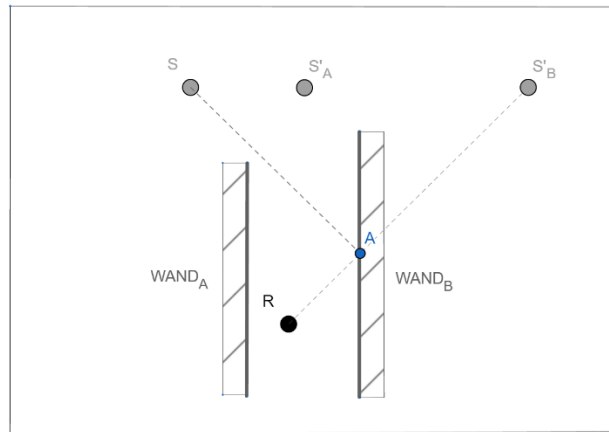


Abbildung 10: Veranschaulichung gültiger Reflexionspfade anhand von zwei Reflektoren (BOOM Library, 2026)

Nicht jede rechnerisch erzeugte Bildquelle führt automatisch zu einem gültigen Schallpfad. Entscheidend ist, ob der daraus resultierende Reflexionspunkt tatsächlich auf der reflektierenden Fläche liegt und ob die Orientierung der Fläche einen solchen Pfad überhaupt zulässt. In Abbildung 10 wird dies an zwei Reflektoren verdeutlicht: Zwar können für beide Flächen virtuelle Bildquellen erzeugt werden, aber nur eine davon führt zu einem physikalisch gültigen Reflexionspfad. Die andere ist ungültig, weil die geometrische Anordnung keinen ersten Reflexionsweg über die betreffende Fläche zulässt. Eine Bildquelle ist nur dann sinnvoll, wenn sie hinter ihrem Reflektor liegt.

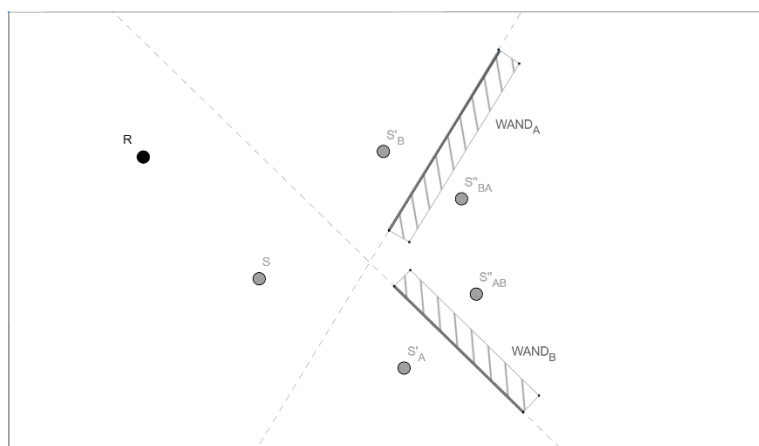


Abbildung 11: Ungültige Reflexionspfade bei ungünstiger Positionierung von Reflektoren (BOOM Library, 2026)

Ähnliches gilt auch für mehrere reflektierende Flächen mit ungünstiger Orientierung. Wie in Abbildung 11 angedeutet, können zwei Reflektoren so zueinanderstehen, dass sie trotz rechnerisch möglicher Bildquellen keinen gültigen Reflexionspfad zueinander erzeugen. Reflektoren, die akustisch nicht

zueinander zeigen, können Schall nicht sinnvoll aufeinander weiterleiten. Deshalb genügt es nicht, Bildquellen einfach nur geometrisch zu erzeugen. Sie müssen zusätzlich validiert werden, etwa durch Prüfung der Flächennormalen, der Lage der Reflexionspunkte und möglicher Verdeckungen.

Für BOOM Artificial IR ist das ISM deshalb vor allem als deterministisches Verfahren für frühe spekulare Reflexionen relevant. Es bietet eine geometrisch präzise und rechnerisch vergleichsweise effiziente Möglichkeit, direkte Reflexionspfade zu erfassen. Dieses Verfahren funktioniert besonders gut in einfachen, schuhkartonartigen Räumen, bei komplexeren Raumgeometrien werden jedoch weitergehende Optimierungen benötigt. Für die vorliegende Arbeit ist das insofern wichtig, als das ISM innerhalb von BOOM Artificial IR einen Teil der frühen Raumantwort strukturiert und damit zur Form der synthetisch erzeugten Impulsantwort beiträgt (BOOM Library, 2026).

2.4.5 Beam Tracing

Neben dem ISM gilt auch Beam Tracing (BT) als ein weiteres deterministisches Verfahren zur Berechnung von Reflexionspfaden. BT dient dabei nicht einfach als Alternative zum Raytracing, sondern vor allem dazu, Bildquellen und ihre möglichen Reflexionsketten geometrisch weiter zu validieren. Während beim ISM einzelne gespiegelte Quellen berechnet werden, betrachtet BT zusätzlich die räumlichen Bereiche, in denen diese Bildquellen überhaupt zu gültigen Schallpfaden führen können.

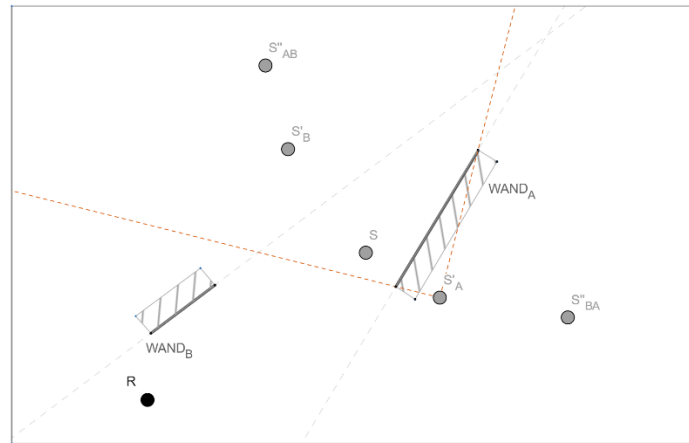


Abbildung 12: Darstellung zur Erzeugung eines Beams (BOOM Library, 2026)

Ein Beam ist ein gültiger Raumsektor, der durch eine Bildquelle und die Eckpunkte ihres Reflektors definiert wird. Ein Beam ist damit kein einzelner Strahl, sondern ein räumlich ausgedehnter Bereich möglicher Schallausbreitung. Wie in Abbildung 12 dargestellt, erzeugt die Bildquelle S'_A zusammen mit dem Reflektor $WAND_A$ einen solchen Beam. Nur Reflektoren, die innerhalb dieses Raumsektors liegen, können für weitere gültige Reflexionen berücksichtigt werden. Reflektor $WAND_B$ liegt in dem dort gezeigten Beispiel außerhalb des Beams von S'_A und muss deshalb keine weiteren Bildquellen von S'_A erzeugen. Das Verfahren reduziert damit die Zahl geometrisch möglicher, aber physikalisch nicht sinnvoller Reflexionspfade.

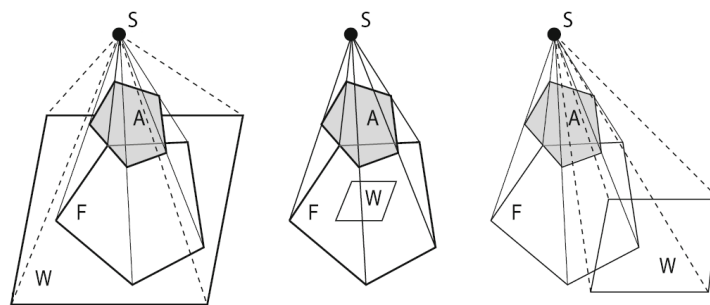


Abbildung 13: Relevanz eines Reflektors für eine nächste Reflexion (BOOM Library, 2026)

In Abbildung 13 wird dieser Zusammenhang zusätzlich anhand einer dreidimensionalen Skizze, in der Quelle, Reflektor, Beam und weitere reflektierende Flächen gemeinsam dargestellt werden, verdeutlicht. Ein weiterer Reflektor ist nur dann für eine nächste Reflexion relevant, wenn er den vom Beam aufgespannten Raumsektor tatsächlich schneidet. BT fungiert damit als räumliche Einschränkung der mit dem ISM erzeugten Reflexionsmöglichkeiten. Ziel ist es, die Menge der weiterzuverfolgenden Pfade zu verkleinern und auf geometrisch plausible Kandidaten zu begrenzen.

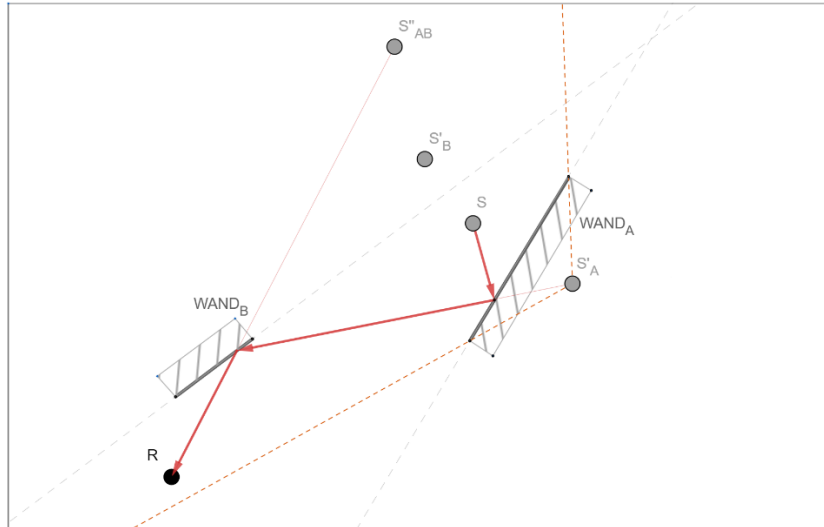


Abbildung 14: Entstehung eines neuen gültigen Schallpfads (BOOM Library, 2026)

Die Gültigkeit eines Beams kann sich durch kleine Veränderungen der Quellposition ändern. Wird die ursprüngliche Hauptquelle leicht verschoben, kann sich der Beam verbreitern, sodass ein zuvor ausgeschlossener Reflektor nun innerhalb des gültigen Raumsektors liegt. Wie in Abbildung 14 dargestellt, entsteht dadurch ein neuer gültiger Schallpfad. Dieser Aspekt macht deutlich, dass BT stark von der konkreten räumlichen Konstellation abhängt und nicht allein aus der Existenz einer Bildquelle auf einen gültigen Reflexionsweg geschlossen werden kann.

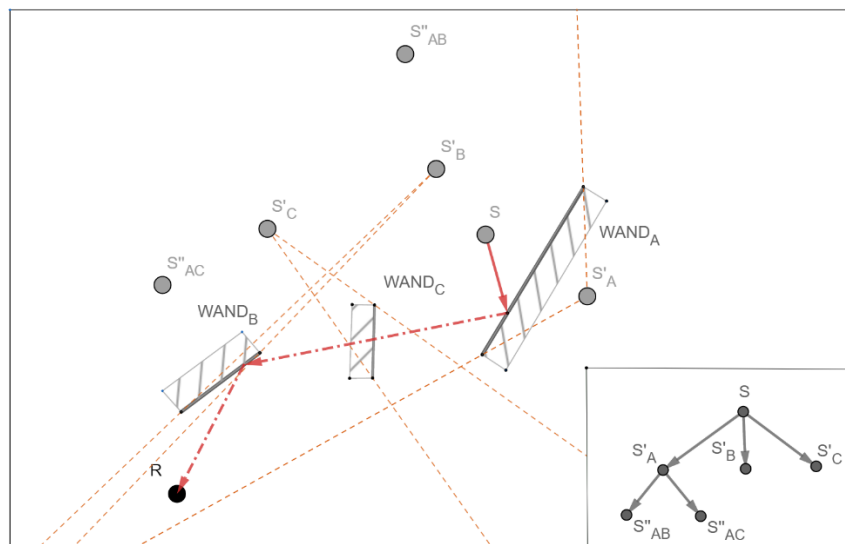


Abbildung 15: Blockierung des Schallwegs durch einen zusätzlichen Reflektor (BOOM Library, 2026)

Allerdings reicht auch das Vorhandensein eines gültigen Beams noch nicht aus, um einen Reflexionspfad endgültig zu akzeptieren. Zusätzlich müssen Verdeckungen beziehungsweise Obstruktionen geprüft werden. Ein potenziell gültiger Pfad kann durch einen weiteren Reflektor blockiert werden. Wie in Abbildung 15 angedeutet, kann ein zusätzlicher Reflektor $WAND_C$ den Schallweg

zwischen Quelle, Reflexionspunkten und Empfänger verdecken. In diesem Fall muss der Pfad trotz formal gültiger Bildquelle und gültigem Beam verworfen werden. BT ist somit nicht nur eine Methode zur Einschränkung von Raumsektoren, sondern Teil einer mehrstufigen geometrischen Validierung.

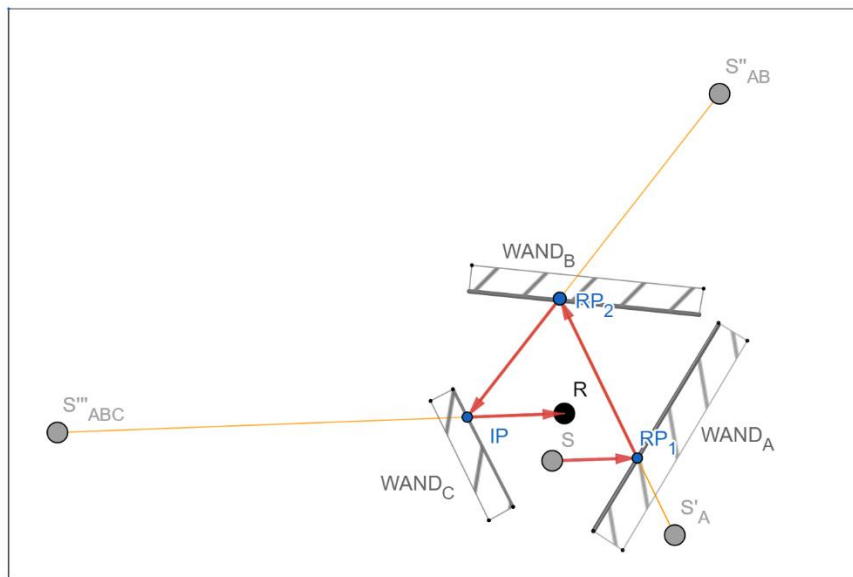


Abbildung 16: Entstehung neuer Reflexionspfade abhängig von der Reflexionsordnung (BOOM Library, 2026)

Für die eigentliche Pfadkonstruktion beschreibt Abbildung 16 ein rückwärts gerichtetes Vorgehen vom Empfänger zur Quelle. Dabei wird zunächst zwischen dem Empfänger R und der Bildquelle höchster Ordnung ein Schnittpunkt konstruiert, der als Intersection Point (IP) bezeichnet wird. Von diesem Punkt aus wird anschließend der zugehörige Reflexionspunkt an der Mutterquelle beziehungsweise der Bildquelle niedrigerer Ordnung bestimmt. Dieser Vorgang wiederholt sich rekursiv von Bildquelle zu Bildquelle, bis schließlich die ursprüngliche reale Quelle erreicht ist. Beispielsweise entsteht bei einer Reflexion dritter Ordnung dadurch der Pfad $R \rightarrow IP \rightarrow RP_2 \rightarrow RP_1 \rightarrow S$, wobei RP_1 und RP_2 die Reflexionspunkte an den beteiligten Flächen bezeichnen. Die Länge eines solchen Pfades entspricht daher immer der Reflexionsordnung plus zwei. Für Reflexionsordnung drei ergibt sich also ein Pfad mit fünf beteiligten Punkten.

Die im Handbuch gezeigte schematische Ablaufdarstellung macht zusätzlich deutlich, dass für jede Reflexionsordnung jeweils passende Schnitt- und Verdeckungsprüfungen durchgeführt werden müssen. Mit steigender Ordnung wächst die Zahl der erforderlichen Zwischenschritte und Validierungen deutlich an. BT dient hier dazu, diese Suche systematischer und effizienter zu organisieren, indem nur solche Reflexionsketten weiterverfolgt werden, die sowohl geometrisch innerhalb der gültigen Raumsektoren liegen als auch nicht durch andere Objekte blockiert sind.

Für BOOM Artificial IR ist BT damit vor allem als Erweiterung und Validierung des ISM relevant. Während das ISM mögliche Bildquellen und spekulare Reflexionen geometrisch konstruiert, prüft BT, welche dieser theoretisch möglichen Pfade im Raum tatsächlich gültig sind. Das Verfahren trägt somit dazu bei, frühe Reflexionen präziser und rechnerisch effizienter zu bestimmen. Für die vorliegende Arbeit ist dies insbesondere deshalb bedeutsam, weil BT einen Teil der frühen spekularen Raumantwort strukturiert und damit die Form der von BOOM Artificial IR erzeugten Impulsantwort mitbestimmt (BOOM Library, 2026).

2.4.6 Mikrofone

Ein weiterer Bestandteil von BOOM Artificial IR betrifft die Modellierung der Mikrofone beziehungsweise des Empfängers. Dabei geht das System nicht davon aus, dass jeder eintreffende Schallanteil unabhängig von seiner Richtung gleich stark aufgenommen wird. Stattdessen wird die Richtcharakteristik des virtuellen Mikrofons berücksichtigt. Dadurch hängt der Beitrag eines eintreffenden Schallpfades nicht nur von seinem Schalldruck und seiner Laufzeit ab, sondern auch davon, aus welcher Richtung er auf das Mikrofon trifft.

Die Richtwirkung wird durch die Kombination aus der Mikrofonrichtung $\vec{d}_m$, der Einfallsrichtung des Schalls $\vec{d}_s$ und einem Formparameter s beschrieben. Der resultierende Empfangsfaktor g für ein eintreffendes Schallsignal wird dabei mit

$$g = [(1 - s) + s(\vec{d}_m \times \vec{d}_s)], \text{ mit } 0 \leq s \leq 1$$

(BOOM Library, 2026)

angegeben. In dieser Formel beschreibt $\vec{d}_m$ die Ausrichtung des Mikrofons, $\vec{d}_s$ die Richtung, aus der der Schall auf das Mikrofon trifft, und s einen Formparameter zur Steuerung der Richtcharakteristik. Das Skalarprodukt $\vec{d}_m \times \vec{d}_s$ bestimmt dabei, wie stark Mikrofonachse und Einfallsrichtung zueinander ausgerichtet sind. Treffen beide Richtungen gut aufeinander, fällt der Empfangsfaktor höher aus; bei seitlichem oder rückwärtigem Einfall wird das Signal entsprechend schwächer gewichtet.

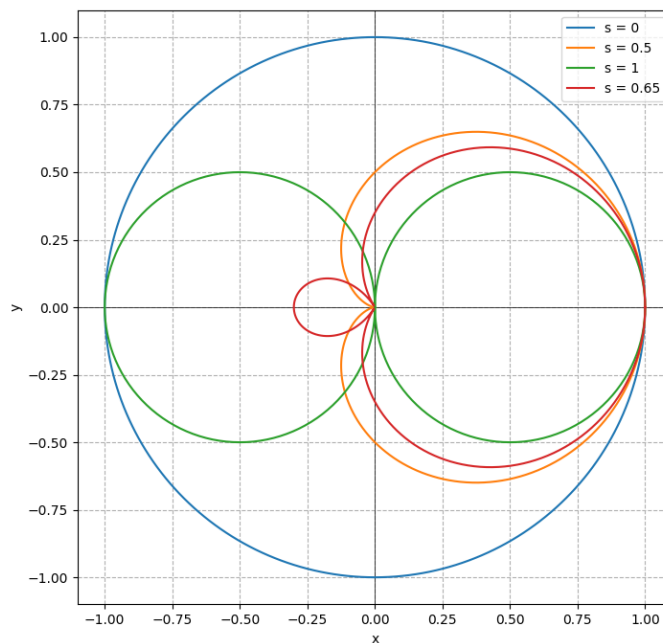


Abbildung 17: Richtcharakteristik des Empfängers abhängig von s (BOOM Library, 2026)

Es lassen sich im Programm so über den Parameter s unterschiedliche Richtungscharakteristiken erzeugen. Wie in Abbildung 17 dargestellt, führt $s = 0$ zu einer kugelförmigen beziehungsweise omnidirektionalen Charakteristik, bei der Schall aus allen Richtungen gleichmäßig erfasst wird. Mit zunehmendem s -Wert wird die Richtungswirkung stärker gebündelt. Dadurch entstehen gerichtete Charakteristiken, die sich zunehmend an nierenförmigen oder stärker fokussierten Mikrofonmustern orientieren. Das bedeutet, dass BOOM Artificial IR den Empfänger nicht nur als geometrischen Punkt behandelt, sondern seine Aufnahmecharakteristik gezielt in die Berechnung einbezieht.

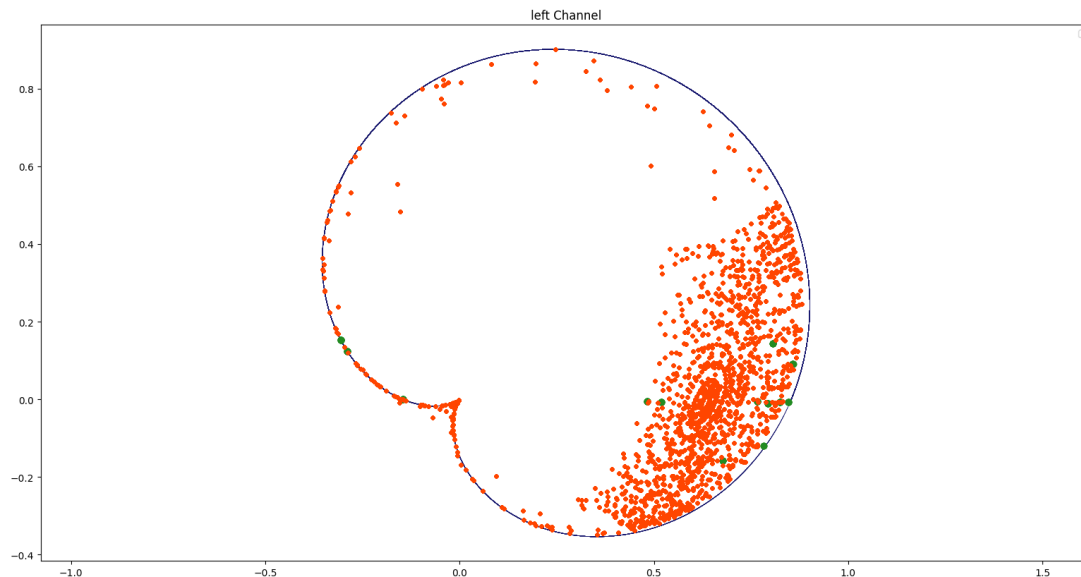


Abbildung 18: Grafische Abbildung von eintreffenden Ray-Treffern auf einem Empfänger (BOOM Library, 2026)

Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, werden die eintreffenden Ray-Treffer auf einer virtuellen Mikrofoncharakteristik grafisch abgebildet. Die Punktverteilung macht anschaulich, dass nicht alle Schallpfade denselben Beitrag zum resultierenden Signal leisten. Vielmehr hängt ihre Gewichtung davon ab, ob sie in den empfindlicheren Hauptaufnahmebereich des virtuellen Mikrofons fallen oder eher in seitliche beziehungsweise rückwärtige Bereiche mit geringerer Empfindlichkeit. Diese Modellierung ist für die resultierende Impulsantwort relevant, weil sie beeinflusst, wie stark Direktschall, frühe Reflexionen und seitlich eintreffende Raumanteile im finalen Signal vertreten sind.

Für das Programm bedeutet dies, dass die Mikrofonmodellierung ein zusätzlicher Schritt zwischen physikalisch-geometrischer Schallberechnung und finaler Impulsantwort ist. Nicht jeder geometrisch gültige Schallpfad wird also unverändert übernommen. Stattdessen wird sein Beitrag in Abhängigkeit von der Richtcharakteristik des gewählten virtuellen Mikrofons skaliert. Für die vorliegende Arbeit ist dies besonders relevant, weil in BOOM Artificial IR unterschiedliche Empfängertypen ausgewählt werden können und sich dadurch die resultierende Impulsantwort nicht nur durch Raumgeometrie und Material, sondern auch durch die virtuelle Mikrofoncharakteristik verändert (BOOM Library, 2026).

3. Methodik

3.1. Studiendesign – Überblick

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein zweiphasiges Studiendesign gewählt, das sowohl eine praxisnahe Auswahl relevanter Raumtypen als auch eine systematische akustische Analyse ermöglicht. Das Vorgehen gliedert sich in Phase A, in der typische geschlossene Raumtypen in Videospielen bestimmt werden und Phase B, in der die synthetisch erstellten und real gemessenen Impulsantworten anhand ausgewählter Testräume verglichen werden.

3.2. Phase A: Bestimmung typischer geschlossener Raumtypen

3.2.1 Auswahl der Spiele

Zur Identifikation relevanter Raumtypen in Videospielen wurde eine Marktanalyse von Spielen der letzten zehn Jahre durchgeführt. Ziel war es, eine Auswahl an Titeln zu treffen, die sowohl in der Praxis weit verbreitet sind als auch unterschiedliche, für die Untersuchung relevante Innenraumtypen enthalten. Die Auswahl basierte zunächst auf allgemeinen Marktkriterien wie finanzieller Leistung, kritischer Rezeption und aktueller Spieleraktivität. Ergänzend wurde jedoch ein inhaltliches Auswahlkriterium einbezogen: die akustische Relevanz des Spiels im Hinblick auf Raumklang und räumliche Orientierung. Die Marktanalyse wurde dazu im Anhang hinterlegt.

Diese zusätzliche Fokussierung lässt sich auch durch die Literatur begründen. Mehrere Arbeiten zeigen, dass realistische beziehungsweise verbesserte räumliche Audiowiedergabe insbesondere in Situationen relevant ist, in denen Audio zur Orientierung, Navigation, Distanzabschätzung oder Hindernisvermeidung beiträgt, und dass Verbesserungen im Spatial Audio Rendering die Aufgabenleistung erhöhen können (Cowan et al., 2014), während ein realistisches hybrides Soundmodell die Anpassungen an die Umgebung erleichtert und die Hindernisvermeidung verbessert (Podkosova et al., 2016). Hochentwickelte Audiosysteme können sowohl die wahrgenommene Realitätsnähe, die Spielerfahrung als auch die Aufgabenausführung beeinflussen (Poudratchi et al., 2024), da die alltägliche Erfahrung eines Menschen stark mit seiner akustischen Wahrnehmung gekoppelt und somit weit entwickelt ist (Murphy and Neff, 2010). Auch Spiele, die für Menschen mit Sehbeeinträchtigungen erstellt wurden, verlassen sich überwiegend auf audiogestützte Merkmale, um die Spielbarkeit zu gewährleisten (Guillen-Hanson et al., 2021). Gleichzeitig weist die Literatur darauf hin, dass der Nutzen realistischer Raumakustik nicht in allen Genres gleichermaßen ausgeprägt ist. Für schnelle Actionspiele, insbesondere First-Person-Shooter (FPS), argumentieren einige Arbeiten, dass bewusst gestaltete oder stilisierte Sounds teilweise funktionaler sein können als strikt realistische (Grimshaw, 2007). Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies, dass nicht allein das Genre als solches entscheidend ist, sondern vor allem, ob ein Spiel relevante Innenräume und räumlich orientierungsbezogene Audiosituationen enthält. Aus diesem Grund wurden vor allem Titel berücksichtigt, die über ausgeprägte Innenräume verfügen und in denen Raumakustik potenziell einen funktionalen oder immersiven Mehrwert bietet. Auf Basis dieser Kriterien wurde eine Stichprobe von insgesamt 29 Spielen zusammengestellt. Dabei wurde auf eine Mischung verschiedener Genres geachtet, um unterschiedliche Spielstrukturen und Raumdesigns abzudecken. Bestimmte Spieltypen wurden bewusst ausgeschlossen, insbesondere Titel mit überwiegend offenen Umgebungen oder stark outdoor-lastiger Raumstruktur, da diese für die Untersuchung von Innenraumakustik weniger geeignet sind.

3.2.2 Definition „geschlossener Raum“

Für die vorliegende Arbeit ist eine klare Definition des Begriffs „geschlossener Raum“ notwendig, um eine einheitliche Grundlage für die Auswahl und Analyse der Testumgebungen zu schaffen. Ein geschlossener Raum wird im Rahmen dieser Arbeit als ein Bereich definiert, der durch umgebende Flächen wie Wände, Decken und Böden vollständig oder überwiegend begrenzt ist. Diese Begrenzungen führen dazu, dass Schall innerhalb des Raumes mehrfach reflektiert wird und ein ausgeprägtes Nachhallfeld entsteht. Die Abgrenzung zu Außenräumen erfolgt insbesondere über das Fehlen solcher klaren Begrenzungsflächen. In Außenbereichen breitet sich Schall überwiegend frei aus, wodurch Reflexionen eine geringere Rolle spielen, und kein stabiler Nachhall entsteht. Dadurch unterscheiden sich Innen- und Außenräume deutlich in ihrem akustischen Verhalten. In Videospielen existieren jedoch häufig Übergangsformen, wie teilweise geöffnete oder halboffene Räume, die beispielsweise durch offene Türen und Fenster oder zerstörte Strukturen verändert werden. Diese führen zu einem Mischverhalten zwischen Innen- und Außenakustik, da ein Teil der Schallenergie den Raum verlassen kann, während gleichzeitig Reflexionen innerhalb des Raumes stattfinden. Für die vorliegende Arbeit werden solche Übergangssituationen bewusst vereinfacht betrachtet. Räume werden dann als „geschlossen“ betrachtet, wenn die raumbegrenzenden Flächen dominieren. Die Fokussierung auf geschlossene Räume ist für diese Arbeit besonders relevant, da Impulsantworten vor allem in solchen Umgebungen aussagekräftige akustische Parameter liefern. Eigenschaften wie Nachhallzeit, Klarheit oder frühe Reflexionen sind direkt von der Raumbegrenzung abhängig und lassen sich in offenen Umgebungen nur eingeschränkt bestimmen (Mahmoud, 2019). Aufgrund dieser Unterschiede werden ausschließlich geschlossene Räume betrachtet, um eine konsistente und vergleichbare Analyse der akustischen Parameter zu ermöglichen.

3.2.3 Raumtyp-Kategorien

Im Vorfeld wurde versucht, die in der im Anhang hinterlegten Marktanalyse identifizierten Räume über ein deutlich detaillierteres Kategoriensystem zu erfassen. Dieses umfasste neben dem Ursprungsspiel und einer visuellen Referenz auch räumliche Maße wie Breite, Länge, Höhe und Volumen sowie Angaben zu Boden-, Wand- und Deckenmaterialien, durchschnittlicher Materialwirkung, Säulenmaterial, Inventar, Dekoration und besonderen architektonischen Merkmalen. Im Verlauf der Analyse zeigte sich jedoch, dass eine derart feingliedrige Erfassung für Videospielräume nur eingeschränkt praktikabel ist. Zum einen lassen sich exakte Maße in vielen Spielen nicht zuverlässig bestimmen, zum anderen sind Materialeigenschaften häufig visuell nur schwer eindeutig einzuordnen. Insbesondere die Unterscheidung zwischen ähnlichen Oberflächenmaterialien erwies sich ohne zusätzliche technische Informationen als unsicher.

Aus diesem Grund wurde das Kategoriensystem bewusst reduziert und auf übergeordnete Raumtypen fokussiert. Diese Vereinfachung ermöglicht eine konsistente Einordnung der Räume und ist für die Zielsetzung der Arbeit ausreichend, da nicht die exakte architektonische Rekonstruktion einzelner Spielräume, sondern die Identifikation typischer akustisch relevanter Raumkategorien im Vordergrund steht.

Als kleiner Raum werden kompakte, geschlossene Innenräume mit geringem Volumen bezeichnet. Dazu zählen beispielsweise kleine Zimmer, Büros, Abstellräume oder einzelne Wohnräume. Akustisch zeichnen sich diese Räume durch kurze Reflexionswege und eine vergleichsweise dichte Folge früher

Reflexionen aus. Der Nachhall ist in solchen Räumen meist kurz, zugleich prägen die frühen Reflexionen den Höreindruck besonders stark.

Mittelgroße Räume umfassen Innenbereiche, die deutlich größer als einzelne Zimmer sind, jedoch noch nicht die Dimension einer Halle oder eines monumentalen Raumes erreichen. Beispiele hierfür sind größere Wohnbereiche, Klassenräume, Restaurants, kleine Lobbys oder Werkstätten. Akustisch weisen diese Räume im Vergleich zu kleineren Räumen längere Reflexionswege und ein stärker ausgeprägtes Nachhallverhalten auf. Gleichzeitig bleibt die Raumwirkung noch kontrollierbar, sodass sowohl frühe Reflexionen als auch Nachhall für die Wahrnehmung relevant sind.

Große Hallen sind weitläufige Innenräume mit deutlich größerem Volumen, etwa Lagerhallen, große Fabrikbereiche, Veranstaltungssäle oder Bahnhofshallen. Im Vergleich zu kleinen und mittelgroßen Räumen treten hier längere Laufzeiten, ein stärker ausgeprägter Nachhall und ein größerer räumlicher Eindruck auf. Akustisch sind solche Räume vor allem durch die Kombination aus frühen Reflexionen über größere Distanzen und einem deutlicheren diffusen Nachhallfeld geprägt. Sie stellen daher einen wichtigen Kontrast zu kleinen Raumtypen dar.

Korridore und Gänge bilden eine eigenständige Raumkategorie, da sie sich nicht nur durch ihr Volumen, sondern vor allem durch ihre längliche Geometrie von anderen Räumen unterscheiden. Typische Beispiele sind Flure, Tunnel, Verbindungsgänge oder schmale Passagen. Akustisch führen solche Räume häufig zu stark gerichteten Reflexionen entlang der Längsachse. Dadurch entsteht ein charakteristischer Höreindruck, der sich deutlich von quadratischen oder offenen Innenräumen unterscheidet.

Monumentalräume bezeichnen besonders große und akustisch eindrucksvolle Räume, die häufig mit sakralen, historischen oder repräsentativen Bauwerken assoziiert werden. Dazu zählen beispielsweise Kirchen, Kathedralen, Tempel, große Kuppelhallen oder palastartige Innenräume. Charakteristisch sind sehr große Raumvolumina, lange Nachhallzeiten und ein stark ausgeprägtes Raumgefühl. In Videospielen werden solche Räume oft gezielt eingesetzt, um Größe, Bedeutung oder Atmosphäre zu vermitteln. Aufgrund ihres besonderen akustischen Verhaltens werden sie in dieser Arbeit als eigene Kategorie behandelt und nicht mit gewöhnlichen Hallen zusammengefasst.

Als technischer Raum werden funktional geprägte Innenräume verstanden, die meist durch harte Materialien, klare Geometrien und eine geringe dekorative Gestaltung gekennzeichnet sind. Beispiele hierfür sind Maschinenräume, Serverräume, Labore, Kontrollräume, Werkstätten oder industrielle Nebenräume. Akustisch sind diese Räume häufig durch stark reflektierende Oberflächen, teilweise enge Geometrien und eine eher trockene bis mittlere Nachhallcharakteristik geprägt. Sie unterscheiden sich von Wohn- oder Monumentalräumen nicht nur durch ihre Nutzung, sondern auch durch ihre typische Materialität und den dadurch entstehenden Höreindruck.

Die festgelegten Raumtyp-Kategorien decken einen breiten Bereich typischer Innenraumstrukturen in Videospielen ab. Sie bilden die methodische Grundlage für die Auswahl der späteren Test-Räume und ermöglichen es, unterschiedliche akustische Situationen systematisch zu vergleichen. Gleichzeitig dient die Kategorisierung dazu, die Untersuchung auf Raumtypen zu fokussieren, die in der Praxis von Videospielen regelmäßig auftreten und für die Bewertung synthetischer Impulsantworten relevant ist.

3.2.4 Sampling-Verfahren

Zur Erfassung typischer Raumtypen in den ausgewählten Videospielen wurde ein zeitbasiertes Sampling-Verfahren angewendet. Ziel war es, eine systematische und zugleich praktikable Auswahl von Räumen zu treffen, ohne vollständige Levelanalysen jedes einzelnen Spiels durchführen zu müssen. Grundlage der Analyse bildeten vollständige Gameplay-Videos, die den Spielverlauf möglichst vollständig abdecken. Die Verwendung vollständiger Videos war notwendig, um verschiedene Spielphasen innerhalb des Titels berücksichtigen zu können und die Raumbeobachtung nicht nur auf einzelne Szenen oder Ausschnitte zu beschränken.

Für jedes Spiel wurden insgesamt sechs Räume erfasst. Die Auswahl erfolgte in zwei relativen Spielphasen, die aus der frühen Spielphase und der mittleren Spielphase ausgewählt wurden. Dadurch sollte vermieden werden, dass ausschließlich Räume aus dem Beginn eines Spiels berücksichtigt werden, da sich Raumdesign, Atmosphäre und Architektur im weiteren Verlauf oft ändern.

Zu Beginn der Analyse wurde der Spielverlauf ab dem Zeitpunkt betrachtet, an dem sich die Spielfigur in einem tatsächlich spielbaren Raum befand. Zwischensequenzen, Menüs sowie nicht interaktiv erfahrbare Szenen wurden dabei nicht berücksichtigt. Ausgehend von diesem Punkt wurde das Gameplay-Video jeweils in festen Intervallen von zehn Minuten weitergesprungen. An jedem dieser Zeitpunkte wurde geprüft, ob ein neuer, spielbarer Raum vorlag. War dies der Fall, wurde dieser Raum in die Analyse aufgenommen. Auf diese Weise wurden in der frühen Spielphase drei Räume erfasst.

Anschließend wurde direkt zur Mitte des Gameplay-Videos gewechselt, um eine zweite Perspektive auf einen anderen Spielzustand sowie eine andere Fortschrittsphase zu erhalten. Von dort aus wurde das gleiche Verfahren erneut angewendet: Es wurde wieder in festen Intervallen von zehn Minuten weitergesprungen und insgesamt drei weitere Räume aufgenommen, sofern es sich um neue, spielbare Innenräume handelte.

Insgesamt ergab sich damit pro Spiel eine Stichprobe von sechs Räumen, die sich auf zwei unterschiedliche relative Spielphasen verteilen. Das Verfahren kombiniert somit ein zeitbasiertes Sampling mit festen Intervallen und einer relativen Unterteilung des Spielverlaufs. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in seiner guten Nachvollziehbarkeit und seiner einheitlichen Anwendung auf alle untersuchten Spiele. Gleichzeitig wird durch die Aufteilung in frühe und mittlere Spielphase eine gewisse Variation innerhalb des Spiels erfasst, ohne dass eine vollständige Analyse des gesamten Spielverlaufs notwendig ist.

Gleichzeitig sind mit diesem Verfahren auch Einschränkungen verbunden. Da die Auswahl auf festen Zeitsprüngen basiert, kann nicht ausgeschlossen werden, dass bestimmte Raumtypen seltener erfasst werden als andere. Zudem hängt die Analyse von der Struktur des jeweiligen Gameplay-Videos sowie vom tatsächlichen Spielverlauf der aufgezeichneten Person ab. Das Verfahren erhebt daher keinen Anspruch auf eine vollständige Erfassung aller im Spiel vorkommenden Räume, sondern dient der systematischen Gewinnung einer vergleichbaren und praktikablen Stichprobe.

3.2.5. Datenerfassung

Die im Rahmen der Marktanalyse identifizierten Räume wurden in einer Excel-Tabelle, die im Anhang hinterlegt ist, systematisch erfasst. Ziel war es, die Beobachtungen aus den Gameplay-Videos in einer

einheitlichen und vergleichbaren Form zu dokumentieren. Für jeden erfassten Raum wurden dabei folgende Informationen festgehalten.

- Titel des Spiels
- Link zum zugehörigen Gameplay-Video
- Abschnitt des Spiels (frühe oder mittlere Spielphase)
- Zeitstempel im Video
- Zugehöriger Raumtyp

Die tabellarische Erfassung ermöglichte es, die Räume spielübergreifend zu vergleichen und anschließend nach Raumtypen auszuwerten. Gleichzeitig diente sie als Grundlage für die spätere Häufigkeitsanalyse und die Auswahl repräsentativer Test-Räume.

Die Zuordnung der beobachteten Räume erfolgte über eine feste Codier-Logik, bei der jeder Raum genau einer zuvor definierten Raumkategorie zugewiesen wurde. Verwendet wurden dabei die Kategorien:

- Kleiner Raum
- Mitteltgroßer Raum
- Große Halle
- Korridor / Gang
- Monumentalraum
- Technischer Raum

Die Codierung orientierte sich nicht an exakten architektonischen Messwerten, sondern an dem visuell und funktional erkennbaren Gesamteindruck des Raumes. Ausschlaggebend waren insbesondere:

- Wahrnehmbare Größe und Proportionen
- Räumliche Form
- Nutzung beziehungsweise Funktion des Raumes
- Typische architektonische Merkmale

Da es sich um virtuelle Spielräume handelt, war eine vollständig objektive Vermessung in vielen Fällen nicht möglich. Die Codierung stellt daher eine strukturierte qualitative Einordnung dar. Um die Vergleichbarkeit der Datenerfassung zu erhöhen, wurden bei der Codierung feste Konsistenzregeln angewendet.

Erstens wurde jeder Raum nur einer Hauptkategorie zugeordnet, auch wenn Mischformen oder Übergangsbereiche vorlagen. In solchen Fällen wurde die Kategorie gewählt, die den Raum insgesamt am besten beschreibt.

Zweitens wurden nur spielbare Räume berücksichtigt. Zwischensequenzen, Menüs, Kamerafahrten oder rein filmische Sequenzen wurden nicht erfasst.

Drittens wurden Räume nur dann aufgenommen, wenn sie sich klar von vorherigen Beobachtungen unterschieden. Wiederholte oder nahezu identische Räume innerhalb kurzer Abstände wurden nach Möglichkeit vermieden, um die Stichprobe nicht unnötig zu verzerren.

Viertens wurden halboffene oder teilweise geöffnete Räume nur dann codiert, wenn ihr akustischer und räumlicher Eindruck überwiegend dem eines geschlossenen Raumes entsprach.

Schließlich wurde die Codierung über alle Spiele hinweg nach denselben Kategorien und Entscheidungsregeln durchgeführt, um eine möglichst konsistente Datengrundlage für die spätere Auswertung zu schaffen.

Insgesamt wurden auf diese Weise 174 Räume erfasst und codiert. Dabei zeigte sich, dass mittelgroße Räume mit 72 Nennungen die größte Kategorie darstellen, gefolgt von Korridoren beziehungsweise Gängen mit 47 Fällen. Deutlich seltener wurden kleine Räume, große Hallen, Monumentalräume und technische Räume identifiziert. Die Verteilung zeigt, dass vor allem mittelgroße Innenräume und lineare Strukturen in den untersuchten Spielen häufig vorkommen. Diese Häufigkeiten bilden die Grundlage für die anschließende Auswahl repräsentativer Raumtypen.

3.3. Phase B: Auswahl und Analyse von drei Test-Räumen

3.3.1. Auswahl der Raumtypen

Auf Grundlage der in Phase A identifizierten Raumkategorien wurden für die experimentelle Untersuchung drei Raumtypen ausgewählt: kleiner Raum, Korridor und mittelgroßer Raum. Die Auswahl orientiert sich einerseits an den Ergebnissen der vorangegangenen Marktanalyse und andererseits an dem Ziel für die Untersuchung drei akustisch klar unterscheidbare Raumcharakteristiken abzudecken. Die Entscheidung für diese drei Kategorien beruht auf einem bewussten Kontrast der Raumformen. Ein kleiner Raum steht für kompakte, stark begrenzte Innenräume mit kurzen Reflexionswegen. Ein Korridor beziehungsweise Gang stellt durch seine langgestreckte Geometrie einen deutlich anderen akustischen Raumtyp dar, bei dem gerichtete Reflexionen entlang der Längsachse eine stärkere Rolle spielen. Der mittelgroße Raum ergänzt diese Auswahl um eine dritte Kategorie, die zwischen beiden Extremen liegt und für viele typische Innenräume in Videospielen repräsentativ ist. Durch diese Kombination konnten drei unterschiedliche, aber gleichzeitig praxisnahe Raumtypen untersucht werden.

Neben der inhaltlichen Relevanz spielte auch die praktische Durchführbarkeit der Messungen eine wichtige Rolle. Für die Untersuchung wurden bewusst Räume gewählt, die leicht zugänglich sind und in denen Messungen ohne größere organisatorische Hürden mehrfach durchgeführt werden konnten. Dies war insbesondere deshalb relevant, weil bei Impulsantwortmessungen Wiederholungen notwendig sein können, etwa wenn einzelne Aufnahmen durch Störgeräusche, Bedienfehler oder andere Einflüsse unbrauchbar werden. Auf dieser Grundlage wurden folgende konkrete Räume ausgewählt:

- Kleiner Raum: das eigene Zimmer
- Korridor: der Hausflur
- Mittelgroßer Raum: ein Hochschulraum

Diese Räume wurden nicht als idealisierte Laborumgebungen verstanden, sondern als praxisnahe reale Vergleichsräume, die den zuvor definierten Raumtypen in ihrer Grundstruktur entsprechen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle drei Räume möbliert, beziehungsweise genutzt sind und somit nicht ausschließlich aus leeren architektonischen Hüllen bestehen. Die Möblierung beeinflusst die akustischen Eigenschaften, insbesondere durch zusätzliche Absorption, Streuung und Abschattung. Für den Vergleich mit den synthetisch erzeugten Impulsantworten wurde deshalb darauf geachtet, die wesentlichen Möblierungselemente in BOOM Artificial IR zumindest näherungsweise nachzubilden. Eine exakte Rekonstruktion aller Details war dabei nicht das Ziel; vielmehr sollte eine grobe, aber

plausible Annäherung an die reale Raumsituation erreicht werden. Die Auswahl der drei Test-Räume stellt somit einen Kompromiss zwischen methodischer Vergleichbarkeit, praktischer Zugänglichkeit und akustischer Relevanz dar. Für die Zielsetzung der Arbeit ist dieser Ansatz ausreichend, da nicht die perfekte architektonische Reproduktion einzelner Räume, sondern der Vergleich realer und synthetischer Impulsantworten unter nachvollziehbaren Bedingungen im Vordergrund steht.

3.3.2. Beschreibung der virtuellen Räume

Für die spätere Generierung synthetischer Impulsantworten wurden die drei ausgewählten Vergleichsräume in BOOM Artificial IR als virtuelle Räume nachgebildet. Ziel war dabei nicht die vollständige exakte Rekonstruktion der realen Räume, sondern eine plausible und nachvollziehbare Annäherung an deren wesentliche räumliche und akustische Eigenschaften. Die Modellierung erfolgte für die zuvor ausgewählten Raumtypen.

Die Software stellt zur Bearbeitung der Szene zwei Hauptansichten bereit, nämlich eine Ansicht der ZX-Achse sowie eine Ansicht entlang der XY-Achse. Dadurch konnten die Räume sowohl in der Grundfläche als auch in ihrer seitlichen Struktur kontrolliert aufgebaut und angepasst werden. Die Konstruktion der Räume erfolgte durch das schrittweise Hinzufügen einfacher geometrischer Objekte. Dabei konnten insbesondere Wände, Bodenflächen, Decken sowie weitere raumprägende Elemente als einzelne Objekte in die Szene hinzugefügt werden. Diese Objekte ließen sich anschließend in ihrer Größe, Position und Ausrichtung verändern. Zusätzlich konnten sie über Regler beziehungsweise Eingabefelder entlang der verschiedenen Achsen verschoben und gedreht werden. Auf diese Weise war es möglich, die grundlegende Raumgeometrie der realen Vergleichsräume in vereinfachter Form nachzubilden.

Für die akustische Modellierung stellte die Software außerdem eine begrenzte Auswahl vordefinierter Materialien zur Verfügung. Jedem Objekt konnte über ein Dropdown-Menü ein Material zugewiesen werden, das die akustischen Eigenschaften der jeweiligen Oberfläche approximiert.

Ein weiterer relevanter Aspekt der Software ist die Auswahl des Empfänger- beziehungsweise Mikrofontyps. BOOM Artificial IR bietet hierfür mehrere Optionen, darunter unter anderem:

- A/B
- XY
- Mono (Omnidirektional)
- ORTF3D
- AMBIX3

Damit erlaubt die Software unterschiedliche Aufnahmekonfigurationen, von einfachen stereofonen Anordnungen bis hin zu räumlicheren beziehungsweise ambisonischen Formaten. Für die vorliegende Arbeit ist diese Auswahl insofern relevant, als der virtuelle Empfänger nicht nur in seiner Position, sondern auch in seiner mikrofontechnischen Charakteristik definiert werden kann. Dies beeinflusst die resultierende Impulsantwort und musste daher bei der Erstellung der synthetischen Vergleichsdaten berücksichtigt werden.

Die geometrische Gestaltung der virtuellen Räume orientierte sich an den realen Vergleichsräumen, in denen die Impulsantworten aufgenommen wurden. Berücksichtigt wurden insbesondere die grundlegenden Raumdimensionen wie Länge, Breite und Höhe sowie markante räumliche Merkmale

wie Türen, Fenster oder größere strukturelle Elemente. Zusätzlich wurden im Rahmen der Möglichkeiten von BOOM Artificial IR auch größere Einrichtungsgegenstände beziehungsweise raumprägende Objekte vereinfacht nachgebildet, sofern diese für die akustische Wirkung des Raumes als relevant eingeschätzt wurden. Dies betraf beispielsweise Möbel in allen drei Räumen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Geometrie nicht in allen Fällen exakt in Zentimetern übertragen werden konnte. Da BOOM Artificial IR in der praktischen Anwendung nur begrenzt feine Maßangaben zulässt, mussten einzelne Werte teilweise gerundet werden. Diese Rundungen wurden möglichst geringgehalten, stellen aber eine bewusste methodische Vereinfachung dar.

Die Materialwahl in den virtuellen Räumen erfolgte bewusst als Annahme und nicht als exakte Abbildung der realen Oberflächen. Grund dafür ist, dass BOOM Artificial IR nur eine begrenzte, vordefinierte Materialbibliothek zur Verfügung stellt. Die real vorhandenen Materialien der Vergleichsräume konnten daher nicht immer eindeutig oder vollständig übernommen werden. In diesen Fällen wurde jeweils das akustisch ähnlichste Material aus der Software ausgewählt. Die Zuordnung erfolgte für Boden, Wände, Decke und, soweit sinnvoll, für größere Objekte im Raum. Auch hier handelt es sich um eine methodische Vereinfachung, die im Rahmen dieser Arbeit bewusst in Kauf genommen wurde. Die Materialannahmen wurden deshalb nicht als objektiv richtige Materialzuweisung verstanden, sondern als kontrollierte Approximation, um eine möglichst nachvollziehbare virtuelle Raumabbildung zu erzeugen. Diese Einschränkung ist bei der Interpretation der späteren Vergleichsergebnisse zu berücksichtigen.

3.3.3. Erstellung synthetischer Impulsantworten

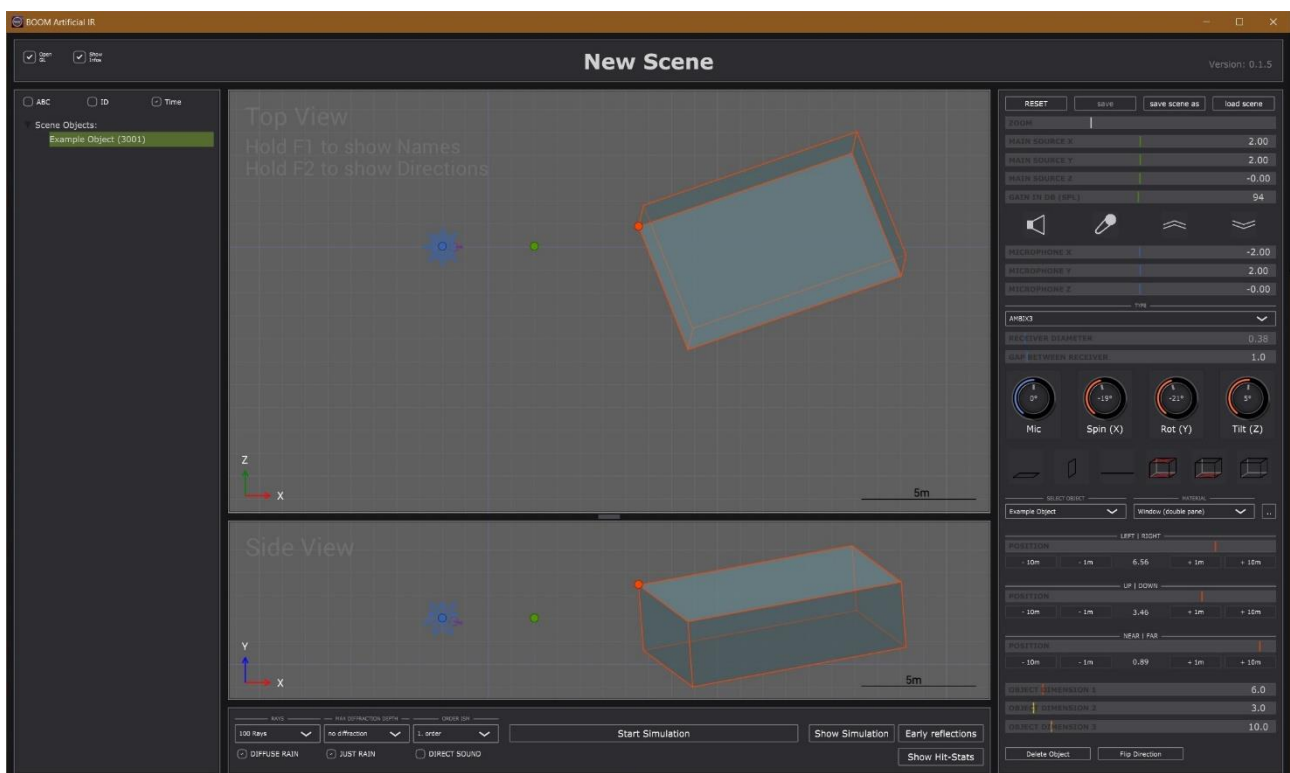


Abbildung 19: Erstellung einer Szene in BOOM Artificial IR (BOOM Library, 2026)

Die synthetischen Impulsantworten wurden mit BOOM Artificial IR auf Basis der zuvor modellierten virtuellen Räume erstellt. Ziel war es, für jeden der drei ausgewählten Raumtypen eine möglichst

plausible, unter kontrollierten Bedingungen erzeugte Impulsantwort zu generieren, die anschließend mit den real gemessenen Impulsantworten verglichen werden konnte.

Nach der geometrischen und materiellen Modellierung der Räume wurde in der Software jeweils eine Schallquelle sowie ein Empfänger innerhalb der Szene positioniert. Dabei wurde darauf geachtet, dass zwischen Quelle und Empfänger eine für den jeweiligen Raumtyp sinnvolle Distanz besteht. Die Positionierung sollte einer realistischen Aufnahmesituation entsprechen und gleichzeitig vermeiden, dass Quelle und Empfänger entweder zu nah beieinander liegen oder sich in einer akustisch untypischen Konstellation befinden.

Für den Empfängertyp wurde die A/B-Mikrofonierung gewählt, obwohl ein omnidirektionales Mikrofon die besten Bedingungen einer Impulsantwortaufnahme herstellen würde (Richard et al., 2020). Diese Entscheidung orientierte sich am realen Aufnahme-Setup, da für die Messungen Mikrofone des Modells RØDE NT5 zur Verfügung standen. Die Auswahl der Mikrofonkonfiguration erfolgte somit nicht zufällig, sondern mit dem Ziel, die synthetische Simulation methodisch möglichst nah an die reale Messsituation anzunähern.

Für alle drei Räume wurden dieselben zentralen Simulationsparameter verwendet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Einstellungen lauteten:

- Amount of Rays: 1000000
- Diffuse Rain: aktiviert
- Just Rain: deaktiviert
- Diffraction Depth: 2
- Order ISM: 3
- Direct Sound: aktiviert

Die Anzahl von 1000000 Rays wurde gewählt, da das Handbuch für geschlossene Umgebungen wie Räume, Kinos oder Theater einen Bereich von 250000 bis 1000000 Rays empfiehlt. Die gewählte Einstellung liegt somit am oberen Rand des empfohlenen Bereichs und sollte eine ausreichend dichte Berechnung der Schallausbreitung und Reflexionsverteilung innerhalb der modellierten Innenräume ermöglichen (BOOM Library, 2026).

Die Funktion Diffuse Rain wurde aktiviert, da sie laut Nutzungshandbuch für die Erfassung diffuser Reflexionen zuständig ist und mehr als 95 % aller Raytraced Reflections findet. Das Handbuch empfiehlt ausdrücklich, diese Option grundsätzlich aktiviert zu lassen. Da reale Innenräume nicht ausschließlich aus ideal spekularen Reflexionen bestehen, erschien die Einstellung für die vorliegende Untersuchung besonders sinnvoll (BOOM Library, 2026).

Die Option Just Rain wurde dagegen deaktiviert. Laut Handbuch werden bei aktivierter Funktion die wenigen regulären, nicht-rain-basierten Reflexionen unterdrückt, sodass nur die Rain-Technik verwendet wird. Diese Einstellung kann vor allem in offenen Umgebungen sinnvoll sein und wird nur teilweise für Innenräume empfohlen. Für die vorliegende Untersuchung geschlossener Räume wurde daher auf diese Option verzichtet (BOOM Library, 2026).

Für die Diffraction Depth wurde der Wert 2 gewählt. Das Nutzungshandbuch beschreibt, dass ein einzelner Strahl bei Annäherung an eine Kante in mehrere Beugungsstrahlen aufgeteilt werden kann und sich dadurch die Gesamtzahl der Rays sehr schnell erhöht. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass Beugung in vielen Fällen deaktiviert bleiben kann, in bestimmten Szenen jedoch interessante

Ergebnisse liefert. Die gewählte Einstellung stellt daher einen bewussten Kompromiss dar: Beugungseffekte werden berücksichtigt, ohne das Modell vollständig auf sehr hohe Beugungstiefen auszulegen. Da dieselbe Einstellung in allen drei virtuellen Räumen beibehalten wurde, bleibt die Vergleichbarkeit zwischen den Simulationen erhalten (BOOM Library, 2026).

Mit Order ISM auf der dritten Ordnung wurden frühere spekulare Reflexionen bis zur dritten Ordnung einbezogen. Das Handbuch empfiehlt für Umgebungen mit harten Oberflächen, wie typische Innenräume, einen Bereich von eins bis fünf. Zudem wird dort erwähnt, dass die dritte Einstellung häufig verwendet wird. Die gewählte Einstellung ist daher sowohl methodisch nachvollziehbar als auch durch die Softwaredokumentation gestützt (BOOM Library, 2026).

Die Option Direct Sound wurde aktiviert, da laut Handbuch dadurch eine realistischere Aufnahmesituation simuliert wird, bei der das Mikrofon den Direktschall der Schallquelle zusätzlich zu den reflektierten Anteilen empfängt. Da auch die realen Messungen Direktschall enthalten, war diese Einstellung für den Vergleich zwischen realen und synthetischen Impulsantworten besonders wichtig. Eine Deaktivierung hätte dazu geführt, dass ausschließlich reflektierte Schallanteile in die synthetische Impulsantwort eingehen, was nicht der realen Messsituation entsprochen hätte (BOOM Library, 2026).

Die Parametrisierung orientiert sich damit sowohl an den Empfehlungen des Nutzungshandbuchs als auch an der Zielsetzung der Arbeit, synthetische Impulsantworten unter möglichst realitätsnahen und konsistenten Bedingungen zu erzeugen. Durch die Verwendung identischer Simulationsparameter für alle drei Räume sollte sichergestellt werden, dass Unterschiede in den resultierenden Impulsantworten möglichst auf die Raumcharakteristik und nicht auf wechselnde Softwareeinstellungen zurückzuführen sind.

Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die synthetisch erzeugten Impulsantworten weiterhin von den vereinfachten Raumgeometrien, den getroffenen Materialannahmen sowie den in der Software verfügbaren Simulationsmodellen abhängen. Die erzeugten Impulsantworten sind daher als modellbasierte Annäherungen an die realen Vergleichsräume zu verstehen und nicht als vollständige physikalische Reproduktionen.

3.3.4. Auswahl realer Vergleichs-Impulsantworten

Zur Bewertung der synthetisch erzeugten Impulsantworten wurden in drei ausgewählten Vergleichsräumen eigene reale Impulsantworten aufgenommen. Ziel war es, für jeden Raum eine reale Referenz zu erhalten, die mit der in BOOM Artificial IR generierten Impulsantwort verglichen werden kann. Für die Messungen wurden verschiedene Anregungssignale getestet. Dazu zählen:

- Sinus-Sweeps
- Ballonimpulse
- MLS

Die Aufnahmen erfolgten mit einem RØDE NT5.

Die Verwendung mehrerer Messverfahren diente zunächst dazu, unterschiedliche praktikable Wege der Impulsantwortmessung zu erproben und deren Eignung für die vorliegende Untersuchung zu bewerten.

Für den eigentlichen Vergleich mit den synthetischen Impulsantworten wurden die sweep-basierten Messungen als primäre Referenz ausgewählt. Diese Entscheidung beruht sowohl auf den praktischen Beobachtungen während der Messungen als auch auf der Literatur (Stan et al., 2002). Logarithmische Sweeps gelten als besonders robuste Methode zur Impulsantwortmessung, da sie eine gute Trennung der linearen Antwort von Verzerrungsanteilen ermöglichen und durch die Gestaltung des Sweep-Signals ein günstiges Signal-Rausch-Verhältnis erreicht werden kann. Entsprechend wird die swept-sine-Technik häufig als bevorzugtes Verfahren beschrieben.

In den eigenen Messungen erwiesen sich die sweep-basierten Aufnahmen ebenfalls als die stabilste und am besten auswertbare Grundlage. Im Vergleich zu den anderen Verfahren lieferten sie konsistentere Parameterverläufe und waren damit am besten für den Vergleich mit den synthetisch erzeugten Impulsantworten geeignet.

Die ballonbasierten Aufnahmen wurden ergänzend getestet, zeigten jedoch eine geringere Reproduzierbarkeit. Dies ist methodisch plausibel, da Ballonimpulse zwar einfach einsetzbar sind, ihre spektrale Verteilung, Lautstärke und Richtwirkung jedoch von Faktoren wie Ballongröße, Fülldruck und Art des Platzens abhängen können. In der Literatur wird daher ebenfalls darauf hingewiesen, dass ballonbasierte Anregungen zwar praktikabel, aber nicht vollständig konsistent sind.

Die MLS-Aufnahmen erwiesen sich in der vorliegenden Untersuchung als stärker verrauscht und damit für die Hauptauswertung weniger geeignet. Auch dies ist methodisch nachvollziehbar, da rauschbasierte Verfahren in der Praxis stark von einem guten Signal-Rausch-Verhältnis und einer sauberen Messkette abhängen. In der Literatur wird allgemein hervorgehoben, dass gerade für raumakustische Parameter eine ausreichend große Dynamik und ein hoher SNR entscheidend sind.

Eine zentrale praktische Herausforderung bestand im Gain-Staging. Für verwertbare Impulsantworten musste ein Pegel gewählt werden, der einerseits hoch genug ist, um eine gute Dynamik und ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzeugen, andererseits jedoch keine Übersteuerung verursacht. Diese Balance erwies sich in der Praxis als anspruchsvoll, da sich je nach Raum, Anregungssignal und Mikrofonposition unterschiedliche Anforderungen ergaben. Darüber hinaus ist bei sweep-basierten Messungen zu berücksichtigen, dass die Qualität der resultierenden Impulsantwort auch von der Messkette und insbesondere vom verwendeten Lautsprecher abhängt. Grundsätzlich muss das Anregungssignal in allen relevanten Frequenzbereichen genügend Energie liefern; gleichzeitig beeinflussen Lautsprecherfrequenzgang, Verzerrungen und die gesamte Messkette das Ergebnis. Die sweep-basierte Messung ist damit zwar methodisch vorzuziehen, aber nicht unabhängig von der Qualität des verwendeten Wiedergabesystems. Das in dieser Arbeit verwendete Setup erwies sich als ausreichend, jedoch ist davon auszugehen, dass mit einem hochwertigeren und gleichmäßigeren Lautsprechersystem präzisere Ergebnisse möglich gewesen wären. Die ballonbasierten Messungen sind zusätzlich dadurch limitiert, dass ihr Anregungssignal nur eingeschränkt standardisierbar ist. Bei den MLS-Aufnahmen zeigte sich hingegen besonders deutlich, dass ein ungünstiges Gain-Staging und ein zu geringer Signalabstand vom Hintergrundrauschen die Auswertbarkeit einschränken können. Insgesamt ergibt sich daraus, dass die realen Impulsantworten zwar eine geeignete Vergleichsgrundlage darstellen, ihre Qualität jedoch von den praktischen Bedingungen der Messung und der Reproduzierbarkeit des Anregungssignals abhängt.

Aus diesen Gründen wurden für die Hauptanalyse ausschließlich die Sweep-Messungen als reale Vergleichs-Impulsantworten verwendet. Für die Zielsetzung der Arbeit ist diese Einschränkung

vertretbar, da mit den sweep-basierten Messungen die methodisch stabilste und literaturgestützt am besten geeignete Datengrundlage ausgewählt wurde.

4. Analyse und Ergebnisse

4.1 Ergebnisse Phase A: Raumtyp-Häufigkeiten

Die in Phase A durchgeführte Raumtypanalyse ergab, wie die im Anhang hinzugefügte Tabelle zeigt, insgesamt 174 erfasste Räume, die den zuvor definierten Kategorien zugeordnet wurden. Die Auswertung zeigt eine deutliche Ungleichverteilung der Raumtypen.

		Summe Räume:		22	72	18	47	3	12
Spiel	Gameplay Video	Abschnitt	Zeitstempel	Kleiner Raum	Mittelgroßer Raum	Große Halle	Korridor	Technischer Raum	Monumentalraum
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	40:50		1				
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	50:30		1				
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	1:00:50		1				
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	7:01:00	1					
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	7:11:07				1		
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	7:21:55		1				
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	14:47	1					
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	29:01				1		
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	39:15			1			
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	17:55:50	1					
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	18:06:22	1					
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	18:28:55		1				
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	11:52			1			
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	21:34	1					
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=...	Früh	31:03			1			
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=...	Mittel	6:23:12			1			

Abbildung 20: Raumtypen-Tabelle (Phase A)

Am häufigsten wurde der mittelgroße Raum erfasst. Mit 72 Nennungen stellt diese Kategorie den größten Anteil der untersuchten Räume dar. An zweiter Stelle folgt der Korridor beziehungsweise Gang mit 47 Nennungen. Deutlich seltener treten kleine Räume mit 22 Fällen sowie große Hallen mit 18 Fällen auf. Noch geringer vertreten sind der Monumentalraum mit 12 Nennungen und der technische Raum mit lediglich 3 Fällen.

Prozentual betrachtet liegen die Räume in einem Ranking im folgenden Wertebereich:

- Mittelgroßer Raum: 41,38 %
- Korridor: 27,01 %
- Kleiner Raum: 12,64 %
- Große Halle: 10,34 %
- Monumentalraum: 6,9 %
- Technischer Raum: 1,72 %

Die Ergebnisse zeigen, dass in den untersuchten Spielen vor allem mittelgroße Innenräume sowie lineare Raumstrukturen wie Korridore besonders häufig vorkommen. Dies spricht dafür, dass diese Raumtypen für viele Spielsituationen von besonderer praktischer Relevanz sind. Kleine Räume und große Hallen treten zwar ebenfalls regelmäßig auf, sind aber deutlich seltener vertreten. Monumentalräume und technische Räume erscheinen demgegenüber eher als spezifische Sonderfälle.

Für die weitere Untersuchung ist insbesondere relevant, dass die häufigsten Raumtypen zugleich unterschiedliche akustische Eigenschaften aufweisen. Während mittelgroße Räume eher einen allgemeinen, in vielen Spielen typischen Innenraum repräsentieren, bilden Korridore eine charakteristische Raumform mit stark gerichteter Schallausbreitung. Kleine Räume ergänzen diese

Auswahl um eine kompakte, stärker begrenzte Raumkategorie. Die Ergebnisse aus Phase A stützen damit die Entscheidung, in Phase B mit einem kleinen Raum, einem Korridor und einem mittelgroßen Raum weiterzuarbeiten.

4.2 Ergebnisse Phase B: Akustischer Vergleich

Die Auswertung der Impulsantworten erfolgt in dieser Arbeit nach einem festen und durchgehend einheitlichen Schema. Dieses Vorgehen dient dazu, die synthetisch erzeugten und die real aufgenommenen Impulsantworten systematisch und nachvollziehbar miteinander zu vergleichen.

Zunächst wird für jeden Raum die synthetische Impulsantwort einzeln betrachtet. Dabei werden nacheinander die Darstellung der Impulsantwort selbst, die frequenzabhängigen Nachhallparameter im RT60-Diagramm, die Decay-Darstellung sowie das Spektrogramm ausgewertet. Auf diese Weise lässt sich zunächst beschreiben, wie das simulierte Raumverhalten aufgebaut ist, welche Nachhallzeiten in verschiedenen Frequenzbereichen auftreten und wie gleichmäßig oder unruhig das Abklingverhalten verläuft. Anschließend wird die real aufgenommene Impulsantwort desselben Raumes nach demselben Schema analysiert. Dadurch wird sichergestellt, dass beide Datensätze unter identischen Gesichtspunkten betrachtet werden und die spätere Gegenüberstellung nicht auf unterschiedlichen Bewertungskriterien beruht. Im nächsten Schritt folgt der objektive Vergleich zwischen synthetischer und realer Impulsantwort. Hier stehen die mit dem Programm Room EQ Wizard ermittelten grafischen Verläufe und Nachhallparameter im Mittelpunkt. Verglichen werden insbesondere die Länge und Form der Impulsantwort, die frequenzabhängigen Unterschiede in EDT, T20 und T30 sowie Auffälligkeiten in Decay und Spektrogramm. Ziel dieses Abschnitts ist es, Gemeinsamkeiten und Abweichungen messtechnisch zu beschreiben. Ergänzend dazu folgt schließlich ein subjektiver Vergleich. Hier werden Höreindrücke beschrieben, die beim Anhören der mit den Impulsantworten gefalteten Sprach-, Musik- und Drum-Signale entstehen. Dieser Teil dient nicht als Ersatz der objektiven Analyse, sondern als Ergänzung, um die messtechnischen Unterschiede auch in ihrer klanglichen Wirkung einzuordnen.

Zur Analyse der Impulsantworten wird die Software ROOM EQ Wizard (REW) verwendet. REW ist ein Mess- und Auswertungsprogramm für akustische und elektroakustische Fragestellungen. In dieser Arbeit wird das Programm nicht zur raumakustischen Planung im engeren Sinn eingesetzt, sondern zur visuellen und parameterbasierten Auswertung bereits vorliegender Impulsantworten. Der Vorteil von REW liegt darin, dass die Impulsantwort nicht nur als einzelne Zeitfunktion betrachtet werden kann, sondern gleichzeitig verschiedene Darstellungsformen zur Verfügung stehen, die unterschiedliche akustische Eigenschaften sichtbar machen. Während die eigentliche Impulsantwort vor allem den zeitlichen Energieverlauf zeigt, geben die frequenzabhängigen Nachhallparameter Auskunft über die Stärke und Dauer des Nachhalls in verschiedenen Frequenzbereichen. Die Decay-Darstellung ergänzt dies um eine kombinierte Betrachtung von Zeit und Frequenzverlauf, und das Spektrogramm erlaubt eine farbcodierte Darstellung der Energieverteilung über Zeit und Frequenz. Für die vorliegende Arbeit ist REW deshalb besonders geeignet, weil dieselbe Impulsantwort mit mehreren komplementären Darstellungen untersucht werden kann. Dadurch wird vermieden, dass die Analyse nur auf einem einzelnen Kennwert beruht. Stattdessen steht ein umfassenderes Bild des Raumverhaltens zur Verfügung (Room EQ Wizard, n.d.).

Die Darstellung der Impulsantwort bildet die Grundlage jeder weiteren Auswertung. Sie zeigt, wie sich die Energie eines Signals nach dem Eintreffen des Direktschalls beziehungsweise des Hauptimpulses

über die Zeit verteilt und abbaut. Im Impulsdiagramm ist auf der horizontalen Achse die Zeit aufgetragen, auf der vertikalen Achse der Pegel beziehungsweise die relative Signalstärke in dBFS. Der höchste Ausschlag am Anfang entspricht in der Regel dem stärksten Energieeintrag, also dem Hauptanteil der Raumantwort. Danach folgt die Abklingphase, in der das Signal durch Reflexionen, Streuungen und Absorptionsvorgänge allmählich abnimmt. Aus dem Impulsdiagramm lassen sich mehrere grundlegende Eigenschaften ablesen. Erstens wird sichtbar, wie abrupt oder wie ausgedehnt die Raumantwort beginnt. Ein sehr schmaler, klarer Anfangsimpuls spricht eher für einen direkten und kompakten Energieeintrag, während verbreiterte oder unruhige Anfangsbereiche auf komplexere frühe Reflexionsstrukturen hindeuten können. Zweitens zeigt die Kurve, wie schnell die Energie insgesamt abfällt. Ein steiler, rascher Abfall weist auf einen eher trockenen Raum oder eine kurze Impulsantwort hin, während ein flacher Verlauf ein längeres Ausschwingen anzeigt. Drittens lassen sich auffällige Einzelereignisse erkennen, etwa deutlich hervortretende Peaks, Nachschwinger oder stufenartige Abklingvorgänge. Wichtig ist dabei, dass das Impulsdiagramm zunächst vor allem einen globalen zeitlichen Eindruck vermittelt. Es zeigt sehr gut, ob eine Impulsantwort kurz, lang, ruhig, diffus oder stark strukturiert wirkt. Es sagt aber noch nicht präzise aus, in welchen Frequenzbereichen bestimmte Nachhalleffekte auftreten. Dafür sind die weiteren Darstellungen notwendig. In der Arbeit dient das Impulsdiagramm deshalb vor allem der ersten Einordnung: Wie lang ist die Impulsantwort ungefähr, wie sieht ihr Anfangsverlauf aus und wie kontrolliert oder unruhig erscheint der zeitliche Energieabbau insgesamt?

Die frequenzbasierte Darstellung ist für die objektive Auswertung der wichtigste Teil der Analyse. Sie zeigt, wie sich verschiedene Nachhallparameter frequenzabhängig verhalten. Während die Impulsantwort eher den Gesamteindruck des zeitlichen Verlaufs liefert, erlaubt das RT60-Diagramm eine gezielte Bewertung einzelner Frequenzbereiche. In REW werden dabei mehrere Kurven dargestellt, die unterschiedliche Aspekte des Abklingverhaltens beschreiben. Für diese Arbeit sind insbesondere EDT, T20 und T30 relevant (Room EQ Wizard, n.d.).

Die Early Decay Time (EDT) beschreibt den frühen Energieabfall direkt zu Beginn der Raumantwort. Sie basiert auf dem ersten Teil des Abklingverlaufs und zeigt die Zeit, die der Pegel braucht, um von 0 dB die Lautstärke von -10 dB zu erreichen, nachdem das initiale Signal gestoppt hat. Die EDT ist deshalb besonders wichtig, weil sie stark mit dem ersten Höreindruck eines Raumes zusammenhängt. Wenn die EDT höher liegt als T20 und T30, bedeutet das in der Regel, dass der Raum in seiner Anfangswahrnehmung räumlicher oder hallender erscheint, als es die späteren linearen Nachhallzeiten allein vermuten lassen würden. Praktisch gesagt beschreibt EDT also vor allem, wie der Raum direkt nach dem Energieeintrag wahrgenommen wird. Ein hoher EDT kann auf starke frühe Reflexionen, energiereiche Anfangsphasen oder einen räumlich auffälligen ersten Abklingverlauf hinweisen (Lansky, 2023).

T20 beschreibt die Nachhallzeit anhand eines mittleren Abschnitts des linearen Energieabfalls. In REW wird dafür ein definierter Pegelbereich des Abklingverlaufs ausgewertet und auf eine volle Nachhallzeit extrapoliert. T20 ist in der Regel robuster als eine rein frühe Betrachtung und eignet sich gut, um den linearen Nachhallbereich zu beschreiben. Wenn T20 niedrig und gleichmäßig verläuft, spricht das für ein kontrolliertes, eher trockenes Abklingverhalten. Größere Schwankungen zwischen Frequenzbändern deuten dagegen auf eine stärkere Frequenzabhängigkeit des Raumes hin (Lansky, 2023).

T30 funktioniert ähnlich wie T20, verwendet aber einen noch größeren linearen Abschnitt des Pegelabfalls. Dadurch ist T30 oft ein besonders nützlicher Parameter, wenn die Impulsantwort ausreichend sauber und langgenug ist. T30 beschreibt das spätere lineare Ausschwingen meist etwas stabiler als T20. Liegen T20 und T30 nahe beieinander, spricht das dafür, dass der lineare Abklingbereich der Impulsantwort relativ konsistent ist. Größere Unterschiede zwischen beiden Werten können darauf hinweisen, dass der Energieabfall nicht gleichmäßig verläuft oder dass sich frühe und spätere Abklingphasen deutlich unterscheiden.

Im RT60-Diagramm ist auf der horizontalen Achse die Frequenz aufgetragen. Auf der vertikalen Achse stehen die Zeitwerte in Millisekunden. Jede Kurve entspricht einem bestimmten Parameter, also etwa EDT, T20 oder T30. Beim Lesen der Kurven ist wichtig, nicht nur einzelne Punkte isoliert zu betrachten, sondern Verläufe und Tendenzen zu erkennen. In dieser Arbeit werden die Werte deshalb nicht für jedes einzelne Frequenzband einzeln interpretiert, sondern zu drei größeren Bereichen zusammengefasst:

- 50-100 Hz als tieffrequenter Bereich
- 100- 1000 Hz als mittlerer Bereich
- 1-10 kHz als hochfrequenter Bereich

Diese Einteilung hat den Vorteil, dass die Beschreibung stabiler und aussagekräftiger wird. Gerade in realen Messungen schwanken einzelne Bänder oft deutlich. Für die wissenschaftliche Einordnung ist es sinnvoller, von Bereichen mit ähnlicher Tendenz zu sprechen als von einzelnen isolierten Frequenzpunkten.

Entscheidend sind dabei folgende Fragen:

- Liegt die EDT deutlich über T20 und T30?
- Bleiben T20 und T30 nah beieinander oder streuen sie stark?
- Sind die Werte im Bassbereich höher als im Mittel- und Hochtongbereich?
- Verläuft die Kurve glatt und kontrolliert oder unruhig und schwankend?

Aus diesen Beobachtungen lässt sich ableiten, ob ein Raum eher trocken, kontrolliert, bassbetont, spektral unruhig oder früh räumlich wirkt.

Die Decay-Darstellung ergänzt die RT60-Parameter um eine visuelle Betrachtung des frequenzabhängigen Energieabbaus über die Zeit. Während das RT60-Diagramm Kennwerte aus dem Abklingverlauf ableitet, zeigt Decay den Verlauf selbst in einer verdichteten Form. In dieser Darstellung wird sichtbar, wie die Energie in verschiedenen Frequenzbereichen mit zunehmender Zeit abnimmt. Dadurch kann man sehr gut erkennen, ob bestimmte Bereiche länger stehen bleiben, schneller abfallen oder ungleichmäßig ausklingen.

Die Decay-Grafik ist besonders hilfreich, um zu beurteilen,

- ob der Energieabbau insgesamt gleichmäßig verläuft,
- ob einzelne Frequenzbereiche länger nachschwingen,
- ob die früheren und späteren Abklingphasen unterschiedlich strukturiert sind,
- und ob das System eher glatt oder eher resonanzbehaftet reagiert.

Ein geordnetes, glattes Decay spricht meist für ein kontrolliertes Modell oder für eine relativ homogene Raumantwort. Ein unruhiges Decay mit lokalen Verdichtungen oder verlängerten Bereichen weist eher

auf Resonanzen, Materialeinflüsse, komplexe Geometrien oder streuende Flächen hin (Lavrova and Kanev, 2020).

Das Spektrogramm stellt die Energieverteilung einer Impulsantwort über Zeit und Frequenz farblich dar. Die horizontale Achse zeigt die Frequenz, die vertikale Achse die Zeit, und die Farbintensität beschreibt die Stärke der Energie. Diese Darstellung ist besonders anschaulich, weil sie sehr schnell sichtbar macht, wo im Frequenzspektrum Energie konzentriert ist und wie lange einzelne Bereiche nach dem Hauptimpuls bestehen bleiben. Bereiche mit hoher Energiedichte erscheinen intensiver, während schwächere Bereiche dunkler oder weniger ausgeprägt dargestellt werden (Room EQ Wizard, n.d.).

Das Spektrogramm eignet sich vor allem dazu,

- längere Ausschwingvorgänge in bestimmten Frequenzbereichen zu erkennen,
- spektrale Verdichtungen oder Resonanzen sichtbar zu machen,
- Unterschiede zwischen tieffrequentem und hochfrequentem Verhalten zu beurteilen,
- und die zeitlich-frequenzielle Struktur der Impulsantwort als Ganzes zu erfassen.

4.2.1 Kleiner Raum



Abbildung 21: Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums

Die Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort zeigt einen klar ausgeprägten Hauptimpuls zu Beginn des Signals, gefolgt von einem kurzen und kontinuierlich abklingenden Nachhallverlauf. Der Energieabfall erfolgt gleichmäßig und endet nach kurzer Zeit, was auf eine eher kontrollierte und trockene Raumcharakteristik hinweist. Auffällige lang auslaufende Reflexionsfahnen oder stark unruhige Nachhallstrukturen sind in der synthetischen Impulsantwort nicht erkennbar. Dies spricht dafür, dass der kleine Raum in der Simulation als kompakter Innenraum mit begrenztem Nachhall abgebildet wurde. Die Impulsantwort wirkt dabei insgesamt sauber und stabil, was auf die modellbasierte und gegenüber realen Messungen stärker idealisierte Erzeugung zurückzuführen sein kann.

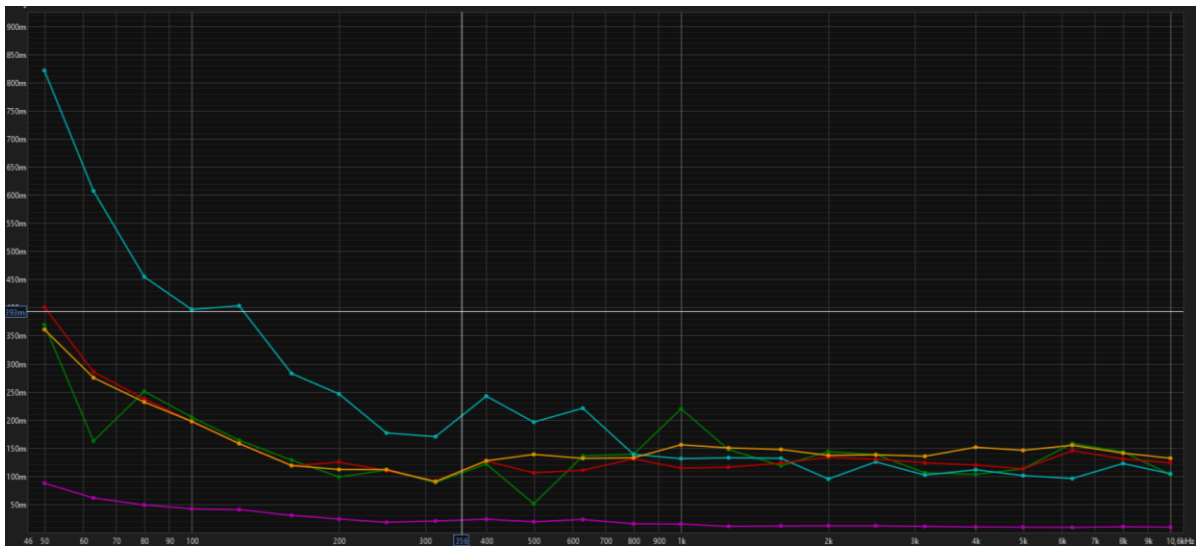


Abbildung 22: Frequenzbasierte-Auswertung der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums

Im tieffrequenten Bereich der frequenzbasierten-Auswertung zwischen etwa 50 Hz und 100 Hz zeigen sich die höchsten Nachhallwerte. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,4 und 0,83 Sekunden und fällt mit steigender Frequenz deutlich ab. T20 und T30 bewegen sich im selben Bereich grob zwischen 0,2 und 0,4 Sekunden beziehungsweise 0,2 und 0,37 Sekunden. Das weist darauf hin, dass tiefere Frequenzen im synthetischen kleinen Raum am längsten nachschwingen und die frühe Abklingphase im Bassbereich am stärksten ausgeprägt ist. Im mittleren Frequenzbereich von etwa 100 Hz bis 1 kHz stabilisiert sich das Abklingverhalten merklich. Die EDT liegt hier überwiegend im Bereich von ungefähr 0,14 und 0,4 Sekunden, während T20 meist etwa zwischen 0,11 und 0,16 Sekunden und T30 zwischen 0,09 und 0,16 Sekunden verläuft. Die Werte sind in diesem Bereich insgesamt deutlich kompakter und gleichmäßiger als im Bassbereich. Das spricht für einen kurzen, kontrollierten Nachhall, wie er für einen kleinen Raum plausibel ist. Im hochfrequenten Bereich zwischen etwa 1 kHz und 10 kHz bleiben die Nachhallparameter ebenfalls niedrig. Die EDT bewegt sich hier grob zwischen 0,1 und 0,16 Sekunden, T20 liegt ungefähr bei 0,11 bis 0,15 Sekunden, und T30 verläuft in einem ähnlichen Bereich von etwa 0,13 bis 0,16 Sekunden. Damit zeigt sich im Hochtonbereich ein trockenes und stabiles Abklingverhalten ohne langes Ausschwingen. Insgesamt ergibt sich für den synthetischen kleinen Raum ein stimmiges Bild: Während tiefe Frequenzen lange ausklingen, ist der Nachhall in mittleren und hohen Frequenzen deutlich kürzer. Der Raum wirkt damit insgesamt kompakt und kontrolliert, mit einer für kleine Innenräume typischen Betonung längerer Bassanteile.

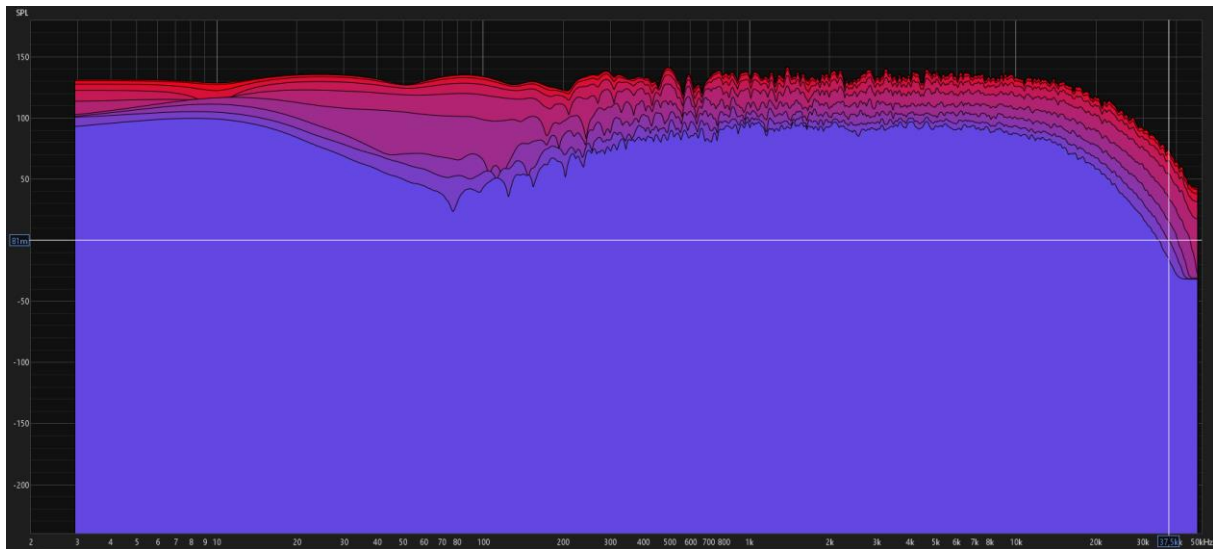


Abbildung 23: Decay-Darstellung der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums

Die Decay-Darstellung zeigt ebenfalls einen insgesamt geordneten und relativ kurzen Energieabbau. In den tiefen Frequenzbereichen ist die Energie zunächst stärker ausgeprägt, fällt jedoch mit der Zeit deutlich ab. In den mittleren und höheren Frequenzen ist der Verlauf kompakter und gleichmäßiger. Das unterstützt den Eindruck, dass die synthetische Impulsantwort zwar ein plausibles frequenzabhängiges Abklingverhalten besitzt, jedoch insgesamt weniger komplex und weniger unregelmäßig erscheint als dies bei realen Raumantworten typischerweise zu erwarten wäre.

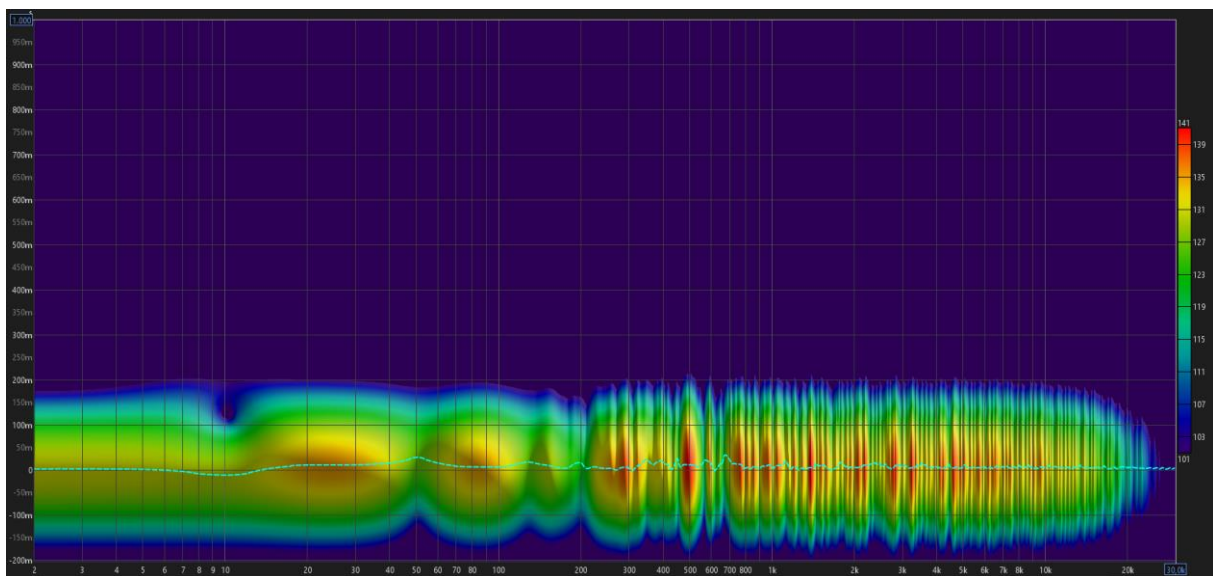


Abbildung 24: Spektrogramm der synthetischen Impulsantwort des kleinen Raums

Auch das Spektrogramm bestätigt die kompakte Raumcharakteristik. Die Energie konzentriert sich auf einen kurzen Zeitraum nach dem Direktschall. Es sind keine lang ausgedehnten, stark stehenden Nachhallanteile sichtbar. Die Verteilung wirkt insgesamt glatt und kontrolliert. Daraus lässt sich schließen, dass die synthetische Impulsantwort vor allem eine plausible, aber idealisierte Innenraumakustik abbildet.

Zusammenfassend beschreibt die synthetische Impulsantwort des kleinen Raumes einen kurzen, trockenen und relativ gleichmäßig abklingenden Raum. Die Simulation erzeugt eine gut strukturierte Raumantwort mit plausiblen frühen Reflexionen und begrenzter Nachhallzeit. Auffällig ist dabei

insbesondere die glatte, stabile Charakteristik der Kurven, die auf eine stärker idealisierte Modellierung schließen lässt. Für sich betrachtet wirkt die synthetische Impulsantwort damit grundsätzlich passend für einen kleinen Innenraum. Ob diese Plausibilität auch im Vergleich zur realen Messung bestehen bleibt, wird im folgenden Abschnitt untersucht.

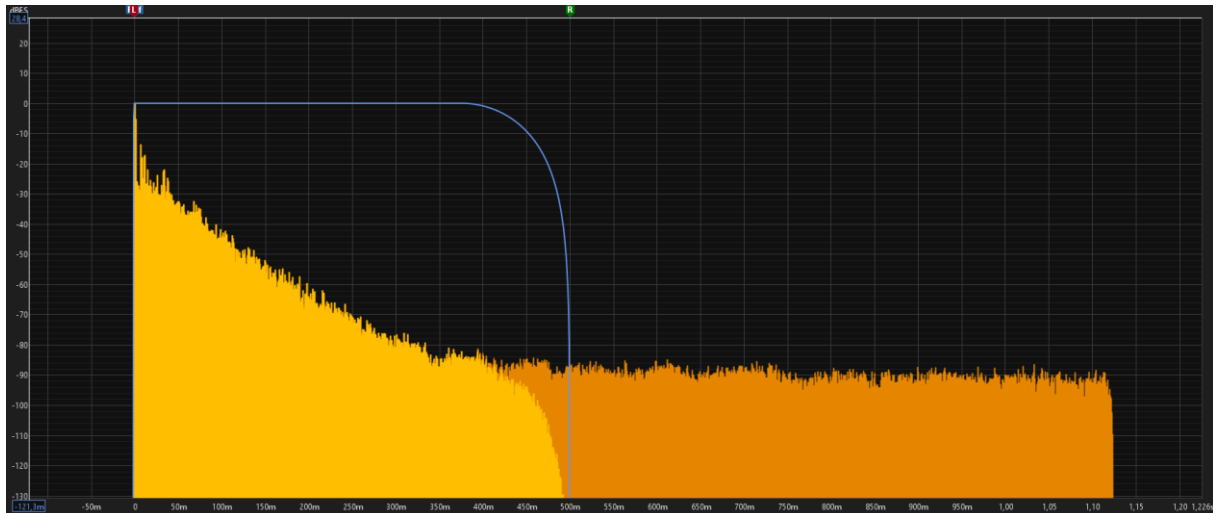


Abbildung 25: Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums

Die Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort zeigt einen klar erkennbaren Direktanteil zu Beginn des Signals. Anschließend folgt ein kurzer, aber deutlich unruhiger Abklingverlauf als bei der synthetischen Impulsantwort. Der Energieabfall erfolgt nicht vollkommen gleichmäßig, sondern zeigt kleinere Schwankungen und eine ausgeprägte Restenergie über einen längeren Zeitraum. Dies weist darauf hin, dass die reale Raumantwort stärker von komplexen Reflexionen, Diffusionseffekten und Rauschanteilen beeinflusst wird. Insgesamt wirkt die gemessene Impulsantwort dadurch weniger kontrolliert und weniger glatt als die modellbasierte synthetische Impulsantwort. Gleichzeitig entspricht dieses Verhalten eher dem, was für reale Innenräume zu erwarten ist, da dort Möblierung, Oberflächenstruktur und kleine geometrische Unregelmäßigkeiten zusätzlichen Einfluss auf die Schallausbreitung nehmen.



Abbildung 26: Frequenzbasierte-Auswertung der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums

Im Tieffrequenten Bereich der Frequenzbasierten-Auswertung zwischen etwa 50 Hz und 100 Hz zeigen sich die höchsten Nachhallwerte. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,36 und 0,95 Sekunden und weist damit im Bassbereich die stärksten Ausprägungen auf. T20 bewegt sich in diesem Bereich grob zwischen 0,39 und 0,69 Sekunden, während T30 ungefähr zwischen 0,39 und 0,65 Sekunden liegt. Damit wird deutlich, dass die tiefen Frequenzen auch im aufgenommenen kleinen Raum am längsten ausklingen. Die frühe Abklingphase ist im Bassbereich besonders stark ausgeprägt, was auf eine deutliche Tiefton-Nachhallkomponente hinweist. Im mittleren Frequenzbereich von etwa 100 Hz bis 1 kHz wird das Abklingverhalten insgesamt kompakter, bleibt jedoch weiterhin etwas unruhig. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,13 und 0,58 Sekunden und schwankt damit deutlich stärker als die späteren linearen Nachhallparameter. T20 bewegt sich in diesem Bereich überwiegend zwischen 0,29 und 0,42 Sekunden, T30 ungefähr zwischen 0,29 und 0,4 Sekunden. Die Werte zeigen, dass der Nachhall im mittleren Frequenzbereich zwar kürzer ist als im Bass, aber noch immer relativ präsent bleibt. Gleichzeitig deutet die stärkere Streuung der EDT darauf hin, dass die frühere Energieabnahme in diesem Bereich weniger gleichmäßig verläuft. Im hochfrequenten Bereich zwischen etwa 1 kHz und 10 kHz bleiben die Nachhallparameter im Vergleich zum Bass ebenfalls niedriger, zeigen aber weiterhin ein moderates Ausschwingverhalten. Die EDT bewegt sich hier ungefähr zwischen 0,13 und 0,38 Sekunden, T20 liegt grob zwischen 0,23 und 0,36 Sekunden, T30 in einem ähnlichen Bereich von etwa 0,23 bis 0,36 Sekunden. Damit ergibt sich im Hochtonbereich kein überwiegend kurzer, trockener Nachhall, sondern ein weiterhin vorhandenes, jedoch kontrolliertes Ausschwingen. Die Werte verlaufen insgesamt stabil, wenn auch nicht völlig gleichmäßig. Insgesamt zeigt der aufgenommene kleine Raum damit ein plausibles Bild eines kleinen, aber akustisch noch recht lebendigen Raums. Besonders im Bassbereich bleiben die Nachhallzeiten deutlich erhöht, während mittlere und hohe Frequenzen kürzer ausklingen, jedoch nicht vollständig trocken erscheinen. Auffällig ist vor allem, dass die EDT über weite Bereiche höher und unruhiger verläuft als T20 und T30, was auf eine stärker ausgeprägte frühe Abklingphase und ein insgesamt etwas weniger homogenes Ausschwingverhalten hinweist.

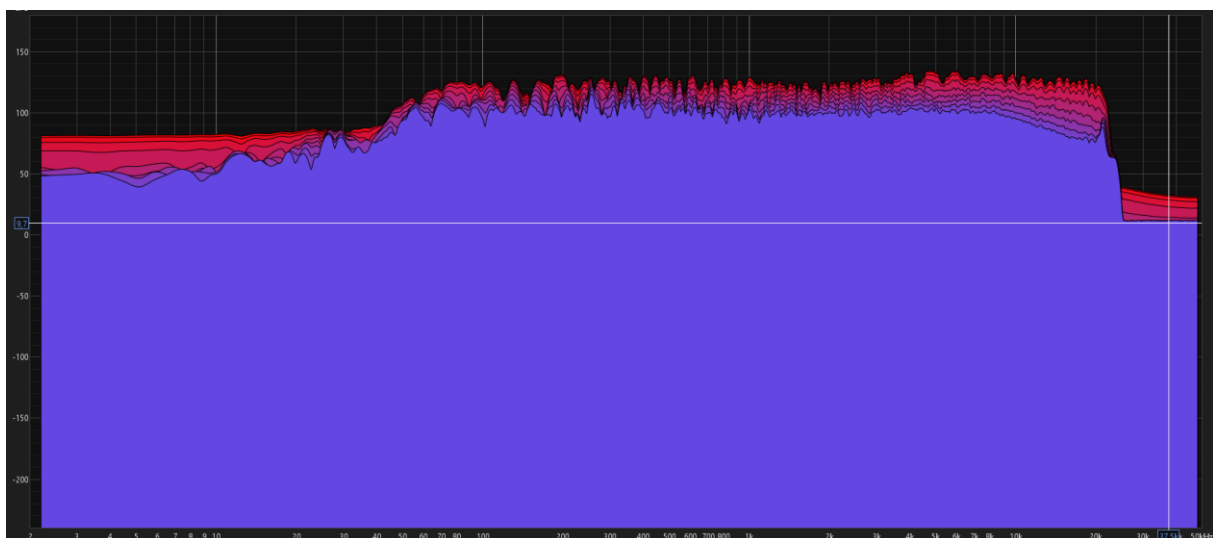


Abbildung 27: Decay-Darstellung der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums

Die Decay-Darstellung zeigt, dass die Energie im realen Raum langsamer und unregelmäßiger abnimmt als in der synthetischen Variante. Während die Nachhallenergie in höheren Frequenzen zügig zurückgeht, bleiben einzelne Bereiche im Bass und in den unteren Mitten länger bestehen. Das deutet

auf frequenzabhängige Resonanz- und Reflexionseffekte hin, wie sie in kleinen Räumen typischerweise auftreten.

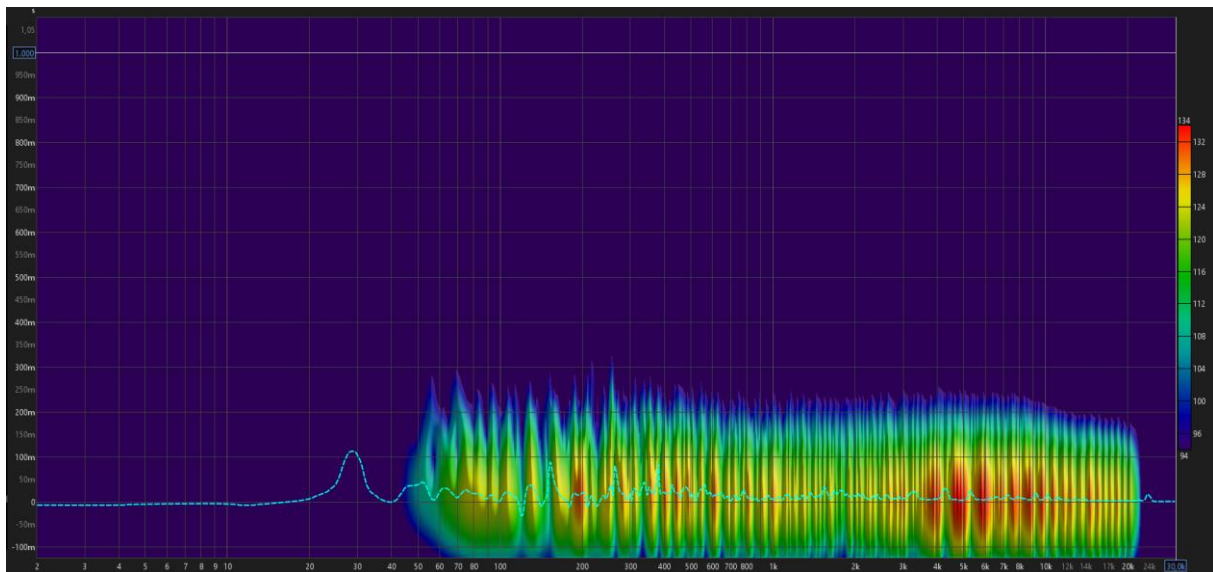


Abbildung 28: Spektrogramm der aufgenommenen Impulsantwort des kleinen Raums

Auch das Spektrogramm zeigt eine deutlich komplexere Struktur als bei der synthetischen Impulsantwort. Die Energie ist über einen längeren Zeitraum sichtbar und verteilt sich unregelmäßiger über das Frequenzspektrum. Besonders im mittleren und höheren Frequenzbereich ist eine dichtere und lebendigere Verteilung der Energie erkennbar. Dies spricht dafür, dass die reale Raumantwort nicht nur aus wenigen klar berechenbaren Reflexionspfaden besteht, sondern durch eine Vielzahl überlagerter Reflexions- und Streueffekte geprägt wird. Im Tieftonbereich ist die Energie länger sichtbar, was ebenfalls mit den höheren Nachhallwerten in den tiefen Frequenzen zusammenpasst. Insgesamt bestätigt das Spektrogramm damit den Eindruck einer komplexeren und weniger idealisierten Raumantwort.

Zusammenfassend beschreibt die reale Impulsantwort des kleinen Raums einen deutlich komplexeren und länger abklingenden Innenraum, als es die synthetische Impulsantwort zunächst vermuten lässt. Die Messung zeigt stärkere frequenzabhängige Unterschiede, mehr Unruhe im Abklingverlauf und vor allem ausgeprägte tieffrequente Anteile. Für sich betrachtet wirkt die reale Impulsantwort damit plausibel für einen kleinen, möblierten Innenraum, in dem Möbel, Oberfläche und Raumdetails die akustische Antwort mitprägen. Die reale Impulsantwort vermittelt somit ein weniger idealisiertes, damit aber räumlich reichhaltigeres akustisches Bild. Inwiefern sich diese Unterschiede auch quantitativ und subjektiv gegenüber den synthetischen Impulsantworten niederschlagen, wird im anschließenden Direktvergleich untersucht.

Bereits in der Zeitbereichsdarstellung zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Impulsantworten. Die synthetische Impulsantwort weist einen klaren Hauptimpuls und einen vergleichsweise kurzen, glatten und kontrollierten Abklingverlauf auf. Die reale Impulsantwort zeigt dagegen einen längeren und unruhigen Nachhallverlauf auf. Die reale Impulsantwort zeigt dagegen einen längeren und unruhigeren Nachhallverlauf mit stärker ausgeprägter Restenergie. Dies deutet darauf hin, dass die reale Raumantwort komplexer ist und stärker von diffusen Reflexionen, Möblierung, Oberflächenstruktur und kleinen geometrischen Unregelmäßigkeiten beeinflusst wird.

Auch die Auswertung der Nachhallparameter bestätigt diese Unterschiede zwischen synthetischer und realer Impulsantwort. Während die synthetische Variante im kleinen Raum vor allem in den mittleren und hohen Frequenzbereichen vergleichsweise kurze und kontrollierte Nachhallzeiten aufweist, liegen die Werte der realen, sweep-basierten Impulsantwort insgesamt deutlich höher. Im tieffrequenten Bereich von 50 bis 100 Hz zeigen beide Impulsantworten erhöhte Nachhallwerte, die reale Aufnahme fällt jedoch insgesamt stärker aus. Besonders deutlich wird dies in der EDT, die bei der realen Impulsantwort höher liegt und auf eine ausgeprägtere frühe Abklingphase im Bassbereich hinweist. Auch T20 und T30 bewegen sich hier auf einem höheren Niveau als bei der synthetischen Variante. Im Bereich von 100 Hz bis 1 kHz wird der Unterschied besonders klar: Die synthetische Impulsantwort zeigt hier überwiegend kurze und relativ stabile Werte, während die reale Impulsantwort in EDT, T20 und T30 deutlich längere Nachhallzeiten aufweist. Das spricht dafür, dass der reale Raum im mittleren Frequenzbereich weniger kontrolliert ausklingt und stärker von diffusen Reflexionen sowie raumakustischen Einflüssen geprägt ist. Auch im hochfrequenten Bereich von 1 kHz bis 10 kHz bleibt dieser Trend bestehen. Die synthetische Impulsantwort verhält sich weiterhin eher trocken und kompakt, während die reale Impulsantwort höhere und zugleich etwas unruhigere Werte zeigt. Dadurch wirkt das Ausschwingverhalten der realen Aufnahme auch in den oberen Frequenzen weniger homogen. Damit zeigt sich insgesamt, dass die reale Impulsantwort des kleinen Raums in allen drei betrachteten Frequenzbereichen längere Nachhallzeiten aufweist als die synthetische Impulsantwort. Besonders auffällig ist die Differenz in der EDT, was darauf hindeutet, dass bereits der erste subjektive Höreindruck des realen Raums räumlicher und nachhallreicher ausfällt als in der Simulation.

Auch in den Darstellungen von Decay und Spektrogramm erscheint die reale Impulsantwort komplexer. Die Energie ist über einen längeren Zeitraum sichtbar und verteilt sich weniger regelmäßig über das Frequenzspektrum. Die synthetische Impulsantwort wirkt demgegenüber kompakter, kontrollierter und schneller abklingend.

Im subjektiven Hörvergleich wirkte in den im Anhang in einem Drive-Ordner hinterlegten Hörbeispielen, die reale Impulsantwort insgesamt deutlich hallender als die synthetische Variante. Dieser Eindruck deckt sich mit den längeren Nachhallzeiten der realen Impulsantwort und mit dem in den REW-Darstellungen sichtbaren langsameren Energieabbau. Bei den gefalteten Hörbeispielen mit Sprach-, Drum- und Musikbeispielen zeigte sich, dass die reale Impulsantwort den Klang stärker in den Raum einbettet und dadurch weniger trocken wirkt. Besonders bei den Drums und bei der Musik entstand ein diffuserer und räumlich ausgedehnterer Eindruck als bei der synthetischen Impulsantwort. Gleichzeitig fiel auf, dass die reale Faltung in diesem Beispiel die tiefen Frequenzanteile stärker abschwächt als die künstlich erzeugte Impulsantwort. Dadurch wirkte der Klang zwar räumlicher, zugleich aber auch etwas weniger voll beziehungsweise weniger bassbetont. Bei der Stimme trat dieser Effekt weniger als Bassverlust, sondern eher als geringere Direktheit und stärkere räumliche Einbettung in Erscheinung. Die reale Impulsantwort ließ die Sprachsignale weniger trocken und stärker im Raum verankert erscheinen, während die synthetische Impulsantwort kontrollierter, direkter und klarer wirkte.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich, dass die mit BOOM Artificial IR erzeugte synthetische Impulsantwort den kleinen Raum grundsätzlich plausibel, jedoch deutlich trockener und stärker idealisiert abbildet als die reale Messung. Die Simulation erzeugt eine kompakte, kontrollierte und gleichmäßigere Raumantwort, während die reale Impulsantwort längere Nachhallzeiten, stärkere frequenzabhängige Schwankungen und eine insgesamt komplexere akustische Struktur aufweist. Die

Unterschiede sind sowohl objektiv in den Nachhallparametern als auch subjektiv im Höreindruck erkennbar. Damit lässt sich für den kleinen Raum festhalten, dass BOOM Artificial IR die allgemeine Raumcharakteristik zwar nachbilden kann, die reale akustische Komplexität jedoch nur eingeschränkt erfasst.

4.2.2 Korridor

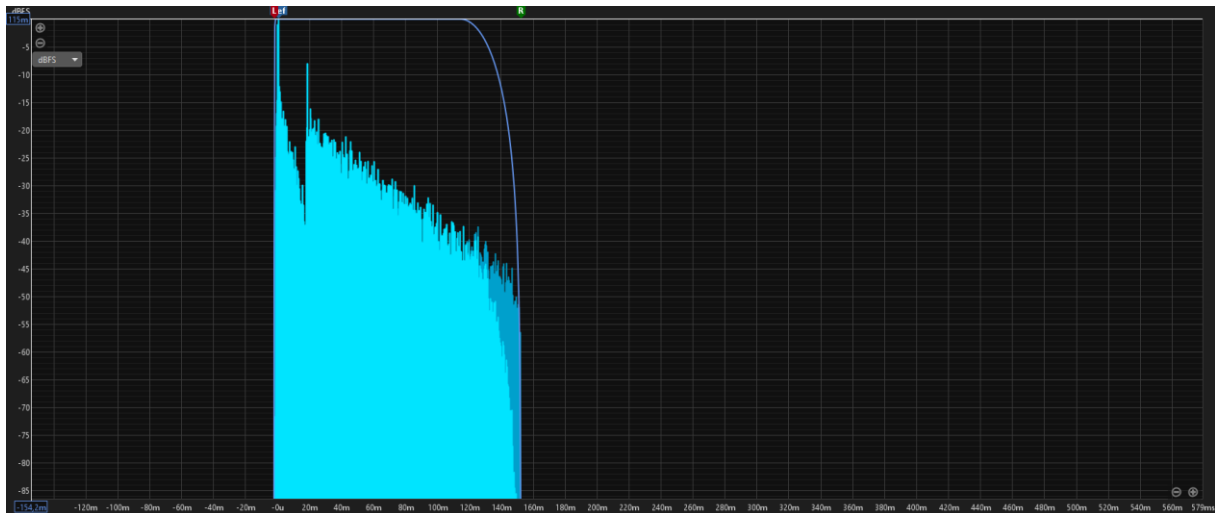


Abbildung 29: Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort des Korridors

Die Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort zeigt einen klar ausgeprägten Hauptimpuls mit anschließendem, vergleichsweise kurzem und gleichmäßig abklingendem Verlauf. Die Energie fällt nach dem Direktschall kontinuierlich ab und endet deutlich früher als bei stärker hallenden Raumantworten. Auffällige lange Nachhallfahnen oder stark zerklüftete Reflexionsstrukturen sind nicht erkennbar. Damit vermittelt die synthetische Impulsantwort insgesamt den Eindruck eines kontrolliert modellierten, eher trockenen Korridors. Trotz der länglichen Raumform wirkt der Nachhall nicht übermäßig ausgedehnt, sondern kompakt und berechenbar.

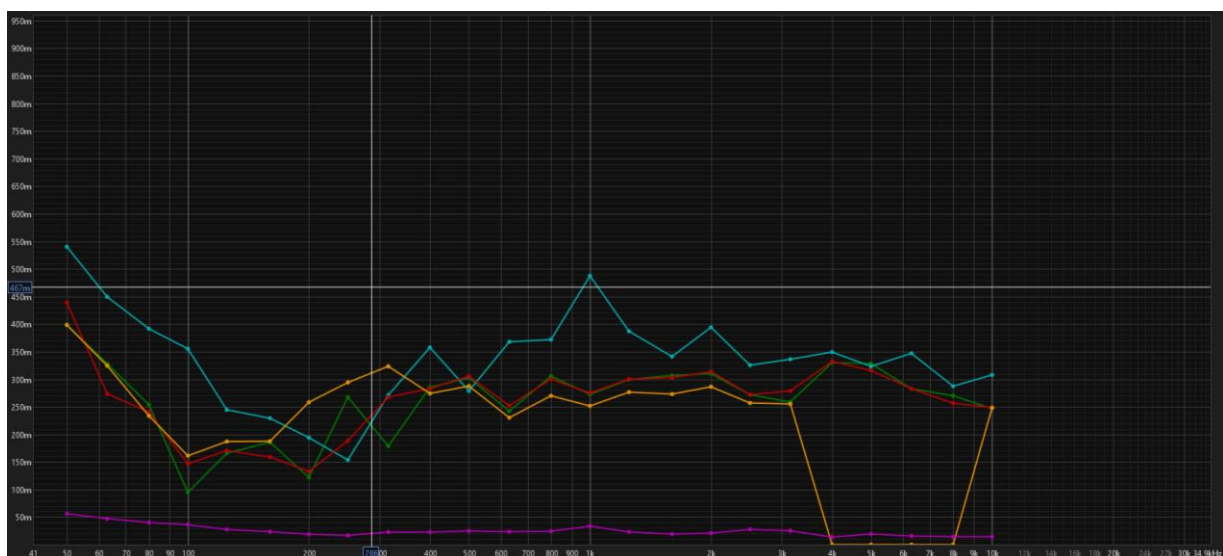


Abbildung 30: Frequenzbasierte-Auswertung der synthetischen Impulsantwort des Korridors

Im tieffrequenten Bereich der Frequenzbasierten-Auswertung zwischen etwa 50 und 100 Hz zeigen sich die höchsten Nachhallwerte. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,23 und 0,54 Sekunden und

fällt mit steigender Frequenz recht deutlich ab. T20 bewegt sich in diesem Bereich grob zwischen 0,15 und 0,44 Sekunden, während T30 ungefähr zwischen 0,16 und 0,4 Sekunden liegt. Dabei wird sichtbar, dass die tiefen Frequenzen im synthetischen Korridor am längsten ausklingen und die frühe Abklingphase im Bassbereich am stärksten ausgeprägt ist. Im mittleren Frequenzbereich von etwa 100 Hz bis 1 kHz stabilisiert sich das Abklingverhalten, bleibt aber nicht völlig glatt. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,16 und 0,49 Sekunden und zeigt damit noch merkbare Schwankungen. T20 bewegt sich überwiegend zwischen 0,13 und 0,31 Sekunden, T30 etwa zwischen 0,24 und 0,32 Sekunden. Das deutet darauf hin, dass der Korridor im mittleren Frequenzbereich zwar kontrollierter ausklingt als im Bass, aber weiterhin eine gewisse räumliche Ausdehnung und Reflexionsdichte aufweist. Vor allem die erhöhten EDT-Werte zeigen, dass die frühe Energieabnahme in diesem Bereich noch deutlich wahrnehmbar bleibt. Im hochfrequenten Bereich zwischen etwa 1 kHz und 10 kHz bleiben die Nachhallwerte gegenüber dem Bass ebenfalls reduziert, allerdings nicht überwiegend kurz. Die EDT bewegt sich hier grob zwischen 0,29 und 0,4 Sekunden. T20 liegt ungefähr zwischen 0,25 und 0,33 Sekunden. T30 verläuft über weite Teile ebenfalls in einem ähnlichen Bereich, zeigt in den oberen Hochtönen jedoch einzelne auffällige Einbrüche, die eher als instabile beziehungsweise weniger belastbare Einzelwerte gelesen werden sollten, statt als durchgehend physikalisch sinnvolle Tendenz. Insgesamt spricht das für ein im Hochtönenbereich weiterhin vorhandenes, aber moderat kontrolliertes Ausschwingen. Für den synthetischen Korridor ergibt sich somit ein stimmiges Bild eines schmalen, länglichen Raums mit ausgeprägter Nachhallwirkung im Bass und moderat verlängertem Ausschwingen in mittleren und hohen Frequenzen. Auffällig ist insbesondere, dass die EDT über fast den gesamten Frequenzverlauf oberhalb von T20 und T30 liegt. Das weist darauf hin, dass die erste Abklingphase des Korridors räumlich stärker wirkt als die späteren linearen Nachhallparameter allein vermuten lassen. Der Korridor erscheint damit nicht trocken, sondern akustisch durchaus präsent und reflektiv, ohne jedoch in ein langes, diffuses Ausschwingen überzugehen.

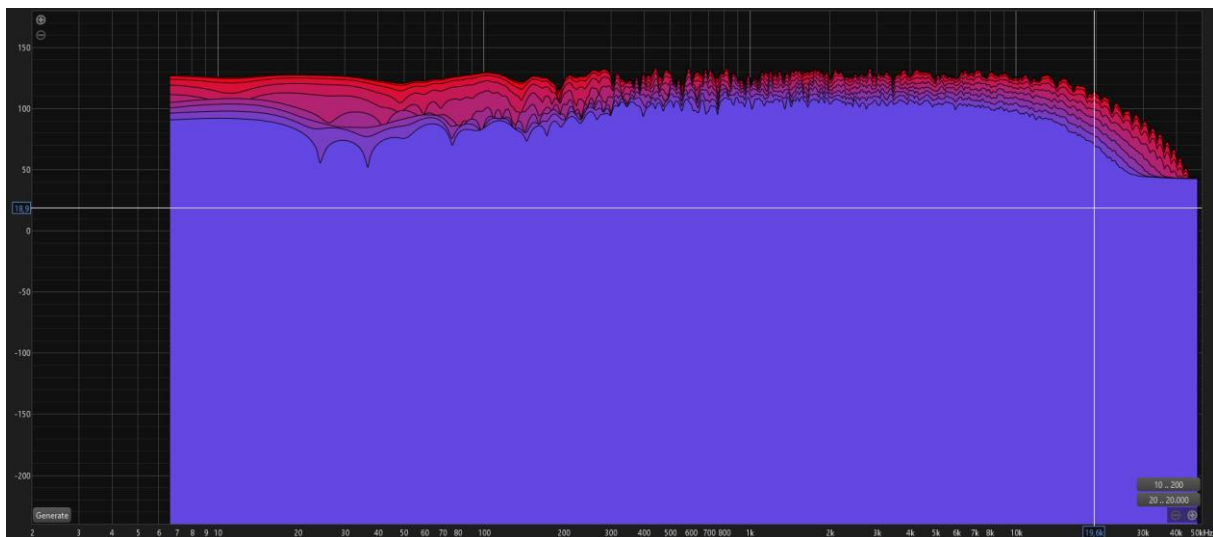


Abbildung 31: Decay-Darstellung der synthetischen Impulsantwort des Korridors

Die Decay-Darstellung bestätigt diesen Eindruck. Der Energieabbau erfolgt geordnet und ohne stark unregelmäßige Nachhallstrukturen. Im Bassbereich ist zunächst noch etwas mehr Energie vorhanden, während sich die mittleren und höheren Frequenzen kompakter und kontrollierter verhalten. Der Verlauf wirkt damit typisch für eine synthetisch erzeugte Raumantwort, bei der komplexe reale Unregelmäßigkeiten nur eingeschränkt abgebildet werden.

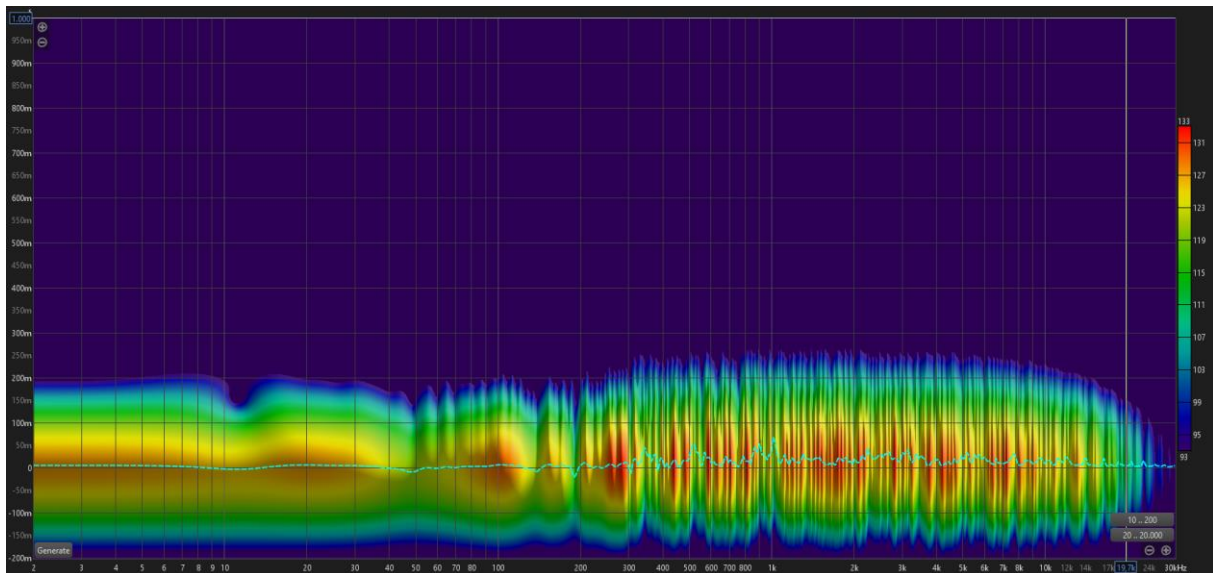


Abbildung 32: Spektrogramm der synthetischen Impulsantwort des Korridors

Im Spektrogramm ist die Energie über einen kurzen bis mittleren Zeitraum konzentriert. Besonders im frühen Bereich ist eine deutliche Energieverteilung erkennbar, die anschließend kontinuierlich abnimmt. Die Struktur erscheint insgesamt gleichmäßig und weniger chaotisch als bei realen Raumantworten. Dies spricht dafür, dass die Simulation zwar eine plausible Korridorcharakteristik erzeugt, diese jedoch in einer geglätteten und kontrollierten Form darstellt. Auffällig ist außerdem, dass die Energieverteilung im mittleren und höheren Frequenzbereich klar sichtbar bleibt, ohne dass sich ausgeprägte langanhaltende Resonanzen oder diffuse Unregelmäßigkeiten abzeichnen. Dadurch wirkt die synthetische Impulsantwort insgesamt akustisch aufgeräumt.

Zusammenfassend beschreibt die synthetische Impulsantwort des Korridors einen kompakten, kontrollierten und mäßig hallenden linearen Innenraum. Die Impulsantwort weist einen klaren Direktanteil, einen geordneten Abklingverlauf sowie stabile frequenzabhängige Nachhallparameter auf. Für sich betrachtet erscheint die synthetische Impulsantwort damit grundsätzlich passend für einen Korridor. Ob diese simulierte Raumcharakteristik auch die reale akustische Komplexität eines Flurs abbilden kann, wird im anschließenden Vergleich mit der gemessenen Impulsantwort untersucht.

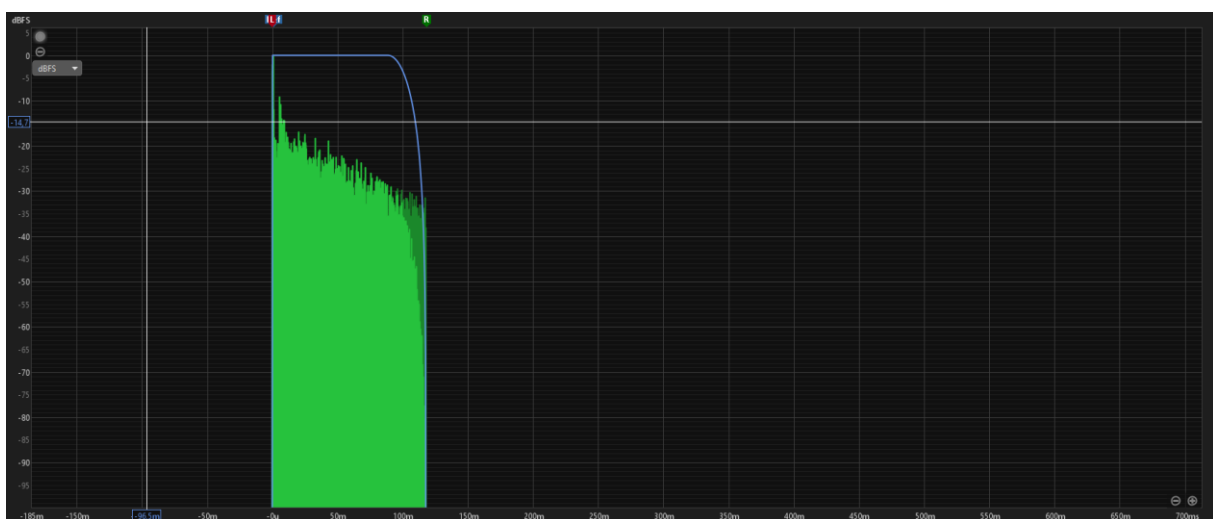


Abbildung 33: Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors

Die Zeitbereichsdarstellung der realen Impulsantwort zeigt einen klar erkennbaren Hauptimpuls mit anschließendem raschem Energieabfall. Bereits anhand dieses Verlaufs wird deutlich, dass der Korridor keinen langen, diffusen Nachhall besitzt, sondern vor allem durch einen starken frühen Reflexionsanteil geprägt ist. Direkt nach dem Hauptimpuls ist noch eine kompakte Folge energiereicher Reflexionsanteile sichtbar, danach fällt die Hüllkurve jedoch zügig ab. Charakteristisch ist dabei, dass der Verlauf nicht völlig glatt erscheint, sondern im frühen Bereich mehrere kleine Energieverdichtungen zeigt. Das ist für den Korridor akustisch plausibel: Durch die längliche Geometrie sowie die gegenüberliegenden Wandflächen entstehen frühe Reflexionen entlang der Raumachse und zwischen den seitlichen Begrenzungen, die den Höreindruck des Raumes prägen. Gleichzeitig fehlt aber die ausgeprägte diffuse Spätphase, wie sie in größeren oder stärker hallenden Räumen zu erwarten wäre. Der Korridor wirkt im Zeitbereich daher kompakt, direkt und relativ trocken.

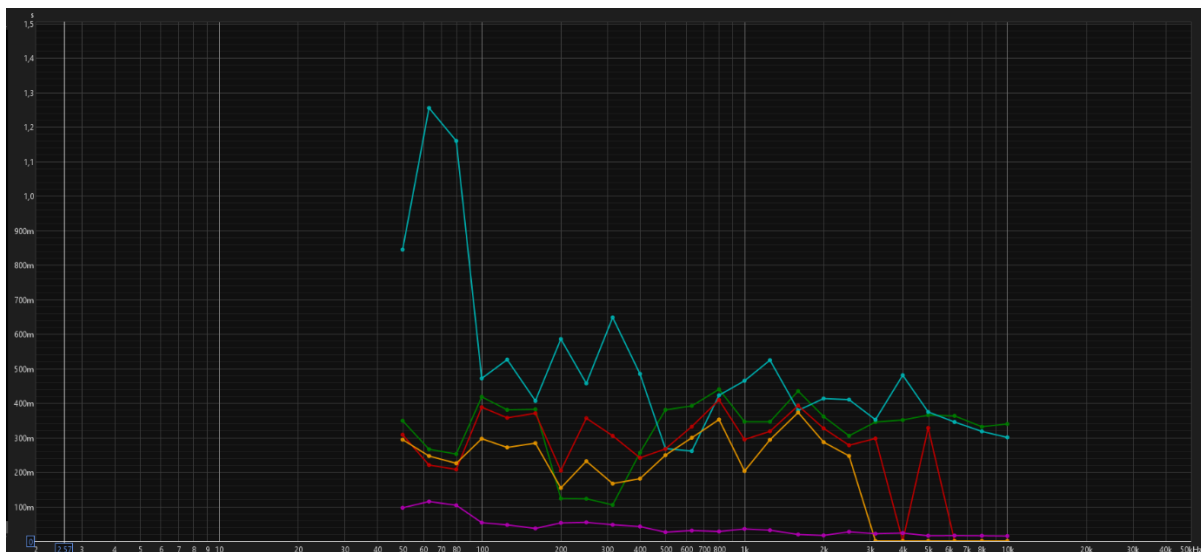


Abbildung 34: Frequenzbasierte-Auswertung der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors

Im tieffrequenten Bereich der Frequenzbasierten-Auswertung zwischen etwa 50 und 100 Hz zeigen sich bereits erhöhte Nachhallwerte, vor allem in der frühen Abklingphase. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,47 und 1,26 Sekunden und fällt ab 100 Hz stark ab. T20 bewegt sich im Bassbereich grob zwischen 0,21 und 0,39 Sekunden, T30 etwa zwischen 0,24 und 0,3 Sekunden. Damit zeigt sich, dass besonders der erste Energieabfall in den tiefen Frequenzen stark ausgeprägt ist, während die späteren linearen Nachhallparameter zwar ebenfalls erhöht sind, aber weniger stark ausfallen als die EDT. Im mittleren Frequenzbereich von etwa 100 Hz bis 1 kHz bleibt das Abklingverhalten deutlich unruhiger als bei einem sehr gleichmäßigen Raumverlauf. Die EDT bewegt sich hier ungefähr zwischen 0,26 und 0,65 Sekunden und zeigt damit merkliche Schwankungen über den Frequenzverlauf. T20 liegt in diesem Bereich grob zwischen 0,2 und 0,42 Sekunden, T30 etwa zwischen 0,13 und 0,35 Sekunden. Das spricht dafür, dass der reale Korridor im mittleren Frequenzbereich kein vollkommen homogenes Ausschwingverhalten besitzt, sondern durch unterschiedliche Reflexionsanteile und frequenzabhängige Raumreaktionen geprägt ist. Vor allem die Schwankungen der EDT deuten darauf hin, dass der Höreindruck der frühen Reflexionen je nach Frequenzbereich deutlich variiert. Im hochfrequenten Bereich zwischen etwa 1 und 10 kHz bleibt die reale Impulsantwort weiterhin vergleichsweise aktiv. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,3 und 0,53 Sekunden. T20 bewegt sich grob zwischen 0,2 und 0,39 Sekunden, während T30 über weite Teile zunächst in einem ähnlichen Bereich verläuft, in den oberen Frequenzen jedoch einzelne starke Einbrüche zeigt, die eher als instabile Einzelwerte zu lesen sind. Insgesamt bleibt damit auch im Hochtonbereich ein merkliches

Ausschwingen erhalten, was für einen realen Korridor mit reflektierenden Flächen plausibel ist. Insgesamt ergibt sich für den realen Korridor ein Bild eines akustisch deutlich präsenten und frequenzabhängig unruhigen Raums. Besonders auffällig ist, dass die EDT über große Teile des Frequenzspektrums oberhalb von T20 und T30 liegt und im Bassbereich sehr hohe Werte erreicht. Das weist darauf hin, dass die erste Abklingphase des realen Korridors stärker und räumlich auffälliger ausfällt als die späteren linearen Nachhallabschnitte. Der Raum wirkt damit nicht nur länger und reflektiv, sondern in seiner realen Ausprägung auch komplexer und weniger homogen als ein idealisiert kontrollierter Verlauf.

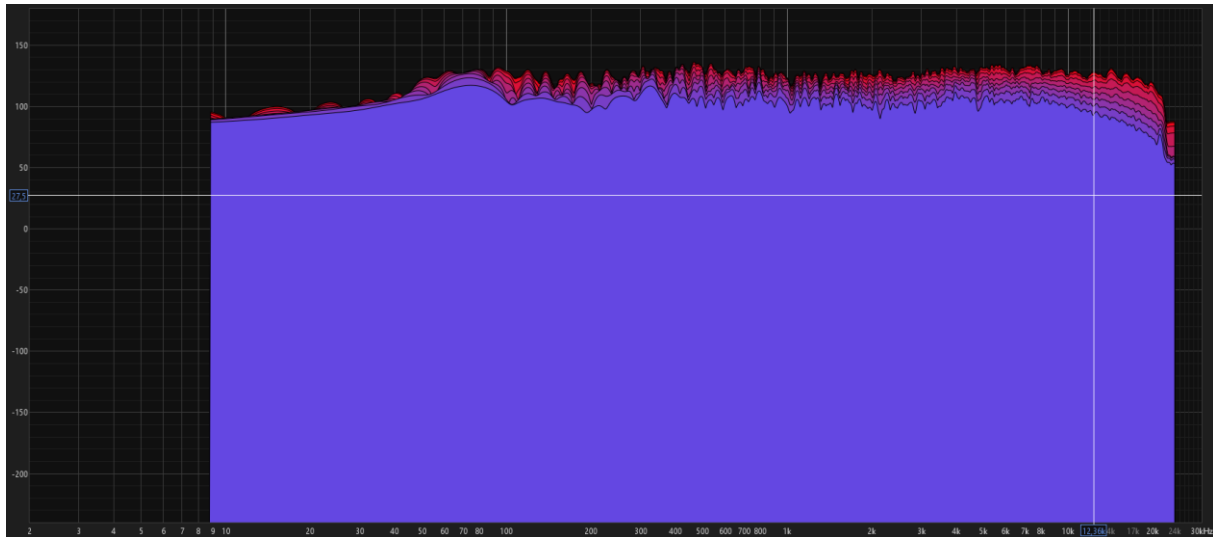


Abbildung 35: Decay-Darstellung der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors

Die Decay-Darstellung stützt diese Einordnung besonders gut. Sichtbar ist ein insgesamt zügiger Energieabbau nach dem frühen Impulsbereich. Zwar bleibt über das Frequenzspektrum hinweg noch Energie erhalten, doch es zeigt sich keine lang ausgedehnte, breit verteilte Nachhallstruktur. Stattdessen konzentriert sich der wesentliche Verlauf auf die frühe und mittlere Zeitachse. Auffällig ist, dass die Kurven im mittleren und höheren Frequenzbereich eine gewisse Struktur und Dichte aufweisen, ohne jedoch in einen langen Spätnachhall überzugehen. Das spricht dafür, dass der Korridor eine gut wahrnehmbare räumliche Signatur besitzt, diese aber eher durch frühe Reflexionsmuster statt durch einem langen Nachhall entsteht.

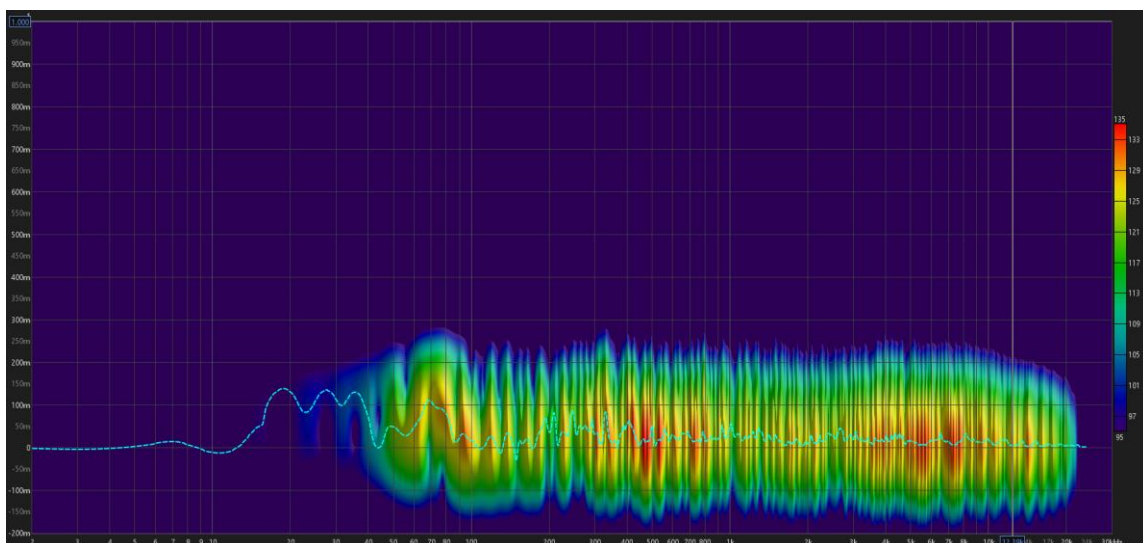


Abbildung 36: Spektrogramm der aufgenommenen Impulsantwort des Korridors

Auch das Spektrogramm ist für die Interpretation des Korridors sehr aufschlussreich. Es zeigt eine kompakte, zeitlich klar begrenzte Energieverteilung, die im frühen Bereich deutlich konzentriert ist. Besonders die mittleren und höheren Frequenzen bilden eine dichte Struktur aus, die relativ schnell ausläuft. Tieffrequente Anteile bleiben etwas länger sichtbar, dominieren die Gesamtwirkung jedoch nicht. Im Spektrogramm wird damit sehr gut erkennbar, dass der Korridor kein raumakustisch großer oder stark nachhallender Raum ist. Stattdessen handelt es sich um einen Raum, dessen akustischer Charakter vor allem durch die räumliche Bündelung früher Reflexionen entsteht. Die Darstellung wirkt insgesamt plausibel und konsistent mit der geometrischen Erwartung an einen länglichen, vergleichsweise schmalen Raum.

Zusammenfassend beschreibt die reale Impulsantwort des Korridors einen trockenen bis mäßig hallenden, frühreflexionsgeprägten Raum. Die Messung zeigt einen klaren Direktanteil, einen energiereichen frühen Verlauf sowie einen kurzen späten Abklang. Besonders die Beziehung zwischen erhöhter EDT und niedrigeren T20- und T30-Werten deutet darauf hin, dass der Korridor zwar zunächst räumlich präsent wirkt, aber keinen langen diffusen Nachhall entwickelt. Damit lässt sich der reale Korridor akustisch als Raum mit deutlicher früher räumlicher Signatur, aber begrenzter Nachhallausdehnung beschreiben.

Beide Impulsantworten zeigen denselben grundlegenden Aufbau: ein klarer Direktschallanteil zu Beginn, darauffolgende frühe Reflexionen und ein insgesamt relativ kurzer Abklingprozess. Damit stimmen beide Datensätze zunächst in der grundsätzlichen Raumcharakteristik überein: Der Korridor wirkt weder wie ein stark diffuser Hallraum noch wie ein trockener Freifeldraum, sondern wie ein frühreflexionsgeprägter, kompakter Innenraum.

Trotz dieser strukturellen Übereinstimmung gibt es Unterschiede. Die synthetische Impulsantwort wirkt im Zeitverlauf regelmäßiger und glatter. Ihr Energieabfall verläuft homogener, und die Reflexionsstruktur erscheint kontrollierter. Die reale Impulsantwort zeigt dagegen eine unruhige und stärker schwankende Hüllkurve, was auf reale Bau- und Materialunregelmäßigkeiten, kleinere Geometrieabweichungen sowie nicht perfekt symmetrische Reflexionsbedingungen hindeutet. Auffällig ist außerdem, dass die reale Impulsantwort im frühen Verlauf etwas kompakter, aber in einzelnen Abschnitten unruhiger erscheint, während die synthetische Impulsantwort etwas gleichmäßiger modelliert. Objektiv spricht das dafür, dass die Simulation den Korridor in seiner Grundstruktur gut trifft, die reale Messung aber mehr kleinräumige Variationen enthält.

Bei der Gegenüberstellung der Nachhallparameter zeigen sich zwischen synthetischer und realer Impulsantwort sowohl Übereinstimmungen als auch deutliche Abweichungen. Im linearen Nachhallbereich liegen die Kennwerte von T20 und T30 bei beiden Impulsantworten grundsätzlich in vergleichbaren Größenordnungen. Sowohl bei der synthetischen als auch bei der realen Impulsantwort bewegen sich diese Werte über große Teile des Spektrums überwiegend im Bereich von etwa 0,2 bis 0,4 Sekunden. Damit zeigt sich, dass die Simulation den späteren linearen Abklingverlauf des Korridors insgesamt plausibel annähert. Gerade dieser Befund ist relevant, da er darauf hinweist, dass die synthetische Impulsantwort die mittlere Nachhallcharakteristik des Korridors im Grundsatz angemessen abbildet. Der deutlichste Unterschied zeigt sich bei der EDT. In der realen Messung liegt dieser insbesondere im tieffrequenten Bereich zwischen 50 und 100 Hz merklich höher als in der synthetischen Impulsantwort. Während die EDT der synthetischen Variante im Bassbereich etwa zwischen 0,23 und 0,54 Sekunden liegt, erreicht die reale Impulsantwort dort Werte von ungefähr 0,47 bis 1,26 Sekunden. Auch im Bereich von 100 Hz und 1 kHz bleibt die EDT der

realen Impulsantwort insgesamt höher und schwankungsreicher. Objektiv bedeutet das, dass die Simulation zwar den späteren linearen Nachhallbereich recht gut erfasst, die frühe Energieverteilung und damit die Wirkung der ersten Reflexionen im realen Korridor jedoch tendenziell unterschätzt. Im frequenzabhängigen Verlauf zeigen sich weitere Unterschiede. Die synthetische Impulsantwort verhält sich insgesamt gleichmäßiger und kontrollierter. Besonders T20 und T30 verlaufen über weite Frequenzbereiche relativ stabil und liegen häufig nahe beieinander. Zwar weist auch die synthetische Impulsantwort gewisse Schwankungen auf, diese fallen jedoch insgesamt moderater aus als bei der realen Messung. Die reale Impulsantwort zeigt demgegenüber eine deutlich stärkere spektrale Unruhe, vor allem in der EDT, aber auch in einzelnen Abschnitten von T20 und T30. Dies wird insbesondere im Bereich zwischen 100 Hz und 1 kHz sichtbar, wo die reale Impulsantwort größere Ausschläge und weniger homogene Übergänge zwischen benachbarten Frequenzbändern aufweist. Auch im hochfrequenten Bereich zwischen 1 und 10 kHz bleibt dieser Unterschied bestehen. Die synthetische Impulsantwort zeigt dort ein ruhiges und moderat kontrolliertes Ausschwingverhalten, während die reale Impulsantwort höhere und unregelmäßigere EDT-Werte besitzt. Dies deutet darauf hin, dass der reale Korridor stärker von frequenzabhängigen Reflexionsprozessen, kleineren baulichen Details, Oberflächenunregelmäßigkeiten oder lokalen Resonanzeffekten beeinflusst wird, die im Simulationsmodell nur vereinfacht oder gar nicht enthalten sind. Objektiv lässt sich daher festhalten, dass die synthetische Impulsantwort den Korridor im linearen Nachhallbereich insgesamt plausibel approximiert, insbesondere mit Blick auf T20 und T30. Die reale Impulsantwort zeigt jedoch eine stärkere frühe Abklingwirkung. Die synthetische Impulsantwort bildet den Korridor damit frequenzübergreifend homogener und glatter ab, während die reale Messung ein komplexeres, unruhigeres und in der frühen Energieverteilung ausgeprägteres Verhalten erkennen lässt.

Auch im Decay-Plot ist die Grundtendenz ähnlich, aber die Struktur unterscheidet sich. Beide Verläufe zeigen keinen langen diffusen Spätnachhall. Der wesentliche Energieabbau erfolgt jeweils im frühen bis mittleren Zeitbereich. Insofern bestätigen beide Darstellungen, dass der Korridor kein stark hallender Raum ist. Die synthetische Decay-Darstellung ist jedoch deutlich sauberer und gleichförmiger. Die Energiebänder laufen geordneter aus und wirken weniger fragmentiert. Die reale Decay-Darstellung zeigt dagegen stärkere lokale Unregelmäßigkeiten und eine raue Mikrostruktur. Diese Unterschiede sind objektiv plausibel, weil reale Korridore akustisch nie vollkommen homogen sind.

Die Spektrogramme zeigen besonders gut, worin der Unterschied zwischen beiden Ansätzen liegt. In beiden Fällen ist die Energieverteilung zeitlich kompakt, und beide Datensätze zeigen einen vergleichbaren Grundcharakter: frühe Energie, anschließend ein begrenztes Ausschwingen ohne langen diffusen Hall. Die synthetische Impulsantwort erzeugt dabei eine regelmäßige, dichter organisierte Struktur. Die Energieverteilung wirkt geordnet und glatt, fast „idealtypisch“. Das reale Spektrogramm ist dagegen heterogener: Die Energie tritt ungleichmäßiger auf, und einzelne Bereiche erscheinen stärker betont als andere. Gerade im Übergang zwischen frühem und mittlerem Zeitbereich ist die reale Struktur weniger homogen. Objektiv bedeutet das: Die Simulation reproduziert die Gesamt Tendenz des Korridors gut, reduziert aber die spektrale und zeitliche Unruhe, die in der realen Messung vorhanden ist.

Insgesamt zeigt der objektive Vergleich, dass die synthetische Korridorimpulsantwort den realen Korridor grundsätzlich überzeugend annähert. Besonders bei T20 und T30 stimmen beide Impulsantworten im relativen Größenbereich gut überein. Die Simulation trifft damit die allgemeine Nachhallcharakteristik des Korridors gut. Die wichtigsten Abweichungen liegen in zwei Punkten:

Erstens ist die reale Impulsantwort im frühen Verlauf energiereicher und unruhiger, was sich vor allem in den höheren EDT-Werten widerspiegelt. Zweitens zeigt die reale Messung mehr spektrale Unregelmäßigkeiten, während die synthetische Impulsantwort geglätteter und homogener erscheint.

Daraus ergibt sich: Die synthetische Impulsantwort bildet den Korridor im linearen Nachhallverhalten und in der grundsätzlichen Raumcharakteristik plausibel ab, unterschätzt aber tendenziell die Komplexität und Rauigkeit des realen frühen Reflexionsgeschehens.

In der subjektiven Hörbewertung zeigten sich, in den im Anhang in einem Drive-Ordner hinterlegten Hörbeispielen, zwischen der synthetischen und der realen Impulsantwort kleine nachvollziehbare Unterschiede. Die mit der synthetischen Impulsantwort bearbeitete Sprachaufnahme wirkte insgesamt klarer und geschlossener. Die Stimme blieb besser fokussiert und erschien homogener in ihrer räumlichen Abbildung. Die mit der realen Korridorimpulsantwort bearbeitete Sprachaufnahme wirkte demgegenüber unruhiger und in gewisser Weise „zerteilter“. Dieser Eindruck lässt sich damit beschreiben, dass die Reflexionsanteile weniger zusammenhängend und etwas rauer wahrgenommen wurden. Die reale Raumantwort erzeugte damit zwar einen glaubwürdigen Korridorcharakter, wirkte in der Sprachanwendung jedoch weniger kontrolliert als die synthetische Variante.

Auch bei der Musik waren Unterschiede hörbar. In der Version mit der realen Impulsantwort fiel insbesondere ein kaum wahrnehmbarer Rausch- beziehungsweise Störanteil im oberen Frequenzbereich auf. Dadurch wirkte die reale Fassung insgesamt etwas gröber und weniger sauber als die synthetische Bearbeitung. Die synthetische Impulsantwort erschien im Musikbeispiel kontrollierter und klanglich geschlossener, während die reale Variante stärker von hochfrequenten Nebeneffekten geprägt war.

Bei den Drums zeigte sich wiederum ein etwas anderes Bild. Hier wirkte die mit der synthetischen Impulsantwort bearbeitete Version im Vergleich zur realen Aufnahme etwas dumpfer. Das deutet darauf hin, dass die synthetische Korridorimpulsantwort die Transienten zwar kontrolliert abbildet, dabei jedoch einen Teil der brillanteren oder härteren Anteile weniger stark betont. Die reale Impulsantwort ließ die Schlagzeuganteile dagegen etwas offener und härter erscheinen, wenn auch auf Kosten einer insgesamt rauerer und weniger sauberen Raumabbildung.

Zusammenfassend ergibt sich aus der subjektiven Wahrnehmung, dass die synthetische Korridor-Impulsantwort vor allem bei Sprache und teilweise auch bei Musik als kontrollierter, klarer und geordneter wahrgenommen wurde. Die reale Impulsantwort wirkte hingegen akustisch rauer, unruhiger und stärker von hochfrequenten Nebeneffekten geprägt, vermittelte dafür aber in einzelnen Aspekten, etwa bei den Drums, eine offenerer und weniger gedämpfte Wiedergabe. Insgesamt bestätigt die subjektive Hörbewertung damit den objektiven Eindruck, dass die synthetische Impulsantwort den Korridor in seiner Grundcharakteristik plausibel nachbildet, die reale Raumantwort jedoch mehr Unregelmäßigkeiten und klangliche Rauheit enthält.

4.2.3 Mittelgroßer Raum

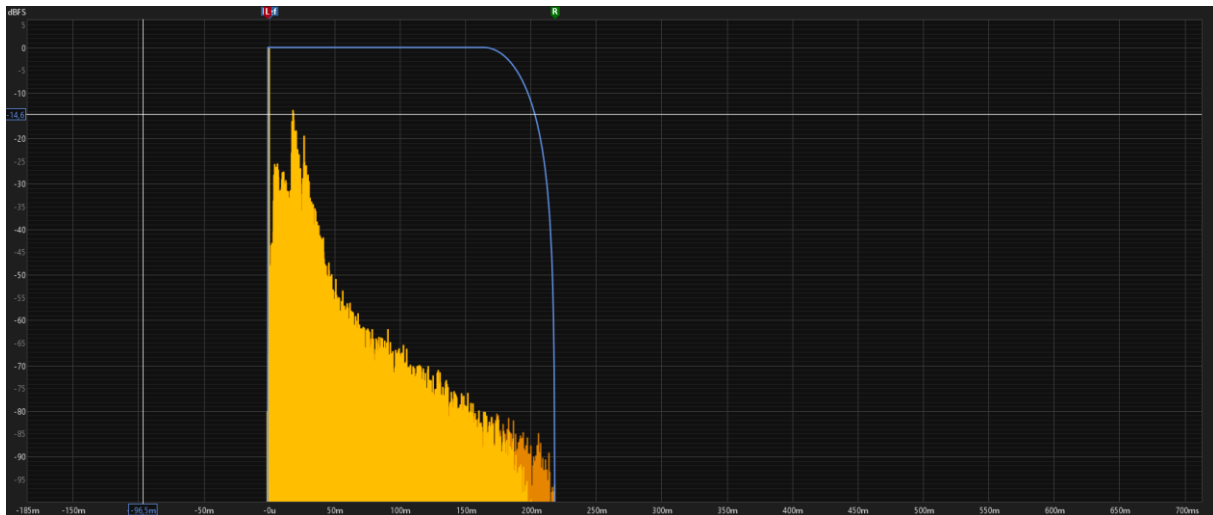


Abbildung 37: Zeitbereichsdarstellung der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Die synthetische Impulsantwort des mittelgroßen Raums zeigt insgesamt einen kontrollierten, klar strukturierten und im Vergleich zum Korridor etwas voluminöseren Raumcharakter. Bereits in der Impulsdarstellung wird sichtbar, dass es sich um einen Raum handelt, der mehr räumliche Ausdehnung besitzt als der kleine Raum und zugleich weniger stark kanalisiert wirkt als der Korridor. Die künstlich erzeugte Impulsantwort weist einen deutlich ausgeprägten Direktanteil auf, gefolgt von einer dichten Folge früher Reflexionen und einem anschließenden, gleichmäßig auslaufenden Energieabfall. Im Zeitbereich fällt zunächst der klare Hauptimpuls auf, der sich deutlich vom nachfolgenden Reflexionsverlauf absetzt. Direkt danach entsteht ein dichter Energieblock, der im frühen Bereich stärker ausgeprägt ist als im kleinen Raum, zugleich aber weniger scharf gebündelt erscheint als im Korridor. Das spricht für einen Raum, der mehr reflektierende Flächen in etwas größerer Distanz besitzt und danach eine breitere frühe Reflexionsstruktur erzeugt. Auffällig ist, dass der Abklingverlauf nicht abrupt oder fragmentiert wird, sondern vergleichsweise homogen ausläuft. Die Hüllkurve zeigt einen kontinuierlichen Energieabfall, ohne ausgeprägte chaotische Einbrüche oder stark unregelmäßige Reflexionsspitzen. Die synthetische Impulsantwort vermittelt damit den Eindruck eines geordneten, geometrisch kontrollierten Raums, in dem die wichtigsten Reflexionswege plausibel modelliert wurden. Im Vergleich zum Korridor erscheint die Struktur weniger eng und weniger richtungsbetont, sondern eher so, als würde sich der Schall auf mehrere Flächen verteilen. Die Länge des sichtbaren Verlaufs deutet darauf hin, dass der Raum zwar merklich größer wirkt als der kleine Raum, aber dennoch keinen hallenden Großraumcharakter besitzt. Die synthetische Impulsantwort liegt damit akustisch im Bereich eines mäßig reflektierenden Innenraums mit klarer Raumgröße, aber begrenzter Nachhallausdehnung.

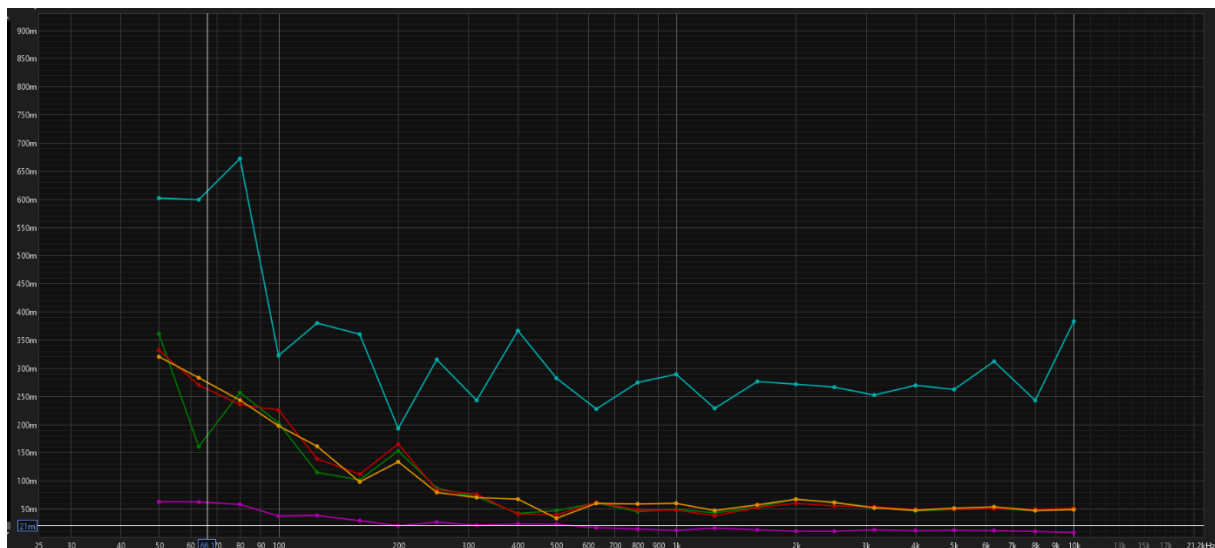


Abbildung 38: Frequenzbasierte-Auswertung der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Im tieffrequenten Bereich von 50 bis 100 Hz zeigen sich die höchsten Nachhallwerte dieser Impulsantwort. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,33 und 0,67 Sekunden und fällt mit steigender Frequenz deutlich ab. T20 bewegt sich in diesem Bereich grob zwischen 0,23 und 0,33 Sekunden, T30 etwa zwischen 0,2 und 0,32 Sekunden. Das weist darauf hin, dass der synthetische mittelgroße Raum im Bassbereich noch eine merklich längere frühe und lineare Abklingphase besitzt als in den höheren Frequenzlagen. Der tieffrequente Anteil schwingt also am längsten nach und prägt dadurch den ersten Raumeindruck besonders stark. Im mittleren Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 kHz wird das Abklingverhalten deutlich kompakter, bleibt aber nicht völlig gleichförmig. Die EDT schwankt hier ungefähr zwischen 0,2 und 0,38 Sekunden und zeigt damit noch gewisse frequenzabhängige Unruhe. T20 liegt meist im Bereich von etwa 0,04 bis 0,17 Sekunden, T30 ungefähr zwischen 0,03 und 0,14 Sekunden. Damit wird deutlich, dass die mittleren Frequenzen bereits wesentlich kontrollierter ausklingen als der Bassbereich. Zugleich bleibt die EDT höher als T20 und T30, was darauf hindeutet, dass die frühe Energieabgabe noch vergleichsweise deutlich wahrnehmbar ist, bevor der spätere lineare Nachhall schneller abklingt. Im hochfrequenten Bereich von 1 bis 10 kHz stabilisieren sich die Werte weiter auf niedrigem Niveau. Die EDT liegt hier überwiegend ungefähr zwischen 0,23 und 0,39 Sekunden. T20 bewegt sich meist zwischen 0,04 und 0,07 Sekunden, T30 ungefähr zwischen 0,05 und 0,07 Sekunden. Insgesamt zeigt sich hier ein kurzes und kontrolliertes Ausschwingverhalten ohne stark verlängerten Hochtonnachhall. Die hohen Frequenzen werden also deutlich schneller abgebaut als die tiefen. Insgesamt ergibt sich für den synthetischen mittelgroßen Raum ein stimmiges Bild: Die längsten Nachhallzeiten liegen im Bassbereich, während mittlere und hohe Frequenzen deutlich kompakter ausklingen. Im Vergleich zu einem kleinen Raum wirkt das Verhalten noch etwas ausgedehnter, bleibt aber insgesamt kontrolliert. Charakteristisch ist außerdem, dass die EDT über weite Teile des Spektrums über T20 und T30 liegt. Das spricht dafür, dass der Raum in der frühen Wahrnehmung etwas größer beziehungsweise präsenter erscheinen kann, als es die späteren linearen Nachhallwerte allein vermuten lassen.

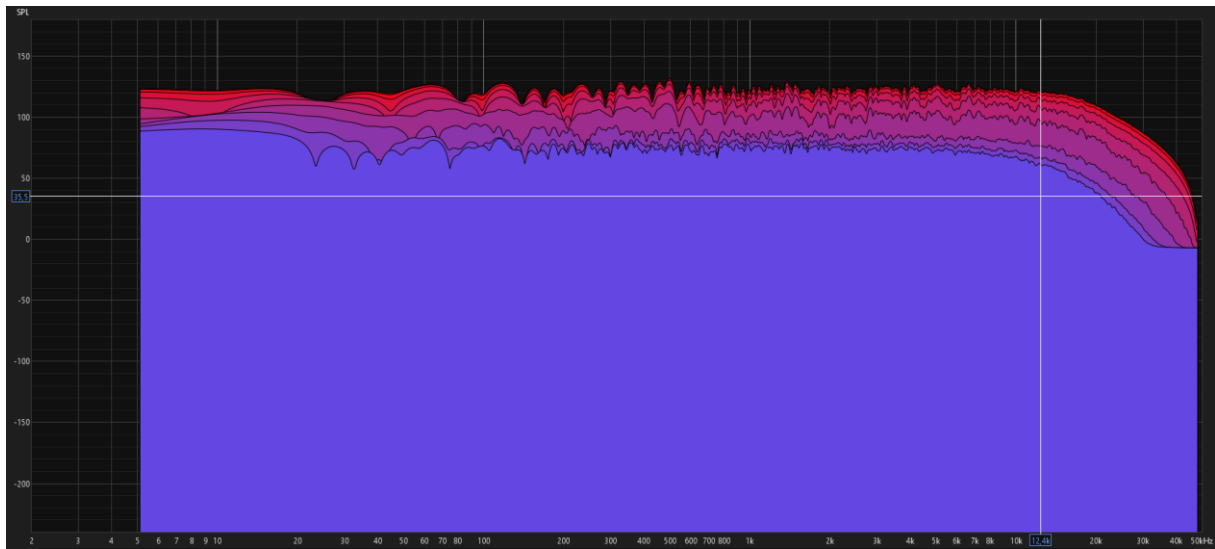


Abbildung 39: Decay-Darstellung der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Die Decay-Darstellung macht den Charakter der synthetischen Impulsantwort besonders gut sichtbar. Zu erkennen ist eine dicht gepackte frühe Energieverteilung, die sich anschließend gleichmäßig abbaut. Es gibt keine lange diffuse Auslaufphase, wie sie für große Hallräume typisch wäre. Stattdessen konzentriert sich der größte Teil der wahrnehmbaren Raumenergie auf den frühen und mittleren Bereich. Im Vergleich zum Korridor wirkt der Decay-Verlauf weniger kanalisiert und weniger stark von einer dominanten Raumachse geprägt. Stattdessen entsteht der Eindruck eines breiter verteilten Reflexionsfeldes. Zugleich bleibt der Verlauf deutlich geordnet und kontrolliert. Die einzelnen Energiebänder verlaufen ruhig, was darauf hindeutet, dass die Simulation keine übermäßige spektrale Unruhe oder chaotische Flattereffekte erzeugt. Dadurch ergibt sich das Bild eines Raums, der zwar eine klare räumliche Signatur besitzt, aber klanglich eher kompakt und kontrolliert bleibt. Der mittelgroße Raum wirkt synthetisch also größer als der kleine Raum, ohne in Richtung Halle oder Monumentalraum zu tendieren.

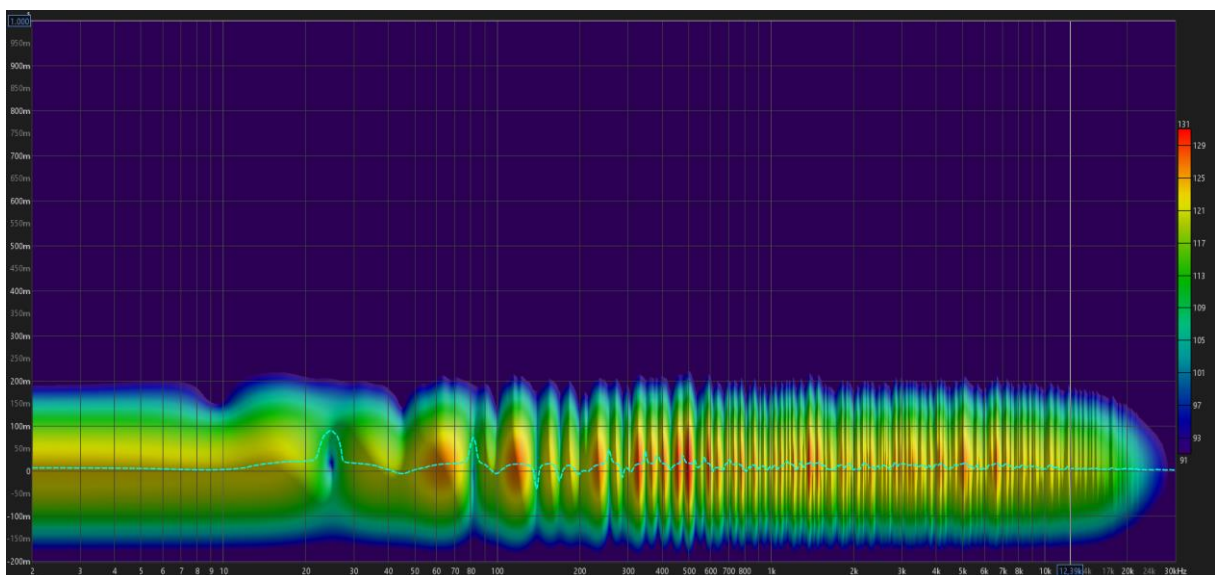


Abbildung 40: Spektrogramm der synthetischen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Das Spektrogramm bestätigt diese Einordnung. Sichtbar ist eine gleichmäßige, über das Spektrum verteilte Energie, die zu Beginn konzentriert und danach geordnet auslaufend erscheint. Besonders im frühen Bereich fallen deutliche tieffrequente und mittelfrequente Energieanteile auf, die dem Raum

Volumen verleihen. Gleichzeitig bleibt das Ausklingen zeitlich begrenzt und verliert sich nicht in einer langen diffusen Fahne. Die Struktur des Spektrogramms wirkt auffallend regelmäßig. Die Energieverteilung ist dichter und raumfüllender als beim kleinen Raum, aber nicht so scharf gebündelt wie im Korridor. Das deutet darauf hin, dass die synthetische Impulsantwort des mittelgroßen Raums eine glaubwürdige Zwischenposition einnimmt: größer, offener und räumlicher als ein kleiner Raum, aber klar kürzer und kontrollierter als ein stark hallender Großraum. Auch im höheren Frequenzbereich bleibt die Struktur übersichtlich und relativ stabil. Es treten keine ausgeprägten spektralen Ausreißer oder stark störende Bänder auf. Das spricht für eine modellierte Raumantwort, die hinsichtlich Materialwahl und Geometrie zu einem homogenen akustischen Verhalten führt.

Zusammenfassend zeigt die synthetische Impulsantwort des mittelgroßen Raums einen stabilen, kompakten und zugleich räumlich plausiblen Innenraumcharakter. Die Impulsantwort besitzt einen klaren Direktanteil, eine dichte frühe Reflexionsstruktur und einen gleichmäßig auslaufenden, insgesamt kurzen Nachhall. Besonders auffällig ist die Differenz zwischen etwas höherer EDT und sehr kurzen T20- und T30-Werten, was darauf hinweist, dass der Raum zunächst ein gewisses Raumgefühl erzeugt, dieses jedoch nicht in einen langen linearen Nachhall überführt.

Die REW-Darstellungen sprechen insgesamt für eine synthetische Impulsantwort, die den mittelgroßen Raum als funktionalen, mäßig reflektierenden und akustisch gut kontrollierten Innenraum modelliert. Die Raumwirkung erscheint größer und offener als beim kleinen Raum, aber deutlich kompakter und geordneter als in stark hallenden oder monumental wirkenden Räumen. Damit bildet die synthetische Impulsantwort eine plausible Grundlage für den anschließenden Vergleich mit der realen Messung des mittelgroßen Raums.

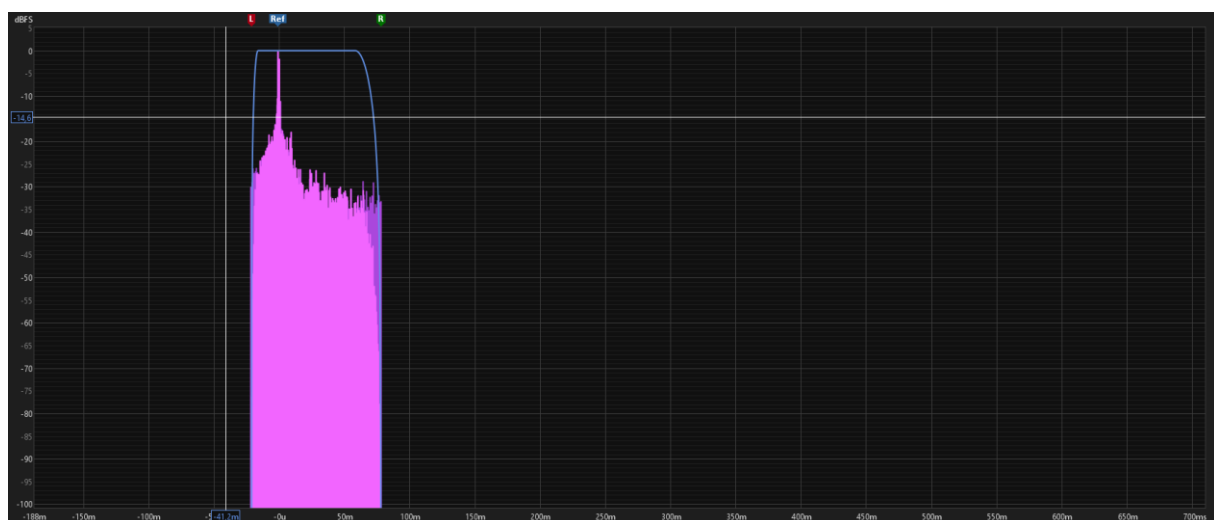


Abbildung 41: Zeitbereichsdarstellung der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Die reale Impulsantwort des mittelgroßen Raums zeigt insgesamt einen kompakten, klar strukturierten und zugleich frequenzabhängig differenzierten Verlauf. Bereits in der Impulsdarstellung wird deutlich, dass der Raum keinen langen, diffusen Nachhall besitzt, sondern seinen akustischen Charakter vor allem über den frühen Energieverlauf und die anschließende, relativ kontrollierte Abklingphase ausbildet. Die Messung vermittelt damit den Eindruck eines Innenraums mit wahrnehmbarer räumlicher Ausdehnung, jedoch ohne stark hallende Ausprägung.

Im Zeitbereich ist zunächst ein deutlicher Hauptimpuls zu erkennen, der sich klar vom nachfolgenden Abklingprozess absetzt. Direkt im Anschluss folgt ein kompakter Bereich erhöhter Energie, der schnell

an Pegel verliert. Der Abklingverlauf bleibt dabei insgesamt auf einen begrenzten Zeitbereich konzentriert und zeigt keine lange diffuse Nachhallfahne. Das spricht dafür, dass der Raum zwar reflektierende Flächen besitzt und ein gewisses Raumgefühl erzeugt, zugleich aber keinen ausgeprägten Nachhall entwickelt. Auffällig ist, dass der frühe Energieverlauf nicht völlig glatt erscheint, sondern eine gewisse Binnenstruktur aufweist. Der Hauptimpuls geht in einen dichten, aber leicht unruhigen Bereich über, was auf mehrere frühe Reflexionen und eine realistische, nicht vollkommen homogene Raumantwort hinweist. Die reale Messung zeigt damit einen plausiblen Verlauf für einen mittelgroßen Innenraum, in dem Schall auf verschiedene Begrenzungsflächen trifft und in kurzer Folge reflektiert wird. Die sichtbare Länge der Impulsantwort bleibt insgesamt kurz. Daraus ergibt sich der Eindruck eines Raums, der räumlich wahrnehmbar, aber nicht stark nachhallend ist. Der mittelgroße Raum besitzt somit keine ausgedehnte Hallstruktur, sondern eine eher kurze und ruhige Raumantwort.

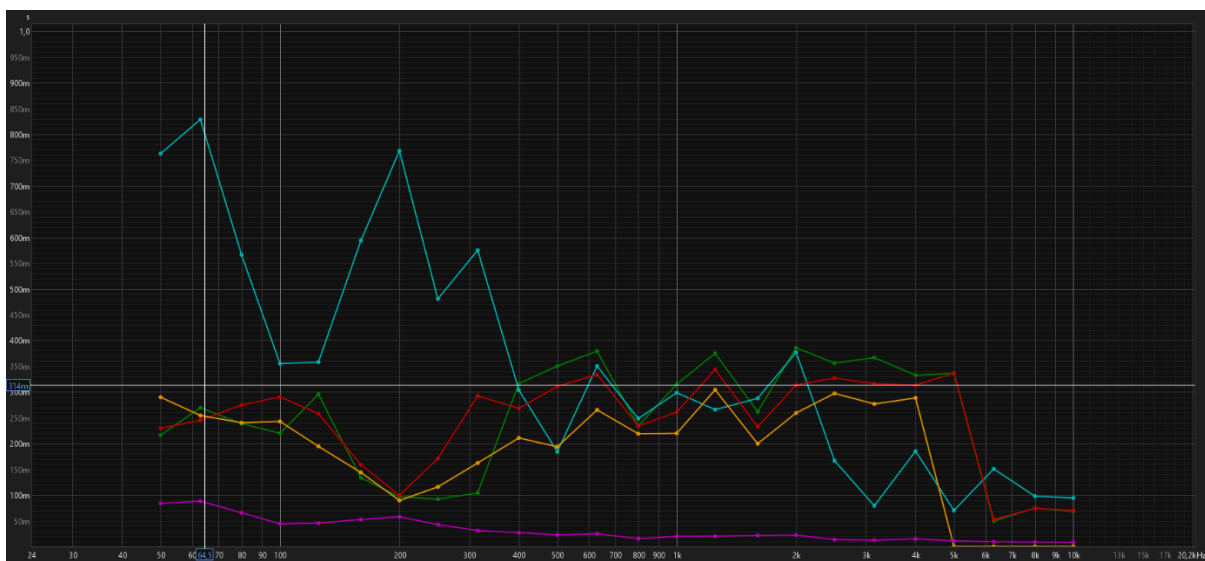


Abbildung 42: Frequenzbasierte-Auswertung der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Im tieffrequenten Bereich zwischen 50 und 100 Hz weist die reale Impulsantwort die höchsten Nachhallwerte auf. Die EDT liegt hier ungefähr zwischen 0,57 und 0,83 Sekunden und fällt zum oberen Ende dieses Bereichs deutlich ab. T20 bewegt sich grob zwischen 0,23 und 0,29 Sekunden, T30 etwa zwischen 0,24 und 0,29 Sekunden. Damit zeigt sich im Bassbereich ein langes frühes Abklingen, während die späteren linearen Nachhallparameter deutlich kürzer bleiben. Das deutet darauf hin, dass tiefe Frequenzen den ersten Raumeindruck besonders stark prägen und im realen mittelgroßen Raum zunächst mit erhöhter Energie wahrnehmbar bleiben. Im mittleren Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 kHz wird das Abklingverhalten unruhiger und frequenzabhängiger. Die EDT schwankt hier ungefähr zwischen 0,19 und 0,77 Sekunden und zeigt damit deutliche bandabhängige Unterschiede. T20 liegt überwiegend zwischen 0,1 und 0,35 Sekunden, T30 ungefähr zwischen 0,09 und 0,27 Sekunden. Insgesamt zeigt sich hier also kein vollkommen gleichmäßiger Verlauf, sondern ein differenziertes frequenzabhängiges Abklingen. Einzelne Bänder fallen deutlich kürzer aus, andere bleiben länger erhalten. Das spricht für ein reales raumakustisches Verhalten mit spektralen Unregelmäßigkeiten, wie sie durch Geometrie, Oberflächen und lokale Reflexionsverhältnisse entstehen können. Im hochfrequenten Bereich zwischen 1 kHz und 10 kHz bleibt das Abklingverhalten insgesamt moderat, allerdings ebenfalls nicht vollständig glatt. Die EDT bewegt sich hier ungefähr zwischen 0,07 und 0,39 Sekunden. T20 liegt meist zwischen 0,02 und 0,34 Sekunden, T30 ungefähr zwischen 0,02 und 0,29 Sekunden. Damit ergibt sich im Hochtonbereich insgesamt ein eher kurzes,

aber spektral unterschiedlich ausgeprägtes Ausschwingverhalten. Einige Frequenzbänder klingen deutlich schneller ab, während andere noch etwas länger nachhalten. Der Hochtonbereich wirkt dadurch kontrolliert, aber nicht vollkommen homogen. Insgesamt ergibt sich für den realen mittelgroßen Raum ein Bild mit stärker ausgeprägtem tieffrequentem Nachhall und deutlich unruhigerem Verlauf in den mittleren und hohen Frequenzen. Während der Bassbereich noch lange nachschwingt, zeigen die übrigen Frequenzbereiche zwar überwiegend kürzere Nachhallzeiten, jedoch mit spürbaren bandabhängigen Schwankungen. Das spricht für ein reales, weniger idealisiertes Abklingverhalten, bei dem frühe Energieverteilung und frequenzabhängige Raumreaktionen stärker differenziert ausfallen.

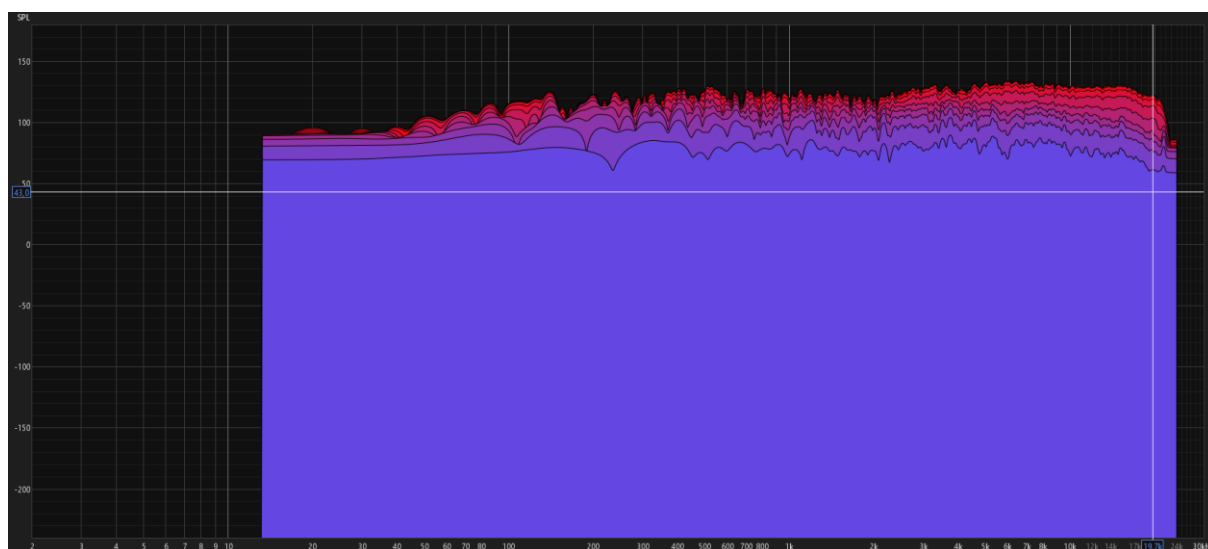


Abbildung 43: Decay-Darstellung der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Die Decay-Darstellung bestätigt diesen Eindruck. Der wesentliche Teil der Energie liegt im frühen bis mittleren Zeitbereich, während eine lange diffuse Auslaufphase ausbleibt. Die Energie nimmt zügig ab, bleibt jedoch in bestimmten Frequenzbereichen kurzzeitig erhalten. Dadurch entsteht keine hallende, sondern eher eine kompakte und strukturiert ausklingende Raumantwort. Auffällig ist, dass die Decay-Darstellung nicht vollständig homogen wirkt. Einzelne Frequenzbereiche zeigen etwas stärkere oder schwächere Ausläufe, was darauf hindeutet, dass der Raum spektral nicht vollkommen gleichmäßig reagiert. Solche Unterschiede sind bei realen Messungen plausibel und verweisen auf die tatsächlichen geometrischen und materiellen Eigenschaften des Raums. Insgesamt lässt sich aus der Decay-Darstellung schließen, dass der mittelgroße Raum zwar eine klar erkennbare Raumantwort besitzt, diese aber vor allem über frühe und mittlere Reflexionsanteile organisiert wird. Ein langer, dichter Spätnachhall ist nicht erkennbar.

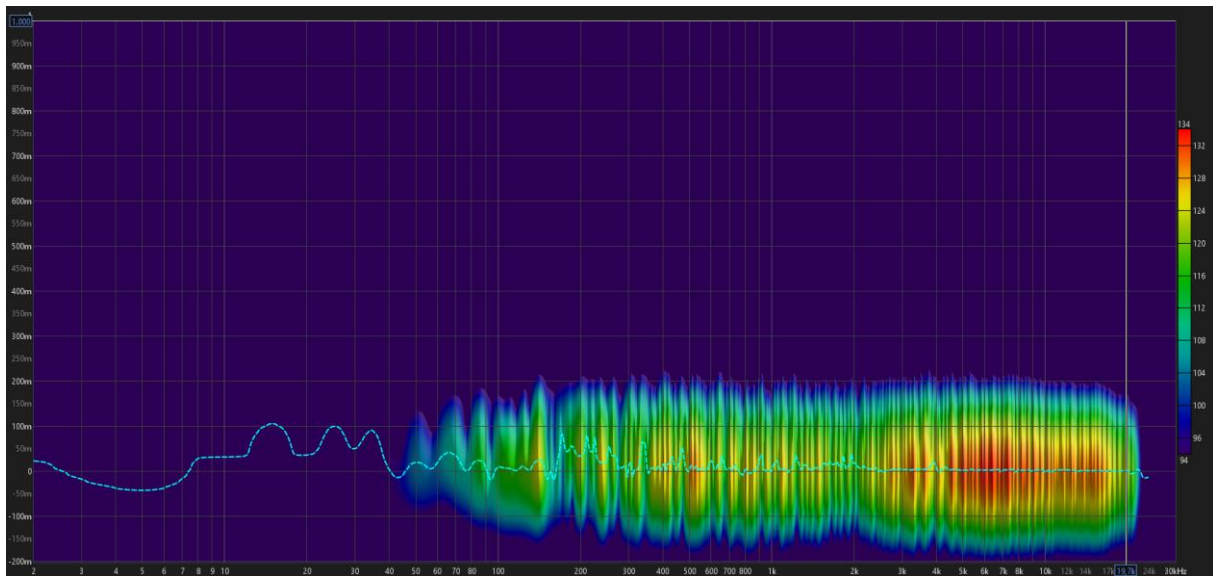


Abbildung 44: Spektrogramm der aufgenommenen Impulsantwort des mittelgroßen Raums

Auch das Spektrogramm liefert ein stimmiges Bild. Die Energie ist zeitlich klar begrenzt und verteilt sich über einen relevanten Frequenzbereich, ohne in eine langanhaltende diffuse Struktur überzugehen. Im unteren und mittleren Frequenzbereich zeigen sich deutliche Energiekonzentrationen, während höhere Frequenzen konsistent auslaufen. Insgesamt erscheint die Energieverteilung kompakt und auf die erste Phase nach dem Direktimpuls fokussiert. Zugleich ist die spektrale Struktur nicht vollkommen gleichförmig. Einzelne Bänder treten stärker hervor als andere, was auf ein realistisches, frequenzabhängiges Verhalten des Raums hinweist. Gerade diese Unterschiede machen sichtbar, dass es sich um eine reale Messung handelt, in der sich Geometrie, Möblierung und Oberflächeneigenschaften akustisch niederschlagen. Das Spektrogramm unterstützt damit die Einordnung des mittelgroßen Raums als Raum mit klarer räumlicher Information, aber begrenzter Nachhallausdehnung. Die Energie bleibt nicht übermäßig lange erhalten, sondern konzentriert sich auf einen relativ kurzen und strukturierten Verlauf.

Zusammenfassend zeigt die reale Impulsantwort des mittelgroßen Raums einen mittelgroßen, akustisch stabilen Innenraum mit kompakter Raumantwort. Der Raum besitzt einen klaren Direktanteil, eine deutlich ausgeprägte frühe Reflexionsphase und insgesamt kurze lineare Nachhallzeiten. Gleichzeitig zeigt insbesondere der erhöhte EDT-Wert, dass der frühe subjektive Eindruck von Räumlichkeit stärker sein kann, als es T20 und T30 allein vermuten lassen. Die Messung beschreibt damit keinen stark hallenden Raum, sondern einen Raum, dessen akustischer Charakter vor allem aus früher Reflexionsstruktur, moderater räumlicher Präsenz und einem insgesamt zügigen Energieabbau entsteht. Die reale Impulsantwort des mittelgroßen Raums kann daher als plausibler und belastbarer Datensatz für die weitere Auswertung betrachtet werden.

Der objektive Vergleich zwischen synthetischer und realer Impulsantwort des mittelgroßen Raums zeigt, dass beide Datensätze im grundsätzlichen Raumcharakter übereinstimmen, sich jedoch in der Feinstruktur des Abklingverhaltens, in der frühen Energieverteilung und in der frequenzabhängigen Ausprägung der Nachhallparameter deutlich unterscheiden. Die synthetische Impulsantwort bildet den mittelgroßen Raum insgesamt geordneter, homogener und stärker kontrolliert ab, während die reale Messung mehr spektrale Schwankungen, stärkere lokale Unruhe und eine komplexere frühe Reflexionsstruktur aufweist.

Im Zeitbereich zeigen beide Impulsantworten zunächst eine ähnliche Grundstruktur: ein klarer Hauptimpuls wird jeweils von einer frühen Reflexionsphase und einem anschließenden Abklingprozess gefolgt. Damit stimmen beide Raumantworten im allgemeinen Aufbau überein. Sowohl die synthetische als auch die reale Messung beschreiben keinen lang hallenden Großraum, sondern einen Raum mit begrenzter Nachhallausdehnung und deutlicher früher Reflexionswirkung. Trotz dieser strukturellen Ähnlichkeit unterscheiden sich beide Verläufe in ihrer Ausprägung. Die synthetische Impulsantwort wirkt insgesamt glatter und gleichmäßiger. Der Energieabfall setzt strukturiert ein und verläuft mit vergleichsweise homogener Hüllkurve. Die reale Impulsantwort zeigt dagegen einen rauerer und weniger idealisierten Verlauf. Insbesondere unmittelbar nach dem Hauptimpuls wirkt die reale Impulsantwort unruhiger, was auf reale Reflexionsunterschiede, asymmetrische Raumanteile oder materialbedingte Variationen schließen lässt. Ein weiterer Unterschied liegt in der Verteilung der frühen Energie. Die reale Impulsantwort besitzt einen früh deutlich wahrnehmbaren Energieanteil, der in seinem Verlauf nicht vollständig gleichmäßig erscheint. Die synthetische Impulsantwort dagegen modelliert diese frühe Phase stärker geglättet und damit ausgewogener. Objektiv bedeutet das: Die Simulation trifft den allgemeinen zeitlichen Aufbau, bildet die mikroskopische Unruhe des realen Reflexionsgeschehens jedoch nur eingeschränkt ab.

Die Unterschiede werden in den frequenzabhängigen Nachhallparametern des mittelgroßen Raums deutlich sichtbar. Im tieffrequenten Bereich von 50 Hz bis 100 Hz zeigt die reale Impulsantwort vor allem bei der EDT höhere Werte als die synthetische Variante. Während die synthetische Impulsantwort in diesem Bereich bereits ein verlängertes frühes Abklingen aufweist, fällt die EDT der realen Messung noch etwas höher aus. Das spricht dafür, dass der reale Raum in seiner Anfangsphase im Bassbereich mehr Energie enthält oder eine komplexere frühe Reflexionsstruktur besitzt als das synthetische Modell. Bei T20 und T30 ist der Unterschied im Tieftonbereich dagegen kleiner; beide Impulsantworten liegen hier in einem ähnlichen Größenbereich, auch wenn die reale Messung tendenziell etwas längere oder unruhigere Verläufe zeigt. Im mittleren Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1 kHz treten die Unterschiede deutlicher in der Struktur als in einer durchgehend höheren absoluten Höhe auf. Die reale Impulsantwort zeigt hier stärkere Schwankungen zwischen den einzelnen Frequenzbändern, während die synthetische Impulsantwort kompakter und gleichmäßiger verläuft. Besonders die EDT streut in der realen Messung wesentlich stärker, was darauf hindeutet, dass der reale Raum im frühen Abklingverhalten frequenzabhängiger reagiert. T20 und T30 bleiben zwar insgesamt ebenfalls kurz, verlaufen in der realen Messung aber unruhiger und weniger homogen als im synthetischen Modell. Auch im hochfrequenten Bereich zwischen 1 kHz und 10 kHz bleibt die synthetische Impulsantwort deutlich glatter. Die reale Impulsantwort weist weiterhin stärkere spektrale Schwankungen auf, obwohl die Nachhallzeiten insgesamt kurz bleiben. Der Unterschied zeigt sich hier also weniger in einer pauschal längeren Nachhallzeit als vielmehr in der geringeren Regelmäßigkeit und in der höheren frequenzabhängigen Varianz der realen Messung. Besonders wichtig ist dabei nicht nur die absolute Differenz der Werte, sondern auch ihr Verhältnis untereinander. In beiden Fällen ist die EDT über weite Frequenzbereiche höher als T20 und T30. Das bedeutet, dass sowohl die synthetische als auch die reale Impulsantwort einen Raum beschreiben, der in der frühen Wahrnehmung räumlicher wirkt, als es die späteren linearen Nachhallzeiten allein vermuten lassen. Dieses Verhalten ist in der realen Messung vor allem im Tief- und Mitteltonbereich stärker ausgeprägt, während die synthetische Impulsantwort das Verhältnis zwischen frühem und späterem Abklingen gleichmäßiger modelliert. Im frequenzabhängigen Verlauf der RT-Parameter zeigen sich ebenfalls klare Unterschiede. Die synthetische Impulsantwort verhält sich über große Teile des Spektrums deutlich glatter und stabiler. Die Kurven verlaufen stabil, die Streuung zwischen den einzelnen

Frequenzbändern bleibt gering, und besonders im mittleren und höheren Frequenzbereich ist das Abklingverhalten sehr gleichmäßig modelliert. Die reale Impulsantwort zeigt demgegenüber starke frequenzabhängige Schwankungen. Diese sind im Bereich von 100 Hz bis 1 kHz sowie von 1 kHz bis 10 kHz besonders gut sichtbar, während sich im Tieftonbereich eher Unterschiede in der Höhe der EDT als in einer vollständig anderen Grundtendenz zeigen. Diese Unruhe ist akustisch plausibel, da reale Räume stärker von Moden, lokalen Resonanzen, nicht idealen Flächenverhältnissen und materialbedingter Streuung beeinflusst werden. Auffällig ist zudem, dass die reale Impulsantwort in einigen Frequenzbereichen eine stärkere Differenz zwischen EDT und den linearen Nachhallparametern aufweist. Das bedeutet, dass die reale Raumantwort spektral differenzierter auf frühe Reflexionen reagiert, während die synthetische Impulsantwort diese Unterschiede stärker glättet. Objektiv lässt sich daher festhalten: Die synthetische Impulsantwort bildet den mittelgroßen Raum frequenzübergreifend homogener ab, die reale Impulsantwort dagegen spektral komplexer, schwankungsreicher und weniger reguliert.

Die Decay-Darstellung bestätigt diese Einschätzung. Die synthetische Impulsantwort zeigt einen geordneten und kontinuierlichen Energieabbau. Die einzelnen Energiebänder laufen ruhig aus, und die Struktur wirkt modellhaft konsistent. Der gesamte Verlauf erscheint kontrolliert und weitgehend frei von spektraler Rauheit. Die reale Impulsantwort besitzt zwar ebenfalls keinen langen diffusen Spätnachhall, zeigt aber einen unruhigeren und stärker strukturierten Decay-Verlauf. Einzelne Frequenzbereiche bleiben etwas länger erhalten oder bauen sich unregelmäßiger ab. Dadurch entsteht keine chaotische, aber doch deutlich realitätsnähere Binnenstruktur. Die Energieverteilung wirkt weniger geglättet und stärker von lokalen Besonderheiten geprägt. Ein wichtiger objektiver Punkt ist dabei, dass beide Impulsantworten denselben grundsätzlichen Raumtyp erkennen lassen: In beiden Fällen konzentriert sich der wesentliche Energieverlauf auf die frühe und mittlere Zeitphase. Der Unterschied liegt also nicht in einem völlig anderen Nachhallcharakter, sondern in der Intensität und Regelmäßigkeit, mit der dieser Charakter ausgeprägt ist.

Die Spektrogramme zeigen die Unterschiede besonders anschaulich. Die synthetische Impulsantwort weist eine gleichmäßige, geordnete und nahezu idealtypische Energieverteilung auf. Die spektrale Struktur ist sauber organisiert, einzelne Energiebänder erscheinen reguliert, und die gesamte Verteilung läuft ohne ausgeprägte spektrale Brüche aus. Die reale Impulsantwort ist dagegen sichtbar heterogener. Die Energieverteilung weist stärkere Unterschiede zwischen einzelnen Frequenzbändern auf und wirkt im Zeit-Frequenz-Bereich insgesamt weniger geglättet. Besonders im unteren und mittleren Frequenzbereich treten Unregelmäßigkeiten hervor, die auf reale Rauminteraktionen und lokale akustische Besonderheiten hinweisen. Zugleich bleibt der Gesamtcharakter ähnlich: Beide Spektrogramme zeigen keine langanhaltende, breit gestreute Hallfahne, sondern eine zeitlich begrenzte Energieverteilung mit Schwerpunkt im frühen und mittleren Bereich. Die Übereinstimmung liegt also in der grundsätzlichen Raumtypik, während sich die Abweichung in der spektralen Feinstruktur manifestiert.

Zusammenfassend zeigt der objektive Vergleich, dass die synthetische Impulsantwort den mittelgroßen Raum in seinem grundlegenden akustischen Charakter plausibel nachbildet, dabei jedoch idealisierter, trockener und homogener ausfällt als die reale Messung. Die reale Impulsantwort weist in mehreren zentralen Parametern tendenziell höhere Werte auf und besitzt vor allem im frühen Verlauf eine stärkere räumliche Wirkung. Damit lässt sich objektiv festhalten, dass die synthetische Impulsantwort den mittelgroßen Raum in der Tendenz zutreffend, aber in vereinfachter und stärker

regulierter Form abbildet. Die reale Messung enthält zusätzliche spektrale und zeitliche Komplexität, die im Modell nur teilweise erfasst wird.

In der subjektiven Hörbewertung zeigen sich, in den im Anhang verlinkten Hörbeispielen, auch beim mittelgroßen Raum klare Unterschiede zwischen der synthetischen und der realen Impulsantwort. Besonders bei der Sprachaufnahme fiel auf, dass die mit der synthetischen Impulsantwort bearbeitete Version klarer und zugleich näher wirkte. Die Stimme erschien direkter, fokussierter und besser verständlich. Demgegenüber wirkte die mit der realen Impulsantwort bearbeitete Sprachaufnahme etwas distanzierter und weniger präzise konturiert. Der Raumeindruck war zwar vorhanden, ging jedoch stärker zulasten der Klarheit und der unmittelbaren Präsenz der Stimme.

Auch bei der Musik wurden Unterschiede deutlich. Die reale Impulsantwort erzeugte einen Eindruck, der stellenweise etwas verzerrter wirkte und zudem erneut durch einen stärker wahrnehmbaren Rausch- beziehungsweise Störanteil in den hohen Frequenzen auffiel. Dadurch erschien die reale Version klanglich rauer und weniger sauber aufgelöst. Die mit der synthetischen Impulsantwort bearbeitete Musikfassung wirkte demgegenüber kontrollierter und geschlossener, da die oberen Frequenzbereiche ruhiger und weniger störanfällig wahrgenommen wurden.

Besonders deutlich trat der Unterschied bei den Drums hervor. Im Tieftonbereich waren die Kickdrums in der synthetischen Impulsantwort deutlich besser hörbar. Sie wirkten klarer konturiert, definierter und setzten sich im Klangbild besser durch. In der realen Impulsantwort erschienen die tiefen Anteile dagegen nicht nur abgedämpfter, sondern auch verschwommener. Der Bassbereich verlor damit an Präzision und Durchsetzungskraft, wodurch die Schlagzeugaufnahme insgesamt weniger klar und weniger druckvoll wirkte.

Zusammenfassend ergab die subjektive Hörbewertung des mittelgroßen Raums, dass die synthetische Impulsantwort vor allem hinsichtlich Sprachverständlichkeit, Präsenz und Tieftondefinition überzeugte. Die mit der realen Impulsantwort bearbeiteten Versionen vermittelten zwar ebenfalls einen räumlichen Eindruck, wirkten jedoch insbesondere bei Musik und Drums rauer, diffuser und in den hohen Frequenzen störanfälliger. Insgesamt wurde die synthetische Variante daher subjektiv als klarer, näher und akustisch stabiler wahrgenommen, während die reale Variante eher einen unruhigeren und weniger präzisen Raumeindruck erzeugte.

5. Diskussion

5.1. Interpretation der Raumtyp-Verteilung

5.1.1 Bedeutung für Game-Audio

Die Analyse der untersuchten Impulsantworten zeigt, dass sich die drei betrachteten Raumtypen sowohl in ihrer zeitlichen Struktur als auch in ihrem frequenzabhängigen Abklingverhalten deutlich voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede sind nicht nur aus raumakustischer Sicht relevant, sondern besitzen auch eine unmittelbare Bedeutung für die Gestaltung von Game-Audio. Gerade in interaktiven Anwendungen ist Hall nicht lediglich ein atmosphärischer Zusatz, sondern ein zentrales Mittel zur räumlichen Orientierung, zur Material- und Raumwahrnehmung sowie zur emotionalen Verstärkung einer Spielumgebung. Die Verteilung unterschiedlicher Raumtypen innerhalb eines Spiels beeinflusst maßgeblich, wie glaubwürdig und differenziert eine virtuelle Welt akustisch wahrgenommen wird. Ein kleiner Raum erzeugt typischerweise einen anderen Höreindruck als ein Korridor oder ein größerer Innenraum. Wird dieser Unterschied im Sounddesign nicht ausreichend berücksichtigt, können Spielwelten trotz visueller Qualität akustisch flach, unpräzise oder künstlich wirken. Die hier untersuchten Impulsantworten zeigen genau diese grundlegende Relevanz: Schon kurze Veränderungen im Nachhallverhalten führen zu deutlich anderen räumlichen Eindrücken. Für Game-Audio ist dabei zunächst wichtig, dass verschiedene Raumtypen nicht nur über ihre absolute Nachhallzeit, sondern über ihr gesamtes Abklingprofil charakterisiert werden. Ein kleiner Raum wirkt in der Regel kompakter, direkter und kontrollierter. Der Höreindruck ist stärker durch frühe Reflexionen und kurze Ausschwingzeiten geprägt. Ein Korridor dagegen besitzt häufig ein gerichtetes, spektral eigenständigeres Reflexionsverhalten, das durch parallele Begrenzungsflächen, längliche Geometrien und eine stärkere Betonung bestimmter Reflexionsmuster gekennzeichnet ist. Mittlere Räume liegen oft zwischen diesen Extremen: sie wirken räumlicher als kleine Räume, ohne dabei die oft markante Signatur eines langen oder stark gerichteten Korridors zu besitzen. Für die Praxis des Game-Audio-Designs bedeutet dies, dass Raumtypen nicht allein nach mehr oder weniger Hall unterschieden werden sollten, sondern nach der spezifischen Struktur ihres Nachhalls. Gerade die Verteilung solcher Raumtypen innerhalb eines Spiels ist deshalb bedeutend, weil Spielerinnen und Spieler akustische Räume meist nicht bewusst analytisch, sondern implizit wahrnehmen. Hall wird dabei zu einem Orientierungssignal. Wenn sich der Nachhallcharakter beim Wechsel von einem kleinen Nebenraum in einen Korridor oder von einem Korridor in einen größeren Raum verändert, unterstützt dies das Gefühl, sich tatsächlich durch unterschiedliche Umgebungen zu bewegen. Die Raumakustik trägt damit zur Lesbarkeit des Leveldesigns bei. Ein akustisch überzeugender Raumwechsel kann Übergänge markieren, Distanzen erfahrbar machen und die Materialität oder Offenheit einer Umgebung vermitteln, selbst wenn diese Informationen visuell nur begrenzt vorhanden sind. Im Kontext von Game-Audio erfüllt die Raumtyp-Verteilung außerdem eine funktionale Rolle für Immersion. Immersion entsteht nicht nur durch grafische Detailtiefe, sondern wesentlich durch die Kohärenz sensorischer Informationen. Wenn das visuelle Bild einen engen, harten Flur zeigt, die akustische Antwort aber wie ein trockener Studiobereich wirkt, entsteht eine Inkonsistenz, die das Erleben der Szene schwächen kann. Umgekehrt verstärkt eine passende Impulsantwort das Gefühl von Präsenz und physischer Glaubwürdigkeit. Die in dieser Arbeit beobachteten Unterschiede zwischen den Raumtypen machen deutlich, dass bereits kleinere Variationen in EDT, T20, T30, Decay-Struktur und spektraler Energieverteilung zu deutlich unterschiedlichen Raumwahrnehmungen führen können. Für Game-Audio heißt das: Die saubere Differenzierung von Raumtypen ist kein rein technisches Detail, sondern ein gestalterischer Schlüssel zur Plausibilität der Spielwelt. Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die relative und emotionale

Funktion von Raumakustik. Unterschiedliche Räume tragen in Spielen oft unterschiedliche dramaturgische Bedeutungen. Ein kleiner Raum kann Intimität, Enge, Sicherheit oder Beklemmung vermitteln. Ein Korridor kann Spannung, Übergang, Unsicherheit oder lineare Bewegung symbolisieren. Ein mittelgroßer Raum kann Offenheit, Zentralität oder funktionale Neutralität ausdrücken. Die Raumakustik unterstützt diese Bedeutungen, indem sie die emotionale Lesart einer Szene verstärkt. Ein trockener, unmittelbarer Klang kann Nähe und Direktheit transportieren, während längere, komplexere Nachhallstrukturen Distanz, Größe und Unsicherheit suggerieren. Die Verteilung verschiedener Raumtypen im Spiel ist somit auch eine Verteilung unterschiedlicher emotionaler Klangräume. Für das praktische Sounddesign bedeutet das, dass Raumakustik nicht nur als technische Nachbildung realer Verhältnisse verstanden werden sollte, sondern als dramaturgisch steuerbares Gestaltungsmittel. Ein Spiel muss nicht zwingend physikalisch exakt klingen, um glaubwürdig zu wirken. Entscheidend ist vielmehr, dass die akustische Ausgestaltung innerhalb der Spielewelt konsistent und funktional ist. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass synthetische Impulsantworten Räume oft homogener, kontrollierter und glatter abbilden, während reale Impulsantworten mehr spektrale Unruhe, komplexere frühe Reflexionen und teilweise unregelmäßigere Verläufe aufweisen. Für Game-Audio ist daraus abzuleiten, dass eine Simulation nicht zwangsläufig jede reale Unregelmäßigkeit enthalten muss. Vielmehr stellt sich die Frage, welche Eigenschaften eines Raumtyps für die Spielerfahrung entscheidend sind. Gerade hierin liegt eine zentrale Bedeutung der Raumtyp-Verteilung: Sie macht deutlich, welche Merkmale eines Raumes im interaktiven Kontext prioritär sind. Für einen kleinen Raum kann das beispielsweise die Nähe und Kontrolle des Klanges sein. Für einen Korridor kann eine charakteristische Längsstruktur mit markanter Frühreflexion oder spektraler Härte wichtiger sein als eine exakt gemessene Nachhallzeit. Für einen mittelgroßen Raum kann entscheidend sein, dass er wahrnehmbar offener und weniger gedrängt wirkt als ein kleiner Raum, ohne jedoch in Richtung großer Hallräume abzudriften. Die Aufgabe des Game-Audio-Designs besteht dann darin, diese typischen Merkmale hörbar zu machen, auch wenn die zugrunde liegende Impulsantwort technisch vereinfacht oder stilisiert ist. Darüber hinaus hat die Raumtyp-Verteilung unmittelbare Konsequenzen für die Implementierung in Game-Engines. In Spielen müssen akustische Räume nicht nur überzeugend, sondern auch performant und flexibel sein. Es ist oft nicht praktikabel für jede einzelne Position im Level eine vollständig einzigartige real gemessene Impulsantwort zu verwenden. Stattdessen wird meist mit einer begrenzten Anzahl charakteristischer Raumklassen gearbeitet, die dann je nach Umgebung zugeschaltet, interpoliert oder parametrisch angepasst werden. Die in dieser Arbeit untersuchten Raumtypen können genau als solche Klassen verstanden werden: kleiner Raum, Korridor und mittelgroßer Raum bilden prototypische Kategorien, die in vielen Spielsituationen wiederkehren. In diesem Zusammenhang wird die Interpretation der Raumtyp-Verteilung besonders relevant. Wenn klar ist, welche akustischen Merkmale die einzelnen Raumtypen voneinander unterscheiden, können diese gezielt in ein System überführt werden. Für ein Game-Audio-Setup bedeutet das etwa, dass nicht nur ein Hall an- oder ausgeschaltet wird, sondern ein abgestuftes Modell verschiedener Raumcharaktere. Ein Level kann dann akustisch in Zonen unterteilt werden, die jeweils bestimmte Nachhallprofile tragen. So entsteht ein kohärentes räumliches Audiodesign, das Übergänge zwischen Bereichen nicht nur visuell, sondern auch klanglich abbildet.

Ein weiterer Punkt ist die Bedeutung für die Lesbarkeit von Bewegung und Distanz. In Spielen verändert sich der Hörkontext häufig dynamisch: Figuren betreten neue Räume, bewegen sich entlang von Korridoren, öffnen Türen oder wechseln zwischen engen und offenen Bereichen. Wenn die Raumtyp-Verteilung akustisch nachvollziehbar gestaltet ist, wird Bewegung nicht nur als Ortswechsel, sondern

als Veränderung des gesamten akustischen Feldes erfahrbar. Das verstärkt die Wahrnehmung von Raumtiefe und Weltkonsistenz. Besonders in First-Person-Spielen, Horror-Spielen, narrativen Spielen oder Stealth-Titeln kann dies stark zur Atmosphäre beitragen. Die Ergebnisse legen außerdem nahe, dass reale und synthetische Impulsantworten im Game-Audio-Kontext unterschiedliche Stärken besitzen. Reale Impulsantworten bringen häufig mehr spektrale Individualität und komplexere Mikrostrukturen mit sich. Dadurch können sie sehr authentisch und lebendig wirken. Gleichzeitig besteht die Gefahr, dass sie, je nach Aufnahmequalität, Nebengeräuschen oder spektralen Unregelmäßigkeiten, schwerer kontrollierbar sind. Synthetische Impulsantworten erscheinen dagegen oft glatter, stabiler und technisch sauber. Sie lassen sich besser anpassen, vereinheitlichen und in ein interaktives System integrieren. Für Game-Audio bedeutet das, dass die Wahl zwischen realer und synthetischer Raumantwort nicht ausschließlich unter dem Gesichtspunkt von Realismus getroffen werden sollte, sondern unter dem Aspekt der gestalterischen Funktion innerhalb des Spiels. Für die Raumtyp-Verteilung ist damit auch die Frage relevant, wann Authentizität und wann Kontrollierbarkeit wichtiger sind. In einem Spiel mit stark stilisierter Grafik oder reduzierter Audioumgebung kann eine synthetisch kontrollierte Impulsantwort völlig ausreichend oder sogar vorteilhaft sein. In einem Spiel, das stark auf atmosphärischen Detailrealismus setzt, können reale Impulsantworten zusätzliche Glaubwürdigkeit und Tiefe erzeugen. Wahrscheinlich liegt die praktisch sinnvollste Lösung häufig in einer Mischform: Grundlegende Raumtypen werden synthetisch oder parametrisch stabil modelliert und bei Bedarf durch reale Charakteristika ergänzt. Schließlich ist die Interpretation der Raumtyp-Verteilung auch aus methodischer Sicht bedeutsam. Sie zeigt, dass die akustische Qualität eines Spielraums nicht allein aus einem einzigen globalen Kennwert abgeleitet werden kann. Zwei Räume mit ähnlichen mittleren Nachhallzeiten können subjektiv sehr unterschiedlich wirken, wenn ihre frühen Reflexionen, ihre spektrale Verteilung oder ihre Energieorganisation verschieden sind. Genau deshalb ist die differenzierte Analyse mehrerer Raumtypen für Game-Audio so wertvoll. Sie macht sichtbar, dass glaubwürdige virtuelle Räume nicht durch eine generische Hallästhetik entstehen, sondern durch eine gezielte Abstimmung raumtypischer Merkmale. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verteilung unterschiedlicher Raumtypen für Videospielakustik eine zentrale gestalterische und funktionale Rolle spielt. Sie beeinflusst die räumliche Orientierung, die Immersion, die dramaturgische Wirkung und die technische Implementierung akustischer Räume. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich kleine Räume, Korridore und mittelgroße Räume sowohl objektiv als auch subjektiv differenzierbar abbilden lassen und dass diese Differenzierung für eine überzeugende interaktive Audiogestaltung wesentlich ist. Für die Entwicklung von Game-Audio-Systemen folgt daraus, dass Raumakustik nicht als nachträglicher Effekt verstanden werden sollte, sondern als integraler Bestandteil der Weltgestaltung, der frühzeitig konzipiert und systematisch auf unterschiedliche Raumtypen abgestimmt werden muss.

5.1.2 Typische akustische Problemzonen

Im Verlauf der Analyse wurde deutlich, dass die Qualität einer Impulsantwort nicht allein von der grundsätzlichen Eignung des gewählten Raumtyps abhängt, sondern in hohem Maß auch von bestimmten akustischen Problemzonen beeinflusst wird. Solche Problemzonen treten sowohl im realen Raum als auch in der Simulation auf, äußern sich dort jedoch auf unterschiedliche Weise. Für die Bewertung der erzeugten und aufgenommenen Impulsantworten ist ihre Identifikation besonders wichtig, weil sie direkt auf die spätere klangliche Nutzbarkeit im Game-Audio-Kontext einwirken. Sie

beeinflussen die Wahrnehmung von Klarheit, Distanz, Räumlichkeit, Frequenzbalance und Natürlichkeit und können dazu führen, dass ein Raum trotz grundsätzlich plausibler Nachhallzeit unnatürlich, instabil oder schwer kontrollierbar wirkt.

Eine erste typische Problemzone betrifft den tieffrequenten Bereich. In nahezu allen untersuchten Raumantworten zeigte sich, dass tiefe Frequenzen länger ausschlagen als mittlere und hohe Frequenzen. Das ist raumakustisch zwar grundsätzlich erwartbar, da tiefe Frequenzen aufgrund ihrer größeren Wellenlängen in kleinen und mittelgroßen Innenräumen häufig weniger effektiv absorbiert werden. Problematisch wird dieser Bereich jedoch dann, wenn einzelne Frequenzbänder besonders stark hervortreten oder wenn der Bass nicht nur länger ausklingt, sondern zugleich ungleichmäßig verteilt ist. In solchen Fällen entsteht kein homogener tieffrequenter Nachhall, sondern ein modaler, teilweise resonanzartiger Charakter. Für die klangliche Wahrnehmung kann dies bedeuten, dass Kickdrums, tiefe Percussion- oder Bassanteile an Präzision verlieren. Sie wirken dann nicht mehr klar kontiniert, sondern aufgeweicht, dröhnend oder verschmiert. Gerade für die Videospielproduktion ist das relevant, weil tieffrequente Signale oft eine tragende Rolle für Wucht, Körperlichkeit und physische Präsenz spielen. Wenn dieser Bereich übertönt oder instabil ist, leidet nicht nur die Natürlichkeit des Raumklangs, sondern auch die funktionale Lesbarkeit des Audiosignals.

Eine zweite Problemzone liegt im Bereich der frühen Reflexionen. Diese prägen den ersten Höreindruck eines Raumes besonders stark und schlagen sich vor allem in erhöhten EDT-Werten oder in auffälligen Strukturen zu Beginn der Impulsantwort nieder. Frühe Reflexionen sind grundsätzlich nicht negativ; im Gegenteil, sie sind ein wesentlicher Bestandteil räumlicher Wahrnehmung. Problematisch werden sie dann, wenn sie zu stark, zu dicht oder spektral ungleich verteilt auftreten. In realen Räumen kann dies durch nahe Begrenzungsflächen, harte Materialien, asymmetrische Oberflächenverhältnisse oder lokale Streuobjekte verursacht werden. Die Folge ist häufig ein Raum, der subjektiv sehr präsent oder hallend wirkt, obwohl die linearen Nachhallzeiten im späteren Verlauf relativ kurz bleiben. Für Sprachsignale kann das zu verminderter Verständlichkeit führen, weil der eigentliche Direktschall weniger klar vom frühen Reflexionsfeld getrennt wahrgenommen wird. In musikalischen Anwendungen kann sich das in einem Verlust an Definition, in einer raueren Textur oder in einer Art gestörter Klangwahrnehmung äußern. Im Game-Audio-Bereich ist dies besonders kritisch, weil die frühen Reflexionen stark darüber entscheiden, ob ein Raum als glaubwürdig und räumlich differenziert oder als akustisch unruhig wahrgenommen wird.

Eine weitere typische Problemzone betrifft die spektrale Unruhe im Mittel- und Hochtonbereich. Während in synthetischen Impulsantworten die Kurven häufig geglättet und vergleichsweise stabil verlaufen, zeigen reale Impulsantworten oft stärkere bandweise Schwankungen. Diese können durch Materialeigenschaften, unregelmäßige Geometrien, Möblierung, kleine bauliche Details oder Störanteile in der Messung entstehen. Objektiv äußert sich dies in einem unruhigeren Verlauf von EDT, T20 und T30 sowie in einer ungleichmäßigeren Energieverteilung im Spektrogramm. Subjektiv kann ein solcher Bereich als schärfer, rauschig, körniger oder diffuser wahrgenommen werden. Besonders für Sprache ist dies problematisch, weil gerade die mittleren und hohen Frequenzen wesentlich für Konsonantenverständlichkeit, Präsenz und Klarheit verantwortlich sind. Wenn diese Frequenzbereiche durch spektrale Unruhe belastet sind, kann Sprache an Deutlichkeit verlieren oder härter und anstrengender klingen. Im Game-Audio-Kontext wirkt sich das unmittelbar auf Dialoge, Foley-Details oder Richtungsinformationen aus, die oft in genau diesen Frequenzbereichen liegen.

Ein weiterer kritischer Bereich ist die Diskrepanz zwischen frühem und linearem Abklingverhalten. In mehreren Analysen zeigte sich, dass EDT zum Teil deutlich höher ausfällt als T20 und T30. Ein solches Verhältnis ist akustisch plausibel und kann auf eine ausgeprägte Anfangsenergie hinweisen. Problematisch wird es dann, wenn diese Differenz so groß wird, dass der Raum in der Wahrnehmung zunächst deutlich hallender oder größer erscheint, als es die späteren linearen Nachhallwerte nahelegen. Dadurch entsteht ein akustisches Verhalten, das zwar nicht zwingend falsch ist, aber schwerer vorhersehbar und schwieriger kontrollierbar werden kann. Für die Videospielentwicklung ist dies deshalb relevant, weil interaktive Signale schnell und eindeutig lesbar bleiben müssen. Wenn der erste Höreindruck eines Raumes zu dominant ist, kann dies Transienten verdecken, kurze Ereignisse aufblähen oder die Distanzwahrnehmung verfälschen. Besonders bei dynamischen Spielabläufen mit vielen kurzen Einzelereignissen wie Fußschritten, Waffen, diegetischen Interface-Signalen oder sprachlichen Hinweisen kann eine zu starke frühe Energieverteilung die Präzision der akustischen Szene verringern.

Hinzu kommt die Problemzone der starken Frequenzabhängigkeit des Nachhalls. Grundsätzlich ist jede Raumantwort frequenzabhängig, doch in manchen Fällen fällt diese Abhängigkeit besonders ausgeprägt aus. Dann entsteht kein konsistenter Raumcharakter über das gesamte Spektrum, sondern eine Art Aufspaltung in unterschiedlich reagierende Teilbereiche: ein langanhaltender Bassbereich, ein kontrollierter Mittenbereich und zugleich ein unruhiger oder überbetonter Hochtonbereich. Ein solcher Raum kann zwar objektiv interessante Strukturen aufweisen, ist gestalterisch aber schwerer einsetzbar, weil unterschiedliche Signalarten sehr unterschiedlich reagieren. Sprache kann zu direkt und gleichzeitig rau wirken, Musik kann im Bass verschwimmen und im Hochton verrauschen, während perkussive Elemente ihre Kontur verlieren. Für die praktische Anwendung in Spielen ist ein solcher Raum problematisch, weil er keine konsistente akustische Signatur für verschiedene Soundklassen liefert. Statt den Raumcharakter zu unterstützen, beginnt er, einzelne Signaltypen auf unerwünschte Weise zu verfärben.

Eine weitere typische Problemzone ergibt sich durch lokale Resonanzen und modale Verdichtungen. Diese treten besonders häufig in kleinen Räumen oder in länglichen Raumformen wie Korridoren auf. Sie zeigen sich im frequenzbasierten Verlauf als einzelne Ausschläge, im Decay als länger stehende Bereiche und im Spektrogramm als einzelne konzentrierte Energieansammlungen in bestimmten Frequenzonen. Solche Resonanzen können den Charakter eines Raumes zwar stark prägen, gleichzeitig aber zu einer Überrepräsentation einzelner Frequenzen führen. Klanglich äußert sich das oft als Dröhnen, Hohlheit oder als eine unnatürliche Betonung bestimmter Tonhöhenlagen. Für die Videospielentwicklung kann das problematisch sein, weil dadurch die klangliche Neutralität des Raumes verloren geht. Statt einen Raumtyp allgemein erkennbar zu machen, werden einzelne Resonanzfrequenzen dominierend. Das reduziert die Übertragbarkeit der Impulsantwort auf unterschiedliche Audiosignale und kann insbesondere bei wiederholt auftretenden Geräuschen störend wirken.

Im Zusammenhang mit realen Messungen kommt außerdem die Problemzone des Störgeräuschanteils hinzu. Anders als synthetische Impulsantworten enthalten reale Aufnahmen potenziell Nebengeräusche, Systemrauschen, Luftbewegungen, elektrische Störungen oder Verfälschungen durch die Signalkette. Solche Anteile müssen nicht immer sofort im Impulsdiagramm dominant sichtbar sein, können sich aber im Hochtonbereich, in der Spätphase oder in einer allgemein raueren spektralen Struktur bemerkbar machen. Subjektiv wird dies oft als zusätzlicher Noise-Anteil, als Härte oder als unruhigere Textur wahrgenommen. Für die objektive Analyse erschwert Rauschen

zudem die Interpretation der späteren Abklingphasen, weil insbesondere T20- und T30-Auswertungen dann weniger stabil werden können. Im Game-Audio-Kontext ist dies besonders relevant, da Impulsantworten meist nicht nur analysiert, sondern auch praktisch verwendet werden. Ein erhöhter Störanteil wird bei der Faltung mit Audiomaterial nicht neutral behandelt, sondern unter Umständen mit in den finalen Klang übertragen.

Als weitere Problemzone erweist sich die Überkontrolliertheit synthetischer Impulsantworten. Während reale Räume häufig unter spektraler Unruhe, Resonanzen und ungleichmäßigen Reflexionsmustern leiden, kann das Gegenteil bei synthetischen Raumantworten ebenfalls problematisch sein. Wenn eine Simulation zu glatt, zu gleichmäßig und zu sauber modelliert ist, entsteht zwar eine technisch gut kontrollierbare, aber womöglich akustisch zu generische Raumantwort. Der Raum klingt dann zwar nicht fehlerhaft, aber möglicherweise weniger individuell, weniger lebendig oder weniger glaubwürdig. Für die Game-Entwicklung ist das insofern problematisch, da eine zu neutrale Raumantwort zwar funktional sein kann, aber die charakteristische Identität eines Ortes nur unzureichend transportiert. Typische Problemzonen in synthetischen Modellen sind daher nicht nur zu hohe oder zu niedrige Nachhallzeiten, sondern auch ein Mangel an mikrostruktureller Komplexität und eine zu starke Regularisierung des Frequenzverlaufs.

Darüber hinaus ist die Übergangszone zwischen Frequenzbereichen häufig akustisch kritisch. Problematisch sind dabei nicht nur sehr tiefe oder sehr hohe Frequenzen, sondern gerade die Bereiche, in denen sich das Verhalten eines Raumes deutlich verändert. Wenn beispielsweise der Bassbereich noch lang nachschwingt, der mittlere Bereich aber schon stark kontrolliert ist, kann dies zu einem unbalancierten Gesamteindruck führen. Ähnliches gilt, wenn der Hochtonbereich plötzlich stärker verrauscht oder diffuser wird als der restliche Raumcharakter. Solche Brüche erschweren eine konsistente Wahrnehmung des Raumes und können dazu führen, dass ein Signal nicht als einheitlich im selben Raum eingebettet erlebt wird. Für interaktive Audioanwendungen ist gerade diese Balance wichtig, weil Soundeffekte mit verschiedenen Frequenztendenzen eine unterschiedliche Raumcharakteristik erhalten, was zum Bruch der Immersion des Erlebenden führt.

Aus der Gesamtschau der Analysen lässt sich ableiten, dass typische akustische Problemzonen nicht isoliert auftreten, sondern meist miteinander verbunden sind. Ein verlängerter Bassbereich kann mit modalen Resonanzen zusammenfallen; starke frühe Reflexionen können erhöhte EDT-Werte erzeugen; spektrale Unruhe kann die subjektive Wahrnehmung von Verzerrung, Härte und Noise-Verhältnis verstärken; und eine zu starke Glättung in der Simulation kann umgekehrt zu einem Mangel an realistischem Raumcharakter führen. Genau deshalb ist ihre systematische Identifikation so wichtig. Sie erlaubt nicht nur eine präzise Beschreibung der Raumantworten, sondern auch eine bessere Entscheidung darüber, welche Impulsantworten sich für den praktischen Einsatz eignen und an welchen Stellen Nachbearbeitung, Auswahl oder Neuaufnahme notwendig sind.

Für die Bedeutung im Game-Audio lässt sich daraus schließen, dass typische akustische Problemzonen immer unter einem doppelten Gesichtspunkt bewertet werden müssen: Einerseits als messtechnische Auffälligkeit, andererseits als klangliche und funktionale Konsequenz. Nicht jede Unregelmäßigkeit ist automatisch negativ; manche trägt sogar zur charakteristischen Identität eines Raumes bei. Problematisch wird sie dann, wenn sie die Klarheit, Steuerbarkeit oder Wiedererkennbarkeit des Raumtyps beeinträchtigt. Die Herausforderung besteht deshalb nicht darin, jede Abweichung zu eliminieren, sondern zwischen charakterbildender Komplexität und störender Instabilität zu unterscheiden.

Zusammenfassend zeigen sich als typische akustische Problemzonen vor allem verlängerte und ungleichmäßige Bassanteile, überbetonte frühe Reflexionen, spektrale Unruhe im Mittel- und Hochtonbereich, starke Unterschiede zwischen EDT und linearen Nachhallparametern, lokale Resonanzen sowie potenzielle Störanteile realer Messungen. Ergänzt wird dies auf der Simulationsseite durch das gegenteilige Risiko einer zu glatten und zu stark regularisierten Raumantwort. Für die Gestaltung und Bewertung von Impulsantworten im Game-Audio-Kontext bedeutet dies, dass nicht nur mittlere Nachhallwerte, sondern vor allem die konkrete Struktur solcher Problemzonen entscheidend dafür ist, ob ein Raum klanglich überzeugend und funktional einsetzbar ist.

5.2. Eignung von BOOM Artificial IR für Games

5.2.1 Stärken

Im Rahmen der Untersuchung zeigt sich, dass BOOM Artificial IR für den Einsatz im Bereich Videospielentwicklung im Audibereich in mehrfacher Hinsicht gut geeignet ist. Die Stärken des Tools liegen dabei nicht nur in der eigentlichen Erzeugung künstlicher Impulsantworten, sondern auch in seiner praktischen Handhabung, seiner gestalterischen Flexibilität und seiner Anwendbarkeit innerhalb iterativer Produktionsprozesse. Gerade für die Entwicklung interaktiver Audiowelten ist dies von besonderer Bedeutung, da dort nicht nur akustische Plausibilität, sondern auch Geschwindigkeit, Anpassbarkeit und kreative Steuerbarkeit eine zentrale Rolle spielen.

Eine wesentliche Stärke von BOOM Artificial IR ist zunächst die benutzerfreundliche Oberfläche. Das Interface ist übersichtlich aufgebaut und erlaubt einen vergleichsweise direkten Zugang zur Erzeugung und Bearbeitung von Raumantworten. Für den Produktionsalltag bedeutet das, dass nicht erst ein komplexer technischer Mess- oder Analyseprozess erforderlich ist, um zu verwertbaren Ergebnissen zu kommen. Stattdessen können relevante Raumparameter schnell erfasst, angepasst und ausprobiert werden. Gerade im Game-Audio-Kontext, in dem häufig mit vielen Räumen, Übergängen und Varianten gearbeitet wird, ist diese niedrige Zugangsschwelle ein klarer Vorteil. Das Tool eignet sich dadurch nicht nur für sehr technisch spezialisierte Workflows, sondern auch für kreative Sounddesign-Prozesse, in denen ein schneller Wechsel zwischen Hören, Anpassungen und erneuter Ausgabe erforderlich ist.

Eng damit verbunden ist die leichte Verwendbarkeit im iterativen Arbeiten. Ein besonders großer praktischer Vorteil besteht darin, dass künstliche Impulsantworten beliebig oft neu gerendert werden können. Das ist für Game-Audio ausgesprochen wertvoll, weil Raumklang in Spielen selten schon beim ersten Versuch final feststeht. Vielmehr entstehen viele Entscheidungen erst im Zusammenspiel mit Leveldesign, Musik, Foley, Sprache und Gameplay. Wenn eine Raumantwort zu trocken, zu hallend, zu dumpf oder zu glatt wirkt, kann sie ohne großen zusätzlichen Aufwand angepasst und neu exportiert werden. Diese Wiederholbarkeit erleichtert das Feintuning erheblich. Im Unterschied zu realen Aufnahmen, bei denen jede neue Variante unter Umständen einen neuen Messaufbau, neue technische Kontrolle und einen erneuten Ortsbesuch erfordert, bleibt der synthetische Workflow deutlich effizienter und kontrollierter.

Gerade darin liegt eine weitere Stärke: BOOM Artificial IR erlaubt eine hohe gestalterische Kontrolle über den Raumcharakter. Die Ergebnisse der Arbeit haben gezeigt, dass synthetische Impulsantworten häufig homogener, stabiler und kontrollierter ausfallen als reale Messungen. Für

Game-Audio ist das nicht zwingend ein Nachteil, sondern oft ein Vorteil. In interaktiven Anwendungen muss ein Raum nicht nur realistisch, sondern vor allem funktional einsetzbar sein. Ein zu unruhiger oder messtechnisch roher Raum kann Sprache verschleiern, Transienten verschmieren oder bestimmte Soundeffekte übermäßig verfärbten. Die künstlich erzeugten Raumantworten bleiben dagegen meist konsistenter und berechenbarer. Dadurch lassen sie sich leichter in ein Spielsystem integrieren und gezielter auf unterschiedliche Soundklassen abstimmen.

Hinzu kommt, dass sich synthetische Raumantworten mit BOOM Artificial IR gut dafür eignen, Räume bewusst zu stilisieren. Genau das ist für Game-Audio besonders relevant. In Spielen geht es häufig nicht um eine rein dokumentarische Abbildung realer Räume, sondern um eine dramaturgisch oder atmosphärisch sinnvolle Zuspitzung. Ein Raum darf also akustisch größer, härter, dichter, trockener und diffuser wirken, als er es physikalisch exakt wäre, wenn dies der gewünschten Wirkung dient. BOOM Artificial IR ist in diesem Zusammenhang besonders nützlich, weil es nicht an die Zufälligkeiten und Unregelmäßigkeiten realer Messungen gebunden ist. Stattdessen können Raumantworten gezielt so gestaltet werden, dass sie einen bestimmten Raumtyp nicht nur imitieren, sondern in ihrer Wirkung verstärken. Für Horrorspiele, Sci-Fi-Umgebungen, stilisierte Innenräume oder überzeichnete akustische Perspektiven ist das ein klarer gestalterischer Vorteil.

Gerade diese Stilisierung ist im Game-Audio-Kontext vielleicht sogar eine der wichtigsten Stärken überhaupt. Ein realistischer Raum ist nicht automatisch der beste Raum für ein Spiel. Oft ist es wirksamer, einen Raum in seinen charakteristischen Eigenschaften leicht zu überhöhen, damit er für Spielende klarer wahrnehmbar wird. Ein Korridor darf dadurch etwas schärfer und markanter erscheinen, ein kleiner Raum etwas direkter und enger, ein größerer Raum etwas offener und atmosphärischer. BOOM Artificial IR bietet dafür eine gute Grundlage, weil die synthetischen Impulsantworten nicht nur reproduzierbar, sondern auch formbar sind. Das macht das Tool zu einem gestalterischen Werkzeug und nicht bloß zu einem Ersatz für reale Messungen.

Eine weitere Stärke liegt in der Konsistenz der Ergebnisse. Während reale Impulsantworten oft stärker von Nebengeräuschen, Aufnahmebedingungen, Lautsprecherwahl, Mikrofonpositionierung, Deconvolution-Problemen oder anderen Messunsicherheiten beeinflusst werden, bleiben die künstlich erzeugten Varianten deutlich robuster. Im Verlauf der Analyse hat sich klar gezeigt, dass reale Aufnahmen ab einem bestimmten Punkt deutlich störanfälliger wurden und in mehreren Fällen neu überprüft oder neu aufgenommen werden mussten. Genau hier zeigt sich ein großer Vorteil von BOOM Artificial IR: Die synthetische Erzeugung ist von solchen praktischen Problemen weitgehend unabhängig. Dadurch entsteht ein stabiler Arbeitsprozess, in dem man sich stärker auf die eigentliche klangliche Gestaltung konzentrieren kann als auf messtechnische Fehlerquellen.

Auch aus produktionstechnischer Sicht ist das Tool für Games besonders geeignet, weil es schnell Variantenbildung ermöglicht. In einem Spiel gibt es selten nur einen einzigen Raum. Oft braucht es zahlreiche leicht unterschiedliche akustische Umgebungen: mehrere kleine Räume, verschiedene Korridore, Übergangsbereiche, größere Innenräume oder stilisierte Sonderräume. Ein Tool, mit dem Varianten zügig erzeugt und gegeneinander getestet werden können, ist deshalb besonders wertvoll. Genau das leistet BOOM Artificial IR. Es erlaubt, auf einer gemeinsamen Grundlage mehrere Raumantworten zu erstellen, die in ihrer Grundcharakteristik verwandt, aber dennoch differenziert sind. Das unterstützt ein konsistentes akustisches Welt-Design, ohne dass jede einzelne Raumantwort völlig neu gemessen werden muss.

Darüber hinaus ist positiv hervorzuheben, dass BOOM Artificial IR sich gut für frühe Produktionsphasen und Prototypisierung eignet. Gerade in der Entwicklung von Games müssen Audioideen oft schon zu einem Zeitpunkt ausprobiert werden, an dem noch keine finalen Räume, keine kompletten Levels und keine endgültigen Assets vorhanden sind. In solchen Phasen ist eine schnelle, stilistisch passende und technisch unkomplizierte Raumantwort oft wertvoller als eine aufwendig gemessene, aber schwer anpassbare reale Impulsantwort. Das Tool erlaubt es, früh einen plausiblen Raumcharakter herzustellen und später gezielt nachzuschärfen. Damit unterstützt es agile Arbeitsweisen und iterative Sounddesign-Prozesse sehr gut.

Was außerdem auffällt, ist die gute Lesbarkeit des resultierenden Raumcharakters. Die synthetischen Impulsantworten zeigen in den Analysen meist ein klareres und regelmäßigeres Verhalten in Impulsdigramm, Decay, RT60-Verlauf und Spektrogramm. Das heißt nicht, dass sie automatisch besser oder realistischer sind, aber sie sind in ihrer Struktur leichter interpretierbar und oft einfach auf eine gewünschte Wirkung hin einzuschätzen. Gerade im Arbeitskontext kann das hilfreich sein, weil man schneller versteht, warum eine bestimmte Raumantwort so klingt, wie sie klingt. Auch das erleichtert gezielte Korrekturen und kreative Entscheidungen.

Aus der weiteren Analyse lässt sich außerdem ableiten, dass die künstlichen Impulsantworten häufig klarer, definierter und kontrollierter wirken, insbesondere bei Sprache und bei tieffrequenten Transienten. Subjektiv wurde mehrfach wahrgenommen, dass Stimmen in den synthetischen Varianten oft klarer und näher erschienen, während reale Aufnahmen teilweise hallender, zerfaserter, verrauschter oder im Bassbereich diffuser wirkten. Auch wenn solche Eindrücke nicht isoliert bewertet werden dürfen, zeigen sie doch eine für Games sehr relevante Stärke: BOOM Artificial IR erzeugt Raumantworten, die akustisch oft besser kontrollierbar bleiben und wichtige Inhalte wie Sprache oder rhythmische Elemente weniger stark verwischen. Für Spiele, in denen Sprachverständlichkeit, Signalpräzision und Mischungssicherheit wichtig sind, ist das ein praktischer Vorteil.

Eine weitere Stärke besteht schließlich darin, dass BOOM Artificial IR eine gute Balance zwischen technischer Plausibilität und kreativer Nutzbarkeit bietet. Die erzeugten Impulsantworten sind nicht bloß abstrakte Halleffekte, sondern weisen durchaus raumtypische Merkmale auf. Gleichzeitig bleiben sie flexibel genug, um nicht an strenge physikalische Messrealität gebunden zu sein. Genau diese Balance ist für Game-Audio besonders geeignet. Spiele benötigen oft keine vollkommen exakte akustische Dokumentation, sondern überzeugende, funktionale und atmosphärisch wirksame Räume. In diesem Spannungsfeld kann BOOM Artificial IR seine Stärken besonders gut ausspielen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass BOOM Artificial IR für den Einsatz im Game-Audio-Bereich vor allem durch seine Benutzerfreundlichkeit, die leichte Bedienbarkeit, die hohe Wiederholbarkeit des Renderings, die gestalterische Flexibilität, die gute Eignung zur Stilisierung von Raumantworten sowie die stabile und kontrollierte Struktur der erzeugten Ergebnisse überzeugt. Besonders im Vergleich zu aufwendigeren und störanfälligeren Messprozessen realer Impulsantworten bietet das Tool eine effiziente und praxisnahe Möglichkeit, virtuelle Räume akustisch differenziert zu gestalten. Für Games, in denen Raumklang nicht nur realistisch, sondern vor allem funktional, atmosphärisch und systematisch einsetzbar sein muss, stellt BOOM Artificial IR damit ein sehr geeignetes Werkzeug dar.

5.2.2 Limitationen

Trotz der genannten Stärken zeigt die Arbeit auch deutlich die Grenzen von BOOM Artificial IR. Diese betreffen sowohl die technische Modellierung der Räume als auch die klangliche Wirkung der resultierenden Impulsantworten. Für den praktischen Einsatz im Game-Audio bedeutet das nicht, dass das Tool ungeeignet wäre, wohl aber, dass seine Ergebnisse mit Blick auf Realismus, Detailtiefe und spektrale Komplexität kritisch eingeordnet werden müssen.

Eine erste wesentliche Limitation liegt in der begrenzten Materialauswahl. Reale Räume werden akustisch stark durch die Kombination vieler Oberflächen geprägt: verschiedene Wandmaterialien, Bodenbeläge, Deckenstrukturen, Türen, Fenster, Möbel, textile Elemente und kleinere unregelmäßige Objekte. In BOOM Artificial IR kann diese Vielfalt nur eingeschränkt abgebildet werden. Wenn nur eine reduzierte Anzahl an Materialtypen oder vereinfachte Materialkategorien zur Verfügung steht, führt das zwangsläufig zu einer stärkeren Abstraktion des realen Raumes. Die Simulation kann dann zwar einen allgemeinen Raumcharakter erzeugen, aber nicht alle materialbedingten Feinheiten reproduzieren, die in echten Räumen für Streuung, Dämpfung und spektrale Färbung verantwortlich sind.

Hinzu kommt die begrenzte räumliche Auflösung bei der Modellierung von Objektgrößen und Raumdimensionen. Wenn Größen nur in groben Schritten, etwa in Dezimetern, eingestellt werden können, erschwert das eine präzise Nachbildung realer Geometrien. Gerade in der Raumakustik können schon kleinere Maßabweichungen Auswirkungen auf Reflexionsverläufe, Resonanzen und frühe Laufzeiten haben. Für große Grundformen mag diese Rasterung noch ausreichend sein, bei kleineren Details, Möbeln, Nischen, Türöffnungen oder asymmetrischen Strukturen wird die Modellierung jedoch möglicherweise zu grob. Dadurch geht ein Teil der mikrogeometrischen Komplexität verloren, die reale Impulsantworten oft gerade so charakteristisch macht.

Eine weitere Limitation zeigt sich in der bereits mehrfach beobachteten starken Glättung der erzeugten Raumantworten. Die synthetischen Impulsantworten wirken in vielen Fällen homogener, stabiler und spektral ruhiger als die real gemessenen Varianten. Das ist einerseits praktisch, weil die Ergebnisse kontrollierbar und sauber bleiben. Andererseits kann genau diese Glätte dazu führen, dass die Impulsantworten weniger lebendig, weniger individuell und in gewisser Weise weniger glaubwürdig wirken. Reale Räume enthalten kleine Unregelmäßigkeiten, lokale Resonanzen, diffuse Streuungen und bandweise Abweichungen, die im Modell oft nur abgeschwächt oder gar nicht erscheinen. Dadurch kann der Klang zwar funktional gut nutzbar sein, aber zugleich etwas regularisiert ausfallen.

Darüber hinaus scheint BOOM Artificial IR die frühe Reflexionsstruktur realer Räume nur begrenzt nachbilden zu können. In den Vergleichen zeigte sich mehrfach, dass insbesondere die EDT in realen Impulsantworten stärker ausgeprägt war als in den synthetischen Varianten. Das deutet darauf hin, dass das Tool zwar den späteren linearen Abklingbereich häufig plausibel annähert, die komplexe Anfangsphase realer Räume aber tendenziell vereinfacht. Gerade diese frühe Phase ist jedoch für die subjektive Wahrnehmung von Räumlichkeit, Nähe, Präsenz und Klarheit besonders wichtig. Für Game-Audio kann das bedeuten, dass synthetische Räume zwar technisch stimmig sind, aber in der ersten Wahrnehmung etwas weniger charaktervoll oder weniger räumlich komplex wirken.

Eine weitere Grenze liegt in der eingeschränkten Abbildung akustischer Zufälligkeit und Unregelmäßigkeit. Reale Räume verhalten sich selten vollständig symmetrisch oder idealisiert. Kleinste bauliche Unterschiede, Oberflächenfehler, Kanten, hervorstehende Elemente oder Möblierungsdetails führen dazu, dass die Raumantwort lokal unruhiger und frequenzabhängiger wird. Ein Simulationswerkzeug wie BOOM Artificial IR muss solche Einflüsse notwendigerweise

vereinfachen. Dadurch entsteht eine systematische Tendenz zur akustischen Idealisierung. Für manche Anwendungen ist das nützlich, für andere jedoch problematisch, weil genau diese Unsauberkeiten oft zur charakteristischen Identität eines Raumes beitragen.

Ebenfalls zu nennen ist die begrenzte Authentizität bei spezifischen Sonderräumen. Solange es um allgemein verständliche Raumtypen geht, wie kleine Räume, mittelgroße Räume oder Korridore, kann das Tool überzeugende Ergebnisse liefern. Schwieriger wird es bei sehr spezifischen, ungewöhnlichen oder architektonisch stark geprägten Räumen. Dort reichen generische Material- oder Geometrieparameter oft nicht aus, um die tatsächliche Raumcharakteristik überzeugend abzubilden. Das bedeutet, dass BOOM Artificial IR besonders gut für typisierte oder stilisierte Räume geeignet ist, aber an seine Grenzen stößt, sobald eine sehr exakte Reproduktion eines konkreten Ortes gefragt ist.

Eine weitere Limitation betrifft die eingeschränkte Kopplung an reale Messbedingungen. Reale Impulsantworten enthalten nicht nur die Raumantwort an sich, sondern auch implizit Informationen über Lautsprechercharakteristik, Mikrofonposition, Richtwirkung, reale Abstrahlbedingungen und die konkrete Aufnahmesituation. Diese Faktoren sind in einer künstlichen Erzeugung entweder nicht vorhanden oder nur indirekt berücksichtigt. Dadurch bleiben synthetische Impulsantworten zwangsläufig abstrakter als reale Aufnahmen. Für die praktische Verwendung ist das nicht zwingend negativ, aber für die Frage der Authentizität und Vergleichbarkeit mit realen Räumen stellt es eine methodische Einschränkung dar.

Auch aus Sounddesign-Sicht gibt es eine wichtige Grenze: Die gute Kontrollierbarkeit kann dazu verleiten, Räume zu stark nach funktionalen Kriterien und zu wenig nach plausiblen Unregelmäßigkeiten zu gestalten. Das Ergebnis ist dann zwar technisch sauber, aber möglicherweise weniger organisch. Gerade in Spielen, in denen Immersion stark über subtile akustische Details entsteht, kann eine zu glatte Raumantwort auf Dauer künstlich oder wenig ortsspezifisch wirken. Anders gesagt: Die Stärke der Bearbeitbarkeit ist zugleich eine Schwäche, da sie das Risiko erhöht, einen Raum zu erzeugen, der eher wie ein gut kontrollierter Effekt als wie ein tatsächlich vorhandener Ort klingt.

Schließlich ist auch zu berücksichtigen, dass BOOM Artificial IR zwar sehr gut für Stilisierung geeignet ist, diese Stilisierung aber immer innerhalb der Grenzen des zugrunde liegenden Modells stattfindet. Das Tool erlaubt also keine unbegrenzte akustische Freiheit, sondern nur eine Variation innerhalb eines vorgegebenen Systems. Wenn die strukturellen Annahmen des Systems bestimmte Arten von Resonanzen, Diffusionen oder Materialreaktionen nicht ausreichend erfassen, lassen sich diese auch durch wiederholtes Rendern oder Parameteranpassungen nur begrenzt herstellen. Die kreative Flexibilität ist also groß, aber nicht grenzenlos.

Zusammenfassend liegen die zentralen Limitationen von BOOM Artificial IR in der reduzierten Materialvielfalt, der groben Einstellbarkeit geometrischer Größen, der tendenziell zu glatten und regularisierten Raumantworten, der begrenzten Nachbildung komplexer früher Reflexionen, der nur eingeschränkten Abbildung realer Unregelmäßigkeiten sowie der geringen Authentizität bei sehr spezifischen oder stark charakterprägenden Räumen. Für den Einsatz im Game-Audio-Kontext bedeutet das, dass das Tool besonders stark ist, wenn kontrollierte, stilisierte und effizient erzeugbare Raumantworten benötigt werden, während es bei maximaler Realitätsnähe und mikroakustischer Detailtreue an Grenzen stößt.

5.2.3 Besonders geeignete Raumtypen

Im Verlauf der Untersuchung zeigt sich, dass sich BOOM Artificial IR nicht für alle Raumtypen in gleichem Maße eignet, sondern seine Stärke besonders dort ausspielt, wo Räume in ihrer akustischen Struktur klar typisierbar, geometrisch nachvollziehbar und gestalterisch kontrollierbar sind. Die Eignung hängt dabei weniger davon ab, ob ein Raum einfach oder komplex ist, sondern vielmehr davon, welche akustischen Merkmale für seine Wahrnehmung entscheidend sind und wie stark diese Merkmale durch das Simulationsmodell angemessen wiedergegeben werden können.

Besonders geeignet scheint BOOM Artificial IR zunächst für kleine bis mittelgroße Innenräume, deren Charakter vor allem durch eine kompakte Raumgeometrie, frühe Reflexionen und relativ kurze Nachhallzeiten bestimmt wird. In solchen Räumen ist der Hall nicht primär durch lange diffuse Ausschwingphasen geprägt, sondern durch eine überschaubare und für das Hören gut lesbare Kombination aus Direktschall, frühen Reflexionen und einem begrenzten Nachhallauslauf. Genau in diesem Bereich zeigt sich das Tool als stark: Die synthetischen Impulsantworten wirkten kontrolliert, konsistent und grundsätzlich plausibel, ohne dass der Raumcharakter vollständig verloren ging. Gerade kleine Räume profitieren davon, dass BOOM Artificial IR einen akustisch sauberen und zugleich räumlich nachvollziehbaren Eindruck erzeugen kann. Für Spiele bedeutet das, dass etwa Schlafzimmer, Büros, kleine Kammern oder ähnlich kompakte Innenräume mit relativ geringem Aufwand überzeugend stilisiert oder angenähert werden können.

Ebenfalls besonders geeignet sind funktionale Innenräume mit klarer akustischer Aufgabe, also Räume, deren Bedeutung im Spiel weniger in einzigartiger architektonischer Identität als in einer nachvollziehbaren räumlichen Einordnung liegt. Dazu zählen beispielsweise kleine technische Räume, Arbeitsräume, Unterrichtsräume, Büros oder generische Innenbereiche in Wohn- oder Funktionsgebäuden. Solche Räume müssen im Spiel oft vor allem als Raumklasse funktionieren. Das heißt: Sie sollen hörbar anders sein als ein Flur oder eine große Halle, müssen aber nicht zwingend die vollständige akustische Individualität eines real gemessenen Ortes besitzen. Für diese Art von Räumen ist eine synthetische Impulsantwort besonders geeignet, weil sie genau die nötige Balance zwischen Wiedererkennbarkeit, Konsistenz und Kontrollierbarkeit bietet.

Auch Korridore und lineare Durchgangsräume gehören zu den Raumtypen, für die sich BOOM Artificial IR besonders gut eignet. Gerade beim Korridor zeigte sich in der Untersuchung, dass die synthetische Impulsantwort den Grundcharakter des Raumes gut treffen kann. Korridore besitzen typischerweise ein akustisches Profil, das nicht primär von langem Hall, sondern von frühen, gerichteten Reflexionen und einer linearen Raumstruktur geprägt ist. Solche geometrisch klaren Verhältnisse lassen sich durch ein Simulationsmodell gut abbilden. Zudem ist der Korridor im Game-Audio ein besonders wichtiger Raumtyp, weil er häufig als Übergangsraum fungiert und deshalb akustisch deutlich von benachbarten Raumklassen abgesetzt werden sollte. Wenn ein Spiel Räume nicht nur visuell, sondern auch akustisch unterscheidbar machen will, ist gerade der Korridor ein Raumtyp, bei dem eine synthetische Impulsantwort einen hohen praktischen Nutzen haben kann.

Besonders geeignet ist BOOM Artificial IR außerdem für stilisiert gestaltete Spielräume, bei denen nicht die exakte physikalische Reproduktion eines realen Vorbilds im Vordergrund steht, sondern die gezielte klangliche Wirkung. In solchen Fällen ist es sogar von Vorteil, dass die erzeugten Impulsantworten tendenziell glatter, geordneter und leichter kontrollierbar ausfallen als reale Messungen. Spiele benötigen häufig keine perfekte raumakustische Dokumentation, sondern einen Raum, der sich im Spielkontext funktional und atmosphärisch richtig anfühlt. Kleine Räume können

etwas kompakter, Flure etwas markanter und mittelgroße Räume etwas kontrollierter modelliert werden, ohne dass dies negativ auffällt. Gerade für stilisierte, atmosphärisch aufgeladene oder dramaturgisch zugespitzte Räume eignet sich das Tool deshalb besonders gut. Es erlaubt, charakteristische Raumprofile zu erzeugen, die glaubwürdig wirken, ohne an die vollständige Unordnung realer Raumantworten gebunden zu sein.

Ein weiterer besonders geeigneter Einsatzbereich sind frühe Produktionsphasen und Prototypisierungssituationen. Wenn in einem Spiel bereits akustische Raumcharaktere benötigt werden, bevor finale Levels, Assets oder Aufnahmebedingungen feststehen, bietet BOOM Artificial IR einen klaren Vorteil. Raumtypen können in dieser Phase zunächst auf ihre Grundwirkung hin gebaut und später verfeinert werden. Gerade Raumtypen, die sich häufig wiederholen oder als akustische Basiskategorien dienen, profitieren von dieser Arbeitsweise. Kleine Innenräume, Flure, Seminarräume, Lobbys, Keller- oder Technikräume können auf diese Weise effizient vorstrukturiert werden, ohne dass für jeden Raumtyp eine reale Messung notwendig ist.

Besonders geeignet scheint das Tool auch für Räume, bei denen Sprachverständlichkeit und klangliche Kontrolle wichtiger sind als maximale physikalische Detailtreue. In der subjektiven Analyse zeigt sich mehrfach, dass synthetische Impulsantworten Stimmen oft klarer, direkter und kontrollierter erscheinen lassen als reale Messungen. Für viele Spiele ist genau das von großem Wert: Dialoge, Hinweise oder zentrale Spielereignisse müssen verständlich und präzise bleiben, auch wenn sie räumlich eingebettet werden. Räume, in denen viel Sprache stattfindet oder in denen akustische Präzision funktional wichtig ist, sind deshalb besonders gut für synthetische Impulsantworten geeignet. Hier kann die leichte Glättung des Nachhalls sogar ein Vorteil sein, wenn sie den Raumcharakter erhält, ohne die Verständlichkeit übermäßig zu verschleiern.

Ebenfalls günstig sind Raumtypen, deren Wahrnehmung vor allem von groben Klassenmerkmalen und nicht von feinsten spektralen Besonderheiten getragen wird. Ein kleiner Raum muss hörbar klein, ein Flur hörbar linear, ein mittelgroßer Raum hörbar offen sein. Solche Unterschiede lassen sich durch synthetische Impulsantworten oft sehr gut darstellen, selbst wenn einzelne Mikrostrukturen oder reale Unregelmäßigkeiten reduziert sind. Das bedeutet, dass BOOM Artificial IR besonders dann stark ist, wenn der Raumtyp als akustische Kategorie funktionieren soll, nicht unbedingt als exakte Nachbildung eines einzigartigen architektonischen Sonderfalls.

Weniger zentral, aber ebenfalls relevant, ist die gute Eignung für modular aufgebaute Spielwelten. In vielen Games entstehen Räume aus wiederkehrenden Bausteinen: Korridorsegmente, Standardzimmer, technische Nebenräume, Büros, Krankenzimmer oder ähnliche Raumtypen wiederholen sich in leicht variierten Form. Für diese Art von Raumdesign ist ein Tool wie BOOM Artificial IR besonders passend, weil es erlaubt, aus einer grundlegenden Raumklasse mehrere Varianten zu erzeugen, ohne jedes Mal bei null zu beginnen. Besonders geeignete Raumtypen sind daher auch solche, die in der Spielwelt mehrfach auftreten und deshalb eine konsistente, aber variierbare akustische Grundsignatur benötigen.

Aus der Perspektive dieser Arbeit lässt sich festhalten, dass vor allem kleine Räume, Korridore und mittelgroße funktionale Innenräume besonders geeignete Einsatzbereiche darstellen. Genau diese Raumtypen profitieren davon, dass BOOM Artificial IR kontrollierte, wiederholbare und stilisierte Impulsantworten erzeugen kann. Sie sind akustisch ausreichend charakteristisch, um klar unterscheidbar zu bleiben, gleichzeitig aber nicht so komplex zu sein, dass jede Vereinfachung sofort zu einem deutlichen Glaubwürdigkeitsverlust führt. Die Ergebnisse legen nahe, dass BOOM Artificial

IR insbesondere dort stark ist, wo ein Raum typisch, häufig, funktional und gestalterisch gut kontrollierbar sein soll.

5.3. Zukunftsaussichten für BOOM Artificial IR

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten darauf hin, dass BOOM Artificial IR grundsätzlich Potenzial für einen Einsatz in der Game-Entwicklung besitzt. Damit das Programm jedoch als eigenständiges Produkt für diesen Bereich erfolgreich auf dem Markt etabliert werden könnte, wären aus heutiger Sicht weitere technische und konzeptionelle Entwicklungen sinnvoll. Dabei geht es nicht nur um eine Verbesserung der akustischen Modellierung selbst, sondern auch um Fragen der Benutzerfreundlichkeit, der Produktionsintegration und der Konkurrenzfähigkeit gegenüber bereits etablierten Lösungen.

Ein erster wichtiger Aspekt betrifft die Positionierung im Marktumfeld. Soll BOOM Artificial IR langfristig als Werkzeug für Game-Audio relevant werden, müsste untersucht werden, welche Funktionen konkurrierende Programme bereits bieten und an welchen Stellen sich das Tool davon abheben könnte. Eine Marktanalyse wäre in diesem Zusammenhang sinnvoll, um zu identifizieren, welche Anforderungen in der Spieleentwicklung besonders wichtig sind und welche Funktionen derzeit möglicherweise noch fehlen. Erst auf dieser Grundlage ließe sich gezielt weiterentwickeln, ob der Schwerpunkt eher auf Realismus, Workflow-Integration, Stilisierung oder Benutzerfreundlichkeit gelegt werden sollte.

Ein besonders relevanter Punkt für die praktische Nutzbarkeit wäre die Kompatibilität mit gängiger Game-Audio-Software, wie Wwise oder FMOD. Da diese Middleware-Lösungen in der Spieleentwicklung eine zentrale Rolle spielen, würde eine möglichst direkte Anschlussfähigkeit an solche Systeme den praktischen Wert von BOOM Artificial IR deutlich erhöhen. Für die Produktionspraxis wäre es ein großer Vorteil, wenn künstlich erzeugte Impulsantworten nicht nur exportiert, sondern möglichst reibungslos in bestehende Audio-Pipelines eingebunden werden könnten. Eine stärkere Orientierung an realen Produktionsumgebungen würde die Einsatzchancen im Game-Bereich daher deutlich verbessern.

Ein weiterer Entwicklungsbereich betrifft die Benutzerfreundlichkeit der Oberfläche. Zwar wurde das Tool im Rahmen der Arbeit bereits als zugänglich wahrgenommen, dennoch zeigen sich bei genauerer Betrachtung Möglichkeiten zur weiteren Optimierung. Dazu gehört beispielsweise eine präzisere und komfortablere Parametereingabe. Gerade bei Reglern für Winkel Positionen oder Objekttransformationen könnte eine direkte numerische Texteingabe die Bedienung erleichtern und die Genauigkeit erhöhen. Solche Verbesserungen wirken auf den ersten Blick klein, sind im Produktionsalltag jedoch sehr relevant, da sie die Effizienz steigern.

Auch die geometrische Auflösung des Systems stellt einen wichtigen Ansatzpunkt für zukünftige Weiterentwicklungen dar. Im Rahmen der Untersuchung wurde deutlich, dass die Beschränkung auf grobe Maßeinheiten, etwa in Dezimeterschritten, die präzise Nachbildung realer Räume erschwert. Eine feinere Skalierung, beispielsweise in Zentimetern, würde die Modelltreue verbessern und die Übertragbarkeit realer Raummaße in das virtuelle Modell erleichtern. Dies wäre vor allem für kleinere Details, asymmetrische Geometrien und realitätsnahe Vergleichsaufbauten von Vorteil.

Ein weiterer zentraler Entwicklungsbedarf besteht in der Materialmodellierung. Die begrenzte Materialauswahl des Programms stellt derzeit eine klare Einschränkung dar, da reale Räume häufig aus einer Vielzahl akustisch unterschiedlich wirksamer Oberflächen bestehen. Für die Zukunft wäre

daher eine erweiterte Materialbibliothek wünschenswert. Noch interessanter wäre darüber hinaus die Möglichkeit, eigene Materialien anzulegen oder Materialparameter individuell zu definieren. Dadurch könnte das Tool deutlich flexibler auf unterschiedliche Produktionskontexte reagieren und würde insbesondere für Sound Designer*innen an Reiz gewinnen, die gezielt mit charakteristischen Oberflächen und spektralen Raumfarben arbeiten möchten.

Darüber hinaus wäre eine Weiterentwicklung hin zu komplexeren geometrischen Formen sinnvoll. In der aktuellen Anwendung scheint das Tool vor allem bei eher typisierten, klar strukturierten Räumen seine Stärken zu besitzen. Für eine breitere Anwendbarkeit im Game-Audio wäre es jedoch von Vorteil, wenn auch architektonisch komplexere, asymmetrischere oder stärker stilisierte Räume differenzierter modelliert werden könnten. Gerade in Spielen treten häufig Räume auf, die nicht nur aus einfachen rechteckigen Volumen bestehen. Eine Erweiterung der Formkomplexität würde es ermöglichen, solche Räume glaubwürdiger und individueller abzubilden.

Auch aus gestalterischer Sicht ergeben sich interessante Zukunftsaussichten. BOOM Artificial IR eignet sich bereits jetzt gut für Stilisierung von Raumantworten, also zur gezielten Formung einer bestimmten akustischen Wirkung. Genau dieser Bereich könnte in Zukunft noch weiter ausgebaut werden. Denkbar wären etwa erweiterte kreative Funktionen, mit denen Raumantworten bewusst in Richtung „enger“, „härter“, „wärmer“, „diffuser“ oder „dramatischer“ gestaltet werden können, ohne den Umweg über komplexe manuelle Modellierungsarbeit gehen zu müssen. Gerade für die Spieleentwicklung wäre das besonders attraktiv, weil dort nicht immer die maximale physikalische Genauigkeit, sondern oft eine präzise kontrollierte Wirkung gefragt ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass BOOM Artificial IR aus Sicht dieser Arbeit durchaus Entwicklungspotenzial für den Game-Audio-Bereich besitzt. Besonders relevant erscheinen dabei eine stärkere Orientierung an den Anforderungen realer Produktionsumgebungen, eine bessere Integration in etablierte Middleware-Systeme, eine feinere geometrische Modellierung, eine flexiblere Materialgestaltung sowie eine Erweiterung der akustischen und geometrischen Komplexität. Wenn diese Aspekte weiterentwickelt würden, könnte das Tool nicht nur als interessantes Spezialwerkzeug, sondern potenziell auch als breiter einsetzbare Lösung für die Spieleentwicklung an Bedeutung gewinnen.

5.4. Methodische Limitationen

5.4.1 Stichprobengröße

Eine zentrale methodische Limitation der vorliegenden Arbeit liegt in der begrenzten Stichprobengröße. Diese betrifft sowohl die Zahl der untersuchten Spiele und Raumtypen in Phase A als auch die Zahl der tatsächlich akustisch analysierten Vergleichsräume in Phase B. Obwohl das gewählte Vorgehen für die Zielsetzung der Arbeit grundsätzlich geeignet ist, schränkt die Stichprobengröße die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse ein.

Bereits in der ersten Phase der Arbeit wurde zwar eine größere Anzahl an Spielen betrachtet, die eigentliche akustische Untersuchung konzentriert sich jedoch nur auf eine kleine Auswahl von drei Raumtypen sowie auf jeweils einen konkreten realen Vergleichsraum pro Raumtyp. Damit basiert die zentrale Gegenüberstellung zwischen realen und synthetischen Impulsantworten auf einer relativ schmalen empirischen Grundlage. Diese Reduktion war aus praktischen Gründen notwendig, insbesondere aufgrund des Zeitaufwands für Aufnahme, Modellierung, Auswertung und Vergleich.

Gleichzeitig bedeutet sie aber, dass die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf alle denkbaren Spielräume oder Raumklassen übertragen werden können.

Besonders deutlich wird diese Einschränkung daran, dass ein einzelner realer Raum niemals die vollständige Bandbreite eines gesamten Raumtyps repräsentieren kann. Ein kleiner Raum kann beispielsweise als Schlafzimmer, Büro, Bad, Lagerraum oder Kammer sehr unterschiedlich ausfallen. Auch Korridore oder mittelgroße Räume unterscheiden sich in realen Gebäuden teils erheblich hinsichtlich Materialität, Möblierung, Geometrie, Nutzungsgrad und Oberflächenverhältnissen. Wenn pro Raumtyp nur ein konkretes Beispiel untersucht wird, bleibt zwangsläufig offen, wie stabil die beobachteten Unterschiede gegenüber anderen Ausprägungen desselben Typs wären. Die Arbeit kann daher eher raumtypische Tendenzen aufzeigen als statistisch belastbare allgemeingültige Aussagen formulieren.

Hinzu kommt, dass die Stichprobengröße auch innerhalb der Messsituation begrenzt ist. Zwar wurden mehrere Aufnahmen durchgeführt und problematische Messungen überprüft und ersetzt, demnach wurde pro final ausgewählten Raum letztlich nur eine kleine Zahl an Messungen als zentrale Vergleichsgrundlage verwendet. Dadurch fehlt eine breitere Absicherung über wiederholte Messreihen, verschiedene Positionen oder mehrere realisierte Varianten desselben Raumtyps. Gerade in der Raumakustik kann jedoch bereits eine veränderte Mikrofon- oder Lautsprecherposition Einfluss auf die resultierende Impulsantwort haben. Eine größere Stichprobe hätte hier die Möglichkeit geboten, Mittelwerte zu bilden, Streuungen systematischer zu erfassen oder robustere Aussagen über die Stabilität einzelner Parameter zu treffen.

Auch für den Vergleich zwischen realer und synthetischer Impulsantwort ist die geringe Stichprobengröße relevant. Wenn nur wenige Räume untersucht werden, ist schwer zu beurteilen, ob die beobachteten Unterschiede auf grundsätzliche Eigenschaften des Tools zurückzuführen sind oder ob sie teilweise durch die Besonderheiten der konkret ausgewählten Räume entstehen. So kann etwa ein einzelner Korridor besonders reflektiv, ein kleiner Raum besonders bassbetont oder ein mittelgroßer Raum besonders ruhig ausfallen. Die Ergebnisse sind deshalb vor allem als fallbezogene Untersuchung unter exemplarischen Bedingungen zu verstehen.

Darüber hinaus begrenzt die geringe Stichprobengröße auch die Aussagekraft der subjektiven Hörbeobachtungen. Die subjektive Bewertung beruht in dieser Arbeit auf einer überschaubaren Zahl von gefalteten Beispielen und auf einer nicht standardisierten Hörbeurteilung. Zwar ist dies für eine ergänzende qualitative Einschätzung sinnvoll, ersetzt aber keine systematische Hörstudie mit mehreren Versuchspersonen, kontrollierten Bedingungen und statistischer Auswertung. Auch hierfür wäre eine größere Stichprobe hilfreich gewesen, um die Hörwahrnehmung stärker abzusichern.

Methodisch ist jedoch zu betonen, dass die begrenzte Stichprobengröße nicht als vollständiger Mangel, sondern als charakteristische Beschränkung einer Bachelorarbeit mit experimentellem Anteil zu verstehen ist. Die vorliegende Arbeit verfolgt nicht das Ziel, eine umfassende raumakustische Klassifikation aller denkbaren Spielräume zu liefern, sondern exemplarisch zu untersuchen, in welchem Ausmaß mit BOOM Artificial IR erzeugte Impulsantworten mit real gemessenen Raumantworten übereinstimmen. Für dieses Ziel ist eine begrenzte, aber bewusst ausgewählte Stichprobe grundsätzlich vertretbar. Sie erlaubt eine detaillierte Einzelanalyse, auch wenn sie keine breit statistisch abgesicherte Generalisierung zulässt.

Aus den genannten Gründen sollten die Ergebnisse daher vor allem als explorative und exemplarische Befunde verstanden werden. Sie geben Hinweise darauf, wie sich synthetische und reale Impulsantworten in bestimmten typischen Innenräumen zueinander verhalten, erlauben jedoch keine abschließende Aussage über alle Raumtypen oder alle denkbaren Anwendungen im Game-Audio-Bereich. Eine weiterführende Untersuchung mit größerer Stichprobe, mehreren realen Räumen pro Raumtyp und einer systematischeren Variante von Geometrie, Materialität und Aufnahmebedingungen wäre notwendig, um die hier gewonnenen Ergebnisse breiter abzusichern.

Zusammenfassend besteht die methodische Limitation der Stichprobengröße also darin, dass nur eine begrenzte Zahl an Raumtypen und Vergleichsräumen detailliert untersucht wurde. Dadurch bleibt die Übertragbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt. Gleichzeitig ermöglicht die reduzierte Stichprobe eine vertiefte qualitative und parameterbasierte Analyse einzelner Fälle, die als fundierte Grundlage für weiterführende Untersuchungen dienen kann.

5.4.2 Technische Limitationen

Neben der begrenzten Stichprobengröße weist die vorliegende Arbeit auch mehrere technische Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Diese betreffen sowohl die reale Aufnahme der Impulsantworten als auch deren anschließende Auswertung und den Vergleich mit den synthetisch erzeugten Impulsantworten. Gerade weil die Arbeit an der Schnittstelle zwischen praktischer Audioproduktion, Raumakustik und Softwaremodellierung angesiedelt ist, spielen technische Randbedingungen eine wesentliche Rolle für die Belastbarkeit der Ergebnisse.

Eine erste technische Limitation betrifft die Messkette der realen Impulsantworten. Die Qualität realer Aufnahmen hängt wesentlich von der eingesetzten Hardware ab, insbesondere von Lautsprechern, Mikrofonen, Recordern beziehungsweise Audio-Interfaces sowie von der räumlichen Anordnung dieser Komponenten. Im Rahmen dieser Arbeit stand zwar ein praktikables und funktionales Setup zur Verfügung, jedoch kein vollständig standardisiertes Labor- oder Normmesssystem. Das bedeutet, dass die aufgenommenen Impulsantworten zwar für eine vergleichende Untersuchung geeignet sind, jedoch nicht die Präzision professioneller raumakustischer Messanlagen erreichen. Gerade in sensiblen Bereichen wie dem Bass, bei der frühen Energieverteilung oder bei schwach ausklingenden Spätanteilen kann die technische Qualität der Messkette einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Daten haben.

Eng damit verbunden ist die Limitation des verwendeten Lautsprechersystems. Sweep-basierte Messungen setzen voraus, dass das abgespielte Testsignal den relevanten Frequenzbereich möglichst vollständig und mit ausreichender Energie anregt. Wenn der verwendete Lautsprecher bestimmte Frequenzen nur eingeschränkt wiedergibt oder keine hinreichend gleichmäßige Abstrahlung besitzt, wirkt sich dies unmittelbar auf die resultierende Impulsantwort aus. Gerade tieffrequente Bereiche können dadurch unterrepräsentiert oder ungleichmäßig angeregt werden. Für die Arbeit bedeutet das, dass nicht jeder Unterschied zwischen realer und synthetischer Impulsantwort ausschließlich als Raumunterschied interpretiert werden kann. Ein Teil der Abweichungen kann auch aus den technischen Eigenschaften des Wiedergabesystems resultieren.

Eine weitere technische Limitation betrifft das Gain-Staging während der Aufnahme. Für brauchbare Impulsantworten musste ein Pegel gewählt werden, der hoch genug ist, um einen guten Signal-

Rausch-Abstand zu erzielen, gleichzeitig jedoch niedrig genug bleibt, um Übersteuerungen zu vermeiden. Diese Balance erwies sich in der praktischen Durchführung als anspruchsvoll. Ein zu niedriger Pegel führte zu einer stärkeren Beeinflussung durch Grundrauschen, während ein zu hoher Pegel das Risiko von Verzerrungen oder unerwünschten Übertonungen einzelner Signalanteile erhöhte. Da die Auswertung raumakustischer Parameter stark davon abhängt, wie sauber sich der Energieabfall vom Rauschboden trennen lässt, ist dies eine relevante technische Einschränkung.

Hinzu kommt die allgemeine Begrenzung durch Störgeräusche und Umgebungsbedingungen. Reale Messungen erfolgen nie unter vollständig idealen Bedingungen. Bereits geringe Störquellen wie Lüftungsgeräusche, Außengeräusche, Raumresonanzen, technische Nebenräume oder ungewollte Bewegungen können die Impulsantwort beeinflussen. Besonders problematisch ist dies in der späteren Abklingphase, da dort die Signalenergie ohnehin schwächer ist und Störungen daher relativ stärker ins Gewicht fallen. In der Arbeit zeigte sich dies unter anderem daran, dass einzelne Aufnahmen überprüft, neu dekonvolviert oder erneut aufgenommen werden mussten. Auch wenn dadurch eine belastbare Endauswahl erreicht wurde, bleibt die Störanfälligkeit realer Messungen eine zentrale technische Limitation.

Ebenfalls relevant ist die begrenzte Reproduzierbarkeit realer Aufnahmen. Auch wenn versucht wurde, Mikrofon- und Lautsprecherpositionen konsistent zu halten, lassen sich reale Messsituationen nie vollständig identisch wiederholen. Kleinste Veränderungen der Positionierung, der Ausrichtung, des Raumzustands oder der Umgebungsgeräusche können zu veränderten Impulsantworten führen. Während synthetische Impulsantworten unter identischen Parametern immer wieder reproduzierbar erzeugt werden können, bleiben reale Aufnahmen daher grundsätzlich variabler. Diese Asymmetrie zwischen synthetischer und realer Datenerzeugung stellt eine technische und methodische Einschränkung des Vergleichs dar.

Auch auf Seiten der synthetischen Erzeugung bestehen technische Begrenzungen. BOOM Artificial IR erlaubt zwar eine kontrollierte und wiederholbare Generierung von Impulsantworten, doch ist diese an die internen Modellierungsgrenzen der Software gebunden. Dazu zählt zunächst die bereits erwähnte eingeschränkte Materialbibliothek. Darüber hinaus sind auch geometrische Details nur innerhalb der softwareseitigen Rasterung und Modelllogik abbildbar. Wenn Objektgrößen nur in groben Schritten angepasst werden können oder keine vollständige Nachbildung realer Mikrostrukturen möglich ist, entstehen zwangsläufig Unterschiede zwischen Modell und Realität. Diese technischen Grenzen der Simulation beeinflussen die resultierende Impulsantwort, selbst wenn die Modellierung sorgfältig durchgeführt wird.

Zudem ist auch die Mikrofonkonfiguration als technische Limitation zu berücksichtigen. Die Wahl der Aufnahmeanordnung beeinflusst, wie stark Direktschall, frühe Reflexionen und Rauminformation erfasst werden, bleibt die reale Messsituation in ihrer räumlichen Abbildung nur näherungsweise reproduzierbar. Die resultierenden Unterschiede sind technisch relevant, weil sie sich unmittelbar auf Klarheit, Präsenz und räumliche Breite der Impulsantwort auswirken können.

Schließlich betrifft eine letzte technische Limitation die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Produktionsumgebungen. Die hier verwendeten Werkzeuge, Einstellungen und Hardwarekombinationen sind funktional und für die Arbeit geeignet, stellen jedoch keine universelle Standardkonfiguration dar. Andere Lautsprecher, Mikrofone, Räume oder Deconvolution-Workflows könnten zu anderen Ergebnissen führen. Die vorliegenden Befunde sind daher als technisch gut begründete, aber an ein konkretes Setup gebundene Ergebnisse zu verstehen.

Zusammenfassend liegen die wichtigsten technischen Limitationen dieser Arbeit in der begrenzten Standardisierung der Messkette, den Einflüssen von Lautsprecher und Mikrofon, dem anspruchsvollen Gain-Staging, der Störanfälligkeit realer Aufnahmen, der Empfindlichkeit realer Messungen sowie den softwareseitigen Begrenzungen der synthetischen Modellierung. Diese Faktoren schränken die Präzision und Generalisierbarkeit der Ergebnisse ein, machen die Untersuchung jedoch nicht unbrauchbar. Vielmehr verdeutlichen sie, dass der Vergleich realer und synthetischer Impulsantworten technisch anspruchsvoll ist und seine Ergebnisse stets im Kontext der verwendeten Mess- und Simulationsbedingungen interpretiert werden müssen.

5.4.3 Grenzen der subjektiven Vergleichbarkeit

Eine weitere methodische Einschränkung der vorliegenden Arbeit betrifft die subjektive Vergleichbarkeit der realen und synthetischen Impulsantworten. Neben der objektiven Analyse mit REW wurden die Raumantworten auch anhand von gefalteten Sprach-, Musik- und Drum-Signalen hörend verglichen. Diese subjektive Perspektive ist für die Arbeit grundsätzlich sinnvoll, da sich Raumakustik nicht allein in Messwerten erschöpft, sondern letztlich auch in ihrer klanglichen Wirkung beurteilt werden muss. Gleichzeitig ist die Aussagekraft solcher Hörvergleiche begrenzt.

Ein zentrales Problem besteht darin, dass die subjektive Wahrnehmung von Impulsantworten stark vom jeweils verwendeten Audiomaterial abhängt. So zeigte sich im Verlauf der Analyse, dass sich Unterschiede zwischen realen und synthetischen Impulsantworten bei Sprache, Musik und Drums nicht identisch äußern. Während bei Sprache eher Klarheit, Nähe und Verständlichkeit im Vordergrund stehen, treten bei Musik stärker spektrale Unterschiede und bei Drums vor allem Transientenverhalten und Tieftonabbildung in Erscheinung. Die Wahrnehmung eines Raumes ist also immer auch an den Charakter des zugrunde liegenden Signals gebunden. Eine Impulsantwort kann bei Sprache kontrolliert und klar wirken, bei Musik aber rauer und rauschhaltiger erscheinen.

Hinzu kommt, dass subjektive Höreindrücke grundsätzlich von der hörenden Person selbst abhängen. Begriffe wie „klarer“, „dumpfer“, „näher“, „hallender“ oder „zerfaserter“ beschreiben reale Höreindrücke, sind jedoch nicht in gleicher Weise objektiv messbar wie EDT, T20 oder T30. Auch wenn solche Beschreibungen für die Einordnung der klanglichen Wirkung sehr hilfreich sind, bleiben sie interpretativ. Die subjektive Hörbewertung dieser Arbeit stellt daher keine standardisierte Wahrnehmungsstudie dar, sondern eine qualitative Ergänzung zur objektiven Analyse.

Eine weitere Grenze ergibt sich aus der fehlenden Standardisierung der Hörsituation. Die subjektiven Vergleiche wurden nicht im Rahmen eines kontrollierten Hörversuchs mit mehreren Versuchspersonen, identischer Abhörumgebung und statistischer Auswertung durchgeführt. Damit ist die Hörbewertung zwar für die Diskussion der klanglichen Unterschiede nützlich, ihre Ergebnisse sind jedoch nicht ohne Weiteres verallgemeinerbar. Sie zeigen, wie sich Unterschiede zwischen realen und synthetischen Impulsantworten im konkreten Arbeitskontext bemerkbar machen können, erlauben aber keine repräsentative Aussage über allgemeine Hörerurteile.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass objektive und subjektive Bewertung nicht immer deckungsgleich sein müssen. Zwei Impulsantworten können in einzelnen Nachhallparametern ähnlich erscheinen und dennoch unterschiedlich wahrgenommen werden, wenn sich frühe Reflexionen, spektrale Gewichtung oder die Verteilung der Energie im gefalteten Signal unterscheiden. Umgekehrt können messtechnisch deutlich unterschiedliche Impulsantworten subjektiv ähnlich plausibel erlebt werden,

wenn sie den allgemeinen Raumcharakter ausreichend gut vermitteln. Die subjektive Vergleichbarkeit ist daher grundsätzlich begrenzt und kann nicht vollständig aus objektiven Parametern abgeleitet werden.

Für die vorliegende Arbeit bedeutet das, dass die subjektive Hörbewertung als ergänzende Interpretationsebene zu verstehen ist. Sie dient dazu, die objektiv festgestellten Unterschiede in ihrer klanglichen Wirkung einzuordnen, ersetzt jedoch keine standardisierte Wahrnehmungsuntersuchung. Die Aussagen zur subjektiven Wirkung von realen und synthetischen Impulsantworten sind deshalb bewusst vorsichtig zu lesen: Sie liefern wertvolle Hinweise auf Wahrnehmungstendenzen, aber keine allgemein gültigen Urteile.

Zusammenfassend liegt die Grenze der subjektiven Vergleichbarkeit darin, dass die klangliche Wirkung von Impulsantworten stark von Signaltyp, Hörkontext und individueller Wahrnehmung abhängt. Die subjektiven Beobachtungen dieser Arbeit sind daher als sinnvolle, aber methodisch eingeschränkte Ergänzung zur objektiven Analyse zu verstehen.

6. Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zu untersuchen, in welchem Ausmaß die mit Artificial IR erzeugten akustischen Parameter mit den tatsächlich gemessenen Werten in realen Räumen übereinstimmen. Zu diesem Zweck wurden synthetisch erzeugte und real aufgenommene Impulsantworten für drei ausgewählte Raumtypen, kleiner Raum, Korridor und mittelgroßer Raum, miteinander verglichen. Die Analyse erfolgte sowohl auf objektiver Ebene anhand verschiedener REW-Darstellungen und frequenzabhängiger Nachhallparameter als auch ergänzend über subjektive Hörvergleiche mit Sprach-, Musik- und Drum-Signalen.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass BOOM Artificial IR reale Räume nicht vollständig physikalisch exakt reproduziert, ihre grundlegenden akustischen Charakteristika jedoch in vielen Fällen plausibel annähern kann. Damit lässt sich die Forschungsfrage differenziert beantworten: Die mit BOOM Artificial IR erzeugten akustischen Parameter stimmen nicht vollständig, aber in wesentlichen Tendenzen mit den real gemessenen Werten überein. Besonders im Bereich der allgemeinen Raumcharakteristik und der grundsätzlichen Nachhallstruktur zeigt sich eine erkennbare Nähe zwischen synthetischen und realen Impulsantworten. Die Abweichungen liegen vor allem in der mikroakustischen Detailtiefe, in der frühen Reflexionsstruktur, in der spektralen Unruhe sowie in der insgesamt stärkeren Glättung und Homogenisierung der synthetischen Raumantwort.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit besteht darin, dass die synthetischen Impulsantworten die untersuchten Raumtypen in ihrer Grundwirkung klar unterscheidbar abbilden können. Kleine Räume, Korridore und mittelgroße Räume zeigten sowohl in den objektiven Darstellungen als auch in der subjektiven Hörwahrnehmung jeweils unterschiedliche akustische Profile. Daraus lässt sich schließen, dass BOOM Artificial IR grundsätzlich in der Lage ist, raumtypische Unterschiede hörbar zu machen. Für die Game-Entwicklung ist das besonders relevant, weil dort nicht zwingend eine vollständige physikalische Exaktheit erforderlich ist, sondern vielmehr eine glaubwürdige und funktionale Differenzierung unterschiedlicher Raumklassen.

Gleichzeitig zeigt die Arbeit aber auch deutlich, dass die synthetischen Impulsantworten in mehreren Bereichen von den realen Messungen abweichen. In den objektiven Vergleichen fiel insbesondere auf, dass reale Räume häufig höhere oder unruhigere EDT-Werte, stärkere frequenzabhängige Schwankungen, komplexere Decay-Strukturen und eine weniger regulierte Energieverteilung im Spektrogramm aufwiesen. Die synthetischen Impulsantworten wirkten demgegenüber meist glatter, kontrollierter und homogener. Diese Tendenz zeigte sich über alle untersuchten Raumtypen hinweg. Die Simulation bildet Räume damit eher als idealisiert, gut kontrollierbare Raumklasse ab, während reale Räume stärker von Mikrostrukturen, Materialunterschieden, lokalen Resonanzen und komplexen Reflexionsverhältnissen geprägt sind.

Auch die subjektiven Hörvergleiche stützen dieses Bild. Wiederholt zeigte sich, dass die mit synthetischen Impulsantworten gefalteten Signale häufig klarer, direkter und kontrollierter wahrgenommen wurden, insbesondere bei Sprache. Reale Impulsantworten wirkten dagegen halliger, rauer, spektral unruhiger oder in bestimmten Bereichen rauschvoller. Bei einigen Signalen, etwa Drums oder Musik, zeigte sich zudem, dass reale Raumantworten zu diffuseren oder weniger präzisen Tieftönen- und Transienten-Abbildungen führen konnten, während synthetische Impulsantworten hier häufig definierter und funktionaler blieben. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass eine stärkere physikalische Nähe zur Realität nicht automatisch zu einer höheren praktischen Eignung im Game-Audio führt.

Damit ergibt sich eine zentrale Schlussfolgerung: Die Eignung von BOOM Artificial IR für die Game-Entwicklung ist weniger an vollständiger physikalischer Übereinstimmung mit realen Räumen zu messen als an der Fähigkeit, typische Raumcharaktere kontrolliert, glaubwürdig und gestalterisch nutzbar abzubilden. Genau in diesem Bereich zeigt das Tool klare Stärken. Es ermöglicht eine benutzerfreundliche Erstellung künstlicher Impulsantworten, erlaubt wiederholtes Rendern, unterstützt iterative Arbeitsweisen und eignet sich gut für die Stilisierung von Raumantworten. Gerade für Spiele, in denen Räume nicht dokumentarisch korrekt, sondern funktional und atmosphärisch überzeugend klingen sollen, stellt dies einen wesentlichen Vorteil dar.

Für Boom Artificial IR bedeutet das, dass das Tool aus Sicht dieser Arbeit vor allem dort überzeugt, wo typische, kontrollierbare und stilisierte Innenraumklassen benötigt werden. Besonders geeignet erscheinen kleine Räume, Korridore und funktionale mittelgroße Innenräume, also Raumtypen, die im Game-Audio häufig auftreten und klar voneinander unterscheidbar sein sollen. Weniger stark ist das Tool dort, wo eine möglichst exakte Reproduktion hochkomplexer oder sehr charakterstarker realer Räume gefordert wäre. Die Ergebnisse legen daher nahe, dass BOOM Artificial IR besonders als produktionsnahes, flexibles und gestalterisch orientiertes Werkzeug verstanden werden sollte, nicht als vollständiger Ersatz hochpräziser raumakustischer Messungen.

Für die praktische Relevanz im Bereich Game-Audio lässt sich festhalten, dass künstliche Impulsantworten wie die von BOOM Artificial IR einen sinnvollen Beitrag zur Gestaltung interaktiver Audiowelten leisten können. Sie ermöglichen es, Räume effizient zu differenzieren, klanglich zu typisieren und an spielerische Anforderungen anzupassen. Gerade weil Spiele häufig mit wiederkehrenden Raumklassen, stilisierten Welten und hoher Produktionsdynamik arbeiten, ist ein Tool mit hoher Wiederholbarkeit, guter Kontrollierbarkeit und schneller Variantenbildung besonders wertvoll. Die Arbeit zeigt damit, dass BOOM Artificial IR nicht nur theoretisch interessant, sondern praktisch durchaus relevant für produktionsnahe Game-Audio-Workflows sein kann.

Gleichzeitig machen die Ergebnisse deutlich, dass die Grenzen des Tools klar benannt werden müssen. Die begrenzte Materialbibliothek, die grobe geometrische Modellierung, die Tendenz zu geglätteten Raumantworten sowie die nur eingeschränkte Nachbildung realer spektraler Unruhe und früher Reflexionskomplexität zeigen, dass BOOM Artificial IR nicht jede reale Raumakustik in gleicher Tiefe erfassen kann. Diese Grenzen mindern jedoch nicht den grundsätzlichen Wert des Tools, sondern verorten ihn klarer: in der plausiblen, kontrollierten und produktionspraktischen Annäherung an Raumcharaktere.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass BOOM Artificial IR für die Erzeugung künstlicher Impulsantworten im Game-Audio-Kontext grundsätzlich geeignet ist, wenn die Zielsetzung nicht in der vollständigen physischen Reproduktion realer Räume, sondern in der glaubwürdigen, kontrollierbaren und stilisierten Abbildung typischer Raumcharakteristika liegt. Die Arbeit beantwortet die Forschungsfrage damit dahingehend, dass die Übereinstimmung zwischen künstlich erzeugten und real gemessenen akustischen Parametern teilweise und tendenziell, nicht aber vollständig gegeben ist. Die größte Stärke des Verfahrens liegt weniger in der exakten Nachbildung jedes raumakustischen Details als in seiner praktischen Anwendbarkeit für die Gestaltung funktionaler und immersiver Klangräume in der Spieleentwicklung.

Literaturverzeichnis

- Amengual Garí, S.V., Schissler, C., Mehra, R.M., Featherly, S., Robinson, P.W., 2019. Evaluation of real-time sound propagation engines in a virtual reality framework. Proc Int Audio Eng Soc Conf Immersive Interact. Audio 1–2.
- BOOM Library, 2026. Artificial IR Instructions.
- Cowan, B., Rojas, D., Kapralos, B., Collins, K., 2014. Spatial sound and its effect on visual quality perception and task performance within a virtual environment. Proc. Meet. Acoust. 19.
- Davari, N., Verbrugge, C., 2021. Efficient 2D Sound Propagation in Video Games. Proc. AAAI Conf. Artif. Intell. Interact. Digit. Entertain. 17, 1.
- Firat, H.B., Maffei, L., Masullo, M., 2022. 3D sound spatialization with game engines: the virtual acoustics performance of a game engine and a middleware for interactive audio design. Virtual Real. 26, 540–542.
- Godin, K.W., Gampe, H., Raghuvanshi, N., 2019. Aesthetic modification of room impulse responses for interactive auralization. Audio Eng. Soc. Conf. 2019 AES Int. Conf. Immersive Interact. Audio 1–2.
- Grimshaw, M.N., 2007. The Acoustic Ecology of the First-Person Shooter. VDM Verlag.
- Guidorzi, P., Barbaresi, L., D’Orazio, D., Garai, M., 2015. Impulse Responses Measured with MLS or Swept-Sine Signals Applied to Architectural Acoustics: An In-depth Analysis of the Two Methods and Some Case Studies of Measurements Inside Theaters. Energy Procedia 78, 1–2.
- Guillen-Hanson, G., Jylhä, H., Hassan, L., 2021. The Role Sound Plays in Games: A Thematic Literature Study on Immersion, Inclusivity and Accessibility in Game Sound Research. Proc. 24th Int. Acad. Mindtrek Conf. 14.
- Hak, C., Hak, J., Wenmaekers, R., 2008. INR as an Estimator for the Decay Range of Room Acoustic Impulse Responses. Audio Eng. Soc. Conv. 124, 2.
- Hak, C.C.J.M., Wenmaekers, R.H.C., van Luxemburg, L.C.J., 2012. Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters. Acta Acust. United Acust. 98, 1.
- Khokhlov, Y., Prisyach, T., Mitrofanov, A., Dutov, D., Agafonov, I., Timofeeva, T., Romanenko, A., Korenevsky, M., 2024. Classification of Room Impulse Responses and its application for channel verification and diarization. INTERSPEECH.
- Lansky, U., 2023. Acoustical parameters measurement of an auditorium.
- Lavrova, M., Kanev, N., 2020. Sound Scattering Properties of Surfaces with Diffusers. MATEC Web Conf. 320.
- Lübeck, T., Pörschmann, C., Arend, J.M., 2020. Perception of direct sound, early reflections, and reverberation in auralizations of sparsely measured binaural room impulse responses. Proc. AES Int. Conf. Audio Virtual Augment. Real. Redmond WA USA 1.
- Mahmoud, N.S.A., 2019. Acoustics from Interior Designer Perspective. Acoust. Mater. 8–10.
- Menzer, F., 2014. Choosing Optimal Delays for Feedback Delay Networks 1.
- Murphy, D., Neff, F., 2010. Spatial Sound for Computer Games and Virtual Reality. Game Sound Technol. Play. Interact. Concepts Dev.
- Podkosova, I., Urbanek, M., Kaufmann, H., 2016. A Hybrid Sound Model for 3D Audio Games with Real Walking. Proc. 29th Int. Conf. Comput. Animat. Soc. Agents.
- Poudratchi, S., Sekhavat, Y.A., Azadehfar, M.R., Roohi, S., 2024. BatSight: A Navigation Game to Map Environmental Information into Audio Cues. Int. J. Serious Games 11, 2.
- Prof. Dobrian, C., 2005. Schroeder’s Reverberator: The Earliest Digital Solution of Sound Reverberation 6–7.
- Richard, A., Christensen, C.L., Koutsouris, G., 2020. Sine Sweep Optimization for Room Impulse Response Measurements. Forum Acusticum 3.
- Room EQ Wizard, n.d. REWHelp.
- Schissler, C., Manocha, D., 2011. GSound: Interactive Sound Propagation for Games. Audio Eng. Soc. Conf. 41st Int. Conf. Audio Games Audio Eng. Soc. 6, 1.
- Sikora, M., Russo, M., Mateljan, I., 2018. Hybrid Beam/Ray Tracing Simulation Method 1989–1991.

- Stan, G.-B.V., Embrechts, J.J., Archambeau, D., 2002. Comparison of different impulse response measurement techniques 50, 3–7.
- Stewart, R., Sandler, M., 2007. Statistical Measures of Early Reflections of Room Impulse Responses. Proc 10th Int Conf. Digit. Audio Eff. DAFx-07 Bordx. Fr. 1.
- Yu, Y., Xia, M., Walter, B., Michielssen, E., Marschner, S., 2023. A Full-Wave Reference Simulator for Computing Surface Reflectance. ACM Trans. Graph. 42, 2.

Anhang

Artificial IR Instructions

<https://drive.google.com/drive/folders/18-w8kZDh-yOh6g0kqDESWurapMC2qDUF?usp=sharing>

Marktanalyse von relevanten Videospielen der letzten 10 Jahre

1. Zielsetzung

- Was bedeutet „relevant“?

1. Finanzielle Leistung

2. Positive Kritik

3. Aktive Spielerzahlen

4. Spiele, die von Artificial Impulse Responses profitieren könnten

5. Spiele mit Indoor-Leveln

- Für wen ist die Analyse gedacht?

1. Boom Library, Audiogroup

2. Bachelorarbeit – Hochschule-Neu-Ulm

- Welche Region?

1. Global

2. Umsetzung

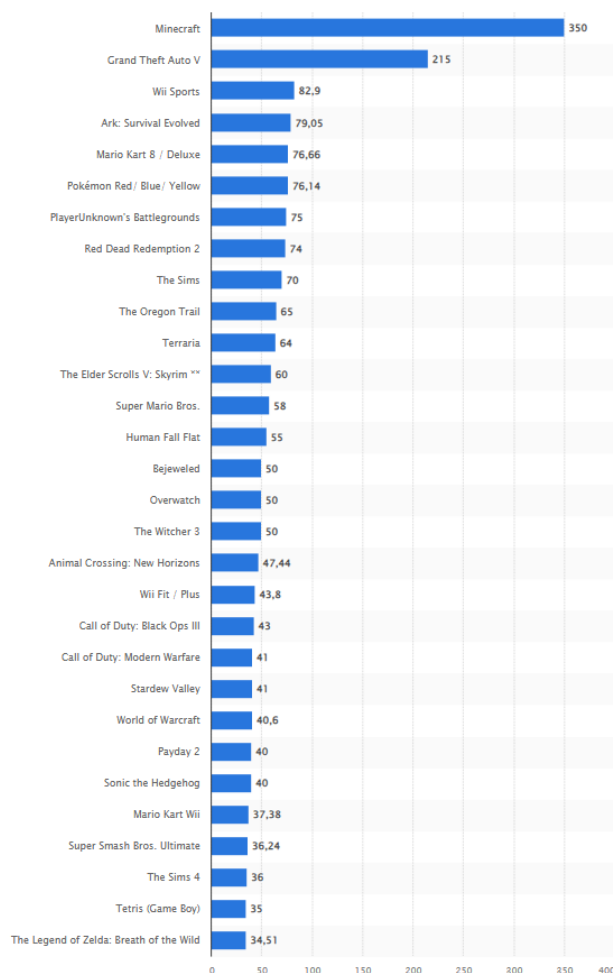
Finanzielle Leistung

Verkaufszahlen (Insgesamt)

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36854/umfrage/verkaufszahlen-der-weltweit-meistverkauften-videospiele/>

Erhebungszeitraum: 28. Mai 2025

Region: Weltweit



Finanzielle Leistung (2025)

<https://steamdb.info/stats/globaltopsellers/>

Steam:

Stand: 02.09.25

#		Name	
1.		Counter-Strike 2	
2.		Path of Exile 2	
3.		Baldur's Gate 3	
4.		Borderlands 4	
5.		HELLDIVERS™ 2	
6.		PUBG: BATTLEGROUNDS	
7.		Steam Deck	Hardware
8.		No Man's Sky	
9.		NBA 2K26	
10.		Kingdom Come: Deliverance II	
11.		Apex Legends™	
12.		Hogwarts Legacy	
13.		Tom Clancy's Rainbow Six® Siege X	
14.		Red Dead Redemption 2	
15.		Battlefield™ 6	
16.		PEAK	
17.		METAL GEAR SOLID Δ: SNAKE EATER	
18.		Dota 2	
19.		Hell is Us	
20.		Warframe	

Finanzielle Leistung 2024

Meistverkaufte Spiele je nach Region

https://en.wikipedia.org/wiki/2024_in_video_games

Rank	Japan ^[11]	United States ^[12]	Europe ^[13]
1	<i>Super Mario Party Jamboree</i>	<i>Call of Duty: Black Ops 6</i>	<i>EA Sports FC 25</i>
2	<i>Dragon Quest III HD-2D Remake</i>	<i>EA Sports College Football 25</i>	<i>Call of Duty: Black Ops 6</i>
3	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Helldivers II</i>	<i>EA Sports FC 24</i>
4	<i>Super Mario Bros. Wonder</i>	<i>Dragon Ball: Sparking! Zero</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>
5	<i>Momotarō Dentetsu World: Chikyuu wa Kibou de Mawatteru!</i>	<i>NBA 2K25</i> ^[a]	<i>Hogwarts Legacy</i>
6	<i>Animal Crossing: New Horizons</i>	<i>Madden NFL 25</i>	<i>Helldivers II</i>
7	<i>The Legend of Zelda: Echoes of Wisdom</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare III</i>	<i>Red Dead Redemption 2</i>
8	<i>Minecraft Education Edition</i>	<i>EA Sports FC 25</i>	<i>The Crew 2</i>
9	<i>Powerful Pro Baseball 2024-2025</i>	<i>Elden Ring</i>	<i>It Takes Two</i>
10	<i>Final Fantasy VII Rebirth</i>	<i>EA Sports MVP Bundle</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare III</i>

Finanzielle Leistung 2023

Meistverkaufte Spiele je nach Region

https://en.wikipedia.org/wiki/2023_in_video_games#

Rank	Japan ^{[12][13]}	United States ^[14]	Europe ^[15]
1	<i>The Legend of Zelda: Tears of the Kingdom</i>	<i>Hogwarts Legacy</i>	<i>EA Sports FC 24</i>
2	<i>Super Mario Bros. Wonder</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare III</i>	<i>Hogwarts Legacy</i>
3	<i>Pikmin 4</i>	<i>Madden NFL 24</i>	<i>FIFA 23</i>
4	<i>Pokémon Scarlet and Violet</i>	<i>Marvel's Spider-Man 2</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare III</i>
5	<i>Momotarō Dentetsu World: Chikyuu wa Kibou de Mawatteru!</i>	<i>The Legend of Zelda: Tears of the Kingdom</i> ^[a]	<i>Grand Theft Auto V</i>
6	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Diablo IV</i>	<i>Diablo IV</i>
7	<i>Kirby's Return to Dream Land Deluxe</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare II</i>	<i>The Legend of Zelda: Tears of the Kingdom</i> ^[a]
8	<i>Dragon Quest Monsters: The Dark Prince</i>	<i>Mortal Kombat 1</i>	<i>Red Dead Redemption 2</i>
9	<i>Splatoon 3</i>	<i>Star Wars Jedi: Survivor</i>	<i>Super Mario Bros. Wonder</i> ^[a]
10	<i>Super Mario RPG</i>	<i>EA Sports FC 24</i>	<i>Marvel's Spider-Man 2</i>

Finanzielle Leistung 2022

Meistverkaufte Spiele je nach Region

https://en.wikipedia.org/wiki/2022_in_video_games#

Rank	Japan ^{[9][10]}	United States ^[11]	Europe ^[12]
1	<i>Pokémon Scarlet and Violet</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare II</i>	<i>FIFA 23</i>
2	<i>Splatoon 3</i>	<i>Elden Ring</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare II</i>
3	<i>Pokémon Legends: Arceus</i>	<i>Madden NFL 23</i>	<i>Elden Ring</i>
4	<i>Kirby and the Forgotten Land</i>	<i>God of War Ragnarök</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>
5	<i>Nintendo Switch Sports</i>	<i>Lego Star Wars: The Skywalker Saga</i>	<i>FIFA 22</i>
6	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Pokémon Scarlet and Violet</i> ^[a]	<i>Pokémon Legends: Arceus</i> ^[a]
7	<i>Minecraft</i>	<i>FIFA 23</i>	<i>God of War Ragnarök</i>
8	<i>Mario Party Superstars</i>	<i>Pokémon Legends: Arceus</i> ^[a]	<i>Lego Star Wars: The Skywalker Saga</i>
9	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>	<i>Horizon Forbidden West</i>	<i>Horizon Forbidden West</i>
10	<i>Elden Ring</i>	<i>MLB The Show 22</i> ^[b]	<i>Gran Turismo Sport</i>

Finanzielle Leistung 2021

https://en.wikipedia.org/wiki/2021_in_video_games#

Höchsten Einnahmen und meistverkaufte Spiele je nach Region

Rank ↕	Game ↕	Revenue ↕
1	<i>PUBG Mobile / Game for Peace</i>	\$2,900,000,000
2	<i>Honor of Kings / Arena of Valor</i>	\$2,800,000,000
3	<i>Genshin Impact</i>	\$1,900,000,000
4	<i>Roblox Mobile</i>	\$1,400,000,000
5	<i>Coin Master</i>	\$1,400,000,000
6	<i>Pokémon Go</i>	\$1,300,000,000
7	<i>Candy Crush Saga</i>	\$1,300,000,000
8	<i>Garena Free Fire</i>	\$1,200,000,000
9	<i>Uma Musume Pretty Derby</i>	\$990,000,000
10	<i>Three Kingdoms Tactics</i>	\$931,000,000

Rank ↕	Japan ^[10] ↕	United States ^[11] ↕	Europe ^[12] ↕
1	<i>Monster Hunter Rise</i>	<i>Call of Duty: Vanguard</i>	<i>FIFA 22</i>
2	<i>Pokémon Brilliant Diamond / Shining Pearl</i>	<i>Call of Duty: Black Ops Cold War</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>
3	<i>Momotaro Dentetsu: Showa, Heisei, Reiwa Mo Teiban!</i>	<i>Madden NFL 22</i>	<i>FIFA 21</i>
4	<i>Super Mario 3D World + Bowser's Fury</i>	<i>Pokémon Brilliant Diamond / Shining Pearl</i> ^[a]	<i>Call of Duty: Vanguard</i>
5	<i>Ring Fit Adventure</i>	<i>Battlefield 2042</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i> ^[a]
6	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Spider-Man: Miles Morales</i>	<i>Red Dead Redemption 2</i>
7	<i>Minecraft: Nintendo Switch Edition</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i> ^[a]	<i>Super Mario 3D World + Bowser's Fury</i> ^[a]
8	<i>Animal Crossing: New Horizons</i>	<i>Resident Evil Village</i>	<i>Call of Duty: Black Ops Cold War</i>
9	<i>Mario Party Superstars</i>	<i>MLB The Show 21</i>	<i>Assassin's Creed Valhalla</i>
10	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>	<i>Super Mario 3D World + Bowser's Fury</i> ^[a]	<i>Spider-Man: Miles Morales</i>

Finanzielle Leistung 2020

https://en.wikipedia.org/wiki/2020_in_video_games#

Höchsten Einnahmen und meistverkaufte Spiele je nach Region

Rank ↕	Game ↕	Revenue ↕
1	<i>PUBG Mobile / Game for Peace</i>	\$2,700,000,000
2	<i>Honor of Kings / Arena of Valor</i>	\$2,564,000,000
3	<i>Roblox</i>	\$2,290,000,000
4	<i>Garena Free Fire</i>	\$2,130,000,000
5	<i>Pokémon Go</i>	\$1,920,000,000
6	<i>League of Legends</i>	\$1,750,000,000
7	<i>Candy Crush Saga</i>	\$1,660,000,000
8	<i>AFK Arena</i>	\$1,450,000,000
9	<i>Gardenscapes: New Acres</i>	\$1,430,000,000
10	<i>Dungeon Fighter Online (DFO)</i>	\$1,410,000,000

Rank ↕	Australia ^[30] ↕	Japan ^[31] ↕	Europe ^{[32][34]} ↕	United States ^[33] ↕
1	<i>Animal Crossing: New Horizons</i>	<i>Animal Crossing: New Horizons</i>	<i>FIFA 21</i>	<i>Call of Duty: Black Ops Cold War</i>
2	<i>Grand Theft Auto V</i>	<i>Ring Fit Adventure</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare</i>
3	<i>Call of Duty: Black Ops Cold War</i>	<i>Momotaro Dentetsu: Showa, Heisei, Reiwa Mo Teiban!</i>	<i>Animal Crossing: New Horizons</i> ^[b]	<i>Animal Crossing: New Horizons</i> ^[b]
4	<i>Call of Duty: Modern Warfare</i>	<i>Final Fantasy VII Remake</i>	<i>FIFA 20</i>	<i>Madden NFL 21</i>
5	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Pokémon Sword / Shield</i>	<i>Call of Duty: Black Ops Cold War</i>	<i>Assassin's Creed Valhalla</i>
6	<i>FIFA 21</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i> ^[b]	<i>The Last of Us Part II</i>
7	<i>Assassin's Creed Valhalla</i>	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>	<i>The Last of Us Part II</i>	<i>Ghost of Tsushima</i>
8	<i>The Last of Us Part II</i>	<i>Minecraft: Switch Edition</i>	<i>Assassin's Creed Valhalla</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i> ^[b]
9	<i>NBA 2K20</i>	<i>Clubhouse Games: 51 Worldwide Classics</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare</i>	<i>Super Mario 3D All-Stars</i> ^[b]
10	<i>NBA 2K21</i>	<i>Super Mario 3D All-Stars</i>	<i>Red Dead Redemption 2</i>	<i>Final Fantasy VII Remake</i>

Finanzielle Leistung 2019

https://en.wikipedia.org/wiki/2019_in_video_games#Best-selling_games_by_country

Höchsten Einnahmen und meistverkaufte Spiele je nach Region

Rank ↕	Japan ^{[8][b]} ↕	United Kingdom ^{[9][c]} ↕	United States ^[10] ↕
1	<i>Pokémon Sword / Shield</i>	<i>FIFA 20</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare</i>
2	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>	<i>Call of Duty: Modern Warfare</i>	<i>NBA 2K20</i>
3	<i>Kingdom Hearts III</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Madden NFL 20</i>
4	<i>Super Mario Maker 2</i>	<i>Star Wars Jedi: Fallen Order</i>	<i>Borderlands 3</i>
5	<i>Monster Hunter World: Iceborne</i>	<i>Pokémon Sword / Shield</i>	<i>Mortal Kombat 11</i>
6	<i>New Super Mario Bros. U Deluxe</i>	<i>Red Dead Redemption 2</i>	<i>Kingdom Hearts III</i>
7	<i>Monster Hunter World: Iceborne Master Edition</i>	<i>FIFA 19</i>	<i>Tom Clancy's The Division 2</i>
8	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Crash Team Racing Nitro-Fueled</i>	<i>Pokémon Sword / Shield</i>
9	<i>Minecraft: Nintendo Switch Edition</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>
10	<i>Luigi's Mansion 3</i>	<i>Tom Clancy's The Division 2</i>	<i>Star Wars Jedi: Fallen Order</i>

Rank ↕	Game ↕	Revenue ↕
1	<i>Fortnite</i>	\$3,709,000,000
2	<i>PlayerUnknown's Battlegrounds (PUBG)</i>	\$1,788,000,000
3	<i>Dungeon Fighter Online (DFO)</i>	\$1,600,000,000
4	<i>Honor of Kings / Arena of Valor</i>	\$1,600,000,000
5	<i>League of Legends</i>	\$1,500,000,000
6	<i>Candy Crush Saga</i>	\$1,500,000,000
7	<i>Pokémon Go</i>	\$1,400,000,000
8	<i>Crossfire</i>	\$1,400,000,000
9	<i>Fate/Grand Order (FGO)</i>	\$1,200,000,000
10	<i>Last Shelter: Survival</i>	\$1,100,000,000

Finanzielle Leistung 2018

https://en.wikipedia.org/wiki/2018_in_video_games#Best-selling_games_by_region

Höchsten Einnahmen und meistverkaufte Spiele je nach Region

Rank	Game	Revenue	Rank	Europe ^[23]	Japan ^{[24][b]}	United States ^[25]
1	<i>Fortnite</i>	\$5,477,000,000	1	<i>FIFA 19</i>	<i>Monster Hunter: World</i>	<i>Red Dead Redemption 2</i>
2	<i>Honor of Kings / Arena of Valor</i>	\$2,510,000,000	2	<i>Red Dead Redemption 2</i>	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>	<i>Call of Duty: Black Ops 4</i>
3	<i>League of Legends</i>	\$1,900,000,000	3	<i>Spider-Man</i>	<i>Pokémon: Let's Go</i>	<i>NBA 2K19</i>
4	<i>Dungeon Fighter Online (DFO)</i>	\$1,700,000,000	4	<i>Call of Duty: Black Ops 4</i>	<i>Splatoon 2</i>	<i>Madden NFL 19</i>
5	<i>Crossfire</i>	\$1,453,000,000	5	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Super Smash Bros. Ultimate^[c]</i>
6	<i>Monster Strike</i>	\$1,387,419,755	6	<i>God of War</i>	<i>Super Mario Party</i>	<i>Spider-Man</i>
7	<i>Pokémon Go</i>	\$1,300,000,000	7	<i>Far Cry 5</i>	<i>Kirby Star Allies</i>	<i>Far Cry 5</i>
8	<i>PlayerUnknown's Battlegrounds (PUBG)</i>	\$1,224,800,000	8	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>	<i>Minecraft: Nintendo Switch Edition</i>	<i>God of War</i>
9	<i>Fate/Grand Order (FGO)</i>	\$1,200,000,000	9	<i>Super Mario Party</i>	<i>Call of Duty: Black Ops 4</i>	<i>Monster Hunter: World</i>
10	<i>Candy Crush Saga</i>	\$1,100,000,000	10	<i>Super Mario Odyssey</i>	<i>Super Mario Odyssey</i>	<i>Assassin's Creed: Odyssey</i>

Finanzielle Leistung 2017

https://en.wikipedia.org/wiki/2017_in_video_games

Höchsten Einnahmen, meistverkaufte Spiele je nach Region und meistverkaufte Premium Spiele

Rank	Game	Revenue	Rank	Japan ^[26]	United Kingdom ^[27]	United States ^{[d][28]}
1	<i>Honor of Kings / Arena of Valor</i>	\$2,400,000,000	1	<i>Monster Hunter XX</i>	<i>FIFA 18</i>	<i>Call of Duty: WWII</i>
2	<i>League of Legends</i>	\$2,100,000,000	2	<i>Pokémon Sun / Moon</i>	<i>Call of Duty: WWII</i>	<i>NBA 2K18</i>
3	<i>Dungeon Fighter Online (DFO)</i>	\$1,900,000,000	3	<i>Mario Kart 8 Deluxe</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>	<i>Destiny 2^[e]</i>
4	<i>Monster Strike</i>	\$1,641,000,000	4	<i>The Legend of Zelda: Breath of the Wild</i>	<i>Assassin's Creed Origins</i>	<i>Madden NFL 18</i>
5	<i>Crossfire</i>	\$1,605,000,000	5	<i>Super Mario Maker</i>	<i>Star Wars Battlefront II</i>	<i>The Legend of Zelda: Breath of the Wild^[f]</i>
6	<i>Fantasy Westward Journey</i>	\$1,500,000,000	6	<i>Biohazard 7: Resident Evil</i>	<i>Crash Bandicoot N. Sane Trilogy</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>
7	<i>Clash Royale</i>	\$1,200,000,000	7	<i>NieR: Automata</i>	<i>Destiny 2</i>	<i>Tom Clancy's Ghost Recon: Wildlands</i>
8	<i>Clash of Clans</i>	\$1,200,000,000	8	<i>Momotaro Dentetsu 2017: Tachiagare Nippon!</i>	<i>Gran Turismo Sport</i>	<i>Star Wars: Battlefront II^[e]</i>
9	<i>Call of Duty: WWII</i>	\$1,000,000,000	9	<i>Yo-kai Watch 3: Sukiyaki</i>	<i>Tom Clancy's Ghost Recon: Wildlands</i>	<i>Super Mario Odyssey^[f]</i>
10	<i>Fate/Grand Order (FGO)</i>	\$982,000,000	10	<i>1-2-Switch</i>	<i>Horizon: Zero Dawn</i>	<i>Mario Kart 8 Deluxe^[f]</i>

Rank	Game	Units sold	Revenue
1	<i>PlayerUnknown's Battlegrounds (PUBG)</i>	30,000,000 ^[1]	\$900,000,000 ^[1]
2	<i>Call of Duty: WWII</i>	< 19,630,000 ^[17]	\$1,000,000,000 ^[16]
3	<i>Grand Theft Auto V / Online</i>	15,000,000 ^[18]	\$521,000,000 ^[14]
4	<i>Super Mario Odyssey</i>	9,070,000 ^[19]	Unknown
5	<i>Star Wars: Battlefront II</i>	9,000,000 ^[20]	Unknown
6	<i>Pokémon Sun / Moon / Ultra Sun / Ultra Moon</i>	8,530,000 ^[b]	Unknown
7	<i>The Legend of Zelda: Breath of the Wild</i>	7,780,000 ^{[19][23]}	Unknown
8	<i>Mario Kart 8 / Deluxe</i>	7,470,000 ^[c]	Unknown
9	<i>FIFA 17</i>	Unknown	\$409,000,000 ^[14]
10	<i>Overwatch</i>	Unknown	\$382,000,000 ^[14]

Finanzielle Leistung 2016

https://en.wikipedia.org/wiki/2016_in_video_games#Highest-grossing_games

Höchsten Einnahmen und meistverkaufte Spiele je nach Region

Rank ↕	Game ↕	Revenue ↕
1	<i>League of Legends</i>	\$1,700,000,000
2	<i>Honor of Kings / Arena of Valor</i>	\$1,610,000,000
3	<i>Monster Strike</i>	\$1,300,000,000
4	<i>Clash of Clans</i>	\$1,200,000,000
5	<i>Dungeon Fighter Online (DFO)</i>	\$1,100,000,000
6	<i>Clash Royale</i>	\$1,100,000,000
	<i>Crossfire</i>	\$1,100,000,000
8	<i>Puzzle & Dragons</i>	\$955,000,000
9	<i>Pokémon Go</i>	\$950,000,000
10	<i>Game of War: Fire Age</i>	\$910,000,000

Finanzielle Leistung 2015

https://en.wikipedia.org/wiki/2015_in_video_games

Höchsten Einnahmen und meistverkaufte Spiele je nach Region

Rank ↕	Game ↕	Revenue ↕
1	<i>League of Legends</i>	\$1,628,000,000
2	<i>Monster Strike</i>	\$1,557,800,000
3	<i>Clash of Clans</i>	\$1,345,000,000
4	<i>Puzzle & Dragons</i>	\$1,290,000,000
5	<i>Crossfire</i>	\$1,110,000,000
6	<i>Dungeon Fighter Online</i>	\$1,052,000,000
7	<i>Call of Duty: Black Ops III</i>	\$1,000,000,000
8	<i>World of Warcraft</i>	\$814,000,000
9	<i>Game of War: Fire Age</i>	\$799,000,000
10	<i>Fallout 4</i>	\$750,000,000

Rank ↕	Japan (retail) ^[23] ↕	United Kingdom (retail) ^[24] ↕	United States (retail) ^[25] ↕	Steam (digital) ^[26] ↕
1	<i>Monster Hunter X</i>	<i>FIFA 16</i>	<i>Call of Duty: Black Ops III</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>
2	<i>Yo-kai Watch Blasters</i>	<i>Call of Duty: Black Ops III</i>	<i>Madden NFL 16</i>	<i>Fallout 4</i>
3	<i>Animal Crossing: Happy Home Designer</i>	<i>Fallout 4</i>	<i>Fallout 4</i>	<i>Ark: Survival Evolved</i>
4	<i>Splatoon</i>	<i>Star Wars Battlefront</i>	<i>Star Wars Battlefront</i>	<i>Rocket League</i>
5	<i>Dragon Quest VIII</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>	<i>Grand Theft Auto V</i>	<i>Just Survive</i>
6	<i>Fire Emblem Fates</i>	<i>Batman: Arkham Knight</i>	<i>NBA 2K16</i>	<i>Cities: Skylines</i>
7	<i>Rhythm Heaven: The Best Plus</i>	<i>FIFA 15</i>	<i>Minecraft</i>	<i>Besiege</i>
8	<i>Super Mario Maker</i>	<i>Call of Duty: Advanced Warfare</i>	<i>FIFA 16</i>	<i>The Witcher 3: Wild Hunt</i>
9	<i>Dragon Quest Heroes</i>	<i>Assassin's Creed Syndicate</i>	<i>Mortal Kombat X</i>	<i>Dying Light</i>
10	<i>The Legend of Zelda: Majora's Mask 3D</i>	<i>Lego Jurassic World</i>	<i>Call of Duty: Advanced Warfare</i>	<i>Life Is Strange</i>

Positive Kritik

Game Of The Year

https://en.wikipedia.org/wiki/The_Game_Award_for_Game_of_the_Year

Nominierte Spiele und Gewinner

2015	<i>The Witcher 3: Wild Hunt</i> ‡
	<i>Bloodborne</i>
	<i>Fallout 4</i>
	<i>Metal Gear Solid V: The Phantom Pain</i>
	<i>Super Mario Maker</i>
2016	<i>Overwatch</i> ‡
	<i>Doom</i>
	<i>Inside</i>
	<i>Titanfall 2</i>
	<i>Uncharted 4: A Thief's End</i>
2017	<i>The Legend of Zelda: Breath of the Wild</i> ‡
	<i>Horizon Zero Dawn</i>
	<i>Persona 5</i>
	<i>PlayerUnknown's Battlegrounds</i>
	<i>Super Mario Odyssey</i>

2018	<i>God of War</i> ‡
	<i>Assassin's Creed Odyssey</i>
	<i>Celeste</i>
	<i>Marvel's Spider-Man</i>
	<i>Monster Hunter: World</i>
	<i>Red Dead Redemption 2</i>
2019	<i>Sekiro: Shadows Die Twice</i> ‡
	<i>Control</i>
	<i>Death Stranding</i>
	<i>Resident Evil 2</i>
	<i>Super Smash Bros. Ultimate</i>
	<i>The Outer Worlds</i>
2020	<i>The Last of Us Part II</i> ‡
	<i>Animal Crossing: New Horizons</i>
	<i>Doom Eternal</i>
	<i>Final Fantasy VII Remake</i>
	<i>Ghost of Tsushima</i>
	<i>Hades</i>

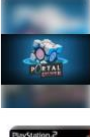
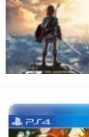
2021	<i>It Takes Two</i> ‡
	<i>Deathloop</i>
	<i>Metroid Dread</i>
	<i>Psychonauts 2</i>
	<i>Ratchet & Clank: Rift Apart</i>
2022	<i>Resident Evil Village</i>
	<i>Elden Ring</i> ‡
	<i>A Plague Tale: Requiem</i>
	<i>God of War Ragnarök</i>
	<i>Horizon Forbidden West</i>
2023	<i>Stray</i>
	<i>Xenoblade Chronicles 3</i>
	<i>Baldur's Gate 3</i> ‡
	<i>Alan Wake 2</i>
	<i>The Legend of Zelda: Tears of the Kingdom</i>
2024	<i>Marvel's Spider-Man 2</i>
	<i>Resident Evil 4</i>
	<i>Super Mario Bros. Wonder</i>
	<i>Astro Bot</i> ‡
	<i>Balatro</i>
2025	<i>Black Myth: Wukong</i>
	<i>Elden Ring: Shadow of the Erdtree</i>
	<i>Final Fantasy VII Rebirth</i>
	<i>Metaphor: ReFantazio</i>

Metacritic

<https://www.metacritic.com/browse/game/>

Spiele mit Mindest-Metascore von 95

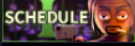
 1. The Legend of... NOV 23, 1998 • Rated E As a young boy, Link is tricked by Ganondorf, th... 99 Metascore	 2. SoulCalibur SEP 8, 1999 • Rated T This is a tale of souls and swords, transcending the... 98 Metascore	 3. Grand Theft Auto IV APR 29, 2008 • Rated M [Metacritic's 2008 Xbox 360 Game of the Year,... 98 Metascore
 4. Super Mario Galaxy NOV 12, 2007 • Rated E [Metacritic's 2007 Wii Game of the Year] The... 97 Metascore	 5. Super Mario Galax... MAY 23, 2010 • Rated E Super Mario Galaxy 2, the sequel to the galaxy-... 97 Metascore	 6. The Legend of... MAR 3, 2017 • Rated E10+ Ignore everything you know about The Legend... 97 Metascore
 7. Tony Hawk's Pro... OCT 30, 2001 • Rated T Challenge up to four friends in online... 97 Metascore	 8. Perfect Dark (2000) MAY 22, 2000 • Rated M Step into the Dark... As Carrington Institute's mo... 97 Metascore	 9. Red Dead... OCT 26, 2018 • Rated M Developed by the creators of Grand Theft Auto V an... 97 Metascore
 10. Grand Theft Auto... NOV 18, 2014 • Rated M The sprawling sun-soaked metropolis of Los Santos ... 97 Metascore	 11. Metroid Prime NOV 17, 2002 • Rated T Samus returns in a new mission to unravel the... 97 Metascore	 12. Grand Theft Auto... OCT 22, 2001 • Rated M Players are put at the heart of their very own... 97 Metascore
 13. Super Mario... OCT 27, 2017 • Rated E10+ New Evolution of Mario Sandbox-Style Gameplay... 97 Metascore	 14. Halo: Combat... NOV 15, 2001 • Rated M In a desperate attempt to keep a conquering alien... 97 Metascore	 15. NFL 2K1 SEP 7, 2000 • Rated E In the end, NFL 2K1 is a deeper, more refined... 97 Metascore
 16. Half-Life 2 NOV 16, 2004 • Rated M [Metacritic's 2004 PC Game of the Year] By... 96 Metascore	 17. BioShock AUG 21, 2007 • Rated M [Metacritic's 2007 Xbox 360 Game of the Year]... 96 Metascore	 18. GoldenEye 007 AUG 25, 1997 • Rated T You are Bond. James Bond. You are assigned... 96 Metascore
 19. Uncharted 2:... OCT 13, 2009 • Rated T Fortune hunter Nathan Drake returns in... 96 Metascore	 20. Resident Evil 4... JAN 11, 2005 • Rated M Resident Evil 4 marks a new chapter in the... 96 Metascore	 21. Baldur's Gate 3 AUG 3, 2023 • Rated M An ancient evil has returned to Baldur's Gate... 96 Metascore
 22. The Orange Box OCT 10, 2007 • Rated M Games included in The Orange Box compilation:... 96 Metascore	 23. Tekken 3 APR 29, 1998 • Rated T An ancient evil force has reawakened, attacking in... 96 Metascore	 24. Mass Effect 2 JAN 26, 2010 • Rated M The Mass Effect trilogy is a science fiction adventure... 96 Metascore

 25. The House in Fat... APR 9, 2021 • Rated M A gothic suspense tale set in a cursed mansion. The... 95 Metascore	 26. Elden Ring FEB 25, 2022 • Rated M A New World Created By Hidetaka Miyazaki And... 95 Metascore	 27. The Elder Scrolls... NOV 11, 2011 • Rated M The next chapter in the Elder Scrolls saga arrives... 95 Metascore
 28. Half-Life NOV 19, 1998 • Rated M Half-Life combines great storytelling in the traditio... 95 Metascore	 29. The Legend of... MAY 12, 2023 • Rated E10+ An epic adventure across the land and skies of... 95 Metascore	 30. The Legend of... MAR 24, 2003 • Rated E AN EVIL WIND IS RISING... Legend has it that... 95 Metascore
 31. The Legend of... JUN 5, 2025 • Rated E10+ Upgrade your adventures in Hyrule on the Nintend... 95 Metascore	 32. Gran Turismo MAY 12, 1998 • Rated E With authentic cars, courses, and car physics,... 95 Metascore	 33. Metal Gear Solid ... NOV 12, 2001 • Rated M Since the incident on Shadow Moses Island,... 95 Metascore
 34. Grand Theft Aut... NOV 4, 2003 • Rated M From the dark and seedy streets of Liberty City's... 95 Metascore	 35. Portal: Compani... JUN 28, 2022 • Rated T Including Portal and Portal 2, the Companion... 95 Metascore	 36. Baldur's Gate II:... SEP 24, 2000 • Rated T An epic continuation of the story that began in... 95 Metascore
 37. Grand Theft Auto... OCT 26, 2004 • Rated M [Metacritic's 2004 PS2 Game of the Year] Five... 95 Metascore	 38. Grand Theft Aut... OCT 29, 2002 • Rated M [Metacritic's 2002 PS2 Game of the Year]... 95 Metascore	 39. LittleBigPlanet OCT 27, 2008 • Rated E In LittleBigPlanet Players meet on a blue and gree... 95 Metascore
 40. The Legend of... NOV 17, 2003 • Rated E The greatest legend in gaming! The ultimate... 95 Metascore	 41. Gran Turismo 3: ... JUL 9, 2001 • Rated E With the addition of two new courses (a downtow... 95 Metascore	 42. Halo 2 NOV 9, 2004 • Rated M The Covenant alien race threatens to destroy all... 95 Metascore
 43. The Legend of... OCT 25, 2000 • Rated E Thrown into a parallel world by the mischievou... 95 Metascore	 44. The Legend of... DEC 3, 2002 • Rated E Now you have a link to one of the greatest... 95 Metascore	 45. The Last of Us JUN 14, 2013 • Rated M Twenty years after a pandemic radically... 95 Metascore
 46. The Legend of... JUN 5, 2025 • Rated E10+ Upgrade your adventures in Hyrule on the Nintand... 95 Metascore	 47. The Legend of... NOV 19, 2006 • Rated T When an evil darkness enshrouds the land of... 95 Metascore	 48. Madden NFL 2003 AUG 12, 2002 • Rated E Take Your Game Online: Access an online... 95 Metascore
 49. Persona 5 Royal MAR 31, 2020 • Rated M Prepare for an all-new RPG experience in... 95 Metascore	 50. The Last of Us... JUL 29, 2014 • Rated M The Last of Us has been rebuilt for the PlayStation... 95 Metascore	 51. Red Dead... MAY 18, 2010 • Rated M Developed by Rockstar San Diego, as a follow up... 95 Metascore
 52. Portal 2 APR 19, 2011 • Rated E10+ Valve is working on a full-length sequel to its awar... 95 Metascore		

Steam

<https://steamdb.info/stats/gameratings/>

Top 20 best-bewertete Spiele auf Steam

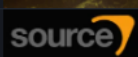
1.		Portal 2		9,75€	97.72%
2.		Stardew Valley		13,99€	97.66%
3.		People Playground		8,19€	97.45%
4.		Vampire Survivors		4,99€	97.31%
5.		Wallpaper Engine	Application	4,99€	97.27%
6.		Portal		9,75€	97.21%
7.		Hades		24,50€	97.12%
9.		HoloCure - Save the Fans!		Free	96.99%
8.		Schedule I		19,50€	96.99%
10.		DELTARUNE		23,99€	96.90%
11.		The Henry Stickmin Collection		-60% 5,59€	96.82%
13.		Left 4 Dead 2		9,75€	96.79%
12.		Terraria		9,75€	96.79%
14.		Half-Life: Alyx		58,99€	96.75%
15.		RimWorld		31,99€	96.72%
16.		Balatro		13,99€	96.69%
17.		A Short Hike		6,59€	96.68%
18.		Aseprite	Application	16,79€	96.67%
20.		Senren * Banka		29,99€	96.64%

Aktive Spielerzahlen

<https://steamdb.info/charts>

Stand 03.09.2025

Alle Produkte mit mehr als 50000 aktuellen Nutzern

Most played games						Compare
100 entries per page. Hold Shift to sort by multiple columns.						Search...
Rank	SteamDB.info	Name ↓↑	Current ↓↑	24h Peak ↓↑	All-Time Peak ↓↑	
1.		Counter-Strike 2	1,176,079	1,484,787	1,862,531	+
2.		Dota 2	668,923	723,079	1,295,114	+
3.		Path of Exile 2	254,001	266,075	578,569	+
4.		PUBG: BATTLEGROUNDS	211,911	660,772	3,257,248	+
5.		Banana	110,770	123,879	917,272	+
6.		HELLDIVERS™ 2	106,700	178,795	458,709	+
7.		Source SDK Base 2007	102,898	103,841	251,292	+
8.		Bongo Cat	96,599	127,258	194,508	+
9.		Rust	82,554	92,012	262,284	+
10.		No Man's Sky	82,032	82,032	212,613	+
11.		Grand Theft Auto V Legacy	81,834	86,930	364,548	+
12.		Tom Clancy's Rainbow Six® Siege X	76,151	84,473	201,933	+
13.		Dead by Daylight	75,022	76,338	120,717	+
14.		Apex Legends	72,775	189,372	624,473	+
15.		Delta Force	69,329	197,871	210,413	+
16.		Football Manager 2024	65,957	68,959	89,478	+
17.		Wallpaper Engine	63,529	126,333	150,375	+
18.		Marvel Rivals	63,153	81,083	644,269	+
19.		Baldur's Gate 3	62,297	65,938	875,343	+
20.		War Thunder	56,408	65,823	121,318	+
21.		Hollow Knight	54,898	72,916	72,916	+
22.		Stardew Valley	52,711	102,860	236,614	+
23.		DayZ	51,593	52,820	78,937	+
24.		Crosshair X	50,642	50,929	89,033	+

Top 20 meistgespielte Spiele auf Steam
<https://steamdb.info/charts/?sort=peak>

1.		PUBG: BATTLEGROUNDS	211,911	660,772	3,257,248	+
2.		Black Myth: Wukong	8,817	34,832	2,415,714	+
3.		Palworld	20,985	30,963	2,101,867	+
4.		Counter-Strike 2	1,176,079	1,484,787	1,862,531	+
5.		Monster Hunter Wilds	10,435	29,154	1,384,608	+
6.		Lost Ark	24,470	24,739	1,325,305	+
7.		Dota 2	668,923	723,079	1,295,114	+
8.		Cyberpunk 2077	38,385	44,466	1,054,388	+
9.		ELDEN RING	24,985	34,902	953,426	+
10.		Banana	110,770	123,879	917,272	+
11.		New World: Aeternum	10,593	11,251	913,634	+
12.		Hogwarts Legacy	17,155	19,707	879,308	+
13.		Baldur's Gate 3	62,297	65,938	875,343	+
14.		Goose Goose Duck	4,447	12,098	702,845	+
15.		Marvel Rivals	63,153	81,083	644,269	+
16.		Apex Legends	72,775	189,372	624,473	+
17.		Path of Exile 2	254,001	266,075	578,569	+
18.		Battlefield™ 6 Open Beta	0	0	521,079	+
19.		Valheim	24,781	26,119	502,387	+
20.		Call of Duty®	46,767	50,130	491,670	+

Spiele die von realistischen Impulsantworten profitieren könnten

Realistische Impulsantworten wären in Spielen sehr brauchbar, die auf Immersion und soundunterstützte Aufgabenbewältigung setzen. Bei kompetitiven Spielen wären Realistische Impulsantworten eher hinderlich.

Spiele mit Indoorbereichen

3. Auswertung

Spiele, die in die Auswertung gekommen sind, müssen eins von den fünf oberen Kriterien entsprechen und in den letzten 10 Jahren erschienen sein.

Grün: Ausreichend Indoorräume und Spiel könnte realistischen Impulsantworten profitieren

Gelb: Zu wenig Indoorräume

Rot: Würde unwahrscheinlich von realistischen Impulsantworten profitieren

1. **Alan Wake 2** - viele Indoor-Bereiche (Häuser, Polizeistation, Einrichtungen)
2. **Apex Legends** - einige Karten mit Gebäuden, Bunkern und engen Innenbereichen
3. **Assassin's Creed Odyssey, Syndicate & Valhalla** - (Tempel, Höhlen, Villen, Grabstätten)
4. **Batman: Arkham Knight** (Krankenhäuser, Polizeistation, Labore etc.)
5. **Baldur's Gate** - (Dungeons, Häuser, Tavernen, Tempel)
6. **Battlefield** - variiert je nach Teil, aber teils Indoor-Schlachten (z. B. Metro-Map)
7. **Black Myth: Wukong** - enthält Indoor-Level in Dungeons, Höhlen, Palästen
8. **Bloodborne** - (Kathedralen, Labore, Häuser, Dungeons)
9. **Borderlands** - trotz vielen Indoorbereichen eher ungeeignet (stilisiert, FPS)
10. **Call of Duty** - (viele Levels in Gebäuden, Bunkern)
11. **Counter-Strike** – trotz vielen Indoorbereichen eher ungeeignet (FPS)
12. **Cyberpunk 2077** – (viele Gebäude, Apartments, Firmenzentralen, Clubs)
13. **Dead by Daylight** - Kommt auf die Map an (z. B. Krankenhäuser, Schulen)
14. **Death Stranding** - primär Outdoor, aber einige wichtige Indoor-Sektionen
15. **Diablo** - (Dungeons, Katakomben, Tempel)
16. **Doom** – (fast vollständig in Indoor-Leveln)
17. **Dying Light** - (Gebäude, Labore, Tunnel – Mischung aus Outdoor/Indoor)
18. **Elden Ring** - (viele Burgen, Höhlen, unterirdische Städte)
19. **Fallout 4** - (Vaults, Gebäude, Bunker)

20. **Final Fantasy VII Remake** - (Shinra-Gebäude, Slums)
21. **Ghost of Tsushima** - primär Outdoor, aber einige Innenbereiche (Burgen, Häuser)
22. **God of War** - viele Dungeons, Tempel, Innenräume
23. **Half Life Alyx** - Viele Tunnel und Gebäude
24. **Hell is Us** - (abhängig vom finalen Release, mutmaßlich teils Indoor)
25. **Helldivers** - hauptsächlich Outdoor, aber es gibt Missionsstrukturen mit Innenbereichen
26. **Hogwarts Legacy** – (riesiges Schloss)
27. **Horizon (Zero Dawn / Forbidden West)** - manche Indoor-Level (alte Ruinen, Bunker)
28. **It Takes Two** - (Spielzeughaus, Uhrwerk)
29. **Kingdom Come: Deliverance** - Burgen, Häuser, Klöster – teils Indoor
30. **Life is Strange** - stark Indoor (Schule, Wohnungen, Diner)
31. **Marvel Rivals**: - trotz vielen Indoorbereichen eher ungeeignet (Stilisiert)
32. **Metal Gear Solid V** - eher Outdoor, aber es gibt Basen und Gebäude
33. **Overwatch** - trotz vielen Indoorbereichen eher ungeeignet (FPS)
34. **Path of Exile** - viele Dungeons, Höhlen – stark Indoor (stilisiert)
35. **Rainbow Six Siege** - fast vollständig Indoor (FPS)
36. **Red Dead Redemption** - primär Outdoor, aber es gibt Häuser, Salons, Innenräume
37. **Resident Evil** - sehr Indoor-lastig (Villen, Labore, Gefängnisse)
38. **Rust** - Zu abhängig von den Konstruktionen der eigenen Spieler*innen
39. **Sekiro** - Teils indoor
40. **Spider-Man (1 & 2, Miles Morales)** - primär Outdoor, aber teils Indoor-Missionen
41. **Star Wars: Jedi Survivor** – (Höhlen, Tempel, Basen)
42. **The Division 2** - (Büros, Museen, Bunker)
43. **The Last of Us Part II** - (Krankenhaus, U-Bahn, Häuser)
44. **The Witcher (3)** - Burgen, Häuser, Dungeons – teils Indoor
45. **Titanfall** - Level mit Indoor/Outdoor-Mix (auch Raumschiffe, Basen)
46. **Uncharted 4** - (Höhlen, Häuser, alte Ruinen)
47. **Zelda: BOTW & TOTK** - (Dungeons & Schreine)
48. **Day Z** - eher Outdoor
49. **Valorant** - trotz vielen Indoorbereichen eher ungeeignet (FPS)

Raumtabelle

		Summe Räume:		22	72	18	47	3	12
Spiel	Gameplay Video	Ab sc hni tt	Zeit ste mp el	Klei ner Rau m	Mittel große r Raum	Gr oß e Hal le	Ko rri do r	Tech nisch er Rau m	Mon ume ntalr aum
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=8N2wKBdK7vk&t=50825s	Früh	40:50		1				
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=8N2wKBdK7vk&t=50825s	Früh	50:30		1				
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=8N2wKBdK7vk&t=50825s	Früh	1:00:50		1				
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=8N2wKBdK7vk&t=50825s	Mittel	7:01:00	1					
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=8N2wKBdK7vk&t=50825s	Mittel	7:11:07				1		
Alan Wake 2	https://www.youtube.com/watch?v=8N2wKBdK7vk&t=50825s	Mittel	7:21:55		1				
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=tCUUsRw74PsA	Früh	14:47	1					
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=tCUUsRw74PsA	Früh	29:01				1		
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=tCUUsRw74PsA	Früh	39:15			1			
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=tCUUsRw74PsA	Mittel	17:55:50	1					
Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=tCUUsRw74PsA	Mittel	18:06:22	1					

Assassin's Creed Odyssey	https://www.youtube.com/watch?v=tCU5Rw74PsA	Mittel	18:28:55		1				
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Früh	11:52			1			
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Früh	21:34	1					
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Früh	31:03			1			
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Mittel	6:23:12			1			
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Mittel	6:33:12			1			
Assassin's Creed Syndicate	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Mittel	6:45:32		1				
Batman: Arkham Knight	https://www.youtube.com/watch?v=ke3ZPjsy1Nk	Früh	17:33		1				
Batman: Arkham Knight	https://www.youtube.com/watch?v=ke3ZPjsy1Nk	Früh	27:49		1				
Batman: Arkham Knight	https://www.youtube.com/watch?v=ke3ZPjsy1Nk	Früh	41:51		1				
Batman: Arkham Knight	https://www.youtube.com/watch?v=ke3ZPjsy1Nk	Mittel	7:47:40		1				
Batman: Arkham Knight	https://www.youtube.com/watch?v=ke3ZPjsy1Nk	Mittel	7:58:16		1				
Batman: Arkham Knight	https://www.youtube.com/watch?v=ke3ZPjsy1Nk	Mittel	8:08:32		1				
Bloodborne	https://www.youtube.com/watch?v=3VhfbpbGAqM	Früh	10.41	1					

	=VJyc-sD1DiY&t=26927s								
Bloodborne	https://www.youtube.com/watch?v=VJyc-sD1DiY&t=26927s	Früh	47:26	1					
Bloodborne	https://www.youtube.com/watch?v=VJyc-sD1DiY&t=26927s	Früh	1:00:50	1					
Bloodborne	https://www.youtube.com/watch?v=VJyc-sD1DiY&t=26927s	Mittel	5:11:29				1		
Bloodborne	https://www.youtube.com/watch?v=VJyc-sD1DiY&t=26927s	Mittel	5:21:42	1					
Bloodborne	https://www.youtube.com/watch?v=VJyc-sD1DiY&t=26927s	Mittel	5:45:45			1			
Baldurs Gate 3	https://www.youtube.com/watch?v=UCxFhfQFaec&t=723s	Früh	12:00					1	
Baldurs Gate 3	https://www.youtube.com/watch?v=UCxFhfQFaec&t=723s	Früh	22:00					1	
Baldurs Gate 3	https://www.youtube.com/watch?v=UCxFhfQFaec&t=723s	Früh	1:06:26		1				
Baldurs Gate 3	https://www.youtube.com/watch?v=UCxFhfQFaec&t=723s	Mittel	10:00:00		1				
Baldurs Gate 3	https://www.youtube.com/watch?v=UCxFhfQFaec&t=723s	Mittel	10:10:00						1
Baldurs Gate 3	https://www.youtube.com/watch?v=UCxFhfQFaec&t=723s	Mittel	10:20:00		1				

Call of Duty Modern Warfare	https://www.youtube.com/watch?v=Q0Wy_fjXLdc	Früh	10:00		1				
Call of Duty Modern Warfare	https://www.youtube.com/watch?v=Q0Wy_fjXLdc	Früh	0,84930556		1				
Call of Duty Modern Warfare	https://www.youtube.com/watch?v=Q0Wy_fjXLdc	Früh	30:23		1				
Call of Duty Modern Warfare	https://www.youtube.com/watch?v=Q0Wy_fjXLdc	Mittel	2:16:31				1		
Call of Duty Modern Warfare	https://www.youtube.com/watch?v=Q0Wy_fjXLdc	Mittel	2:33:30		1				
Call of Duty Modern Warfare	https://www.youtube.com/watch?v=Q0Wy_fjXLdc	Mittel	2:43:30		1				
Call of Duty Modern Warfare II	https://www.youtube.com/watch?v=_74yzN4lf3w	Früh	10:06				1		
Call of Duty Modern Warfare II	https://www.youtube.com/watch?v=_74yzN4lf3w	Früh	20:10				1		
Call of Duty Modern Warfare II	https://www.youtube.com/watch?v=_74yzN4lf3w	Früh	34:41	1					
Call of Duty Modern Warfare II	https://www.youtube.com/watch?v=_74yzN4lf3w	Mittel	2:48:20				1		
Call of Duty Modern	https://www.youtube.com/watch?v=_74yzN4lf3w	Mittel	2:59:49		1				

Warfare II									
Call of Duty Modern Warfare II	https://www.youtube.com/watch?v=_74yzN4lf3w	Mittel	3:11:53	1					
Cyberpunk 2077	https://www.youtube.com/watch?v=nhdPGPiOct0	Früh	11:32				1		
Cyberpunk 2077	https://www.youtube.com/watch?v=nhdPGPiOct1	Früh	21:34				1		
Cyberpunk 2077	https://www.youtube.com/watch?v=nhdPGPiOct2	Früh	37:24				1		
Cyberpunk 2077	https://www.youtube.com/watch?v=nhdPGPiOct2	Mittel	6:01:30		1				
Cyberpunk 2077	https://www.youtube.com/watch?v=nhdPGPiOct2	Mittel	6:18:00		1				
Cyberpunk 2077	https://www.youtube.com/watch?v=nhdPGPiOct2	Mittel	6:29:47			1			
Diablo IV	https://www.youtube.com/watch?v=1KFp_2ME1XE	Früh	16:33		1				
Diablo IV	https://www.youtube.com/watch?v=1KFp_2ME1XE	Früh	26:33						1
Diablo IV	https://www.youtube.com/watch?v=1KFp_2ME1XE	Früh	40:07		1				
Diablo IV	https://www.youtube.com/watch?v=1KFp_2ME1XE	Mittel	7:01:19			1			
Diablo IV	https://www.youtube.com/watch?v=1KFp_2ME1XE	Mittel	7:11:34				1		
Diablo IV	https://www.youtube.com/watch?v=1KFp_2ME1XE	Mittel	7:39:58		1				
Doom (2016)	https://www.youtube.com/watch?v=-oKdlbexbPw	Früh	10:37				1		

Doom (2016)	https://www.youtube.com/watch?v=-oKdIbexbPw	Früh	20:45			1			
Doom (2016)	https://www.youtube.com/watch?v=-oKdIbexbPw	Früh	33:00						1
Doom (2016)	https://www.youtube.com/watch?v=-oKdIbexbPw	Mittel	2:25:00		1				
Doom (2016)	https://www.youtube.com/watch?v=-oKdIbexbPw	Mittel	2:35:09				1		
Doom (2016)	https://www.youtube.com/watch?v=-oKdIbexbPw	Mittel	2:45:09		1				
Dying Light	https://www.youtube.com/watch?v=onKsRtuj_bc	Früh	10:00				1		
Dying Light	https://www.youtube.com/watch?v=onKsRtuj_bc	Früh	21:50				1		
Dying Light	https://www.youtube.com/watch?v=onKsRtuj_bc	Früh	31:50	1					
Dying Light	https://www.youtube.com/watch?v=onKsRtuj_bc	Mittel	4:22:15		1				
Dying Light	https://www.youtube.com/watch?v=onKsRtuj_bc	Mittel	4:32:15		1				
Dying Light	https://www.youtube.com/watch?v=onKsRtuj_bc	Mittel	4:42:15				1		
Dying Light: The Following	https://www.youtube.com/watch?v=LADqnxKrbCk	Früh	15:13		1				
Dying Light: The Following	https://www.youtube.com/watch?v=LADqnxKrbCk	Früh	25:56	1					
Dying Light: The Following	https://www.youtube.com/watch?v=LADqnxKrbCk	Früh	36:50		1				

Dying Light: The Following	https://www.youtube.com/watch?v=LADqnxKrbCk	Mittel	3:2 6:1 6	1					
Dying Light: The Following	https://www.youtube.com/watch?v=LADqnxKrbCk	Mittel	3:3 9:3 9			1			
Dying Light: The Following	https://www.youtube.com/watch?v=LADqnxKrbCk	Mittel	3:5 8:5 1	1					
Dying Light 2	https://www.youtube.com/watch?v=Ow0xcOL2ErY	Früh	17:30		1				
Dying Light 2	https://www.youtube.com/watch?v=Ow0xcOL2ErY	Früh	27:30		1				
Dying Light 2	https://www.youtube.com/watch?v=Ow0xcOL2ErY	Früh	39:19				1		
Dying Light 2	https://www.youtube.com/watch?v=Ow0xcOL2ErY	Mittel	7:0 1:4 7				1		
Dying Light 2	https://www.youtube.com/watch?v=Ow0xcOL2ErY	Mittel	7:1 6:2 6				1		
Dying Light 2	https://www.youtube.com/watch?v=Ow0xcOL2ErY	Mittel	7:3 0:0 0	1					
Elden Ring	https://www.youtube.com/watch?v=bg8i4CvE74M	Früh	10:38						1
Elden Ring	https://www.youtube.com/watch?v=bg8i4CvE74M	Früh	29:18				1		
Elden Ring	https://www.youtube.com/watch?v=bg8i4CvE74M	Früh	39:20				1		
Elden Ring	https://www.youtube.com/watch?v=bg8i4CvE74M	Mittel	7:4 1:3 6		1				
Elden Ring	https://www.youtube.com/watch?v=bg8i4CvE74M	Mittel	7:5 2:1 7				1		

Elden Ring	https://www.youtube.com/watch?v=bg8i4CvE74M	Mittel	8:02:17			1			
Fallout 4	https://www.youtube.com/watch?v=EgbJEC_RLow	Früh	10:16		1				
Fallout 4	https://www.youtube.com/watch?v=EgbJEC_RLow	Früh	20:24		1				
Fallout 4	https://www.youtube.com/watch?v=EgbJEC_RLow	Früh	33:54		1				
Fallout 4	https://www.youtube.com/watch?v=EgbJEC_RLow	Mittel	7:37:36				1		
Fallout 4	https://www.youtube.com/watch?v=EgbJEC_RLow	Mittel	7:47:36				1		
Fallout 4	https://www.youtube.com/watch?v=EgbJEC_RLow	Mittel	7:57:50		1				
Final Fantasy VII Remake	https://www.youtube.com/watch?v=nzr9F7p_4Qk	Früh	13:47		1				
Final Fantasy VII Remake	https://www.youtube.com/watch?v=nzr9F7p_4Qk	Früh	23:47						1
Final Fantasy VII Remake	https://www.youtube.com/watch?v=nzr9F7p_4Qk	Früh	33:47						1
Final Fantasy VII Remake	https://www.youtube.com/watch?v=nzr9F7p_4Qk	Mittel	9:55:28		1				
Final Fantasy VII Remake	https://www.youtube.com/watch?v=nzr9F7p_4Qk	Mittel	10:06:01		1				
Final Fantasy VII Remake	https://www.youtube.com/watch?v=nzr9F7p_4Qk	Mittel	10:16:01			1			
Hogwarts Legacy	https://www.youtube.com/watch?v=JMHhAlYK3ik	Früh	14:30						1

Hogwart s Legacy	https://www.youtube.com/watch?v=JHMHalYK3ik	Früh	24:30						1
Hogwart s Legacy	https://www.youtube.com/watch?v=JHMHalYK3ik	Früh	10:16:04						1
Hogwart s Legacy	https://www.youtube.com/watch?v=JHMHalYK3ik	Mittel	7:06:41		1				
Hogwart s Legacy	https://www.youtube.com/watch?v=JHMHalYK3ik	Mittel	7:21:26		1				
Hogwart s Legacy	https://www.youtube.com/watch?v=JHMHalYK3ik	Mittel	7:34:01		1				
It Takes Two	https://www.youtube.com/watch?v=yZ2VB6nbsUI	Früh	13:48				1		
It Takes Two	https://www.youtube.com/watch?v=yZ2VB6nbsUI	Früh	34:50				1		
It Takes Two	https://www.youtube.com/watch?v=yZ2VB6nbsUI	Früh	54:00				1		
It Takes Two	https://www.youtube.com/watch?v=yZ2VB6nbsUI	Mittel	4:51:52						1
It Takes Two	https://www.youtube.com/watch?v=yZ2VB6nbsUI	Mittel	5:01:02		1				
It Takes Two	https://www.youtube.com/watch?v=yZ2VB6nbsUI	Mittel	5:11:02						1
Rainbow Six Siege	https://www.youtube.com/watch?v=XmPV4V6xD4	Ausnahme	10:00		1				
Rainbow Six Siege	https://www.youtube.com/watch?v=XmPV4V6xD5	Ausnahme	20:00				1		
Rainbow Six Siege	https://www.youtube.com/watch?v=XmPV4V6xD6	Ausnahme	30:00				1		
Rainbow Six Siege	https://www.youtube.com/watch?v=XmPV4V6xD7	Ausnahme	40:00				1		

		ah me							
Rainbow Six Siege	https://www.youtube.com/watch?v=vXmPV4V6xD8	Au sn ah me	50: 00		1				
Rainbow Six Siege	https://www.youtube.com/watch?v=vXmPV4V6xD9	Au sn ah me	1:0 0:0 0		1				
Resident Evil 4 Remake	https://www.youtube.com/watch?v=d7YnCbVsmyE	Frü h	10: 00				1		
Resident Evil 4 Remake	https://www.youtube.com/watch?v=d7YnCbVsmyE	Frü h	20: 25	1					
Resident Evil 4 Remake	https://www.youtube.com/watch?v=d7YnCbVsmyE	Frü h	33: 42				1		
Resident Evil 4 Remake	https://www.youtube.com/watch?v=d7YnCbVsmyE	Mit tel	4:1 6:5 7		1				
Resident Evil 4 Remake	https://www.youtube.com/watch?v=d7YnCbVsmyE	Mit tel	4:2 6:5 7				1		
Resident Evil 4 Remake	https://www.youtube.com/watch?v=d7YnCbVsmyE	Mit tel	10: 16: 25		1				
Resident Evil 8 Village	https://www.youtube.com/watch?v=U_-T05SOE	Frü h	14: 40		1				
Resident Evil 8 Village	https://www.youtube.com/watch?v=U_-T05SOE	Frü h	25: 55		1				
Resident Evil 8 Village	https://www.youtube.com/watch?v=U_-T05SOE	Frü h	37: 05	1					
Resident Evil 8 Village	https://www.youtube.com/watch?v=U_-T05SOE	Mit tel	4:2 2:1 1	1					
Resident Evil 8 Village	https://www.youtube.com/watch?v=U_-T05SOE	Mit tel	4:3 5:5 0	1					
Resident Evil 8 Village	https://www.youtube.com/watch?v=U_-T05SOE	Mit tel	4:4 6:0 0				1		

Star Wars Jedi Survivor	https://www.youtube.com/watch?v=Ce1-V8PpVXA	Früh	15:35		1				
Star Wars Jedi Survivor	https://www.youtube.com/watch?v=Ce1-V8PpVXA	Früh	28:53				1		
Star Wars Jedi Survivor	https://www.youtube.com/watch?v=Ce1-V8PpVXA	Früh	46:00					1	
Star Wars Jedi Survivor	https://www.youtube.com/watch?v=Ce1-V8PpVXA	Mittel	7:19:28		1				
Star Wars Jedi Survivor	https://www.youtube.com/watch?v=Ce1-V8PpVXA	Mittel	7:32:00				1		
Star Wars Jedi Survivor	https://www.youtube.com/watch?v=Ce1-V8PpVXA	Mittel	7:42:35				1		
The Division 2	https://www.youtube.com/watch?v=qOk9lWypy2o	Früh	17:00		1				
The Division 2	https://www.youtube.com/watch?v=qOk9lWypy2o	Früh	33:17				1		
The Division 2	https://www.youtube.com/watch?v=qOk9lWypy2o	Früh	10:16:40		1				
The Division 2	https://www.youtube.com/watch?v=qOk9lWypy2o	Mittel	9:24:12				1		
The Division 2	https://www.youtube.com/watch?v=qOk9lWypy2o	Mittel	9:36:21				1		
The Division 2	https://www.youtube.com/watch?v=qOk9lWypy2o	Mittel	9:46:21		1				
The Last of Us 2	https://www.youtube.com/watch?v=XE5xZSd-lzk	Früh	16:24		1				
The Last of Us 2	https://www.youtube.com/watch?v=XE5xZSd-lzk	Früh	37:11		1				

The Last of Us 2	https://www.youtube.com/watch?v=XE5xZSd-lzk	Früh	47:19		1				
The Last of Us 2	https://www.youtube.com/watch?v=XE5xZSd-lzk	Mittel	7:2 7:2 7		1				
The Last of Us 2	https://www.youtube.com/watch?v=XE5xZSd-lzk	Mittel	7:4 0:4 6				1		
The Last of Us 2	https://www.youtube.com/watch?v=XE5xZSd-lzk	Mittel	7:5 5:2 3		1				
The Witcher 3	https://www.youtube.com/watch?v=k08RRor_zPI	Früh	29:19		1				
The Witcher 3	https://www.youtube.com/watch?v=k08RRor_zPI	Früh	40:24		1				
The Witcher 3	https://www.youtube.com/watch?v=k08RRor_zPI	Früh	1:0 2:1 3		1				
The Witcher 3	https://www.youtube.com/watch?v=k08RRor_zPI	Mittel	15:04:20		1				
The Witcher 3	https://www.youtube.com/watch?v=k08RRor_zPI	Mittel	15:14:24	1					
The Witcher 3	https://www.youtube.com/watch?v=k08RRor_zPI	Mittel	15:26:36		1				
Uncharted 4	https://www.youtube.com/watch?v=d1fFEP9OFPI	Früh	22:51				1		
Uncharted 4	https://www.youtube.com/watch?v=d1fFEP9OFPI	Früh	32:51		1				
Uncharted 4	https://www.youtube.com/watch?v=d1fFEP9OFPI	Früh	44:53				1		
Uncharted 4	https://www.youtube.com/watch?v=d1fFEP9OFPI	Mittel	5:1 8:0 0		1				
Uncharted 4	https://www.youtube.com/watch?v=d1fFEP9OFPI	Mittel	5:2 8:4 9				1		
Uncharted 4	https://www.youtube.com/watch?v=d1fFEP9OFPI	Mittel	5:4 9:1 2				1		

Zelda Breath of The Wild	https://www.youtube.com/watch?v=7zX3D98tt-U&	Früh	19:00			1			
Zelda Breath of The Wild	https://www.youtube.com/watch?v=7zX3D98tt-U&	Früh	29:00			1			
Zelda Breath of The Wild	https://www.youtube.com/watch?v=7zX3D98tt-U&	Früh	44:22		1				
Zelda Breath of The Wild	https://www.youtube.com/watch?v=7zX3D98tt-U&	Mittel	6:13:30				1		
Zelda Breath of The Wild	https://www.youtube.com/watch?v=7zX3D98tt-U&	Mittel	6:25:50				1		
Zelda Breath of The Wild	https://www.youtube.com/watch?v=7zX3D98tt-U&	Mittel	7:06:02			1			
Zelda Tears of The Kingdom	https://www.youtube.com/watch?v=rye3wVDyl5g	Früh	13:42	1					
Zelda Tears of The Kingdom	https://www.youtube.com/watch?v=rye3wVDyl5g	Früh	25:45			1			
Zelda Tears of The Kingdom	https://www.youtube.com/watch?v=rye3wVDyl5g	Früh	35:45		1				
Zelda Tears of The Kingdom	https://www.youtube.com/watch?v=rye3wVDyl5g	Mittel	5:35:35						1
Zelda Tears of The Kingdom	https://www.youtube.com/watch?v=rye3wVDyl5g	Mittel	6:09:00			1			
Zelda Tears of The Kingdom	https://www.youtube.com/watch?v=rye3wVDyl5g	Mittel	6:23:16			1			

Hörbeispiele der gefalteten Testsignale

https://drive.google.com/drive/folders/1uYwqR_H8N8ELp5fuy7Bm-uwZZszQpwdb?usp=sharing