



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Jens Hellemann

Optimierung von Eingangsgrößen für raumakustische Simulationen unter Berücksichtigung inverser Methoden

Jens Hellemann

**Optimierung von Eingangsgrößen für
raumakustische Simulationen unter
Berücksichtigung inverser Methoden**



Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang M.Sc. Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit Firma:
Heinkel Engineering GmbH & Co.KG
Hein-Saß-Weg 30
21129 Hamburg
Deutschland

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. (habil.) Thomas Kletschkowski
Zweitprüfer : Dipl.-Phys. Benjamin Becker

Abgabedatum: 17.12 2015

Zusammenfassung

Verfasser

Jens Hellemann, B.Eng

Thema der Masterthesis

Optimierung von Eingangsgrößen für raumakustische Simulationen unter Berücksichtigung inverser Methoden

Stichworte

Raumakustik, Numerische Akustik, Energiebasierte raumakustische Simulationen, geometrische Akustik (GA), Ray Tracing, statistische Raumakustik, diffuses Schallfeld, Numerische Optimierung, nicht-lineare Fehlerquadrate.

Kurzzusammenfassung

Der Abgleich raumakustischer Simulationen mit experimentellen Daten ist zwingend erforderlich, um verlässliche Berechnungsmodelle für die Vorentwicklung von Fahrzeug- und Flugzeugkabinen einsetzen zu können. Mit Hilfe von energiebasierten Simulationsverfahren wie der Strahlenverfolgung (eng. *ray tracing*) ist es möglich, sogenannte Raumimpulsantworten und die daraus ableitbaren akustischen Raumeigenschaften vorherzusagen. Diese werden jedoch von Eingangsparametern wie die der Absorptionsgrade stark beeinflusst.

Die Praxis zeigt, dass die Absorptionsgrade von realen technischen Systemen sich von denen unterscheiden, welche durch Messungen an Vergleichsproben (z.B. im Kundt'schen Rohr) ermittelt werden. Die Ermittlung der „richtigen“ Absorptionsgrade für akustische Simulationsmodelle scheint somit nicht allzu trivial zu sein. Es besteht daher die Notwendigkeit, ein systematisches Vorgehen zu entwickeln, welches die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Raumimpulsantworten reduziert.

Das Berechnungshilfsprogramm *Room Absorption Property Optimizer* (RAPO) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt, um diese Problematik zu lösen. Das Programm ist in der Lage, die Absorptionsgrade simulierter Raumflächen anhand eines Vergleiches zwischen Simulation und Messung zu optimieren.

Über die entsprechende Datenverarbeitung ist RAPO in der Lage, eine mit Ray Tracing erstellte Simulation nachzuberechnen und zu verändern. Mit dem Einsatz eines iterativen Optimierungsalgorithmus, basierend auf einer Methode der kleinsten Fehlerquadrate, verändert RAPO die Absorptionsgrade der Simulation solange, bis das Abklingverhalten des simulierten und das des gemessenen Raumes sich so gut wie Möglich ähneln.

Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist allerdings eine bewusste Wahl der Simulationsparameter, da dies die Güte der Simulationsergebnisse und somit die der Optimierung über RAPO bestimmt. Die vorliegende Arbeit setzt sich besonders mit dieser Thematik auseinander und lässt dadurch weitere Themen für zukünftige Untersuchungen offen.

Summary

Author

Jens Hellemann, B.Eng

Title of the Masterthesis

Optimization of input parameters for room acoustic simulation considering inverse methods

Keywords

Room acoustics, numerical acoustics, energy based room acoustic simulation, geometrical acoustics, ray tracing, statistical acoustics, steady-state energy, diffuse sound field, numerical optimization, non-linear least square.

Abstract

The comparison of room acoustic simulations with experimental data is essential to verify the reliability of simulation models used for the development of vehicle and aircraft cabins. Applying energy based simulation techniques, such as ray tracing, it is possible to predict the impulse response and thus main acoustic characteristics of an enclosure. The results, however, are strongly influenced by input parameters, such as the acoustic absorption coefficient.

Practice has shown that the absorption of real technical systems may differ significantly from those which can be determined by measurements using reference test samples (eg. Kundt's tube). Thus it is not trivial to use the "right" material properties in acoustic simulation models. It is therefore necessary to develop a systematic procedure to reduce the deviation between measured and calculated room impulse responses data and thus update and/or improve numerical simulation models.

Room Absorption Property Optimizer (RAPO) is a tool developed in this study to solve this issue. This tool is able to optimize the absorption coefficient of room materials by adjusting a ray tracing based simulation to a measured room impulse response.

To make this possible RAPO stores and processes the ray tracing information. Creating several matrices and being able to recreate the simulation mathematically, RAPO changes the room absorption parameters in an iterative way using a non-linear least squares optimization algorithm until the simulated *Energy Decay Curve* (EDC) fits as good as possible to the EDC taken from measured impulse responses.

However, the appropriate handling of additional simulation parameters, such as order of reflection and the number of rays, as well as the number and size of each material surfaces are crucial to reduce the number of possible optima and thus to improve the reliability of the optimization. These issues are discussed in detail in this study and open new topics for further investigations.

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen des Masterstudiums im Flugzeugbau am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg und wurde in Zusammenarbeit mit der Heinkel Group absolviert.

Mein spezieller Dank geht an meine Betreuer Prof. Dr.-Ing. (habil.) Thomas Kletschkowski und Dipl.-Phys. Benjamin Becker für die fachkundige Unterstützung und vor allem für das in mich gesetzte Vertrauen. Danke dafür, dass Sie mich stets aus jeder fachlichen Verzweiflung zurückgeholt haben und mich motiviert haben, auch Schritte zurück zu wagen.

Ich bedanke mich bei meinem Kollegen Daniel Sadra, welcher das Thema dieser Masterarbeit vorgeschlagen hat und mir fachlich aber auch moralisch im Verlauf der vorliegenden Masterarbeit stets zur Seite stand.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinem Kollegen Andre Greulich, der stets Interesse für meine Masterarbeit zeigte. Unsere Unterhaltungen haben mich auf viele Ideen gebracht.

Mein spezieller Dank geht auch an Jennifer Hoppe, Patrick Seeger, Alessandro Zerbetto, Manuel Heder, Thien Nguyen und das Statik-Team für die Runden am Kickertisch, welche als Stresskatalysator gewirkt haben.

Ich bedanke mich auch bei meiner Freundin, welche immer eine gute ZuhörerIn war und stets Ratschläge für organisatorische und nicht-fachliche Problemlösungen hatte.

Als letztes bedanke ich mich recht herzlich bei meiner Familie für ihre bedingungslose Unterstützung und vor allem bei meinen Korrekturlesern, die eine außerordentliche Leistung vollbracht haben.

Hamburg, den 17. Dezember 2015

Jens Hellemann

Inhaltverzeichnis

INHALTVERZEICHNIS	V
LISTE DER SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
TABELLENVERZEICHNIS	XIII
1 EINLEITUNG	15
1.1 ZIEL DER ARBEIT.....	17
1.2 MOTIVATION	17
1.3 AUFGABENSTELLUNG	18
1.4 AUFBAU DER ARBEIT	19
2 GRUNDLAGEN DER AKUSTIK	21
2.1 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER AKUSTIK	22
2.2 GRUNDLAGEN DER RAUMAKUSTIK	34
2.3 GRUNDLAGEN DER SIGNALVERARBEITUNG	47
3 GRUNDLAGEN DER RAUMAKUSTISCHEN SIMULATION MIT RAY TRACING	57
3.1 SCHALLQUELLE	58
3.2 EMPFÄNGER	60
3.3 ENERGIEÜBERTRAGUNGSFUNKTION.....	61
3.4 SIMULATIONSPARAMETER	62
4 METHODIK	63
4.1 VORGEHENSPLAN	64
4.2 SIMULATIONSMODELLE.....	65
4.3 NACHBERECHNUNG DER SIMULATION IN MATLAB	68
4.4 OPTIMIERUNG UND BESTIMMUNG DER KOSTENFUNKTION	72
4.5 ROOM ABSORPTION PROPERTY OPTIMIZER.....	75
5 VERIFIKATION UND VALIDIERUNG DES INVERSEN VERFAHRENS	81
5.1 EINFLUSS DER EINGANGSPARAMETER AUF DAS ERGEBNIS DER ABKLINGKURVE	82
5.2 TESTFÄLLE	88
5.3 REALES SZENARIO.....	116
6 AUSBLICK	122
7 FAZIT	125
LITERATURVERZEICHNIS	127
ANHANG A: PROTOKOLLFÜHRUNG DER SIMULATIONEN	129
ANHANG B: QUELLCODES	131
ANHANG C: BEDIENUNGSANLEITUNG RAPO	157

Liste der Symbole und Abkürzungen

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	[-]	Absorptionsgrad
γ	[grad]	Einfallswinkel
θ	[grad]	Polarwinkel
ϑ	[°C]	Temperatur in Celsius
κ	[-]	Isentropenexponent (auch bekannt als Adiabatenexponent)
μ	[-]	Residuum der Optimierung
λ	[m]	Wellenlänge
ζ	[m]	Auslenkung
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ϱ	[-]	Reflexionsgrad
σ	[-]	Streugrad
τ	[s]	Zeitvariable
τ_{max}	[s]	Maximale Verzögerungszeit. Der Wert gleicht dementsprechend der Simulationsdauer
Φ	[grad]	Azimutwinkel
v	[m/s]	Schallschnelle
\hat{v}	[m/s]	Amplitude der Schallschnelle
\hat{v}_e	[m/s]	Einfallende Amplitude der Schallschnelle
\hat{v}_r	[m/s]	Reflektierte Amplitude der Schallschnelle
\hat{v}_t	[m/s]	Transmittierte Amplitude der Schallschnelle
ω	[s ⁻¹]	Kreisfrequenz

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
A_{eq}	m^2	Äquivalente Absorptionsfläche
A_{ges}	m^2	Gesamtfläche
c_v	[J/kg · K]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
c_p	[J/kg · K]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
E	[J]	Energie
E_0	[J]	Anfangsenergie
f	[Hz]	Frequenz
f_{rO}	[Hz]	Relaxationsfrequenz von Stickstoff
f_{rO}	[Hz]	Relaxationsfrequenz von Sauerstoff
$h(t)$	[-]	Übertragungsfunktion im Zeitbereich
h	%	Luftfeuchtigkeit
h_i	%	Relative Luftfeuchtigkeit
I	[W/m ²]	Schallintensität
I_e	[W/m ²]	Einfallende Schallintensität
I_r	[W/m ²]	Gespiegelt-reflektierte Schallintensität
I_s	[W/m ²]	Gestreute Schallintensität
I_t	[W/m ²]	Transmittierte Schallintensität
K	[-]	Anzahl an diskreten Werten einer Abklingkurve
k	[m ⁻¹]	Wellenzahl
L_I	[dB]	Schallintensitätspegel
L_P	[dB]	Schalleistungspegel
L_p	[dB]	Schalldruckpegel
m_i	[dB/m]	Schalldämpfungskoeffizienten des Mediums i
N_L	[-]	Anzahl an simulierten Strahlen pro Quelle
n_{max}	[-]	Maximale Reflexionsordnung
P	[W]	Schalleistung
p	[Pa]	Schalldruck
\hat{p}	[Pa]	Schalldruckamplitude
p_a	[Pa]	Atmosphärendruck
p_{eff}	[Pa]	Effizienter Schalldruck
p_r	[Pa]	Referenzdruck der Atmosphäre auf dem Meeresspiegel bei 15°C. Dieser entspricht 1013,25hPa
R	[-]	Reflexionsfaktor
$S(f)$	[-]	Fourier transformierte Darstellung des Signals $s(t)$
$s(t)$	[-]	Signal in zeitlicher Darstellung
$s(n)$	[-]	Signal in diskreter Darstellung (digitale Signalverarbeitung)
T	[K]	Temperatur in Kelvin
T_s	[s]	Sabin'sche Nachhallzeit
T_{01}	[K]	Isothermer Referenzpunkt von 273,16K
T_{20}	[s]	Extrapolierte Nachhallzeit auf Basis eines energetischen Abfalls von 20dB

T_{30}	[s]	Extrapolierte Nachhallzeit auf Basis eines energetischen Abfalls von 30dB
T_{60}	[s]	Nachhallzeit
t	[s]	Zeit
t_j	[s]	Diskretes Zeitintervall
V	[m ³]	Volumen
z	[kg/m ² · s]	Feldimpedanz
z_i	[kg/m ² · s]	Feldimpedanz eines Mediums i

Physikalische Einheiten

	Einheit	Bedeutung
Druck	Pa	Pascal (Pa = Nm ²)
Energie	J	Joule (J = W · s)
Frequenz	Hz	Herz (Hz = s ⁻¹)
Länge	m	Meter
Leistung	W	Watt (W = kg · m ² /s ³)
Masse	kg	Kilogramm
Temperatur	°C	Grad Celsius (0°C = Temperatur vom Gefrier- bzw. Siedepunkt des Wassers bei einem Luftdruck von 1013,25hPa)
	K	Kelvin (273,15K = 1°C)
Pegel	dB	Dezibel
Zeit	s	Sekunde
	ms	Millisekunde

Mathematische Konstanten

Symbol	Größe	Bedeutung
π	$\pi \approx 3,14159$	Kreiszahl (Pi): Repräsentiert das Verhältnis zwischen Umfang und Durchmesser eines Kreises.
e	$e \approx 2,71828$	Eulersche Zahl
j	$j^2 = -1$	Imaginäre Zahl

Mathematische Operatoren

Abkürzung/Symbol	Bedeutung
div	Divergenz
grad	Gradient
Δ	Laplace Operator
Σ	Summe
Π	Produkt
∂	Partielles Differential

Textbezogene Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
IMPC	Impact Chance
GA	Geometrische Akustik
Kap.	Kapitel
LTI	Linear-zeitinvariant (eng. Linear Time Invariant)
RAPO	Room Absorption Property Optimazer
RT	Ray Tracing
s.	siehe
s.g.	so genannte/n
u.a.	unter anderem

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1.1:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES RAUMES	15
ABBILDUNG 1.2:	MESSAUFBAU DES KUNDTSCHEN ROHRS	16
ABBILDUNG 2.1:	DARSTELLUNG EINER LONGITUDINALEN WELLE ALS MASSENFEDERSYSTEM	22
ABBILDUNG 2.2:	SCHALLAUSBREITUNGSFORMEN EINER WELLENFRONT.....	25
ABBILDUNG 2.3:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER SCHALLREFLEKTION.....	27
ABBILDUNG 2.4:	GEOMETRISCHE REFLEXION.....	28
ABBILDUNG 2.5:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER SCHALLSTREUUNG (1).....	29
ABBILDUNG 2.6:	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER SCHALLSTREUUNG (2).....	29
ABBILDUNG 2.7:	HELMHOLTZRESONATOR	30
ABBILDUNG 2.8:	PORÖSE SCHALLABSORBER.....	30
ABBILDUNG 2.9:	DARSTELLUNG WELLENAUFTEILUNG BEI EINER REFLEXION IM RAUM.....	31
ABBILDUNG 2.10:	SCHALLDÄMPFUNG IN DER LUFT IN ABHÄNGIGKEIT VON f UND h	33
ABBILDUNG 2.11:	SCHALLDÄMPFUNG IN DER LUFT IN ABHÄNGIGKEIT VON f UND t	33
ABBILDUNG 2.12:	SIMULATIONSMETHODEN DER RAUMAKUSTIK	34
ABBILDUNG 2.13:	EXEMPLARISCHER QUADERRAUM.....	35
ABBILDUNG 2.14:	ZUNAHME DER MODENDICHTE ÜBER DIE FREQUENZBÄNDER.....	37
ABBILDUNG 2.15:	ANALOGIE DER STATISTISCHEN RAUMAKUSTIK ZUR STRÖMUNGSLEHRE.....	38
ABBILDUNG 2.16:	ZEITVERLAUF DER SCHALLEISTUNG EINER QUELLE (LINKS) UND DER ENERGIE DES ENTSPRECHENDEN DIFFUSEN SCHALLFELDES (RECHTS).....	39
ABBILDUNG 2.17:	SCHALLPEGEL DES DIFFUSEN SCHALLFELDES.....	40
ABBILDUNG 2.18:	BEISPIELE DER GEOMETRISCHEN RAUMAKUSTIK, LINKS DIE METHODE DER SPIEGELSCHALLQUELLEN, RECHTS DIE METHODE DES RAY TRACINGS	42
ABBILDUNG 2.19:	SPIEGELSCHALLQUELLENMETHODE	43
ABBILDUNG 2.20:	ABSTANDSGESETZ	44
ABBILDUNG 2.21:	DARSTELLUNG EINER RAY TRACING SIMULATION MIT EASE	46
ABBILDUNG 2.22:	DARSTELLUNG VON EIGENSCHWINGUNGSFORMEN EINER SEITE DER LÄNGE l ...	49
ABBILDUNG 2.23:	RAUMIMPULSANTWORT EINES EXEMPLARISCHEN RAUMES	50
ABBILDUNG 2.24:	DARSTELLUNG DES DIREKTEN UND INDIREKTEN IMPULSES.....	50
ABBILDUNG 2.25:	REFLEKTOGRAMM EINES EXEMPLARISCHEN RAUMES.....	51
ABBILDUNG 2.26:	DARSTELLUNG EINER SIMULIERTEN ABKLINGKURVE	52
ABBILDUNG 2.27:	DARSTELLUNG EINES EXEMPLARISCHEN DIRAC IMPULSES.....	54
ABBILDUNG 2.28:	TERZBANDBEZOGENE IMPULSANTWORTEN EINES FILTERS DER KLASSE 1 ZWEITER ORDNUNG.....	54
ABBILDUNG 2.29:	VERGLEICH DER TRANSFERFUNKTION VON BANDFILTERN BENACHBARTER TERZBÄNDER DER 2. ORDNUNG.....	55
ABBILDUNG 2.30:	ÜBERTRAGUNGSFUNKTION EINES FILTERS 2. ORDNUNG.....	55
ABBILDUNG 3.1:	WINKELBESCHREIBUNG DER RICHTCHARAKTERISTIK EINES LAUTSPRECHERS.....	58
ABBILDUNG 3.2:	RICHTCHARAKTERISTIK EINES EXEMPLARISCHEN LAUTSPRECHERS.....	59
ABBILDUNG 3.3:	PROBLEMATIK BEI DER SIMULATION VON EMPFÄNGERN.....	60
ABBILDUNG 3.4:	BLOCKDIAGRAMM EINER SIMULATION MIT RT (VORLÄNDER, 2008)	62
ABBILDUNG 4.1:	PROJEKTPLANUNG.....	64
ABBILDUNG 4.2:	SIMULIERTER QUADERRAUM.....	65
ABBILDUNG 4.3:	NACHBERECHNUNG DES SIMULIERTEN REFLEKTOGRAMMS.....	70
ABBILDUNG 4.4:	NACHBERECHNUNG DER SIMULIERTEN ABKLINGKURVE.....	71
ABBILDUNG 4.5:	VERGLEICH DER ABKLINGKURVEN UND REFLEKTOGRAMME HINSICHTLICH DER ABTAstrate.....	73
ABBILDUNG 4.6:	STRUKTURDARSTELLUNG DES OUTPUTS DER FUNKTION READRAYTRACEFILE.M	76
ABBILDUNG 4.7:	STRUKTURDARSTELLUNG DES OUTPUTS DER FUNKTION READTRACEDFILE.M	77
ABBILDUNG 4.8:	FLUSSDIAGRAMM DES OPTIMIERUNGSVORGANGES.....	79
ABBILDUNG 4.9:	OPTIMIERUNGSZIEL ERREICHT IN ACHT ITERATIONEN.....	80

ABBILDUNG 5.1:	EINFLUSS DER SIMULATIONSPARAMETER AUF DAS ABKLINGVERHALTEN DES SIMULIERTEN RAUMES (1).....	83
ABBILDUNG 5.2:	DARSTELLUNG DES ÜBER SIM1.E1 ERMITTELTEN REFLEKTOGRAMMS.....	84
ABBILDUNG 5.3:	DARSTELLUNG DES ÜBER SIM3.E1 ERMITTELTEN REFLEKTOGRAMMS.....	84
ABBILDUNG 5.4:	EINFLUSS DER SIMULATIONSPARAMETER AUF DAS ABKLINGVERHALTEN DES SIMULIERTEN RAUMES (2).....	85
ABBILDUNG 5.5:	PLOT DER KOSTENFUNKTION EINER UNIFORMEN MITTLEREN RAUMABSORPTION (TESTFALL I).....	89
ABBILDUNG 5.6:	VERGLEICH ZWISCHEN OPTIMIERTER UND ABGELESENER ABKLINGKURVE (TESTFALL I).....	90
ABBILDUNG 5.7:	MÖGLICHE ERGEBNISSE DER KOSTENFUNKTION EINER BIFORMEN RAUMABSORPTION LINEARER DARSTELLUNG (TESTFALL II-1).....	92
ABBILDUNG 5.8:	MÖGLICHE ERGEBNISSE DER KOSTENFUNKTION EINER BIFORMEN RAUMABSORPTION IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG (TESTFALL II-1).....	92
ABBILDUNG 5.9:	VERGLEICH ZWISCHEN OPTIMIERTER UND ABGELESENER ABKLINGKURVE (TESTFALL II-1).....	93
ABBILDUNG 5.10:	MÖGLICHE ERGEBNISSE DER KOSTENFUNKTION EINER BIFORMEN RAUMABSORPTION IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG (TESTFALL II-2).....	95
ABBILDUNG 5.11:	VERGLEICH ZWISCHEN OPTIMIERTER UND ABGELESENER ABKLINGKURVE (TESTFALL II-2).....	96
ABBILDUNG 5.12:	MÖGLICHE ERGEBNISSE DER KOSTENFUNKTION EINER BIFORMEN RAUMABSORPTION IN LINEARER DARSTELLUNG (TESTFALL II-3).....	98
ABBILDUNG 5.13:	MÖGLICHE ERGEBNISSE DER KOSTENFUNKTION EINER BIFORMEN RAUMABSORPTION IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG (TESTFALL II-3).....	98
ABBILDUNG 5.14:	VERGLEICH ZWISCHEN OPTIMIERTER UND ABGELESENER ABKLINGKURVE (TESTFALL II-3-B).....	100
ABBILDUNG 5.15:	MÖGLICHE ERGEBNISSE DER KOSTENFUNKTION EINER BIFORMEN RAUMABSORPTION IN LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG (TESTFALL II-4).....	102
ABBILDUNG 5.16:	VERGLEICH ZWISCHEN OPTIMIERTER UND ABGELESENER ABKLINGKURVE (TESTFALL II-4-A).....	103
ABBILDUNG 5.17:	ABKLINGKURVE (TESTFALL III-1).....	105
ABBILDUNG 5.18:	VERLAUF DER KOSTENFUNKTION IN ABHÄNGIGKEIT VOM ABSORPTIONSGRAD (TESTFALL III-1).....	106
ABBILDUNG 5.19:	VERGLEICH ZWISCHEN ABGELESENER UND NACHGERECHNETER ABKLINGKURVE (TESTFALL III-1).....	107
ABBILDUNG 5.20:	ABKLINGKURVE (TESTFALL III-2).....	108
ABBILDUNG 5.21:	VERLAUF DER KOSTENFUNKTION IN ABHÄNGIGKEIT VOM ABSORPTIONSGRAD (TESTFALL III-2).....	109
ABBILDUNG 5.22:	VERGLEICH DER KOSTENFUNKTION HINSICHTLICH DER ABTASTRATE (TESTFALL III-2).....	110
ABBILDUNG 5.23:	VERGLEICH ZWISCHEN ABGELESENER UND NACHGERECHNETER ABKLINGKURVE (TESTFALL III-2).....	110
ABBILDUNG 5.24:	VERGLEICH DER LÖSUNGEN HINSICHTLICH DER ABSORPTIONSGRADE (TESTFALL IV).....	113
ABBILDUNG 5.25:	VERGLEICH ZWISCHEN OPTIMIERTERN UND BERECHNETERN ABKLINGKURVEN (TESTFALL IV).....	113
ABBILDUNG 5.26:	VERGLEICH ZWISCHEN DEM ERGEBNIS DER RAY TRACING SIMULATION UND DER AURALISATION.....	118
ABBILDUNG 5.27:	VERGLEICH ZWISCHEN DEM ERGEBNIS DER OPTIMIERUNG UND DER DER AURALISATION (1).....	119
ABBILDUNG 5.28:	VERLAUF DER OPTIMIERTEN ABSORPTIONSGRADE UND DEREN ERWARTUNGSWERTE.....	120
ABBILDUNG 5.29:	ERGEBNISSE HINSICHTLICH DER GEMITTELTEN ABSORPTION.....	121
ABBILDUNG 6.1:	SCREENSHOT VOM 22.10.2015.....	123

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: RELEVANTE TERZ- UND OKTAVBÄNDER IM HÖRBAREN BEREICH	48
TABELLE 4.1: VARIANTEN DES SIMULIERTEN RAUMES HINSICHTLICH DER DIMENSIONEN	66
TABELLE 4.2: RAUMEIGENSCHAFTEN.....	66
TABELLE 4.3: FLÄCHENEIGENSCHAFTEN.....	67
TABELLE 5.1: EINGESETZTE PARAMETER BZGL. DER IN ABBILDUNG 5.1 DARGESTELLTEN SIMULATIONEN	82
TABELLE 5.2: LÖSUNGEN DER BEISPIELBEZOGENEN OPTIMIERUNGEN (TESTFALL II-3).....	99
TABELLE 5.3: LÖSUNGEN DER OPTIMIERUNGEN (TESTFALL II-4).....	102
TABELLE 5.4: VERSUCHSERGEBNISSE TESTFALL IV	112
TABELLE A.1: PROTOKOLLFÜHRUNG DER SIMULATIONEN.....	129

1 Einleitung

Das allgemeine Hörempfinden eines Raumes wird in hohem Maße von der Nachhallzeit und der damit verbundenen Raumabsorption beeinflusst. Die Raumabsorption wird objektiv über die sogenannten Absorptionsgrade beschrieben, welche heute anhand diverser Methoden gemessen werden können.

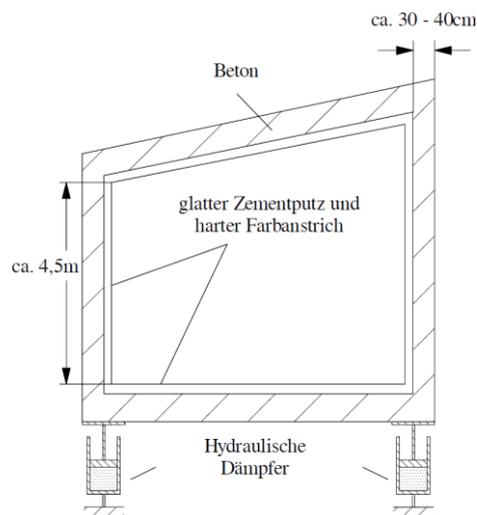


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung eines Raumes (Lerch, et al., 2009)

Hierbei findet beispielsweise der Hallraum (s. Abbildung 1.1) seinen Einsatz. Dieser wird vorwiegend zur Messung akustischer Leistung sowie von Absorptionsgraden gesamter Bauteile und Transmissionsgraden von Wänden eingesetzt (Lerch, et al., 2009). Ein Hallraum ist ein großer Raum, dessen Innenflächen hart und porenfrei sind. Somit werden eine gute Schallreflexion, eine entsprechend lange Nachhallzeit und ein nahezu perfektes diffuses Schallfeld erzielt. Die Ermittlung der Absorptionseigenschaften erfolgt über einen Vergleich zwischen dem Nachhall des leeren und des von einem Bauteil besetzten Raumes. Allerdings wird aus der Messung ein für alle Flächen des Bauteiles gemittelter frequenzabhängiger Absorptionsgrad ermittelt.

Die Möglichkeit für eine Ermittlung von Wandabsorptionsgraden bietet beispielsweise das Kundtsche Rohr bzw. das Impedanzrohr (s. Abbildung 1.2), wobei dieses nur für den senkrechten Schalleinfall gilt. Aus dieser Messung kann eine spektrale Ermittlung der Absorptionsgrade erfolgen, die einem bestimmten Material für Simulationszwecke zugeordnet werden kann.

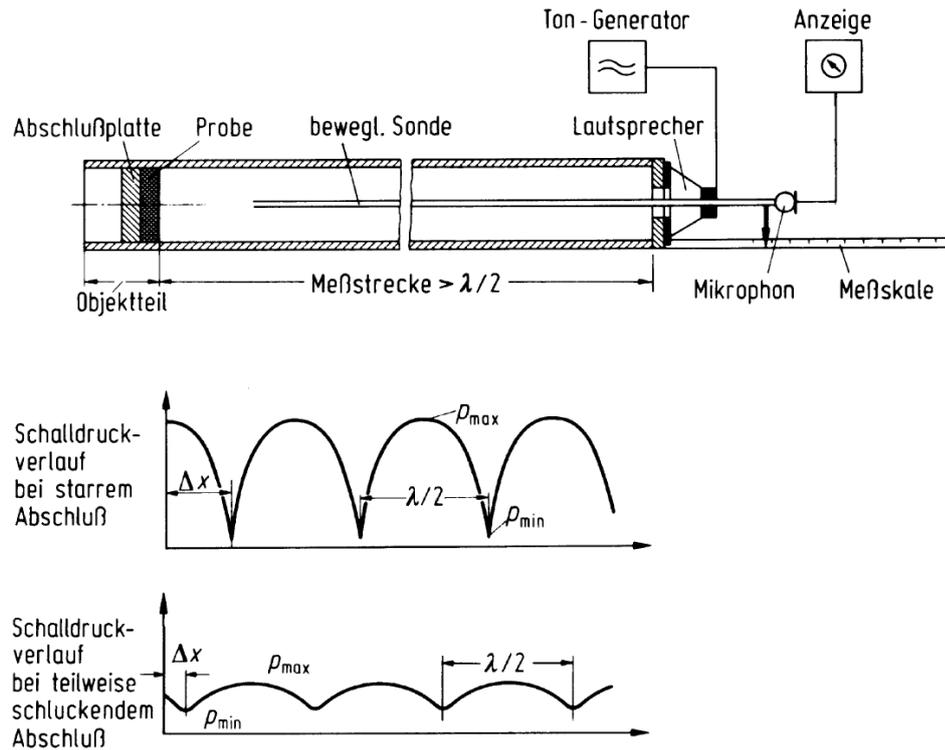


Abbildung 1.2: Messaufbau des Kundtschen Rohrs (Möser, 2012)

Raumakustische Prognosen werden in der Regel über eine entsprechende Simulationssoftware erstellt, deren Algorithmen in allen Fällen eine Vereinfachung der Begebenheiten darstellen. Das Ray Tracing beispielsweise betrachtet eine akustische Anregung als viele massenlose Partikel, welche Energie besitzen und sich als Strahl im Raum geradlinig ausbreiten. Dabei gehen welleneigene Eigenschaften und deren Auswirkungen im Raum, wie die der Resonanzeffekte verloren. Zudem ist es nicht nur dem Rechenaufwand gegenüber unverträglich, sondern auch unmöglich alle Schallereignisse zwischen einer Quelle und einem Empfänger über eine Simulation zu hundertprozentiger Genauigkeit zu reproduzieren. Dazu zählen unter anderem Ereignisse wie Beugungseffekte, Brechungseffekte, Reflexionen, Streuungen, Phasensprünge, Transmissions- und Körperschallvorgänge, welche von den unterschiedlichen raumakustischen Simulationsmethoden vereinfacht betrachtet oder gar komplett vernachlässigt werden.

Auch hinsichtlich einer Messung können kleinste Veränderungen der Randbedingungen wie die der Raumtemperatur dazu führen, dass das Ergebnis deutlich abweicht. Es genügt somit beispielsweise das Einschalten einer Klimaanlage oder das Öffnen eines Fensters, um die akustischen Eigenschaften eines Raumes zu beeinflussen. Es ist somit vorhersehbar, dass es trotz des Einsatzes der gemessenen „richtigen“ Absorptionsgrade zu Abweichungen zwischen einer Simulation und der Realität kommt.

1.1 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin ein systematisches Vorgehen zu entwickeln, welches die Abweichung zwischen einer Simulation und der Realität ausgleicht. Basierend auf den Gesetzen der geometrischen Akustik anhand des Einsatzes der raumakustischen Simulation mittels Ray Tracing erfolgt dies über eine Trimmung der in der Simulation einzusetzenden Absorptionsgrade.

1.2 Motivation

Die Bedeutung der akustischen Auslegung nicht existenter Kabinen steigt in der Luftfahrtindustrie stetig. Nicht nur allein der Tatsache, dass die Entwicklung einer Flugzeugkabine über Jahre hinweg betrieben wird, sondern auch auf Grund der wachsenden Zahl an regelmäßig fliegenden Passagieren. Diese verbringen mehrere Stunden in einem Raum, dessen Akustik eine entscheidende Rolle für das Wohlbefinden der Passagiere spielt. Dementsprechend setzen die Flugbetreiber einen hohen Wert auf Komfort und die Behörden hohe Ansprüche an sicherheitsrelevante Aspekte, wie die der Sprachverständlichkeit.

Es ist somit von großer Bedeutung, dass die Verlässlichkeit raumakustischer Prognosen zukünftig eine stets positive Entwicklung erfahren, um die stringenten Anforderungen unter anderem der Kunden und der Regularien erfüllen zu können.

Die vorliegende Arbeit baut somit auf eine reale Problematik auf, welche allerdings nicht nur in der Luft- und Raumfahrt Industrie vorhanden ist. Auch die Ansprüche der Kunden hinsichtlich der Akustik in einer Fahrzeugkabine steigen und der betriebene Aufwand bei der akustischen Auslegung von Hörsälen, Auditorien, aber auch Konzertsälen und Philharmonien wird verstärkt. In der Fahrzeugindustrie und der Bauindustrie lassen sich somit ebenfalls weitere Untersuchungen, aufbauend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, durchführen.

1.3 Aufgabenstellung

Optimierung von Eingangsgrößen für raumakustische Simulationen unter Berücksichtigung inverser Methoden

Student: Jens Hellmann, B.Eng, Master-Studiengang Flugzeugbau,
Matrikelnummer:1957248

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. (habil.) Thomas Kletschkowski,

Zweitprüfer: Dipl.-Phys. Benjamin Becker,

Aufgabenstellung:

Der Abgleich raumakustischer Simulationen mit experimentellen Daten ist zwingend erforderlich, um verlässliche Berechnungsmodelle für die Entwicklung von Fahrzeug- und Flugzeugkabinen einsetzen zu können. Mit Hilfe von energetischen Simulationsverfahren, wie der Strahlenverfolgung (eng. *ray tracing*), ist es möglich, Raumimpulsantworten und die daraus ableitbaren akustischen Raumeigenschaften vorherzusagen. Diese werden jedoch auch von Eingangsparametern, wie beispielsweise dem akustischen Absorptionsgrad, stark beeinflusst. Die Absorptionsgrade von realen technischen Systemen können sich von Absorptionsgraden, welche durch Messungen an Vergleichsproben (z.B. im Kundt'schen Rohr) ermittelt werden, signifikant unterscheiden. Es sind jedoch im Besonderen die Ergebnisse der Vergleichsproben, welche für akustische Simulationen als Eingangsparameter verwendet werden. Daher besteht die Notwendigkeit ein systematisches Vorgehen zu entwickeln, welches die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Raumimpulsantworten reduziert.

Im Rahmen dieser Masterarbeit ist ein für diesen Zweck geeignetes Vorgehen zu entwickeln, zu implementieren und zu testen, wobei folgende Aspekte zu berücksichtigen sind:

1. Einarbeitung in die theoretischen/ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, der raumakustischen Simulation und der numerischen Optimierung.
2. Konzeption und Implementierung eines inversen Verfahrens zur Identifikation von Wandabsorptionsgraden unter Verwendung der Methode der Strahlenverfolgung.
3. Anwendung, Verifikation und Validierung des inversen Verfahrens anhand analytischer und/oder numerischer Modelle und falls möglich experimenteller Daten.
4. Fortlaufende schriftliche Dokumentation des Vorgehens und der erreichten Ergebnisse.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Optimierung von Eingangsgrößen (hier Absorptionsgrade) für raumakustische Simulationen mit der Methode des Ray Tracing unter Berücksichtigung inverser Methoden. Der Aufbau der vorliegenden Arbeit lässt sich in vier Bereiche unterteilen:

1. Einleitend werden die wesentlichen Grundlagen der technischen Akustik vorgestellt, welche für das Verständnis der Arbeit bedeutend sind. Hierbei werden wichtige Hinweise hinsichtlich der Schallausbreitung in Gasen und die Wirkung von Hindernissen auf das Schallfeld beschrieben, um anschließend einen Einblick in wichtige raumakustische Vorgänge und in die Signalverarbeitung zu geben.
2. Neben den Grundlagen der technischen Akustik wird ein Einblick in die Grundlagen der akustischen Simulation mit Ray Tracing und deren Implementierung in das für die vorliegende Arbeit eingesetzte Simulationsprogramm gegeben.
3. Anschließend stellt diese Arbeit die vom Verfasser angewandte Vorgehensweise vor. Hierbei wird eine Zusammenfassung der Prozesse erläutert, welche den Ablauf sowie die entscheidenden Meilensteine der über sechs Monate durchgeführten Arbeit beschreiben. Zusätzlich werden die unterschiedlichen numerischen Simulationsmodelle dargestellt, welche mit Hilfe eines kommerziellen Ray Tracing Programmes der Ahnert Feistel Media Group AFMG[®] im Verlauf der Arbeit erstellt worden sind. Als Ergebnis der Methodik dieser Arbeit wird das Berechnungshilfsprogramm *Room Absorption Property Optimizer* (RAPO) vorgestellt, welches vom Verfasser dieser Arbeit selbständig mit Hilfe des Berechnungsprogramms MATLAB[®] entwickelt wurde.
4. In Hinblick auf den Validierungsprozess wird RAPO an Testfällen erprobt, wobei die Messungen durch numerische Simulationen ersetzt werden. Am Beispiel von Rechteckräumen wird untersucht, mit welcher Güte mittlere und frequenzabhängige Wandabsorptionsgrade bestimmt werden können, und wie gut die der Fehlerquadratminimierung entstammenden optimalen Parameter den Abgleich gemessener und berechneter Abklingkurven ermöglichen.

Zum Abschluss präsentiert die vorliegende Arbeit eine Diskussion der Ergebnisse sowie einen darauf aufbauenden Ausblick für mögliche zukünftige Untersuchungen. Eine Beschreibung aller numerischen Simulationsmodelle sowie alle Quellcodes und eine Bedienungsanleitung für RAPO sind im Anhang zu finden.

2 Grundlagen der Akustik

Schall ist im alltäglichen Leben immer präsent. Jeder Stoß, jede Vibration, jede Reibung lässt Schall entstehen. Es sind die alltäglichen Erfahrungen, die Hinweise darauf geben, wie die Schallausbreitung stattfindet. Würde man als Beispiel auf einen Blitzschlag achten, bemerkt man eine Verzögerung zwischen der Licht- und der Schallwahrnehmung. Diese Verzögerung entsteht durch den großen Geschwindigkeitsunterschied zwischen beiden Kenngrößen und wächst mit zunehmendem Abstand zur Quelle. Wenn man nun davon absieht, dass Schallquellen eine Richtcharakteristik haben (daher nicht in alle Richtungen gleichmäßig Schall abstrahlen) und dass die Umgebung auch einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Signals hat (Echos, Nachhall, Dämpfung), dann stellt man fest, dass es nur folgende ortsabhängige Unterschiede zwischen den Beobachtungspunkten gibt: Die Verzögerungszeit und die Lautstärke des Blitzgeräusches. Insbesondere hört sich das Signal in jedem Beobachtungspunkt gleich an, weil die Signalgestalt beim Wellentransport nicht „auseinander läuft“. Die Wellenausbreitung versteht man hier als nicht-dispersiv. Dies ist womöglich eine der wichtigsten Eigenschaften der Schallausbreitung in Gasen. Würde dies nicht der Fall sein, wäre die Sprachkommunikation fast unmöglich ([Möser, 2012](#)).

In Festkörpern hingegen breitet sich hochfrequenter Schall schneller aus als tieffrequenter Schall. Dieses Phänomen tritt auf, weil im festen Körper Wellenformen auftreten, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig ist. Man nennt dies Schalldispersion und kann beim Gehen auf gefrorenem Wasser beobachtet werden. Die Schallausbreitung im festen Medium ist allerdings für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung, weil als Medium ausschließlich Luft betrachtet wird.

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Grundlagen der technischen Akustik vorgestellt, welche für das Verständnis der Arbeit relevant sind. Einleitend werden im Zusammenhang mit der grundlegenden Physik der Schallausbreitung in Gasen die physikalischen Größen vorgestellt, welche das Schallfeld beschreiben. Weiterhin befasst sich dieses Kapitel mit der Wirkung von Hindernissen auf das Schallfeld, um abschließend einen Einblick in wichtige raumakustische Vorgänge zu geben. Die mathematischen Herleitungen der Grundlagen werden nicht im Detail präsentiert. Sie sind jedoch in der akustischen Literatur ausführlich beschrieben [siehe ([Cramer et. al., 1976](#); [Möser, 2012](#); [Vorländer, 2008](#))].

2.1 Physikalische Grundlagen der Akustik

2.1.1 Schallausbreitung in Gasen

Schall ist eine mechanische Schwingung, welche aus einer plötzlichen lokalen Änderung der Dichte eines elastischen Mediums entsteht und sich mit Schallgeschwindigkeit als eine Welle im Medium ausbreitet. Der vom Schall erfasste Raum wird als Schallfeld bezeichnet.

Eine Schallwelle breitet sich in Gasen als eine longitudinale Welle aus. Dabei werden die Teilchen im Medium in Richtung der Wellenausbreitung von der Ruhelage ausgelenkt. Zwischen den ausgelenkten und den benachbarten Teilchen entsteht eine lokale Kompression bzw. Dekompression, welche in Form einer Kettenreaktion weitere benachbarte Teilchen aus der Ruhelage bringt (s. Abbildung 2.1).

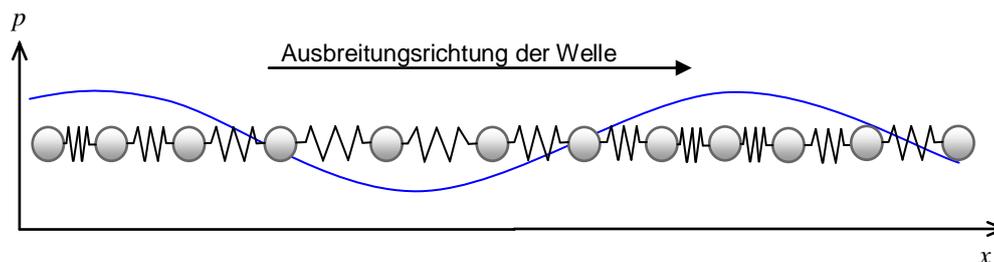


Abbildung 2.1: Darstellung einer longitudinalen Welle als Massenfedersystem

Hierbei spielen die Schallschnelle v und der Schalldruck p als Feldgrößen die Hauptrolle bei der Beschreibung des örtlichen und zeitlichen Vorgangs der Schallausbreitung.

Die Schallschnelle ist definiert als die Auslenkungsgeschwindigkeit der Teilchen aus der Ruhelage. Sie folgt einem zeit- und ortsabhängigen Auslenkungsvektor $\vec{\xi}$, dessen Ableitung über die Zeit die Schallschnelle ebenfalls als Vektor wiedergibt ([Vorländer, 2008](#)).

$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t} \quad 2.1$$

Die Schallschnelle ist nicht mit der Schallgeschwindigkeit zu verwechseln. Die Schallgeschwindigkeit ist die temperatur- und dichteangängige Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle im Medium. In der Luft beträgt diese bei einer Temperatur von 20°C ca. 343m/s. Die Schallschnelle ist abhängig von der Auslenkungsamplitude und der Frequenz des akustischen Signals.

Der Schalldruck resultiert aus den Verdichtungsvorgängen und ist die wohl wichtigste Feldgröße zur Beschreibung des Schallfeldes. Grund dafür ist, dass das menschliche Ohr auf diese Größe besonders empfindlich reagiert. Als Beispiel entspricht der Schalldruck für die Hörschwelle eines gesunden Ohrs $2 \cdot 10^{-5}$ Pa bei 1000Hz. Das menschliche Ohr ist somit in der Lage Druckschwankungen aufzuspüren, welche ca. fünf-milliardenfach schwächer sind als der vorhandene Druck in der Atmosphäre.

Die Schallfeldgleichungen lassen sich auf Basis des Massenerhaltungssatzes für Gleichung 2.2 (Aretz, 2012) und der Impulserhaltung nach dem dynamischen Grundgesetz von Newton für Gleichung 2.3 bestimmen (Kuttruff, 2009).

$$\text{grad } p = -\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad 2.2$$

$$\text{div } \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad 2.3$$

Die Werte p , ρ_0 und c sind hierbei skalare Größen für Schalldruck, Dichte und Schallgeschwindigkeit. Die allgemeine Wellengleichung lässt sich aus den Schallfeldgleichungen herleiten. Hier wird die Schallausbreitung als ein thermodynamisch adiabater Vorgang betrachtet. Grund hierfür ist, dass die Druckwechselwirkungen so schnell erfolgen, dass den lokalen Temperaturänderungen im Medium nicht genügend Zeit zur Verfügung steht, um Wärme in die Umgebung weiterzuleiten. Daraus resultiert ein konstantes zeit- und ortsunabhängiges Verhältnis zwischen Schalldruck und Schalldichte (Möser, 2012)

$$\frac{p_G}{p_0} = \left(\frac{\rho_G}{\rho_0} \right)^\kappa, \quad 2.4$$

worin p_G und ρ_G absolute Werte für Druck und Dichte sind und p_0 und ρ_0 die im Medium vorhandenen Werte für Druck und Dichte beschreiben. Der Isentropenexponent $\kappa = c_p/c_v$ beschreibt das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_v .

Durch Kombination der Gleichungen 2.2, 2.3 und 2.4 lässt sich die allgemeine Wellengleichung mit Hilfe des Laplace-Operators Δ für Schalldruck und Schallschnelle herleiten (Cremer, et al., 1978)

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad 2.5$$

$$\text{div}(\text{grad } \vec{v}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial t^2}, \quad 2.6$$

worin p und v komplexe ort- und zeitabhängige Werte für den Schalldruck und die Schallschnelle beschreiben. Mit der allgemeinen Wellengleichung kann man somit Schalldruck und Schallschnelle an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt innerhalb eines Schallfeldes ermitteln.

Für reine Töne der Funktion $p(x, t) = \hat{p}(x) \cdot e^{j\omega t}$ (eindimensionaler Fall) kann die allgemeine Wellengleichung in die sogenannte Helmholtzgleichung umgeformt werden (Aretz, 2012)

$$p''(x) + k^2 p(x) = 0, \quad 2.7$$

worin $k = \omega/c$ die Wellenzahl und $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz der Funktion beschreibt.

2.1.2 Die Feldimpedanz

Die Feldimpedanz Z ist eine Größe, welche auf atomarer bzw. molekularer Ebene agiert. Man kann die Feldimpedanz als diejenige Größe beschreiben, welche verhindert, dass der Schalldruck benachbarte Teilchen aus der Ruhelage lenkt. Sie ist daher ein Widerstand, der von Dichte und Schallgeschwindigkeit im Medium abhängt und aus dem Quotient der Schalldruckamplitude \hat{p} bezogen auf die Amplitude der Schallschnelle \hat{v} gemäß Gleichung 2.8 berechnet werden kann.

$$\frac{\hat{p}}{\hat{v}} = z = \rho_0 \cdot c \quad 2.8$$

Die Feldimpedanz ist eine wichtige Größe in der Raumakustik, denn es ist das Verhältnis der Impedanzen an der Grenzschicht zweier verschiedener Medien, die den Grad der Reflexion bzw. Transmission von Schall bestimmen.

2.1.3 Energie und Leistungstransport

Im Vorgang der Schallausbreitung wird lediglich Energie transportiert. Wenngleich der Schalldruck eine Auslenkung von Teilchen verursacht, schwingen diese nur innerhalb eines Schwerpunktes und wandern nicht mit der Schallwelle mit.

Die transportierte Schallenergie stammt aus der abgestrahlten Energie einer Schallquelle der Schallleistung P . Je nachdem wie die Schallquelle aufgebaut und im Raum oder im Freien ausgerichtet ist, kann sich eine Schallwelle mit einer charakteristischen Form ausbreiten (s. Abbildung 2.2).

Dabei verteilt sich die abgestrahlte Schallleistung der Quelle über die Fläche einer sogenannten Wellenfront. Die Schallintensität I bezeichnet man als die Leistung, die

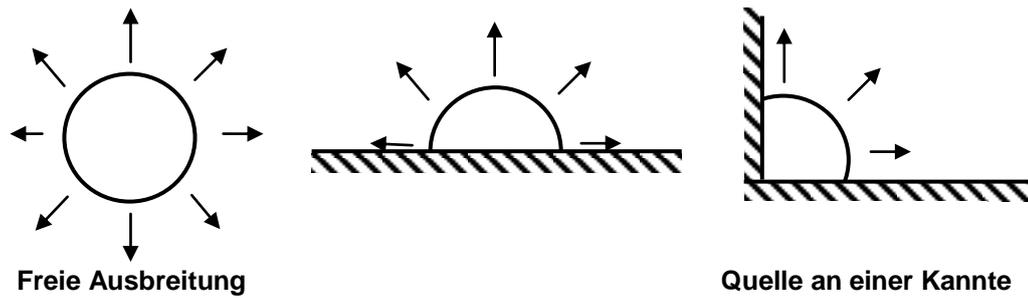


Abbildung 2.2: Schallausbreitungsformen einer Wellenfront

an einem Quadratmeter der Wellenfront vorhanden ist, die gemäß Gleichung 2.9 aus dem Quadrat des effizienten Schalldruckes p_{eff} für jeden Flächenabschnitt an einem festen Ort berechnet werden kann. Summiert man gemäß Gleichung 2.10 die Schallintensitäten aller Flächenanteile, führt dies wieder zur Schalleistung der Quelle zurück.

$$|\vec{I}| = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{\rho_0 \cdot c} dt = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 \cdot c} \quad 2.9$$

$$P = \int_S \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad 2.10$$

Schallintensitäten, Schalleistungen und auch Schalldrücke werden oft als Pegel anhand einer logarithmischen Skala zur Basis 10 bewertet,

$$\text{Schalldruckpegel} \quad L_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{\text{eff}}}{p_0} \right), \quad 2.11$$

$$\text{Schallintensitätspegel} \quad L_I = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{|\vec{I}|}{I_0} \right), \quad 2.12$$

$$\text{Schalleistungspegel} \quad L_P = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad 2.13$$

worin $P_0 = 10^{-12} \text{W}$, $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ und $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}$ als Bezugsgrößen für die Hörschwelle und somit einem Pegel von 0dB eingesetzt werden (Möser, 2012).

2.1.4 Schallreflexion

Im Bereich der Raumakustik ist die Betrachtung der Schallreflexion von entscheidender Bedeutung. Relevant sind hier nicht nur die geometrischen Eigenschaften einer Grenzfläche, sondern auch deren Einfluss auf die Schallfeldgrößen (Schalldruck und Schallschnelle). Um den Vorgang der Schallreflexion vereinfacht zu beschreiben, wird in Folge ein eindimensionaler Fall mit senkrechtem Schalleinfall betrachtet.

Trifft eine Anregung der Funktion $p(x, t) = \hat{p}(x) \cdot e^{j\omega t}$ auf eine Grenzfläche, teilt sich diese in eine reflektierte und eine transmittierte Welle. Die transmittierte Welle wird jetzt nicht behandelt, da sie außerhalb des betrachteten Schallfeldes bleibt.

$$\text{Hinlaufende Welle: } p(x, t) = \hat{p}(x) \cdot e^{-j\omega t}$$

$$\text{Reflektierte Welle: } p(x, t) = r \hat{p}(x) \cdot e^{j\omega t}$$

Hierbei repräsentiert r den komplexen Reflexionsfaktor. Setzt man die Koordinate $x=0$ an der Grenzfläche, superpositionieren sich im Bereich $x<0$, somit vor der Grenzfläche, hinlaufende und reflektierte Schallwelle zu einem in gleicher Weise aufgebauten

Schalldruck

$$p(x, t) = \hat{p}(x) \cdot (e^{-j\omega t} + r \cdot e^{j\omega t}), \quad 2.14$$

bzw. Schallschnelle

$$\vec{v}(x, t) = \frac{\hat{p}(x)}{z_0} \cdot (e^{-j\omega t} - r \cdot e^{j\omega t}). \quad 2.15$$

wobei hier z_0 die Feldimpedanz vor der Grenzfläche beschreibt.

Inwiefern eine Welle an einer Grenze reflektiert wird, hängt von der sogenannten Wandimpedanz der Grenzfläche ab,

$$z = \frac{\hat{p}(x=0)}{\hat{v}(x=0)}. \quad 2.16$$

Setzt man nun Schalldruck (Gleichung 2.14) und Schallschnelle (Gleichung 2.15) in Gleichung 2.16 und stellt sie anschließend nach r um, dann wird der Reflexionsfaktor zu

$$r = \frac{z - z_0}{z + z_0},$$

wobei r komplex ist, da die Wandimpedanz Z in den meisten Fällen einen Phasensprung zwischen hinlaufender und rücklaufender Welle verursacht. Das Quadrat des Betrages vom Reflexionsfaktor stellt das Verhältnis zwischen reflektierter und einfallender Schalleistung dar.

$$\varrho = |r|^2 = \left| \frac{z - z_0}{z + z_0} \right|^2 \quad 2.17$$

Der Vorgang der Reflektion kann auch als ein energetisches Gleichgewicht betrachtet werden. Dabei teilt sich ebenfalls die Intensität einer in einer Grenzfläche zweier Medien einfallenden Welle in eine reflektierte und eine transmittierte Welle auf (s. Abbildung 2.3).

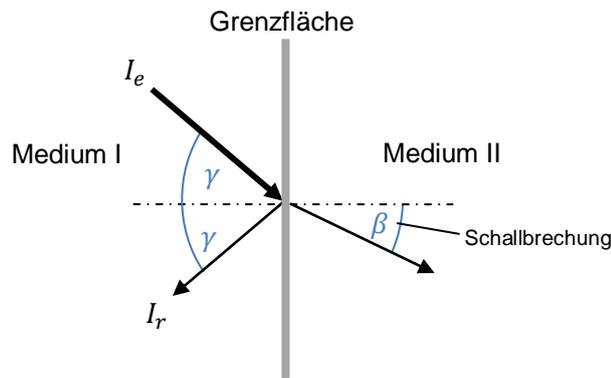


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Schallreflektion

Wird bei der Reflektion der Betrag der gestreuten und dissipierten Intensität vernachlässigt, beträgt somit

$$I_e = I_r + I_t,$$

wobei I_e den Betrag der Intensität der einfallenden Welle, I_r den der mit dem Winkel γ gespiegelt reflektierten und I_t transmittierten Welle darstellt. Ersetzt man nun die Intensitäten durch Geschwindigkeitsamplituden $I = \frac{1}{2} \rho_0 c \cdot \hat{v}^2$ mit $z_i = \rho_i c$, folgt:

$$I_e = I_r + I_t = \frac{1}{2} z_I \cdot \hat{v}_r^2 + \frac{1}{2} z_{II} \cdot \hat{v}_t^2,$$

$$I_r = I_e - I_t = \frac{1}{2} z_I \cdot \hat{v}_e^2 - \frac{1}{2} z_{II} \cdot \hat{v}_t^2,$$

$$I_r = I_e - I_t = \frac{1}{2} z_I \cdot \hat{v}_e^2 - \frac{1}{2} z_{II} \cdot \hat{v}_t^2.$$

Mit etwas geschickter Umformung kann nun der Grad der Reflektion anhand des Verhältnisses zwischen reflektierter und eintreffender Schallintensität berechnet werden

$$\varrho = \frac{I_r}{I_e} = \left| \frac{z_{II} - z_I}{z_I + z_{II}} \right|^2,$$

wobei ϱ den Reflexionsgrad und z_I sowie z_{II} die Feldimpedanzen der jeweiligen Medien darstellen. Betrachtet man nun z_{II} als Wandimpedanz z , erkennt man die Ähnlichkeit dieser Gleichung mit Gleichung 2.17.

Reflexionsfaktor r und Reflexionsgrad ϱ lassen erkennen, dass Reflektion von Schall dann auftritt, wenn die Schallwelle eine plötzliche Änderung der Feldimpedanz erfährt. Dabei ist es egal, ob die Impedanz des Mediums II verglichen mit Medium I größer oder geringer ist, da es eine Frage des Betrags ist.

2.1.5 Schallstreuung

Wenn eine Schallwelle auf ein Objekt trifft, dessen Oberfläche völlig glatt ist, wird diese mit einem Winkel γ gespiegelt reflektiert (s. Abbildung 2.4).

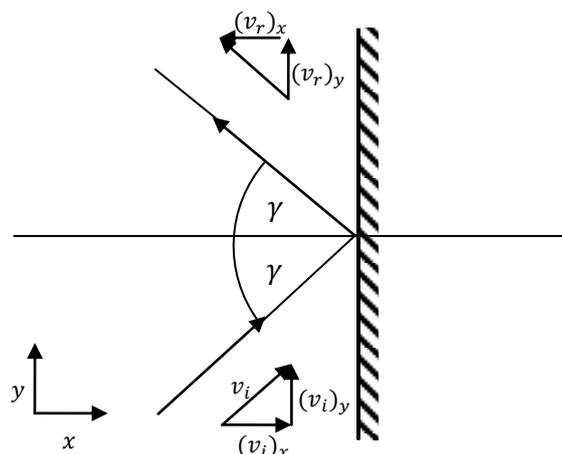


Abbildung 2.4: Geometrische Reflexion [nach (Vorländer, 2008)]

Bei rauen und unebenen Flächen treten hingegen starke Streuungen bei der Reflexion auf. Inwiefern die Welle streut, hängt vom Verhältnis der Wellenlänge λ und der Dimensionen der Unebenheiten ab. Streuungen treten besonders stark auf, wenn sich beide Größen im Verhältnis $\frac{1}{2}$ zueinander befinden (s. Abbildung 2.5).

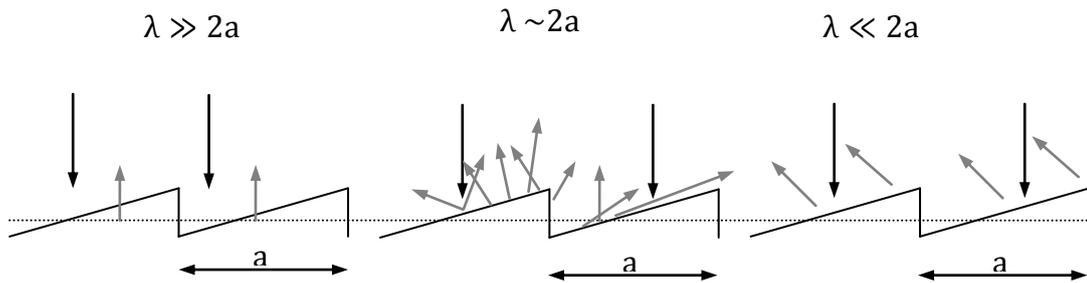


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Schallstreuung (1) [nach (Kuttruff, 2009)]

Der Grad der Streuung wird vom Streugrad σ beschrieben. Betrachtet man die Streuung als Teil des Reflexionsvorganges, kann die Energie des reflektierten Schalls wie folgt berechnet werden:

$$I_r = I_e \cdot (1 - \alpha)(1 - \sigma) \quad 2.18$$

wobei hier α den im nächsten Kapitel vorgestellten Absorptionsgrad repräsentiert und I_r den Betrag der Intensität der mit dem Einfallswinkel gespiegelt reflektierten Welle darstellt.

Der Streugrad kann aus Messungen bestimmt werden, deren Daten als Eingangsparameter für Simulationszwecke verwendet werden können. Diese beschreiben dann den energetischen Anteil einer eintreffenden Schallwelle, welcher nicht gespiegelt reflektiert wird (s. Abbildung 2.6). Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass eine solche Messung nur bedingt exakt sein kann.

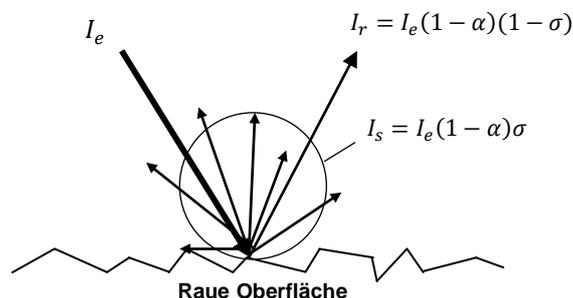


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Schallstreuung (2) [nach (Vorländer, 2008)]

Die Gleichmäßigkeit der Richtungsverteilung der gestreuten Energie wird über den Diffusionskoeffizienten bestimmt. Dieser beschreibt in einem Wert die Gleichmäßigkeit der Verteilung des Schalls von der Oberfläche des Gegenstands. Wenn die

Energie gleichförmig in alle Richtungen gestreut wird, dann ist der Diffusionskoeffizient Eins. Wenn die gesamte Energie in eine Richtung gestreut wird, dann ist der Diffusionskoeffizient Null. Der Diffusionskoeffizient wird in der Regel für jedes Terzband (siehe Kap. *Grundlagen der Signalverarbeitung*) bestimmt und ist somit frequenzabhängig (Vorländer, 2008).

Für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird der Streugrad für alle Flächen gleich Null gesetzt. Der Einfluss des Streugrades sowie des Diffusionskoeffizienten auf das Ergebnis der Arbeit wird somit nicht untersucht.

2.1.6 Absorption von Schall

Definitionsgemäß ist die Absorption von Schall als eine Umwandlung der Schallenergie in eine andere Form von Energie zu verstehen. Beispielsweise finden hier speziell für die Absorption von Schall entwickelte Bauteile ihren Einsatz, wie Helmholtzresonatoren oder poröse Materialien, welche Schallenergie in kinetische Energie bzw. Wärmeenergie umwandeln.

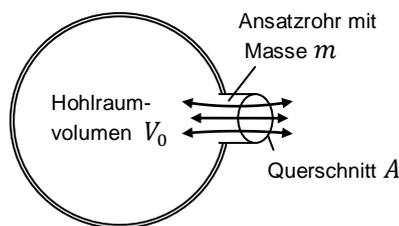


Abbildung 2.7: Helmholtzresonator [nach (Lerch, et al., 2009)]

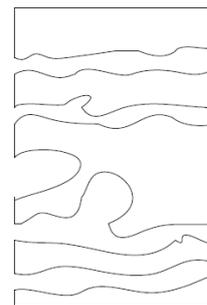


Abbildung 2.8: Poröse Schallabsorber (Möser, 2012)

2.1.6.1 Schallabsorption als Verlustgrad

Die Definition von Schallabsorption kann allerdings relativiert werden. In der Raumakustik bringt man die Schallabsorption gerne in einen direkten Zusammenhang mit dem Reflexionsgrad. Wenn eine Schallwelle im Raum eine Wand trifft, teilt sich diese, wie im Kap. *Schallreflexion* beschrieben, in mehrere Wellen- bzw. Energieanteile auf (s. Abbildung 2.9).

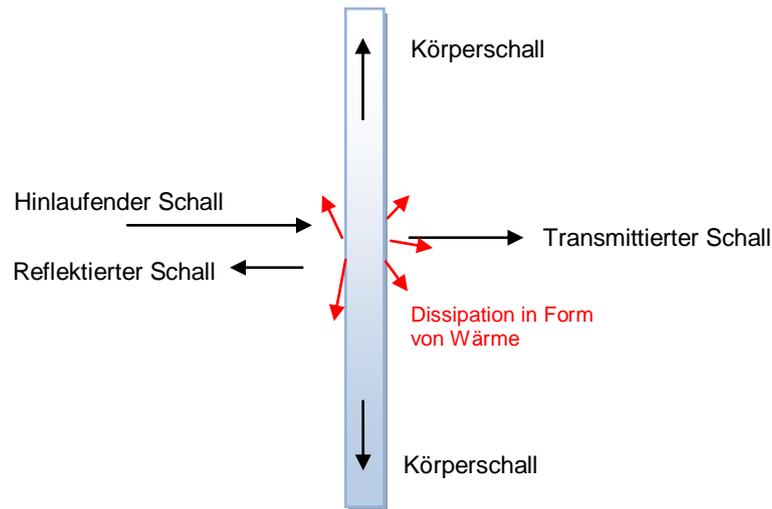


Abbildung 2.9: Darstellung Wellenaufteilung bei einer Reflexion im Raum

Da allerdings nur der reflektierte Anteil im Raum bleibt, kann der Absorptionsgrad als ein Verlustgrad des reflektierten Anteils bezogen auf die eintreffende Anregung betrachtet werden. Der Absorptionsgrad schließt somit nicht nur die dissipierte Schallenergie, sondern auch den transmittierten Schall und den Körperschall ein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit gilt somit als Grundlage für die Definition des Absorptionsgrades die Annahme, dass all diejenige Energie, welche nicht reflektiert wird, absorbiert wird.

Somit lässt sich der Absorptionsgrad α gemäß folgender Gleichung 2.19 berechnen:

$$\alpha = 1 - \varrho = 1 - |r|^2 \quad 2.19$$

2.1.6.2 Schalldämpfung in der Luft

Grundsätzlich wandelt jedes Medium Schallenergie in Wärme um. Betrachtet man Luft als Medium, hängt die Schallabsorption hauptsächlich von der Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur ab. Diese definiert sich als die molare prozentuale Konzentration von Dampfparkeln in der Luft und lässt sich aus folgender Gleichung berechnen

$$h = h_t \cdot 10^{-6,8346 \left(\frac{T_{01}}{T}\right)^{1,261} + 4,6151} \cdot \left(\frac{p_a}{p_r}\right), \quad 2.20$$

wobei T_{01} einen isothermen Referenztaupunkt von 273,16K, p_a und T den vorhandenen Druck und die Temperatur, p_r den Referenzdruck in der Atmosphäre von 1013,25 hPa und h_t die relative Luftfeuchtigkeit darstellen (ISO:9613, 1993).

Die relative Luftfeuchtigkeit definiert sich als das Verhältnis zwischen dem momentanen Wasserdampfgehalt zum maximal möglichen Gehalt bei gegebenem Druck und Temperatur (ISO:9613, 1993). Je höher der Druck und die Temperatur, desto höher

der mögliche Dampfgehalt in der Luft und desto geringer die relative Luftfeuchtigkeit. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 100% führt zur Bildung von Tau oder Nebel in der Luft. Diese Abhängigkeit ist der Grund, weshalb sich Wolken in der Regel erst ab einer bestimmten Höhe bilden.

Luft besteht zu 99,03% aus Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂) Molekülen. Diese werden vom Schalldruck zum Schwingen und Rotieren angeregt. Den Partikeln wird somit kinetische Energie zugeführt, welche dem Schall entzogen und auf Grund intermolekularer Reibkräfte in Form von Wärmeenergie abgebaut wird. Für die Berechnung der absorbierenden Eigenschaften von Luft sind somit vorab die sogenannten *Relaxationsfrequenzen* von Sauerstoff f_{rO} und Stickstoff f_{rN} gemäß Gleichungen 2.21 und 2.22 zu berechnen.

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4,04 \cdot 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \quad 2.21$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \dots \quad 2.22$$

$$\cdot \left(9 + 280h \cdot \exp \left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \right)$$

Mit den berechneten Relaxationsfrequenzen lässt sich nun die Schalldämpfung der Luft m_L mit Gleichung 2.23 berechnen,

$$m_L = 8,686 f^2 \left(\left[1,84 \cdot 10^{-11} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \dots \quad 2.23$$

$$\cdot \left\{ 0,01275 \exp \left(\frac{-2239,1}{T} \right) \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} \right.$$

$$\left. + 0,1068 \exp \left(\frac{-3352,0}{T} \right) \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \right\} \right),$$

wobei f eine beliebig gewählte Frequenz darstellt. Somit ist die Schalldämpfung in der Luft frequenzabhängig. Dies spiegelt sich in den folgenden Graphen wieder.

Die Abbildung 2.10 und Abbildung 2.11 zeigen deutlich, dass insbesondere Frequenzen über 1kHz eine starke Dämpfung in der Luft erfahren. Weiterhin verdeutlichen diese die Bedeutung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur auf die Schalldämpfung in der Luft, besonders im hochfrequenten Bereich.

Die Schalldämpfung der Luft m_L wird in dB/m angegeben. Das gesamte Kap. *Schalldämpfung in der Luft* bezieht sich auf die Literatur (ISO:9613, 1993).

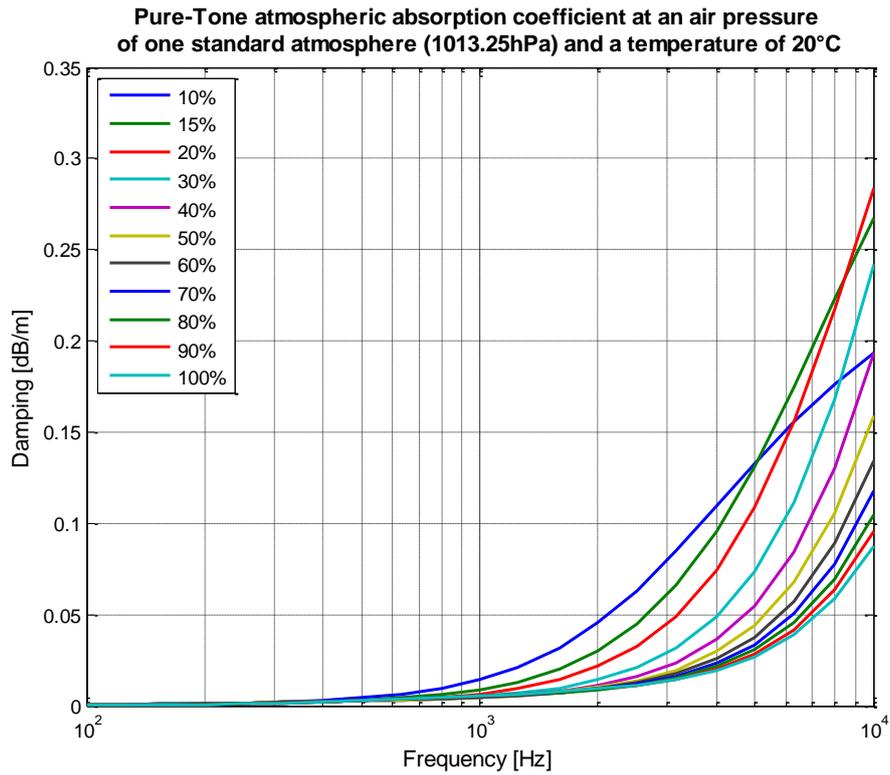


Abbildung 2.10: Schalldämpfung in der Luft in Abhängigkeit von f und h .

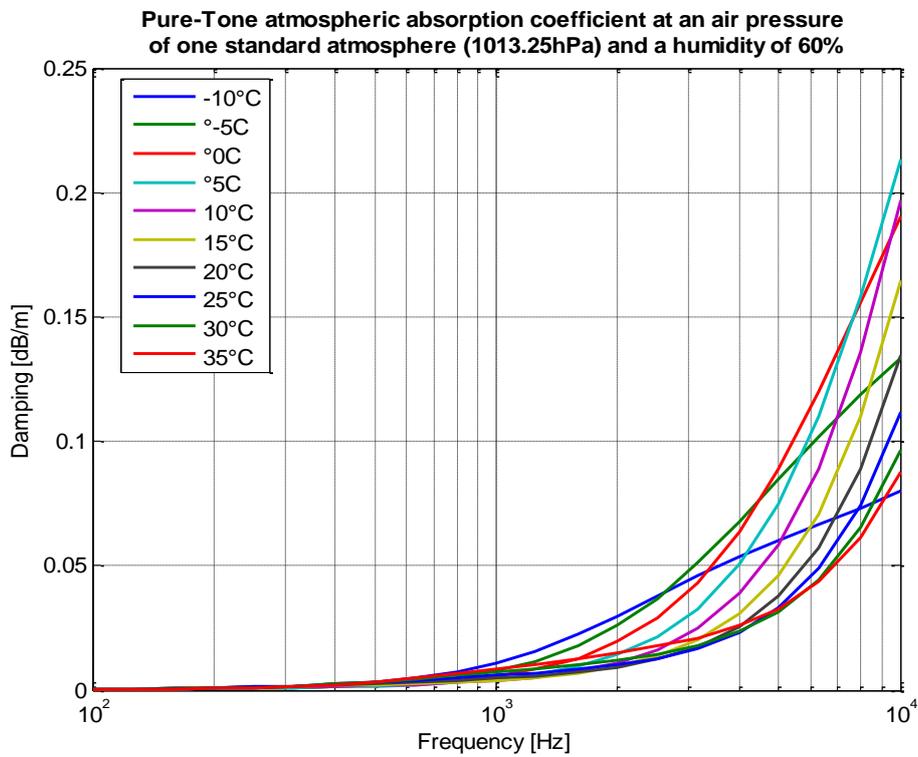


Abbildung 2.11: Schalldämpfung in der Luft in Abhängigkeit von f und t

2.2 Grundlagen der Raumakustik

Wenngleich die Wellenausbreitung im Raum denselben physikalischen Gesetzen unterliegt wie die der Ausbreitung im Freien, entstehen aufgrund der Raumgrenzen zusätzliche Randbedingungen, welche zu speziellen Phänomenen wie die des Halls oder der Resonanz führen. Diese Phänomene werden von der Raumakustik beschrieben. Die Raumakustik beinhaltet ein wichtiges Teilgebiet der Akustik. Aus dieser lässt sich die Qualität der Räume unter anderem hinsichtlich der Sprachverständlichkeit von beispielsweise Auditorien, Vorlesungssälen oder Wohnungen objektiv bewerten (Lerch, et al., 2009).

Die Raumakustik unterteilt sich in drei wesentliche Hauptgebiete, welche unterschiedliche Ansätze bei der Betrachtung der Schallvorgänge verfolgen. Diese werden in Abbildung 2.12 dargestellt.

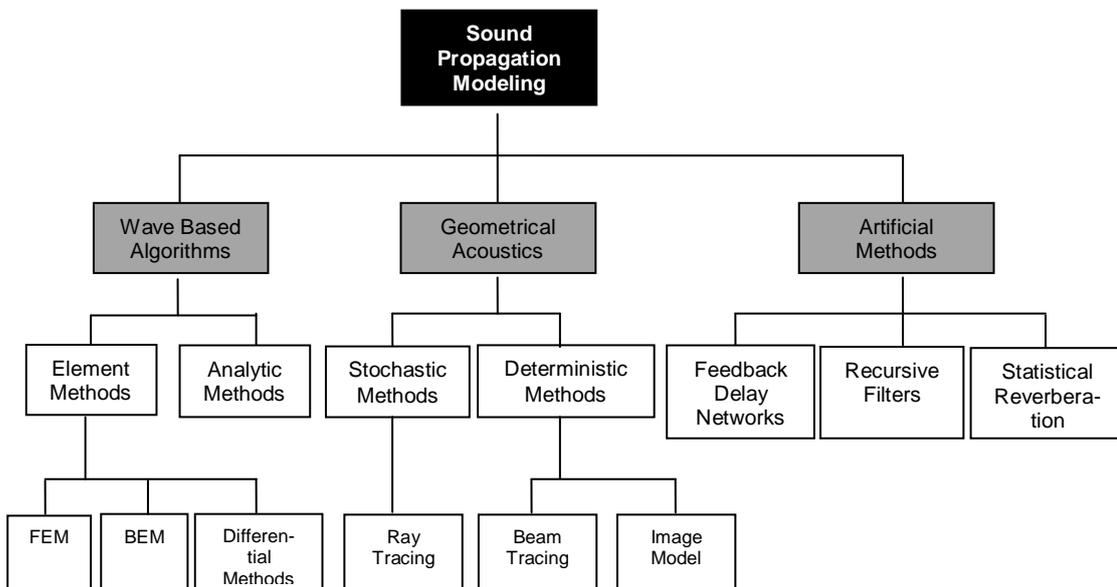


Abbildung 2.12: Simulationenmethoden der Raumakustik [nach (Vorländer, 2008)]

Die vorliegende Arbeit setzt sich hauptsächlich mit der statistischen und der geometrischen Raumakustik auseinander. Grund hierfür ist, dass beiden eine energetische Betrachtung der Begebenheiten zu Grunde liegt. Die wellentheoretische Raumakustik wird zusätzlich kurz vorgestellt, um die Notwendigkeit der Implementierung energetischer Simulationsverfahren deutlich zu machen.

2.2.1 Wellentheoretische Raumakustik

Die wellentheoretische Raumakustik^[1] befasst sich mit analytischen Lösungen des Schallfeldes, dessen Größen als Funktion von Ort und Zeit aus den Grundgleichungen (s. Kap. *Physikalische Grundlagen der Akustik*) hergeleitet werden. Eines der wichtigsten Felder der wellentheoretischen Raumakustik ist die Ermittlung der Raummoden, welche für die Beschreibung von Körperschallvorgängen und Resonanzeffekten wichtig sind (Lerch, et al., 2009).

Um einen Übergang zum Ray Tracing zu finden, ist es wichtig zu begreifen, wie sich das Resonanzverhalten im Raum in Abhängigkeit der Erregungsfrequenz verändert. Hierfür kann eine speziell einfache Raumgeometrie betrachtet werden, beispielsweise ein Quaderraum (s. Abbildung 2.13) der Kantenlänge

$$l_x > l_y > l_z$$

dessen Wände als schallhart angenommen werden, sodass die Komponenten der Schallschnelle verschwinden und der Schalldruck vor der Wand maximal ist [siehe auch (Lerch, et al., 2009)].

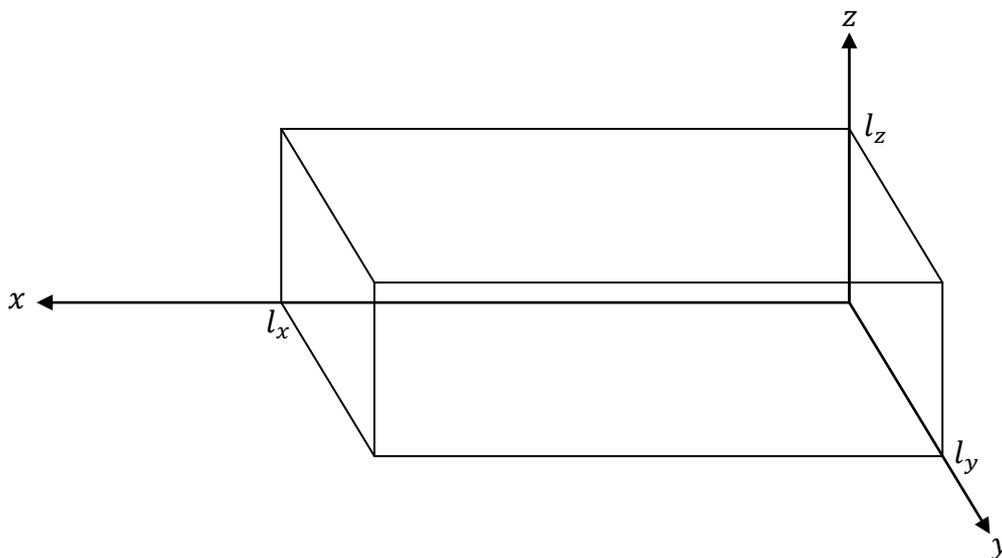


Abbildung 2.13: Exemplarischer Quaderraum [nach (Lerch, et al., 2009)]

^[1] Kap. *Wellentheoretische Raumakustik* fasst zum großen Teil die Literaturquelle Lerch, et al., 2009 Seiten 232 bis 239 zusammen, da hier die wesentlichen Hinweise zum Verständnis der Methodik dieser Arbeit vorhanden sind. Weitere empfehlenswerte Literatur zu diesem Thema: *Lothar Cramer und A. Müller „Wissenschaftliche Grundlagen der Raumakustik“ Band II.*

Um die Resonanzfrequenzen eines solchen Raumes berechnen zu können, wird die Wellengleichung (s. Gleichung 2.5)

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad 2.24$$

durch den Ansatz

$$p = p_{\text{eff}} \left(\cos \frac{n_x \pi x}{l_x} \cdot \cos \frac{n_y \pi y}{l_y} \cdot \cos \frac{n_z \pi z}{l_z} \right) e^{j\omega t} \quad 2.25$$

gelöst. Die Raumachsen x , y und z werden hierbei voneinander getrennt betrachtet. n_x , n_y und n_z sind ganze positive Zahlen (einschließlich der Null). Setzt man Gleichung 2.25 in Gleichung 2.24 ein, kann die Lösung für diskrete Werte

$$f_0 = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad 2.26$$

der Frequenz $f = \omega/2\pi$ ermittelt werden. Diese Werte werden als Eigenwerte oder Eigenresonanzen des Raumes bezeichnet.

Wenn nun in Gleichung 2.26 ganze positive Zahlen für n_x , n_y und n_z der Reihe nach eingesetzt und kombiniert werden, stellt man schnell fest, dass mit zunehmender Frequenz die Anzahl von Eigenfrequenzen in einem bestimmten Frequenzintervall, die sogenannte Modendichte, sehr schnell zunimmt (s. Abbildung 2.14). Dieses Phänomen entsteht durch das Verhältnis der Raumdimensionen zur Wellenlänge der Anregung. Große Räume haben folglich bei gleichem Frequenzband eine höhere Modendichte als kleine Räume.

Allerdings machen sich Eigenfrequenzen ab einer bestimmten Ordnung auf Grund der eben genannten hohen Modendichte gar nicht so stark bemerkbar. Somit verursachen hochfrequente Geräusche keine Hervorhebung einzelner unerwünschten Frequenzen im Raum. Tieffrequente Geräusche hingegen tendieren oft zu Resonanzeffekten (Lerch, et al., 2009).

Infolgedessen scheint es sinnvoll zu sein, ein Verfahren für raumakustische Untersuchungen im hochfrequenten Frequenzbereich anzuwenden, welche bestimmte Welleneigenschaften des Schalls vernachlässigen, sobald das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Raumdimensionen dies zulässt. Ein solches Verfahren spiegelt beispielsweise die geometrische Raumakustik anhand des Ray Tracings wieder

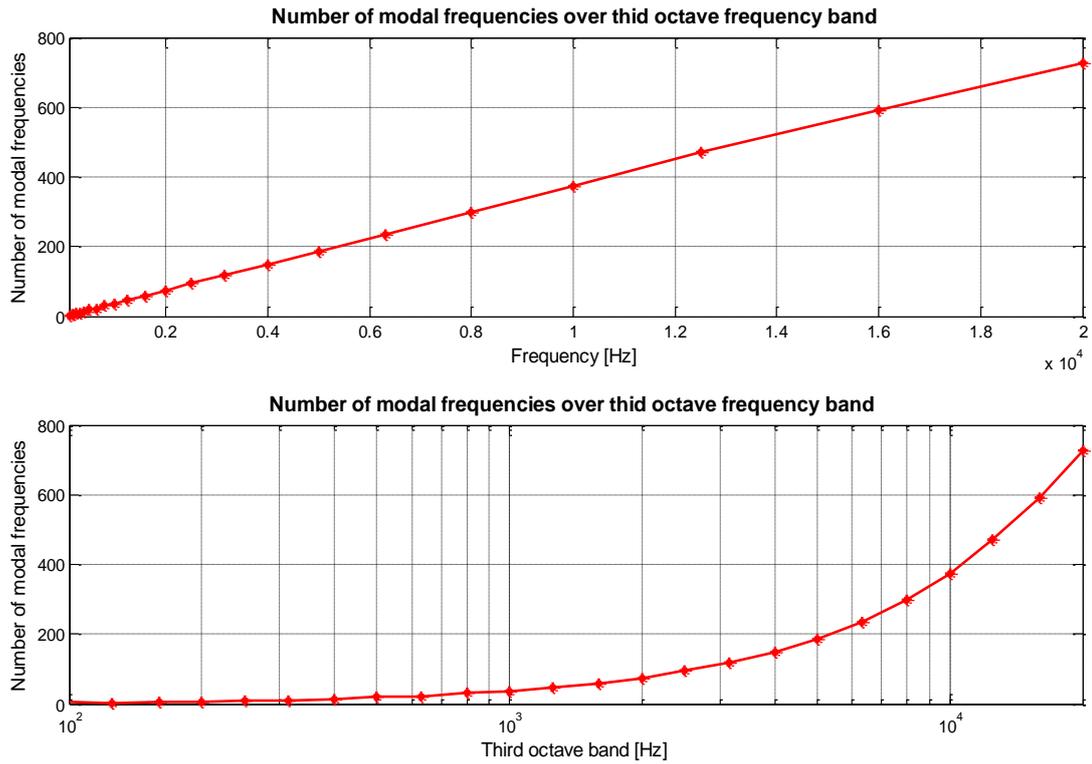


Abbildung 2.14: Zunahme der Modendichte über die Frequenzbänder

2.2.2 Statistische Raumakustik

Die beträchtlichen Preisunterschiede bei dem Kauf von Konzertkarten sind womöglich das beste Beispiel dafür, dass akustische Eigenschaften im Raum an jedem Ort unterschiedlich sind. Mit Hilfe der geometrischen Raumakustik ist es möglich, solche örtlichen Eigenschaften zu bestimmen und somit die Hörsamkeit, beispielsweise von Theater- oder Konzertsälen, zu planen. Dieses Verfahren erfordert oft einen erheblichen Rechenaufwand. Die statistische Raumakustik umgeht diesen Rechenaufwand, indem akustische Raumeigenschaften im statistischen Mittel betrachtet werden. *Wallace Clement Sabine* galt als Pionier der statistischen Raumakustik. Er beobachtete, dass das „allgemeine“ Hörempfinden eines Raumes mit einer Größe beschrieben werden kann, welche an jedem Ort des Raumes nahezu identisch ist. Diese Größe bezeichnet man als die Nachhallzeit ([Cremer, et al., 1978](#)).

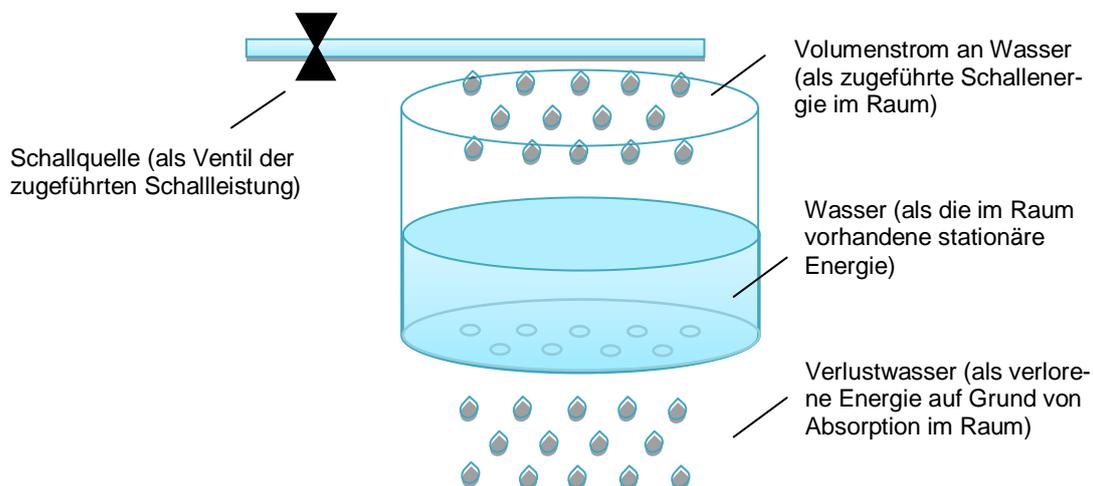


Abbildung 2.15: Analogie der statistischen Raumakustik zur Strömungslehre
[nach ([Möser, 2012](#))]

Die statistische Raumakustik^[1] ist wie die geometrische Raumakustik eine rein energetische Betrachtung der Ereignisse, dessen Prinzip sich mit dem Füllen eines undichten Gefäßes mit Wasser (s. [Abbildung 2.15](#)) vergleichen lässt, wobei die Menge an Wasser die vorhandene Schallenergie im Raum symbolisiert ([Möser, 2012](#)).

Man stellt sich demnach einen Raum vor, der plötzlich einer kontinuierlichen akustischen Anregung ausgesetzt wird.

[1] Das Kap. *Statistische Raumakustik* fasst zum großen Teil die Literaturquelle [Möser 2012](#) Seiten 232 bis 239 zusammen, da hier die wesentlichen Hinweise zum Verständnis der Methodik der vorliegenden Arbeit vorhanden sind. Weitere empfehlenswerte Literatur zu diesen Thema: *Lothar Cramer und A. Müller, Band I, Kap. 1* bzw. *Lerch, et al., Kap. 8.3 Statistische Raumakustik*.

Diese Anregung verteilt sich im Raum und bildet nach kurzer Zeit das sogenannte *diffuse Schallfeld*, dessen Energiedichte an jedem Ort gleich und stationär ist. Gäbe es keinen energetischen Verlust, so würde die Schallenergie im Raum stets wachsen (wie der Pegel im Behälter). Erhöht man analog dazu die Leistung der Quelle, steigt die Energie des diffusen Schallfeldes bei gleicher Absorption. Schaltet man nun die Quelle ab, vergeht eine bestimmte Zeit, bis die vorhandene Energie im Raum vollkommen verschwindet. Diese Zeit hängt direkt mit den Absorptionseigenschaften des Raumes zusammen und wird als Nachhall bezeichnet (s. Abbildung 2.16).

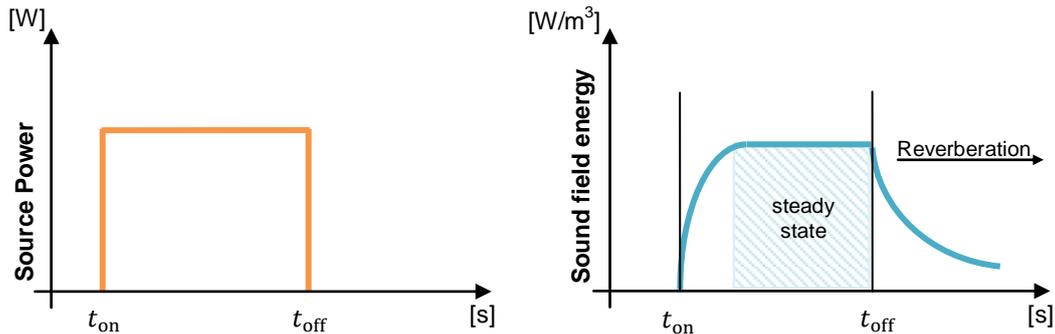


Abbildung 2.16: Zeitverlauf der Schalleistung einer Quelle (links) und der Energie des entsprechenden diffusen Schallfeldes (rechts) [nach (Möser, 2012)]

Aufgrund des nicht interessierenden Anfalls, tritt das diffuse Schallfeld in der statistischen Raumakustik als ein eingeschwungener stationärer Zustand auf, der sich auf die räumliche Energiedichte E bezieht und von der zugeführten Leistung der Quelle(n) P sowie der von der Raumabsorption verursachten Verlustleistung P_L abhängt (s. Gleichung 2.27)

$$P\Delta t = V\Delta E + P_L\Delta t, \quad 2.27$$

wobei V das Raumvolumen bezeichnet.

Zwischen Verlustenergie $P_L t$ und der Energie des diffusen Schallfeldes VE besteht zudem ein proportionaler Zusammenhang: Je höher die Energie des diffusen Schallfeldes ist, desto mehr Energie wird vom Raum absorbiert. Analog zur Abbildung 2.15: Je mehr Wasser im Behälter, desto mehr Druck und somit desto höher der Volumenstrom an Wasser an den undichten Stellen des Behälters. Dieser Zusammenhang wird mit folgender Differentialgleichung zum Ausdruck gebracht

$$\frac{dE}{dt} = \frac{P}{V} - \gamma E, \quad 2.28$$

wobei γ die „Verlust-Raumkonstante“ beschreibt und somit die Information aller im Raum vorhandenen absorbierenden Flächen zusammenfasst. Die Energiedichte kann nach Gleichung 2.29 direkt aus dem Effektivwert des Schalldruckes bestimmt wer-

den, weil die Schallschnelle im statistischen Mittel im diffusen Schallfeld als Null betrachtet werden kann (Möser, 2012).

$$E = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho c^2}, \quad 2.29$$

Der Nachhall beginnt mit dem Abschalten der Quelle. Die Dauer des Nachhalls hängt von den Absorptionseigenschaften des Raumes, dessen Dimensionen und der absorbierenden Eigenschaften des Mediums ab. Die Energiedichte im Raum fällt ab dem Zeitpunkt $t = 0$ (Abschalten der Quelle) exponentiell über die Zeit ab. Die Schallenergie wird über die Funktion

$$E(t) = E_0 e^{-\gamma t}, \quad 2.30$$

beschrieben, wobei E_0 die Energie des diffusen Schallfeldes zum Zeitpunkt $t = 0$ darstellt. Ersetzt man E_0 durch Gleichung 2.29 lässt sich der Verlauf des Schalldruckpegels über die Nachhalldauer anhand Gleichung 2.31 berechnen:

$$L_p(t) = 10 \log_{10} \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_0^2} - \gamma t \cdot \log_{10} e \approx L_{p,0} - 4,3\gamma t, \quad 2.31$$

hierbei bezeichnet e die Eulersche Zahl und $L_{p,0}$ den Schallpegel zum Zeitpunkt $t = 0$. Im Nachhall besteht somit ein linearer Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel und der Zeit, dessen Proportionen von der Verlust-Raumkonstante γ abhängt (s. Abbildung 2.17).

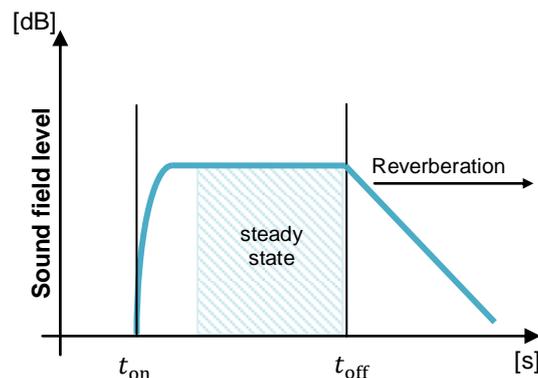


Abbildung 2.17: Schallpegel des diffusen Schallfeldes [nach (Möser, 2012)]

Die Gleichung 2.29 beinhaltet jedoch einen „Haken“, weil die Energiedichte des diffusen Schallfeldes im Nachhall erst zu Null wird, wenn t gegen Unendlich geht. Somit gäbe es, mathematisch betrachtet, im Raum Restanteile eines diffusen Schallfeldes dessen Quelle beispielsweise vor Wochen ausgeschaltet wurde.

Die quantitative Beschreibung des Nachhalls erfolgt aus diesem Grund in der statistischen Raumakustik über die sogenannte Sabin'sche Nachhallzeit T_s . Diese beschreibt

jene Zeit in Sekunden, in der die Schallenergie des diffusen Schallfeldes um einen millionsten Teil, also um 60dB, in Bezug auf dessen stationären Zustand abfällt und lässt sich wie folgt berechnen:

$$T_s = 0,163 \cdot \frac{V}{A_{\text{eq}}} \text{ [s]} \quad 2.32$$

Hierbei ist V das Raumvolumen und A_{eq} die äquivalente Absorptionsfläche, welche sich aus der Summe aller Teilflächen S_i und deren Absorptionsgrade α_i gemäß Gleichung 2.33 zusammensetzt. Im vorderen Faktor 0,163 verbirgt sich die Einheit [s/m].

$$A_{\text{eq}} = \sum_i^N \alpha_i \cdot S_i \quad 2.33$$

Zum Verständnis: Ein geschlossener Raum, dessen äquivalente Absorptionsfläche zwei Quadratmeter beträgt, gleicht einem Raum derselben Dimensionen, dessen Wände keinen Schall absorbieren (vollreflektierende Flächen) jedoch ein offenes Fenster (vollabsorbierende Fläche gemäß der Überlegungen im Kap. *Schallreflexion*) derselben Fläche besitzt.

2.2.3 Geometrische Raumakustik

Die geometrische Raumakustik, auch als geometrische Akustik (GA) bekannt, findet ihren Ursprung in der Strahlenoptik. Hierbei wird eine akustische Ausbreitung nicht als Welle betrachtet. Stattdessen stellt die GA eine Anregung als Strahl dar, welcher aus einer Quelle auf dem Weg zu einem Empfänger verfolgt wird (s. Abbildung 2.18). Dabei werden wellenbezogene Ausbreitungseigenschaften wie Beugungseffekte Randbedingungen wie die der Resonanzeffekte sowie Kennzahlen wie die der Phaseninformation vernachlässigt bzw. gehen verloren. Dies ist jedoch nötig, da die Betrachtung solcher Eigenschaften den Rechenaufwand dieser Art von Methoden unvermeidbar steigern würde.

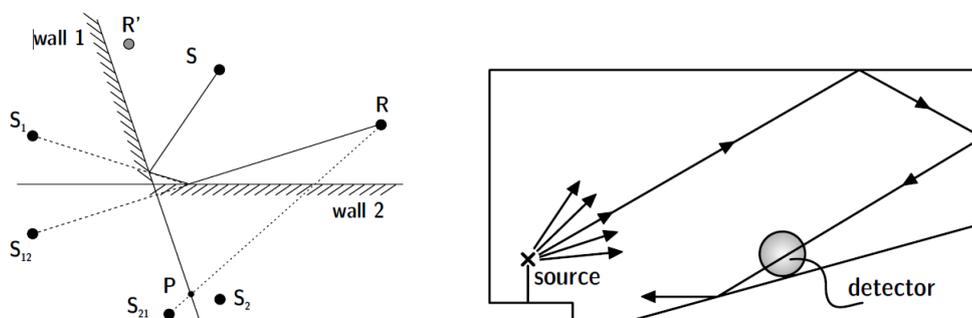


Abbildung 2.18: Beispiele der geometrischen Raumakustik, links die Methode der Spiegelschallquellen, rechts die Methode des Ray Tracings (Vorländer, 2008)

Ein zentrales Gebiet der geometrischen Raumakustik ist die sogenannte *Raumauralisation*. Hierbei kann das örtliche und frequenzabhängige Verhalten des Raumes, trotz der angenommenen Vereinfachungen, relativ genau und mit einem begrenzten Rechenaufwand vorhergesagt werden. Das Ergebnis kann mit einer akustischen Anregung wie etwa einem Musikstück verknüpft werden, um dessen Eindruck durch den Einsatz von Kopfhörern in jener Weise widerzuspiegeln als würde die Musik in einem vergleichbaren realen Raum abgespielt werden.

Weiterhin können Kennwerte des zu prognostizierenden Raumes mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Aus der Nachhallzeit lässt sich beispielsweise eine quantitative Bewertung hinsichtlich der Sprachverständlichkeit im Raum herleiten, deren Werte maßgeblich für die akustische Dimensionierung, unter anderem von Hörsälen und Auditorien sind und sogar von Behörden je nach Raum reglementiert werden.

Um jedoch einen sinnvollen Einsatz der GA zu finden, dürften die vernachlässigten Welleneigenschaften einer akustischen Anregung kaum einen Einfluss auf das Ergebnis der Methode einschließen. Eine objektive Bewertung dieser Überlegung beschreibt die sogenannte *Schröderfrequenz* (Aretz, 2012)

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_s}{V}} \text{ [Hz]}, \quad 2.34$$

wobei T_s die im Kap. *Statistische Raumakustik* vorgestellte Sabin'sche Nachhallzeit beschreibt. Die Schröderfrequenz gilt allerdings nur für würfelförmige bzw. würfelähnliche Räume. Unterhalb der Schröderfrequenz könnten die Welleneigenschaften der Anregung so dominant sein, dass die Ergebnisse der GA mit erhöhter Wahrscheinlichkeit nicht der Realität entsprechen. Oberhalb der Schröderfrequenz verlieren Welleneigenschaften an Bedeutung auf Grund der in Abbildung 2.14 vorgestellte Zunahme der Modendichte über die Frequenz. Aus Gleichung 2.34 ist zu entnehmen, dass das Raumvolumen V eine wichtige Rolle spielt. Somit eignet sich die GA speziell für die Auralisation und die Prognostizierung akustischer Auslegungen großer Räume.

Es gibt zwei gängige Verfahren, welche in der GA üblich sind. Die Methode der Spiegelschallquellen und die in der vorliegenden Arbeit verwendete Methode des Ray Tracings.

2.2.3.1 Spiegelschallquellen

Die Methode der Spiegelschallquellen kann durch das vereinfachte zweidimensionale Beispiel in Abbildung 2.19 erklärt werden. Hierbei wird ein Raum mehrfach über die Grenzen gespiegelt aufgestellt. Eine Quelle (hier im Zentrum der Abbildung dargestellt) sendet einen kurzen Impuls aus, der sich im zweidimensionalen Beispiel als ein Kreis mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Im dreidimensionalen Fall ist die Ausbreitung als Kugel vorzustellen.

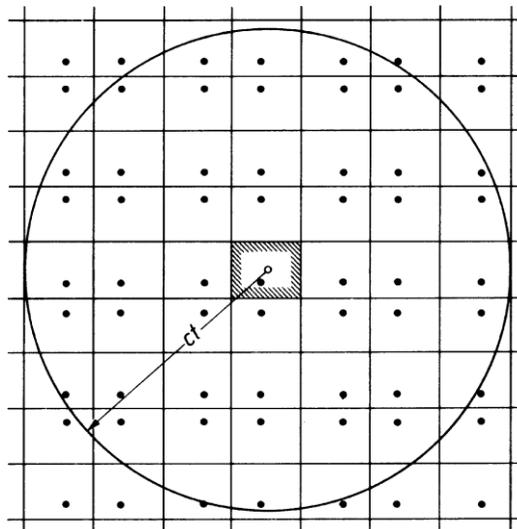


Abbildung 2.19: Spiegelschallquellenmethode (Möser, 2012)

Die in Abbildung 2.19 dargestellten schwarzen Punkte stellen den im Zentrum originalen und die restlichen räumlich gespiegelten Signalempfänger dar, welche die Energie der Kugel aufzeichnen. Die Anzahl der einzelnen Aufzeichnungen gleicht in etwa dem Verhältnis des Kugelvolumens V_k und dem Volumen V des Originalraumes (Möser, 2012).

$$N = \frac{V_k}{V} = \frac{4\pi r^3}{3V} = \frac{4\pi(ct)^3}{3V}, \quad 2.35$$

Für ein Volumen von 200m^3 sind somit in etwa 800.000 Aufzeichnungen in einer Sekunde zu erwarten (Möser, 2012). Dabei nimmt die Dichte der eintreffenden Impulse zu

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \sim \frac{\partial N}{\partial t} = 4\pi c \frac{(ct)^2}{V}, \quad 2.36$$

wobei die Energie des empfangenen Strahls hier wieder nach den Regeln des Abstandsgesetzes proportional zum Radius der Kugel abnimmt (s. Abbildung 2.20).

$$E_{auf} \sim \frac{1}{(ct)^2}, \quad 2.37$$

Die zeitliche Abbildung der von allen (gespiegelten) Empfängern erfassten Energie bildet das so genannte Reflektogramm (s. Kap. *Grundlagen der Signalverarbeitung*).

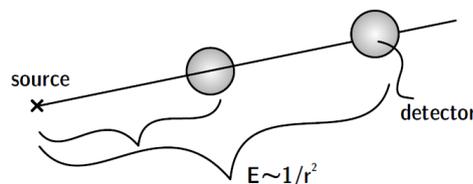


Abbildung 2.20: Abstandsgesetz (Vorländer, 2008)

2.2.3.2 Ray Tracing

Im Grenzfall, bei dem die Gesamtabmessungen des Raumes und der reflektierenden Oberflächen sehr viel größer im Vergleich zur Wellenlängen der akustischen Anregung sind, ist der Einsatz der Methode des Ray Tracings (RT) zulässig. Beim RT (Strahlenverfolgung) wird die Welle einer impulsartigen akustischen Anregung in sehr vielen masselosen Partikeln abgebildet, welche sich geradlinig als unendlich dünner Strahl, mit Schallgeschwindigkeit im Raum ausbreiten (s. Abbildung 2.21) (Aretz, 2012).

Da eine impulsartige akustische Anregung über eine sehr kurze Zeit freigesetzt wird, spricht man davon, dass einzelne Strahlen einen Teil der Energie einer Quelle tragen. Diese werden über ihren eigenen Weg durch den Raum verfolgt, bis idealerweise ein Empfänger „getroffen“ wird. Dieser Weg ist allerdings durch Hindernisse geprägt. Außer beim direkten Schall, werden die Strahlen im Raum mindestens einmal an den Raumgrenzen reflektieren und verlieren dabei einen Teil der Energie.

Inwiefern den Strahlen die Energie durch Reflexionsvorgänge entzogen wird, hängt von den Absorptionseigenschaften der Hindernisse und der Raumdimensionen ab. Wenn demnach ein Raum durch ein geringes Schallabsorptionsverhalten gekennzeichnet ist oder auf Grund von großen Raumdimensionen eine geringere Reflexionsdichte hervorruft, verlieren Strahlen nur sehr langsam die Energie und legen dabei sehr lange Strecken zurück. Somit wird beim RT auch die im Kap. *Schalldämpfung in der Luft* vorgestellte Luftdämpfung und das Abstandsgesetz gemäß Gleichung 2.37 berücksichtigt.

Die Energie E eines einzelnen Strahls lässt sich zum Zeitpunkt t durch die Gleichung

$$E_i(t, \alpha, n) = \frac{E_0}{(ct)^2} \cdot \exp(-mct) \cdot \prod_{k=1}^K (1 - \alpha_k)^n, \quad 2.38$$

beschreiben, wobei E_0 die quellenabhängige Anfangsenergie des Partikels, $(ct)^2$ der zurückgelegte Weg, m der Koeffizient für die Schalldämpfung im Medium darstellen und der hintere Term die verlorene Energie, welche anhand der Anzahl der Reflexionen n an jeder Fläche k mit einem Absorptionsgrad α berücksichtigt wird (Knauber, et al., 2013).

$$E(t) = \sum_i E_i(t_j < t < t_{j+1}) \quad 2.39$$

Die Gesamtenergie, die zu einem diskreten Zeitpunkt am Empfänger ankommt, wird somit über die Summe der Energien aller Strahlen, welche in jedem Zeitintervall t_j den Empfänger erreichen, ermittelt (s. Gleichung 2.39).

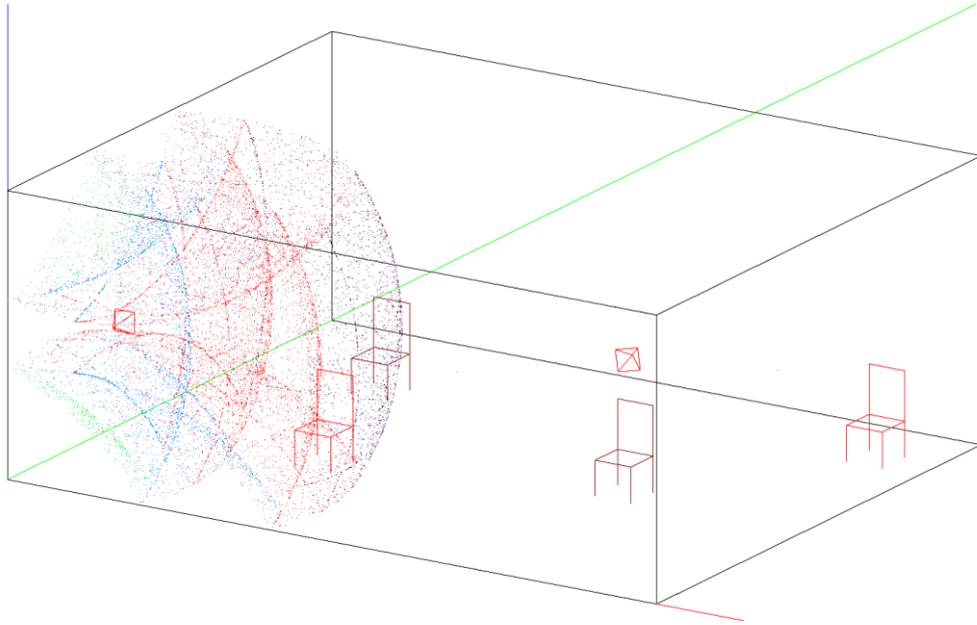


Abbildung 2.21: Darstellung einer Ray Tracing Simulation mit EASE

Der zeitliche Verlauf der vom Empfänger erfassten Energie bildet das sogenannte Reflektogramm (s. Kap. *Grundlagen der Signalverarbeitung*).

Der große Vorteil der Methode der Spiegelschallquellen gegenüber dem RT ist, dass die erste eine systematische Methode darstellt, um alle möglichen Strahlen in Abhängigkeit der Reflexionsordnung zu berücksichtigen. Dies ermöglicht eine genauere Berechnung der akustischen Eigenschaften eines Raumes allerdings mit der Folge, dass der Rechenaufwand mit der Reflexionsordnung exponentiell zunimmt. Die Ergebnisse des RT hingegen unterliegen in gewissen Maßen dem Zufall, da hier die Wahrscheinlichkeit, dass ein Strahl von einem Empfänger aufgenommen wird, eine wichtige Rolle bei der Berechnung akustischer Eigenschaften von Räumen spielt. Dementsprechend leidet die Güte der Berechnung darunter. Der Rechenaufwand nimmt allerdings nur linear zu. Die Berücksichtigung von Streuung und Beugung ist bei RT theoretisch möglich (Weinzierl, et al., 2014). Weitere Einzelheiten über RT-Algorithmen und dem Simulationsaufbau sind im Kap. *Grundlagen der raumakustischen Simulation mit Ray Tracing* zu finden.

2.3 Grundlagen der Signalverarbeitung

Ein Signal wird im Sinne der Signaltheorie als eine zeitabhängige Funktion einer skalaren physikalischen Größe bezeichnet. Typische skalare Größen in der Akustik sind beispielsweise der Schalldruck oder die Schallschnelle. Diese Signale oder zeitabhängige Funktionen werden in der analogen Welt mit $s(t)$ und in der digitalen Welt als $s(n)$ repräsentiert und können in den meisten Fällen der Akustik als linear und zeitinvariant approximiert werden (Vorländer, 2008).

In der Signalverarbeitung zeichnen sich lineare Systeme durch einen proportionalen Zusammenhang zwischen der Amplitude des Ausgangssignals und der Amplitude des Eingangssignals aus. Zeitinvariant bedeutet, dass das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangssignal im System zu jedem Zeitpunkt unverändert bleibt.

Eingangs- und Ausgangssignal sind somit in der Raumakustik die Grenze eines s.g. linearen zeitinvarianten Systems (eng. Linear Time-Invariant LTI System), dessen Ausgangssignal vom Eingangssignal und der Übertragungseigenschaften der Umgebung abhängt. Das Verhältnis kann mit der Funktion

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(\tau - t)d\tau = s(t) * h(t), \quad 2.40$$

beschrieben werden, wobei $g(t)$ und $s(t)$ jeweils das Ausgangs- bzw. Eingangssignal und $h(t)$ die Raumübertragungsfunktion beschreiben. Diese allgemeine Gleichung ist die Basis aller theoretischen Überlegungen eines LTI-Systems (Vorländer, 2008).

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Grundlagen der Signalverarbeitung erklärt. Einleitend werden die Hintergründe der Spektralzerlegung in Terz- und Oktavbändern dargestellt, um im Anschluss die Bedeutung der Raumimpulsantworten und deren Derivate, wie dem Reflektogramm, für die akustische Auslegung eines Raumes zu präsentieren.

2.3.1 Frequenzanalysen

Akustische Signale teilt man im Wesentlichen in drei Kategorien ein: Töne, Klänge und Geräusche. Töne sind das Produkt eines Signals, deren Spektrum nur aus einer einzelnen Frequenz besteht. Klänge hingegen sind akustische Signale, dessen Spektrum sich aus zwei oder mehr Frequenzen zusammensetzt. Diese können beispielsweise von Saiteninstrumenten erzeugt werden, da jede Saite mehr als eine Eigenschwingungsform besitzt (s. Abbildung 2.22).

Tabelle 2.1: Relevante Terz- und Oktavbänder im hörbaren Bereich. Die in Grau dargestellten Zeilen enthalten das für die Luftfahrt übliche Frequenzspektrum^[1].

Terzfrequenzbänder			Oktavfrequenzbänder		
Untere Frequenz [Hz]	Mittlere Frequenz [Hz]	Obere Frequenz [Hz]	Untere Frequenz [Hz]	Mittlere Frequenz [Hz]	Obere Frequenz [Hz]
14,1	16	17,8	11	16	22
19,8	20	22,4			
22,4	25	28,2			
28,2	31,5	35,5	22	31,5	44
35,5	40	44,7			
47,7	50	56,2			
56,2	63	70,8	44	63	88
70,8	80	89,1			
89,1	100	112			
112	125	141	88	125	177
141	160	178			
178	200	224			
224	250	282	177	250	355
282	315	355			
355	400	447			
447	500	562	355	500	710
562	630	708			
708	800	891			
891	1000	1122	710	1000	1420
1122	1250	1413			
1416	1600	1778			
1778	2000	2239	1420	2000	2840
2239	2500	2818			
2818	3150	3548			
3548	4000	4467	2840	4000	5680
4467	5000	5623			
5623	6300	7079			
7079	8000	8913	5680	8000	11360
8913	10000	11220			
11220	12500	14130			
14130	16000	17780	11360	16000	22720
17780	20000	22390			

^[1] Quelle: Vorlagen der von Prof. Dr.-Ing. W. Gleine gehaltenen Vorlesung zur Akustik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg

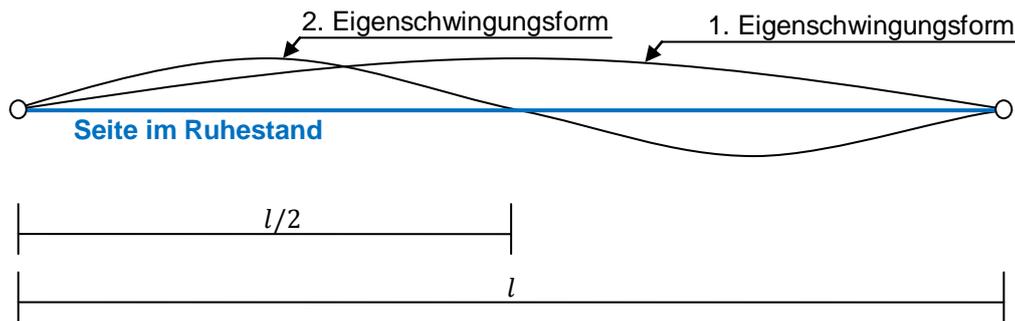


Abbildung 2.22: Darstellung von Eigenschwingungsformen einer Seite der Länge l

In der Raumakustik hingegen werden überwiegend Geräusche analysiert, deren Spektrum sehr viele Frequenzen umfasst. Es ist allerdings überflüssig jede einzelne Frequenz zu analysieren, da die Sensibilität des menschlichen Ohrs gegenüber Frequenzen begrenzt ist. Aus diesem Grund wird die gesamte Bandbreite des wahrnehmbaren Frequenzspektrums für eine feinere Betrachtung in sogenannte Terzbänder und für eine gröbere Betrachtung in Oktavbänder zerteilt, die in der Regel zwischen ca. 20Hz und 20kHz liegen. Die Tabelle 2.1 stellt die Terz- und Oktavbänder, welche in der Bau- und in der Luftfahrtakustik untersucht werden und deren spektrale Zusammensetzung dar. Hierbei kann folgendes zur Kenntnis genommen werden:

- Ein Oktavband besteht aus drei Terzbändern.
- Die untere und obere Frequenz eines Oktavbands liegen im Verhältnis $1/2$.
- Die untere und obere Frequenz eines Terzbands liegen im Verhältnis $1/\sqrt[3]{2}$.
- Die jeweiligen Terz- und Oktavbänder werden anhand der Mittelfrequenz gekennzeichnet. Als Beispiel bezieht das 500Hz-Terzband alle Frequenzen zwischen 447Hz und 562Hz ein. Das 500Hz-Oktavband allerdings umfasst ein Spektrum von 355Hz bis 710Hz.

2.3.2 Raumübertragungsfunktion

Die Gleichung 2.40 weist darauf hin, dass Eingangs- und Ausgangssignale in einem linearen zeitinvarianten Raum mit einer Übertragungsfunktion $h(t)$ gekoppelt sind. Diese wird bei der Raumakustik als Raumimpulsantwort bezeichnet und ist von entscheidender Bedeutung, da aus dieser die wesentlichen akustischen Eigenschaften eines Raumes hergeleitet werden können.

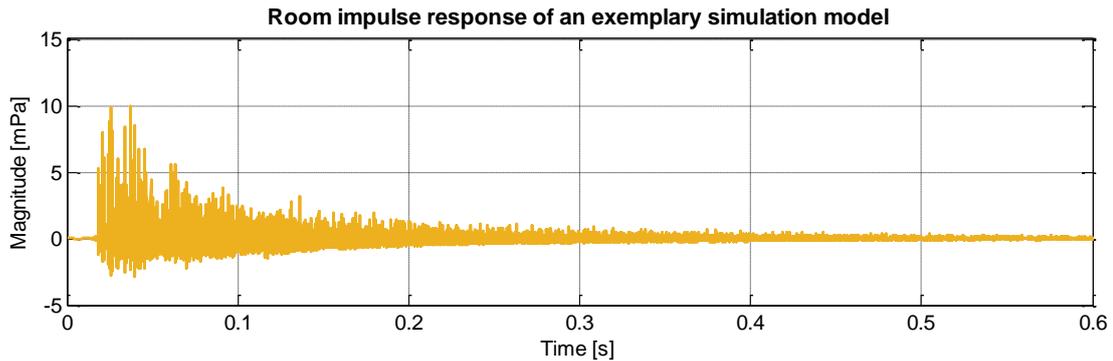


Abbildung 2.23: Raumimpulsantwort eines exemplarischen Raumes

Die **Raumimpulsantwort** kann als die zeitliche Antwort eines Raumes hinsichtlich einem idealen Dirak Impuls (s. Abbildung 2.27) interpretiert werden [Aretz 2012], beginnend mit dem direkten Impuls am Zeitpunkt $t = 0$ und gefolgt von vielen verzögerten und gedämpften Impulsen, welche indirekt über Wandreflexionen ihren Weg zum Empfänger finden (s. Abbildung 2.23). Sie hängt von der Position der Quelle und dem Empfänger im Raum ab. Inwiefern diese verzögerten Impulse gedämpft werden, hängt von den Absorptionseigenschaften des LTI-Systems ab.

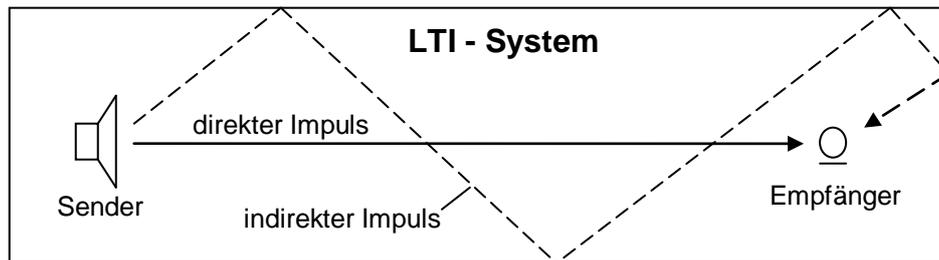


Abbildung 2.24: Darstellung des direkten und indirekten Impulses

Aus dem Quadrat der Raumimpulsantwort wird das sogenannte **Reflektogramm** gewonnen, welches die zeitliche Aufzeichnung der Energie der Impulse darstellt (s. Abbildung 2.25). Aus diesem kann weiterhin über eine Rückintegration die sogenannte **Abklingkurve** (eng. *Energy Decay Curve*) ermittelt werden. Diese beschreibt den energetischen Abfall der impulsartigen Anregung im Raum, allerdings aus einem umgerechneten stationären diffusen Zustand (s. Abbildung 2.26). Es entsteht eine Kurve, die den Nachhall des Raumes beschreibt.

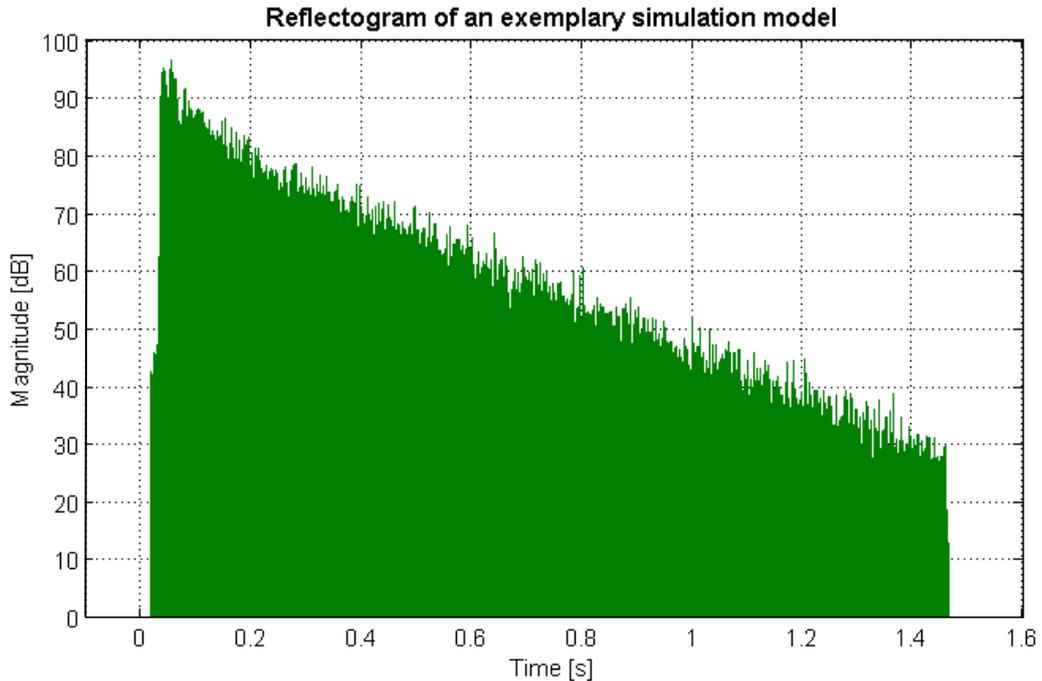


Abbildung 2.25: Reflektogramm eines exemplarischen Raumes

Die Abklingkurve einer Impulsantwort wird über die Rückwärts-Integration des Reflektogramms ermittelt. Dabei beginnt die Integration der Impulsantwort am Ende und läuft bis zum Anfang. Daraus ergibt sich der Abklingvorgang als Funktion der Zeit zu

$$E(t) = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(\tau), \quad 2.41$$

mit p als Schalldruck und als Funktion der Zeit t [s. auch (ISO:3382, 2009)]. Die Energie des abklingenden diffusen Schallfeldes wird als Schallpegel umgerechnet zu

$$L(t) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E(t)}{E_0} \right) \quad 2.42$$

mit $E_0 = 10^{-12} \text{W}$.

Wie im Kap. *Statistische Raumakustik* beschrieben, kann man aus der Abklingkurve diverse raumakustische Eigenschaften entnehmen, um so die Akustik im Raum objektiv bewerten zu können. Darunter fallen unter anderem die Nachhallzeit T_{60} , Stärkemaß G , Klarheitsmaß C_{80} , Deutlichkeit D_{50} und das Bassverhältnis BR aus denen weitere Bewertungen beispielsweise hinsichtlich der Sprachverständlichkeit anhand des *speech transmission index* herzuleiten sind (ISO:3382, 2009).

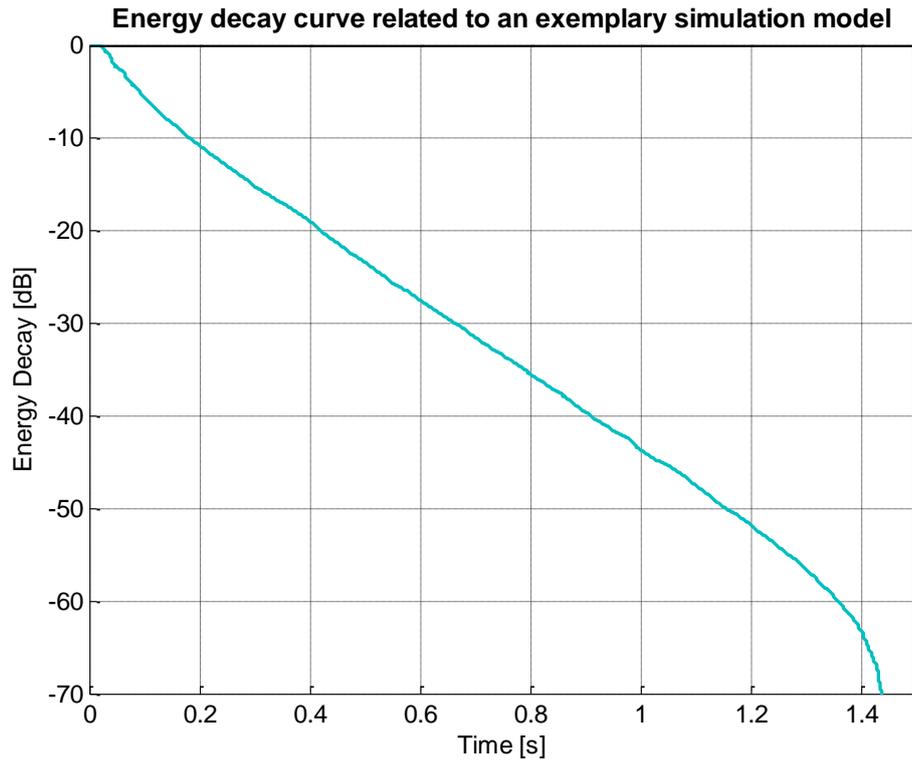


Abbildung 2.26: Darstellung einer simulierten Abklingkurve

2.3.3 Filterung der Raumimpulsantwort

Schalldruckmessgeräte wie zum Beispiel ein Mikrofon sind in der Lage akustische Signale in elektrische Signale umzuwandeln. Diese besitzen in der Regel ein Konstrukt, das durch das akustische Signal in Schwingung versetzt wird und beispielsweise den Widerstand des Messgerätes beeinflusst. Dadurch entstehen entsprechende elektrische Spannungsveränderungen, welche aufgezeichnet werden können.

Aus dem elektrischen Eingangssignal und dem vom Mikrofon aufgezeichneten Ausgangssignal kann eine für das gesamte Frequenzspektrum aufgezeichnete Raumimpulsantwort ermittelt werden. Allerdings muss diese für eine Betrachtung in Terz- bzw. Oktavbändern zunächst gefiltert werden, um so die Raumeigenschaften hinsichtlich der Frequenzen, die von Interesse sind, analysieren zu können. Solch ein Frequenzfilter kann über eine entsprechende Software digital nachsimuliert werden, obwohl dies nicht ganz einfach ist, weil dieser je nach Anwendung verschiedene individuelle Eigenschaften besitzt. Grundsätzlich gilt allerdings, dass ein und derselbe Filter zum Einsatz kommt, wenn verschiedene Signale verglichen werden sollen.

Für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit dient der eingesetzte Filter nur dazu, die gemessene Impulsantwort in dessen Terzspektren zu zerlegen, um so die Basis der in Kap. *Methodik* vorgestellten Optimierung herzustellen. Weitere Überlegungen zu diesem Thema sind im Kap. *Ausblick* niedergeschrieben.

Der Filter, welcher im Laufe der vorliegenden Arbeit eingesetzt wird, wurde über die Berechnungssoftware MATLAB[®] simuliert. Diese bietet mit Hilfe des Befehls *fdesign* die Möglichkeit objektorientierte Filter zu simulieren. Dabei steht die Spezifikation des Filters und weniger die spätere Implementierung im Vordergrund (Hoffmann, et al., 2012).

Das folgende Skript stellt ein Beispiel da, wie eine Impulsantwort für jede Frequenz in MATLAB[®] gefiltert wird:

```
%Input:
ImpulseResponse = %set/create/import an impulse response as a
                  %vector

%Parameters:
FS = 48000;      %filter sample frequency in Hz

%design third octave band pass:
fref = 1000;    %reference frequency in Hz
n = -10:7;     %third octave frequency index

%set initial conditions for filtering:
filtered_IR = zeros(length(n1),length(ImpulseResponse));

for ThisFrequency = n+11

    %third octave mid frequency calculation as specified in EN
    DIN 61260
    Fmid = fref*10^(((3/10)*((ThisFrequency-11)/3)));

    %filter design
    D = fdesign.octave(3,'class 1','N,F0',2,Fmid,FS);
    H = design(D);

    %filtering impulse response
    filtered_IR(ThisFrequency,:) = filter(H,ImpulseResponse);

end
```

Der Filter H wird hierbei von den spezifizierten Parametern D als Filter der Klasse 1 aufgebaut. Der erste Beitrag 3 weist auf eine spektrale Filterung in Terzen hin. N repräsentiert die Ordnung des Filters und F_{mid} die nach (DIN:61260, 2003) berechnete Mittenfrequenzen der Terzbänder.

Das Filtern erfolgt gemäß der Gleichung 2.40, in welcher ein Ausgangssignal über die Faltung eines Eingangssignals mit einer filterbezogenen Impulsantwort ermittelt wird.

Wird ein infinitesimal kurzer Impuls wie der des Dirac-Impulses (s. Abbildung 2.27) gefiltert, kann die Impulsantwort des in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Filters ermittelt werden (s. Abbildung 2.28).

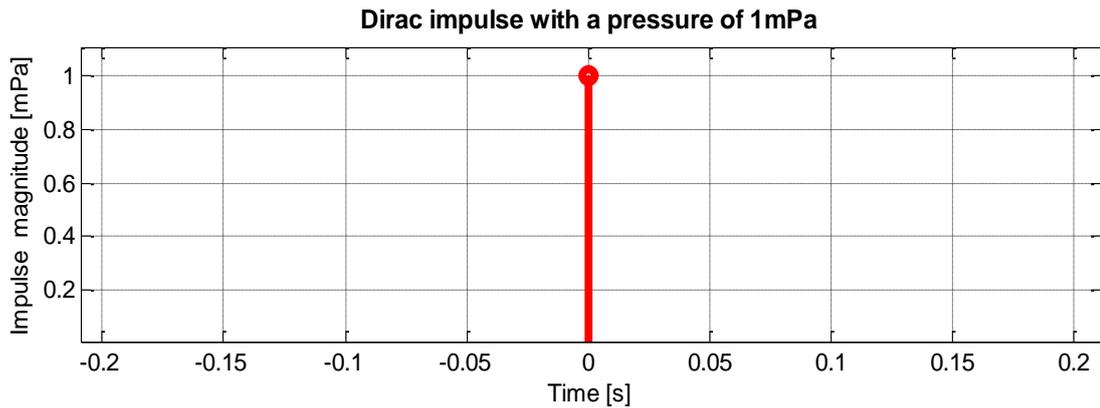


Abbildung 2.27: Darstellung eines exemplarischen Dirac Impulses

Aus der Fourier Transformation der Impulsantworten lässt sich die frequenzabhängige Dämpfung eines Filters ermitteln. Dies wird in Abbildung 2.29 am Beispiel der Transferfunktion eines 1kHz Terzbandfilters der Klasse 1 zweiter Ordnung dargestellt. Hierbei kann beispielsweise entnommen werden, dass dieser Filter ein Signal von 500Hz um circa 16dB abklingen lässt. Weiterhin kann beobachtet werden, dass die Transferfunktion benachbarter Terzbänder sich bei -3dB schneiden. Dies ist ein besonderes Merkmal der Bandfilter 2. Ordnung, da die Pegelsumme zweier inkohärenter Signale derselben Amplitude eine Pegelerhöhung von 3dB ergibt.

$$10 \cdot \log_{10}(2a) \approx 10 \cdot \log_{10}(a) + 3\text{dB}$$

Somit gibt es hinsichtlich der Filterung von akustischen Signalen theoretisch keinen Energieverlust.

Wie bereits erwähnt, lässt sich eine Impulsantwort zu einer Abklingkurve berechnen. Ein perfekter Filter würde eine unendlich steile Abklingkurve vorweisen. Es ist allerdings in Abbildung 2.28 ersichtlich, dass dies nicht der Fall ist, da die jeweiligen Impulsantworten ein über die Zeit gedämpftes Signal darstellen.

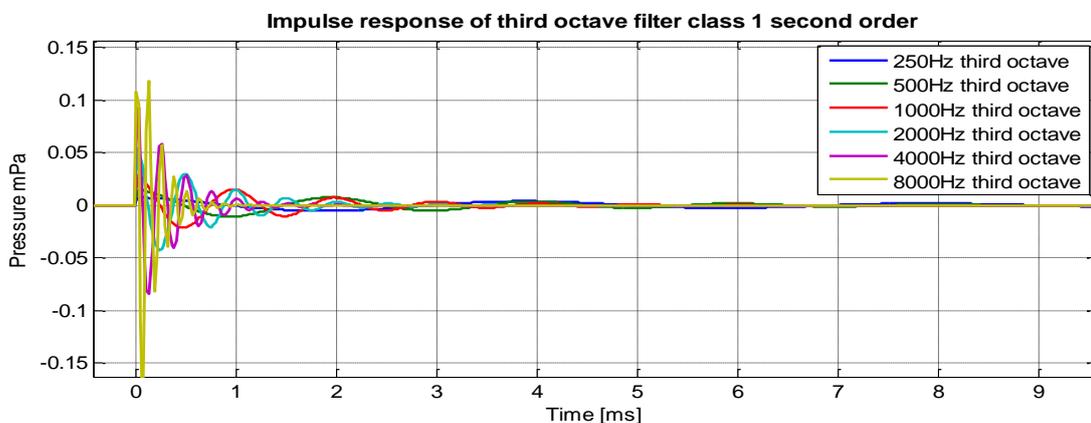


Abbildung 2.28: Terzbandbezogene Impulsantworten eines Filters der Klasse 1 zweiter Ordnung

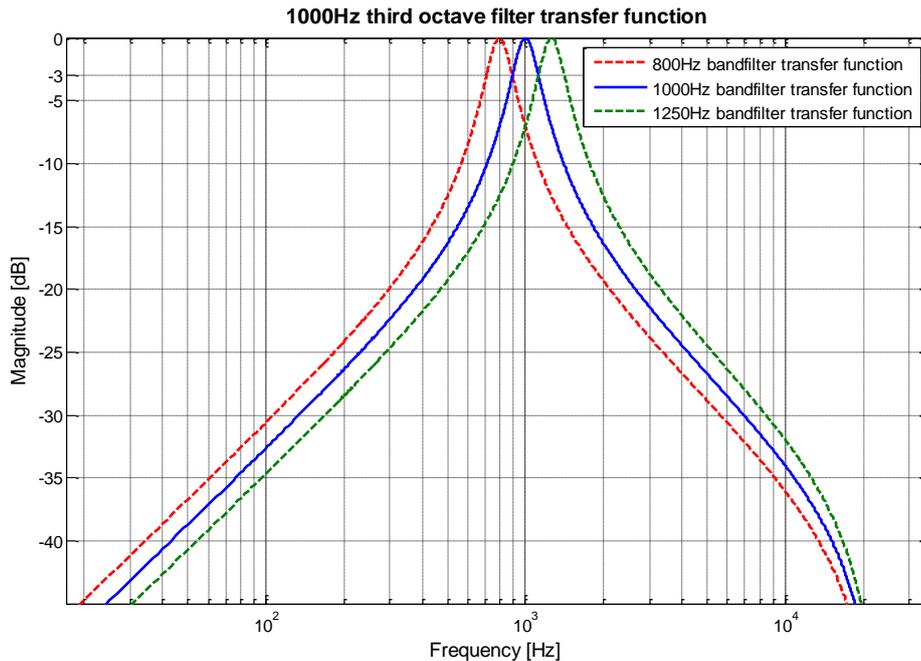


Abbildung 2.29: Vergleich der Transferfunktion von Bandfiltern benachbarter Terzbänder der 2. Ordnung (Modelliert gemäß dem Beispiel auf Seite 53)

Die Abbildung 2.30 zeigt das frequenzabhängige Abklingverhalten des Filters über die Zeit. Man bemerkt hierbei, dass das Abklingverhalten des Filters mit abnehmender Frequenz steigt. Die Nachhallzeit des Filters liegt beispielsweise im 250Hz Terzbandspektrum bei circa 38 Millisekunden.

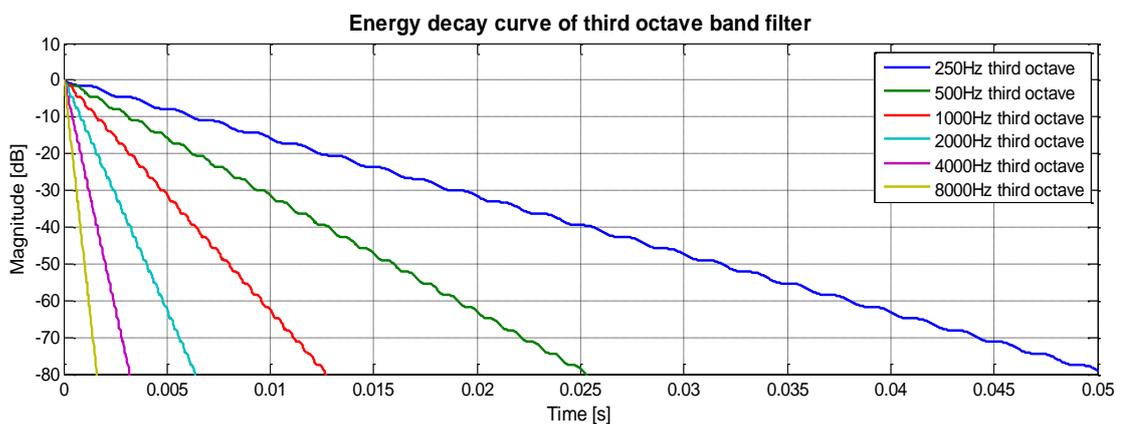


Abbildung 2.30: Übertragungsfunktion eines Filters 2. Ordnung

Es ist für den Einsatz eines Filters wichtig zu beachten, dass die Nachhallzeit des zu messenden Raumes deutlich länger ist als das Dreifache der Nachhallzeit des Filters^[1]. Andererseits besteht die Gefahr, dass das Ergebnis der Filterung einer Raumimpulsantwort durch die Eigenschaften des Filters selbst verfälscht wird.

^[1] Quelle: Untersuchungsergebnisse der Mitarbeiter der Heinkel Group

3 Grundlagen der raumakustischen Simulation mit Ray Tracing

Für die vorliegende Arbeit wird ein Simulationsprogramm der Ahnert Feistel Media Group AFMG[®] in Berlin, namens Enhanced Acoustic Simulator for Engineers EASE[®] verwendet, welches speziell für akustische Simulationen, basierend auf den Gesetzen der geometrischen Akustik, entwickelt ist. Dieses bietet diverse Simulationsmodule an, dessen Algorithmen der Methode der Spiegelschallquelle oder dem Ray Tracing (RT) entsprechen.

Das für die vorliegende Arbeit eingesetzte Simulationsmodul trägt den Namen *Ray Tracing Impacts*. Dieses erzeugt als Ergebnis eine Datei im Format **.mpc*, in welcher die Informationen nur derjenigen Strahlen gespeichert werden, welche von einem definierten ortsfesten Empfänger im Raum erfasst wurden. Passend für die vorliegende Arbeit lässt sich somit die benötigte Information für die Ermittlung ortsfester Reflektogramme exportieren.

Als weiteres Simulationsmodul von EASE[®] wird AURA eingesetzt, welches auf einem von der RWTH-Aachen entwickelten Simulationsalgorithmus namens CAESAR basiert. Dieses Modul dient unter anderem der Ermittlung von abklingkurvenbezogenen Parametern wie die der Nachhallzeit oder der Sprachverständlichkeit (AFMG). Aus diesem Modul lassen sich zusätzlich zwecks Auralisation simulierte Impulsantworten exportieren, welche für die vorliegende Arbeit als Ersatz zu realen Messungen in Anspruch genommen werden.

Die Grundlagen der raumakustischen Simulation mit RT werden in diesem Kapitel erläutert. Beginnend werden wichtige Hinweise bezüglich der Charakterisierung der in der Simulation einbezogenen Elemente geschildert, um anschließend die Übertragung der Energie zwischen Sender und Empfänger zu beschreiben. Abschließend werden wichtige Parameter vorgestellt, deren Bedienung eine äußerst wichtige Rolle hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse einer Simulation spielen.

3.1 Schallquelle

Eine Schallquelle charakterisiert sich unter anderem durch eine **Richtcharakteristik** und eine **Sensitivität**.

Die Richtcharakteristik beschreibt die winkelabhängige Streuung der Schalleistung einer Quelle im Raum. Die Beschreibung dieser erfolgt lediglich über zwei Winkel (s. Abbildung 3.1): einen Polarwinkel θ (senkrecht zur Lautsprechermembran) und einen Azimutwinkel ϕ (quer zur Lautsprechermembran).

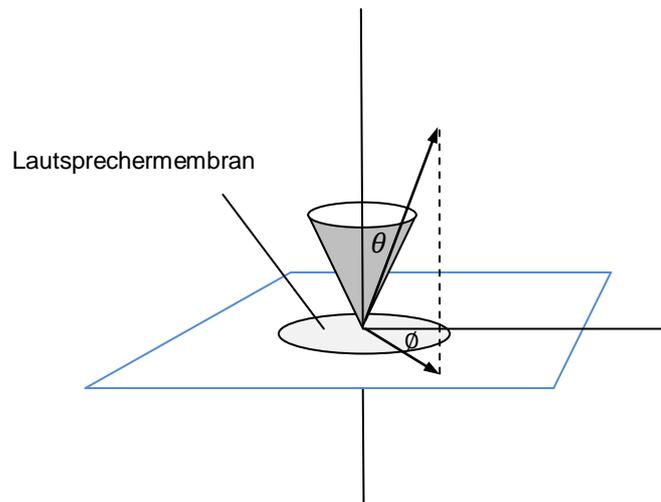


Abbildung 3.1: Winkelbeschreibung der Richtcharakteristik eines Lautsprechers

Die Sensitivität beschreibt den auf die Hauptachse bezogenen Schalldruckpegel, der von einem Lautsprecher in einem Meter Abstand und unter einer zugeführten elektrischen Leistung von einem Watt erzeugt wird.

Beide Parameter können mit Hilfe des entsprechenden Messequipments im reflexionsarmen Raum gemessen werden. EASE[®] bietet hierbei die Möglichkeit die gemessenen Daten direkt zu importieren, um diese als Eingangsparameter für punktförmige Lautsprecher zu verwenden.

Die Abbildung 3.2 zeigt die Richtcharakteristik eines exemplarischen Lautsprechers, dessen Sensitivität normiert auf der Hauptachse dargestellt wird. Demnach würde der Lautsprecher bei einer Sensitivität von beispielsweise 85dB einen Schalldruck von 71dB quer zur Hauptachse in einem Meter Entfernung abstrahlen, wenn dieser mit 1W betrieben wird.

Für die vorliegende Arbeit ist die Charakterisierung der Schallquelle zunächst unbedeutend. Aus diesem Grund, und um eine bessere Übersicht der Ereignisse zu schaf-

fen, wird für alle Simulationen eine von EASE[®] voreingestellte Schallquelle eingesetzt, dessen Richtcharakteristik uniform verteilt ist.

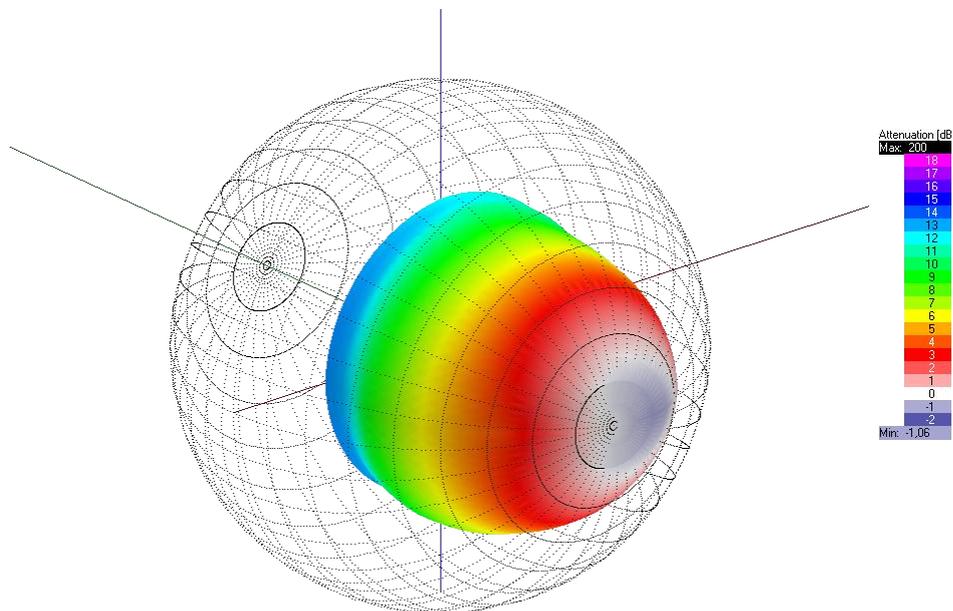


Abbildung 3.2: Richtcharakteristik eines exemplarischen Lautsprechers

3.2 Empfänger

Die Simulation eines Empfängers erfolgt über die Modellierung einer „Detektionszone“, üblicherweise in Form einer Kugel des Querschnittes

$$S_{\text{sphäre}} = \pi r^2,$$

wobei hier auf den Querschnittsradius r geachtet werden muss. Würde dieser nämlich zu klein sein, dann wäre die Wahrscheinlichkeit, dass ein Strahl den Empfänger trifft, sehr gering (s. Abbildung 3.3). Ist der Empfänger zu groß modelliert, beeinträchtigt dies die Güte der Simulation.

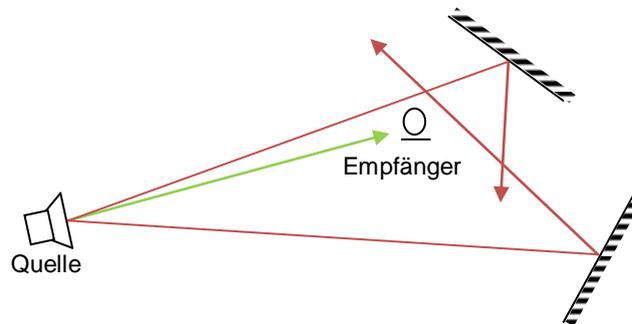


Abbildung 3.3: Problematik bei der Simulation von Empfängern

Die Modellierung des Empfängers ist für die vorliegende Arbeit zunächst ebenso trivial wie die der Quelle. Die Voreinstellung von EASE[®] simuliert einen Empfänger mit einer kugelförmigen „Detektionszone“ mit $r = 1\text{m}$ (AFMG). In der vorliegenden Arbeit wurde lediglich darauf geachtet, dass die Schallquellen möglichst unsymmetrisch im Raum und nicht zu nah an den Raumgrenzen positioniert sind.

3.3 Energieübertragungsfunktion

Das für die vorliegende Arbeit eingesetzte Simulationsmodul trägt den Namen *Ray Tracing Impacts*. Dieses benutzt einen hybriden Algorithmus welcher die Methoden der Spiegelschallquelle und des Ray Tracings kombiniert ([AFMG](#)).

Als Ergebnis der Simulation entsteht für jeden involvierten Empfänger ein Reflektogramm, das in Abhängigkeit der Frequenz oder auch als Pegelsumme ermittelt werden kann. Aus den jeweiligen Reflektogrammen lassen sich gemäß den Gleichungen 2.41 und 2.42 (s. Kap. [Raumübertragungsfunktion](#)) die orts- und frequenzabhängige Abklingkurven berechnen.

Eine genaue Beschreibung des Algorithmus liegt allerdings in der Bedienungsanleitung von EASE[®] nicht vor. Die im Kap. [Methodik](#) vorgelegten Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass sich die simulierten Reflektogramme über die im Kap. [2.2.3.2 Ray Tracing](#) präsentierte Gleichung 2.32 sehr genau nachrechnen lassen.

3.4 Simulationsparameter

Der Aufwand, der für eine RT Simulation betrieben wird, hängt von der Anzahl der simulierten Strahlen sowie der Zeit, in der diese verfolgt werden und die damit vorhandene Anzahl an Reflexionen, welche diese erfahren, ab. Um den Aufwand der Simulation in Grenzen zu halten, werden beim RT sowie bei der Spiegelschallquellenmethode zusätzliche Simulationsparameter berücksichtigt, welche die Verfolgung eines Strahles abbrechen. Diese beziehen sich auf eine maximale „Verzögerungszeit“ t_{max} , eine maximale Reflexionsordnung n_{max} und/oder eine minimale restliche Energie e_{min} , welche nach einer Reflexion übrig bleibt.

Die Verzögerungszeit ist im Rahmen dieser Arbeit als die Zeit zu verstehen, welche zwischen dem Versenden eines Strahles aus einer Quelle bis zum Erfassen dieser über den Empfänger vergeht. Diese maximale Verzögerungszeit entspricht somit der Simulationsdauer.

Grundsätzlich gilt für eine RT Simulation, dass t_{max} weit über die Nachhallzeit gemäß der Sabin'schen Formel (s. Gleichung 2.32) hinaus geht. Dementsprechend muss drauf geachtet werden, dass die n_{max} nicht allzu niedrig und e_{min} nicht allzu hoch gewählt wird, damit Strahlendichte am Ende des Reflektogramms nicht drastisch abnimmt.

Eine hohe Anzahl an simulierten Strahlen pro Quelle N_Q erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein Empfänger „getroffen“ wird.

Im Laufe der vorliegenden Arbeit wurde festgestellt, dass die ebenerwähnten Simulationsparameter einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Simulation haben. Somit könnten Abweichungen bei der Ausgangslage der Optimierung entstehen. Näheres dazu wird im Kap. *Verifikation und Validierung des inversen Verfahrens* erläutert.

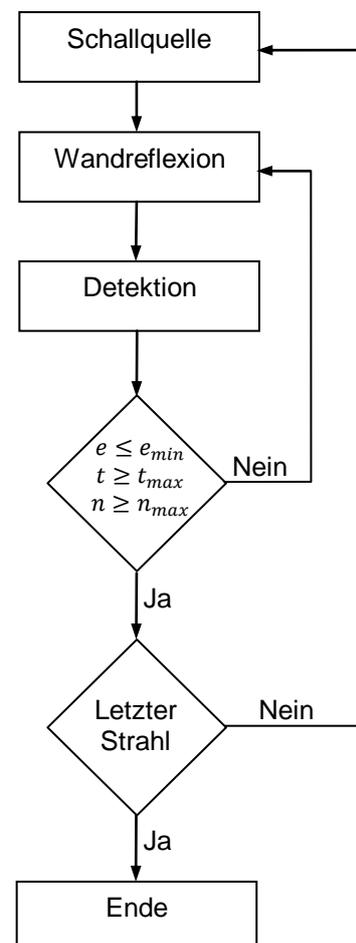


Abbildung 3.4: Blockdiagramm einer Simulation mit RT (Vorländer, 2008)

4 Methodik

Dieses Kapitel befasst sich mit der vom Verfasser verfolgten Vorgehensweise, welche zum entsprechenden Ergebnis geführt hat. Einleitend wird eine Zusammenfassung der Prozesse erläutert, welche den Ablauf der über sechs Monate durchgeführten Arbeit präsentieren. Hierbei ist das Erreichen von zwei Meilensteinen entscheidend:

1. Die erfolgreiche Nachberechnung der im Simulationsprogramm erzielten Ergebnisse (s. Kap. *Nachberechnung der Simulation in MATLAB*) und
2. die Festlegung des Optimierungsvorganges. Hierbei fallen Entscheidungen, wie die des Optimierungsalgorithmus und die des Aufbaus der Kostenfunktion (s. Kap. *Optimierung und Bestimmung der Kostenfunktion*).

Die vorliegende Arbeit hat eine hohe Praxisorientierung. Insgesamt wurden 46 MATLAB-Skripte geschrieben und 24 leicht veränderte Simulationen durchgeführt, welche gezielten Untersuchungen dienen. Anschließend wird zu diesem Kapitel der Aufbau aller Simulationen zusammengefasst. Eine detaillierte tabellarische Beschreibung dieser ist im *Anhang A* zu finden. Eine Beschreibung der Projektplanung ist in Abbildung 4.1 zu finden.

Zum Abschluss wird das Ergebnis der vorliegenden Arbeit präsentiert. Hierbei liegt ein vom Verfasser der vorliegenden Arbeit entwickeltes Berechnungshilfsprogramm namens *Room Absorption Coefficient Optimazer* (RAPO) vor. Eine detaillierte Beschreibung hinsichtlich der Bedienung ist in *Anhang B* und *Anhang C* zu finden.

4.1 Vorgehensplan

Projektplanung
 Jens Hellemann
 Optimierung von Eingangsgrößen für raumakustische Simulationen unter Berücksichtigung inverser Methoden

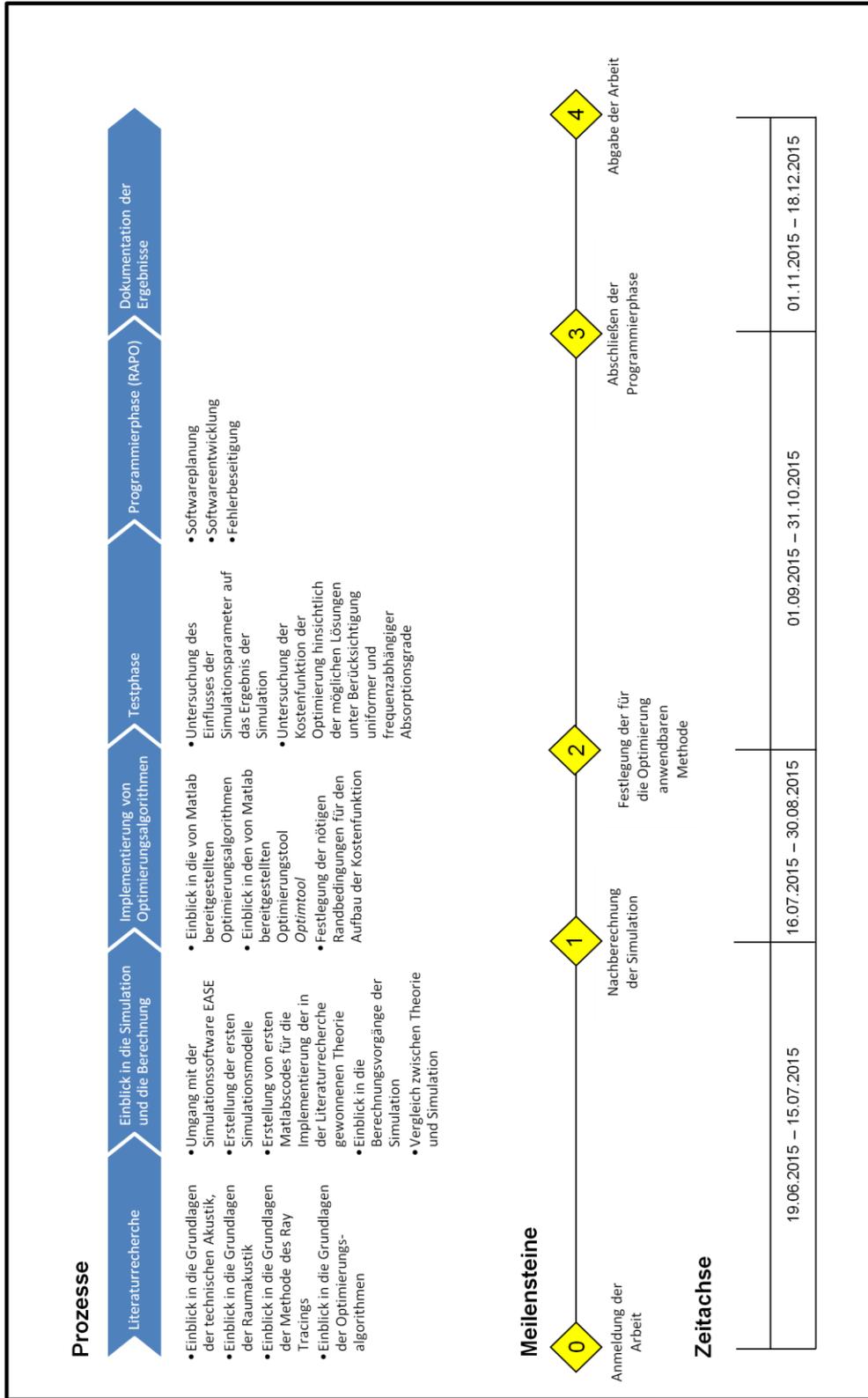


Abbildung 4.1: Projektplanung

4.2 Simulationsmodelle

Die für die Untersuchungen aufgebauten Simulationen wurden mit einem Simulationsprogramm der Ahnert Feistel Media Group AFMG[®], namens Enhanced Acoustic Simulator for Engineers EASE[®], hergestellt.

Im gesamten Verlauf der Arbeit wurden drei leicht veränderte geschlossene Räume simuliert:

- Test_room_1: Ist ein quaderförmiger Raum der Kantenlänge 10x8x5.
- Test_room_2: Ist ein quaderförmiger Raum der Kantenlänge 10x8x4 mit einem großen „Bett“ der Dimensionen 2x3x1 im Zentrum. Dieser Raum ist eine Erweiterung des Raumes „Test_room_1“ und wurde konzipiert, um den Einfluss der Anzahl an Raumflächen auf das Ergebnis zu untersuchen.
- Test Room_3: Ist ein quaderförmiger Raum der Kantenlänge 10x8x4.

„Test_room_2“ ist in Abbildung 4.2 zu sehen. „Test_room_3“ ist identisch zu „Test_room_2“ vorzustellen, jedoch ohne Bett im Zentrum. „Test_room_1“ ähnelt „Test_room_3“ allerdings mit einer höheren Decke (s. Tabelle 4.1).

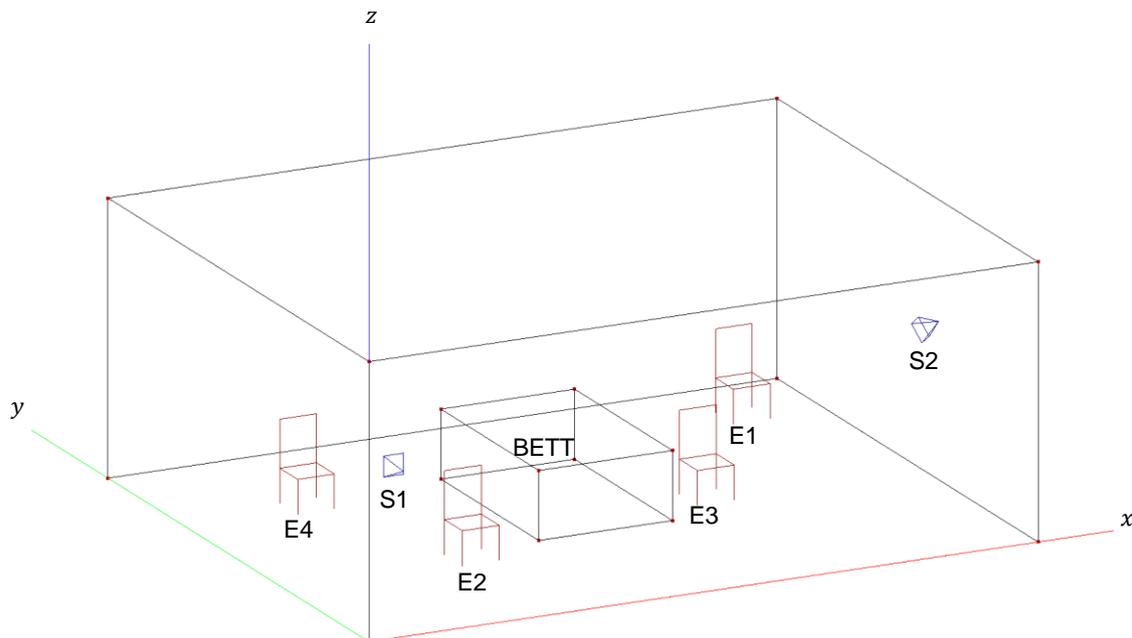


Abbildung 4.2: Simulierter Quaderraum

In jedem Raum sind zwei Quellen und vier Empfänger platziert, wobei nicht alle in jede Simulation mit einbezogen werden. Der Lautsprecher S2 steht in einem Meter Entfernung zu den naheliegenden Wandflächen und zeigt in die Raumdiagonale. Lautsprecher S1 steht ebenfalls in einem Meter Entfernung zu den benachbarten Wandflächen, wobei dieser im „Test_room_1“ in einem Meter Höhe und im

„Test_room_2“ und „Test_room_3“ in zwei Meter Höhe platziert ist. Beide Quellen besitzen eine uniforme Richtcharakteristik, und senden somit in jede Richtung gleichmäßig Schallenergie aus. Die Sensitivität der Quellen beträgt ca. 96dB für jedes Terzband. Die Position der Empfänger wurde so gewählt, dass diese unsymmetrisch im Raum und in einem Meter Höhe platziert sind.

Tabelle 4.1: Varianten des simulierten Raumes hinsichtlich der Dimensionen

	Raumdimensionen	Test_room_1	Test_room_2	Test_room_3
Raummaße	x [mm]	10	10	10
	y [mm]	8	8	8
	z [mm]	5	4	4
Bettmaße	x [mm]	-	2	-
	y [mm]	-	3	-
	z [mm]	-	1	-

Raumakustische Eigenschaften definieren sich u.a. über die Eigenschaften einzelner Flächen im Raum. Diese werden im Verlauf der vorliegenden Arbeit variiert, um die Güte der Optimierung unter Berücksichtigung von frequenzabhängigen und – unabhängigen Absorptionsgraden sowie extremen absorbierenden und reflektierenden Bedingungen, wie die im Hallraum oder im reflexionsarmen Raum, zu untersuchen. Die für jede Raumgestalt verwendeten Flächeneigenschaften sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die dazugehörigen frequenzabhängigen Absorptionsgraden sind in Tabelle 4.3 zu finden.

Tabelle 4.2: Raumeigenschaften

Flächen	Uniform	Triform	Hallraum	Reflexions- armer Raum	Frequenz- abhängig Uniform	Frequenz- abhängig Biform	Frequenz- abhängig Biform 2
Boden	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	Reflektor	Absorber	Hochpass	$\alpha=10\%$	$\alpha=30\%$
Decke	$\alpha=10\%$	$\alpha=40\%$	Reflektor	Absorber	Hochpass	$\alpha=10\%$	Hochpass
Wand (links)*	$\alpha=10\%$	$\alpha=10\%$	Reflektor	Absorber	Hochpass	$\alpha=10\%$	$\alpha=30\%$
Wand (rechts)*	$\alpha=10\%$	$\alpha=10\%$	Reflektor	Absorber	Hochpass	$\alpha=10\%$	Hochpass
Wand (vorne)**	$\alpha=10\%$	$\alpha=10\%$	Reflektor	Absorber	Hochpass	Hochpass	$\alpha=30\%$
Wand (hinten)**	$\alpha=10\%$	$\alpha=10\%$	Reflektor	Absorber	Hochpass	Hochpass	Hochpass

* Fläche normal zur x-Achse, mit „rechts“ $x = 0$ und „links“ $x = 10$

** Fläche normal zur y Achse, mit „vorne“ $y = 0$ und „hinten“ $y = 8$

Als Flächeneigenschaft des Bettes werden $\alpha = 80\%$ der Decke und $\alpha = 30\%$ der restlichen Flächen zugewiesen.

Tabelle 4.3: Flächeneigenschaften

<i>f</i> [Hz]	Flächenbezeichnung							
	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=80\%$	Reflektor	Absorber	Tiefabsorber
100	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,3
125	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,3
160	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,3
200	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,3
250	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,3
315	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,3
400	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,2
500	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,2
630	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,2
800	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,2
1000	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,2
1250	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,2
1600	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,15
2000	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,15
2500	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,15
3150	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,1
4000	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,1
5000	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,1
6300	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,05
8000	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,05
10000	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,01	0,99	0,05

4.3 Nachberechnung der Simulation in MATLAB

Als erster Meilenstein der vorliegenden Arbeit galt die Einordnung der für die Optimierung anwendbaren Ressourcen. Hierbei stellt sich die Frage, welches der vorhandenen Programme für die Durchführung der Optimierung am besten geeignet ist. Der Ansatz, der hier zunächst verfolgt wird, ist eine Nachberechnung der von EASE[®] durchgeführten Simulation in MATLAB[®]. Mit dem Erreichen dieses Zieles gibt es somit die Möglichkeit, verschiedene Eingangsparameter direkt im MATLAB-Code zu verändern. Somit kann eine wiederholte Simulation nach jedem Iterationsvorgang vermieden werden.

Unter den verschiedenen Berechnungsmodulen, die von EASE[®] angeboten werden, befindet sich ein Modul namens *Ray Tracing Impacts*. Hierbei wird eine hybride Simulation mit der Methode des Ray Tracings und der Spiegelschallquelle erzeugt. Die Daten der Ergebnisse lassen sich als Datei im *.dat Format exportieren. Dabei kann die Information aller vom Empfänger erfassten Strahlen unter anderem hinsichtlich der jeweiligen Reflexionen, der Anfangsenergie, des zurückgelegten Weges, der Verzögerungszeit sowie der vom Empfänger erfassten restlichen Energie exportiert werden.

Diese Informationen lassen sich durch ein speziell für das gegebene Format vom Verfasser erstelltes Script in MATLAB importieren, sortieren und als *.mat Datei für eine weitere Verarbeitung speichern.

Die Nachberechnung des Reflektogramms erfolgt gemäß Gleichung 2.41, allerdings über eine inverse Rückrechnung. Hierbei wird zunächst die Information der Lautsprecher bezüglich der frequenzabhängigen Sensitivität der simulierten Quelle entnommen und in eine Zeilenmatrix $L_0(f)$ als Anfangsenergie in Pegel für jeden Strahl i gespeichert.

$$L_0(f) = [L_{0,1}(f) \quad L_{0,2}(f) \quad \cdots \quad L_{0,i}(f)]$$

Für die Berechnung der verlorenen Energie auf Grund von Reflexionen wird eine Matrix N erzeugt, welche die Informationen hinsichtlich der Anzahl der vorkommenden Reflexionen n eines Strahles i an einer Fläche s enthält.

$$N_{(ixs)} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1s} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & n_{i2} & \cdots & n_{is} \end{bmatrix}$$

Diese wird mit einer Zeilenmatrix $\alpha_s(f)$ multipliziert, welche die Information des frequenzabhängigen Absorptionsgrades einer Fläche s enthält.

$$\alpha_s(f) = [\alpha_1(f) \quad \alpha_2(f) \quad \cdots \quad \alpha_s(f)]$$

Die Berechnung erfolgt gemäß Gleichung 4.1.

$$L_R(f, \alpha) = 10 \cdot \log_{10} \left(\exp(N_{(ixs)} \cdot [\ln \alpha_{(1xs)}(f)]^T) \right) \quad 4.1$$

Die Berechnung des gedämpften Schallpegels, welcher auf Grund der absorbierenden Eigenschaften des Mediums entsteht, wird gemäß Gleichung 4.2 für jeden einzelnen Strahl berechnet.

$$L_{m,i}(f) = m(f) \cdot r_i \quad 4.2$$

Hierbei ist m der im Kap. *Schalldämpfung in der Luft* vorgestellte frequenzabhängige Schalldämpfungskoeffizient der Luft und r der vom Strahl i zurückgelegte Weg. Es wird anschließend eine frequenzabhängige Zeilenmatrix L_m erzeugt, welche die Information hinsichtlich der gedämpften Energie eines Strahles spaltenweise enthält.

$$L_m(f) = [L_{m,1}(f) \quad L_{m,2}(f) \quad \cdots \quad L_{m,i}(f)]$$

Als letztes ist noch die vom Abstandsgesetz verursachte Schalldispersion ebenfalls als Pegel zu berücksichtigen. Diese wird als Pegel gemäß Gleichung 4.3 zu

$$L_d = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) = 20 \cdot \log_{10}(r), \quad 4.3$$

mit

$$r_0 = 1 \text{ m},$$

wobei r eine Zeilenmatrix ist, welche die Information bezüglich des von einem Strahl zurückgelegten Weges enthält.

$$r = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_i]$$

Der Pegel eines jeden Strahls i kann somit beim Einsetzen der Gleichungen 4.1, 4.2 und 4.3 in Gleichung 4.4 berechnet werden

$$L_E(f, \alpha) = L_0(f) - L_R^I(f, \alpha) - L_m(f) - L_d. \quad 4.4$$

Es entsteht eine Zeilenmatrix L_E , welche die von einem Empfänger erfasste frequenzabhängige Energie der Strahlen enthält.

$$L_E(f, \alpha) = [L_{E,1}(f) \quad L_{E,2}(f) \quad \cdots \quad L_{E,i}(f)]$$

Sind die einzelnen Strahlen i über die Ankunftszeit geordnet kann das Reflektogramm gemäß der folgenden Gleichung 4.5 berechnet werden.

$$E^n(f, \alpha) = 10^{(L_E^n(f)/10)} \quad 4.5$$

Die gesamte Berechnung erfolgt für jedes Terzband und für jeden simulierten Empfänger.

Für eine frequenzunabhängige Betrachtung müssen die Energien der frequenzabhängigen Reflektogramme zu jedem diskreten Zeitpunkt gemäß Gleichung 4.6 addiert werden.

$$E = E(f_1) + E(f_2) + E(f_3) + \dots + E(f_{n-1}) + E(f_N) \quad 4.6$$

Die Abbildung 4.3 zeigt den Vergleich eines mit EASE[®] simulierten exemplarischen Reflektogramms (in blau) und dessen Nachberechnung in MATLAB[®] (in rot). Die Abweichung der Energien für jeden Strahl liegt im Bereich des hundertstel Dezibels.

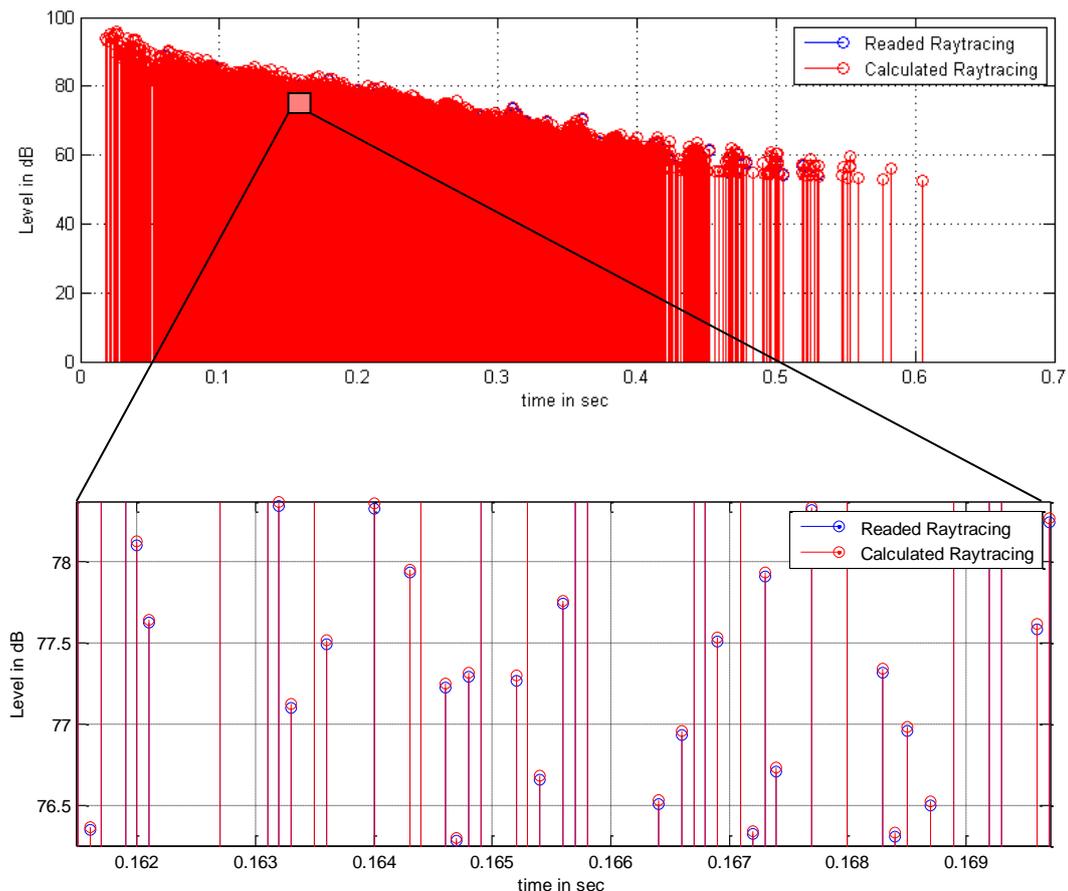


Abbildung 4.3: Nachberechnung des simulierten Reflektogramms

Die Abklingkurve eines diffusen Schallfeldes im simulierten Raum lässt sich nun für jede Frequenz oder als Summe aller Frequenzen gemäß Gleichung 2.41 bzw. 2.42

ermitteln. Dies wird über den Einsatz einer inversen kumulativen Summe aller in $E(f)$ bzw. in E enthaltenen Beiträge und eine entsprechende Umrechnung in Pegel umgesetzt. Der Vergleich zwischen Simulation und Nachrechnung wird in Abbildung 4.4 dargestellt.

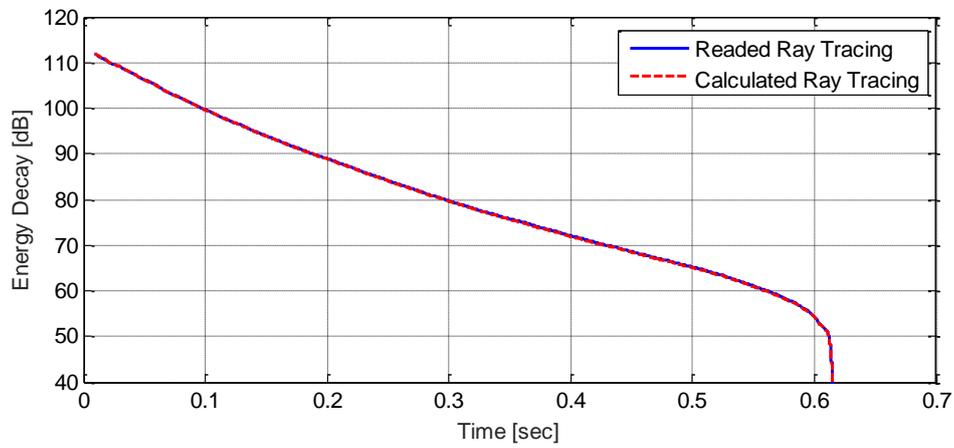


Abbildung 4.4: Nachrechnung der simulierten Abklingkurve

4.4 Optimierung und Bestimmung der Kostenfunktion

Nachdem eine Nachberechnung der Simulation über die Berechnungssoftware MATLAB[®] gewährleistet ist, wird der Vorgang der Optimierung direkt über diese eingeleitet. MATLAB[®] stellt hierfür diverse Optimierungsverfahren zu Verfügung.

Das für die vorliegende Arbeit verwendete Optimierungsverfahren wird über das Abrufen des Befehls LSQCURVEFIT ausgeführt, welches auf Basis einer Methode der kleinsten Fehlerquadrate versucht, die minimale quadratische Abweichung zwischen zwei Kurven über

$$J = \min_x \|y - f(x)\|_2^2 = \min_x \sum_i [y_i - f(\alpha)_i]^2$$

zu ermitteln, so dass die von einer Variablen x abhängige Funktion $f(x)$ so gut wie möglich der zweiten Kurve y angepasst wird.

Um den Optimierungsvorgang aufzubauen, muss die zu optimierende Kostenfunktion J festgelegt werden. Hierfür gibt es zunächst zwei Möglichkeiten:

Option 1: Die Kostenfunktion bezieht sich auf die quadratische Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Reflektogrammen oder,

Option 2: Die Kostenfunktion bezieht sich auf die quadratische Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Abklingkurven.

Der Vorteil der Option 1 gegenüber Option 2 liegt darin, dass die Simulationsergebnisse in gewissem Maße direkt als Eingangsparameter für die Optimierung eingesetzt werden können. Somit hat die Optimierung einen besseren Zugriff auf jeden einzelnen simulierten Strahl und kann diese so anpassen, dass ein gemessenes Reflektogramm im optimalen Fall exakt reproduziert wird.

Allerdings gibt es für den Aufbau des Optimierungsvorganges eine wichtige Randbedingung. Da LSQCURVEFIT eine Subtraktion zweier Matrizen hervorruft, müssen diese dieselbe Anzahl an Spalten- bzw. Zeileneinträgen haben. Beide Eingangsparameter müssen somit über eine gemeinsame Abtastrate verfügen. Messungen werden auf Grund des Nyquist-Kriterium und des Hörvermögens eines menschlichen Ohres mit einer Rate von mindestens 44,1kHz abgetastet. Bei der Simulation mit RT allerdings gibt es keine definierte Abtastrate, weil die Energie dann aufgenommen wird, wenn ein Strahl den Empfänger trifft.

Die diesbezüglichen Untersuchungen ergeben, dass die in jedem Zeitschritt eines Reflektogramms vorhandene Energie stark von der Rate der Abtastung abhängt. Die Abklingkurve bleibt jedoch unverändert (s. Abbildung 4.5).

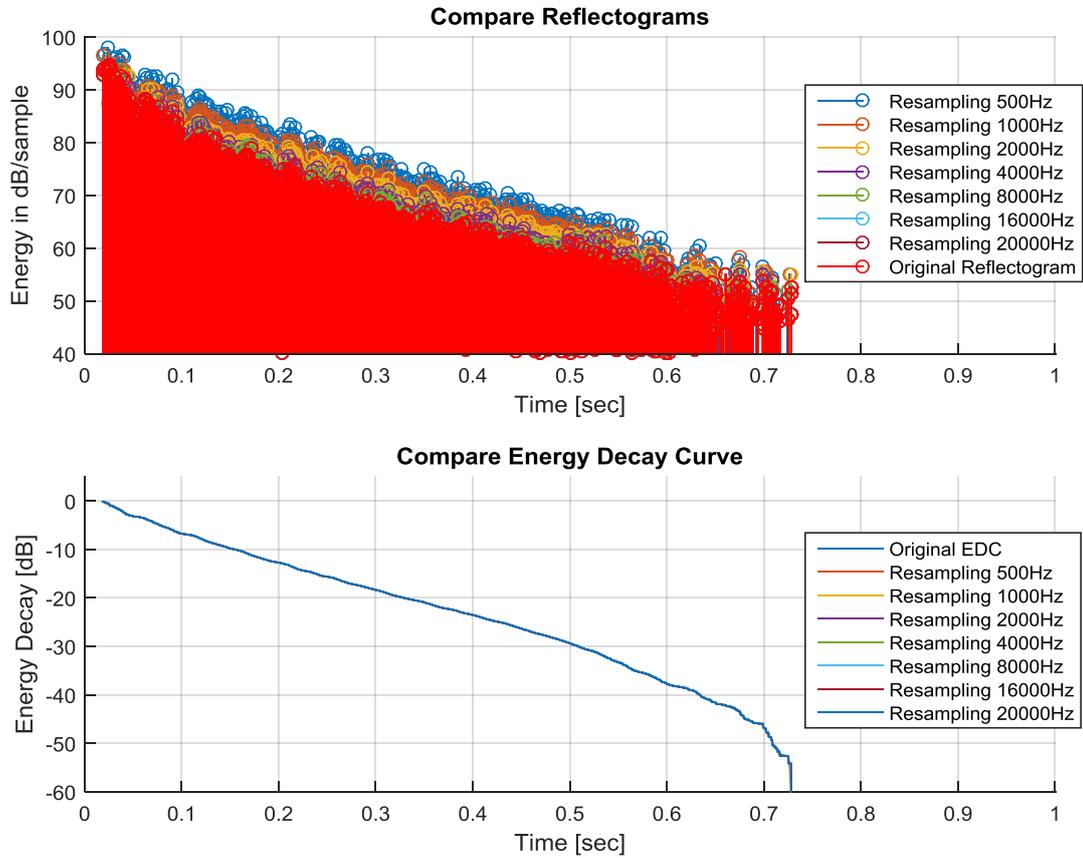


Abbildung 4.5: Vergleich der Abklingkurven und Reflektogramme hinsichtlich der Abtastrate

Um das Ergebnis der Optimierung nicht zusätzlich von der Abtastrate der Eingangsparameter zu beeinflussen, wird für die zweite Option als Aufbau der Kostenfunktion entschieden. Die Kostenfunktion $J(\alpha)$ wird somit anhand der Summe der quadratischen Abweichungen von n Zeitschritten der Abklingkurven gemäß folgender Berechnung ermittelt:

$$e_n = L_{messung}(n) - L_{simulation}(n) \quad 4.7$$

$$\mathbf{e} = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_N]$$

$$\|\mathbf{e}\|_2 = \sqrt{\mathbf{e}\mathbf{e}^T} = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_N^2}$$

$$J(\alpha) := \|\mathbf{e}\|_2^2 = e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_N^2 \quad 4.8$$

Der Solver LSQCURVEFIT löst somit das Problem, indem ein minimaler Betrag der Kostenfunktion gesucht wird.

$$\text{Lösung} \rightarrow \min_{\alpha} (J(\alpha))$$

Dies erfolgt über ein sogenanntes Gradientenverfahren, welches die Steigung der Kostenfunktion zu jeder Iteration mit Hilfe einer Ableitung über den Absorptionsgrad α berechnet.

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = 2\mathbf{e} \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \alpha} \right)^T \quad 4.9$$

Das Minimum ist dann erreicht, wenn die Steigung zu Null wird:

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} \stackrel{!}{=} 0$$

LSQCURVEFIT wird als Solver für die vorliegende Arbeit eingesetzt, weil dieses in der Lage ist Probleme zu lösen, dessen Variablen einen nicht-linearen Bezug zur Lösung haben. Weiterhin bietet LSQCURVEFIT aus der Sicht des Verfassers eine optimale Schnittstelle hinsichtlich der für RAPO vorgesehenen Datenverarbeitung.

4.5 Room Absorption Property Optimizer

Das Berechnungshilfsprogramm *Room Absorption Property Optimizer* (RAPO) ist das Ergebnis der Methodik der vorliegenden Arbeit, welches ergänzend zu EASE[®] seinen Einsatz findet. RAPO ist in der Lage, die von EASE[®] exportierten Simulationsergebnisse zu lesen und zu verarbeiten. Dabei kann es selbständig die bei der Simulation einbezogenen Schallquellen und Empfänger erkennen und das Ergebnis so sortieren, dass eine parallele Optimierung über mehrere Reflektogramme möglich ist.

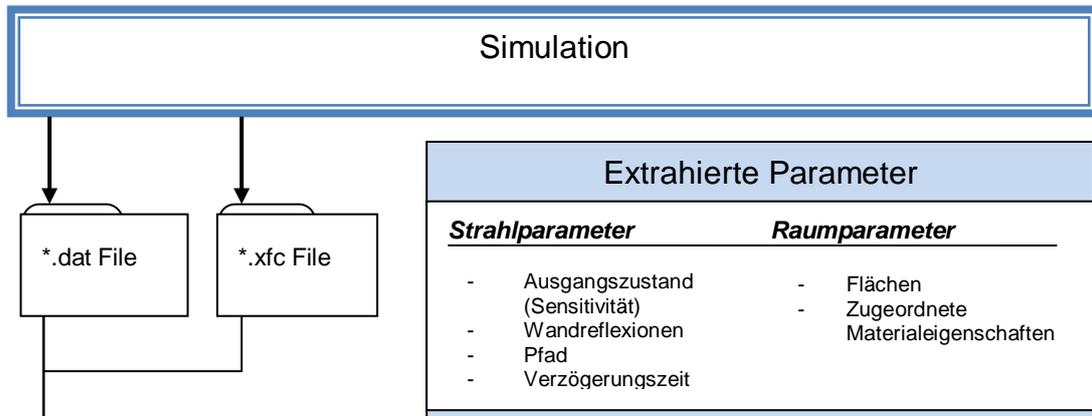
Je nach Anzahl an Raumflächen und zu optimierenden Absorptionsgraden, wird die Optimierung zu einem mehrdimensionalen Problem. Um den Zeitaufwand des Optimierungsvorganges zu minimieren, sortiert RAPO die Flächen nach Materialeigenschaften, um somit jede gleichwertige Raumfläche (beispielsweise jedes Sitzpolster, Fenster oder jede Tischplatte) einem gemeinsamen Absorptionsgrad zuzuweisen. Die Anzahl der zu optimierenden Absorptionsgrade und die damit verbundene Anzahl an Iterationsvorgängen werden dadurch reduziert.

RAPO bietet zusätzlich eine Schnittstelle zum Nutzer. Hierbei kann die Vorgehensweise der Berechnung und der Optimierung eingestellt werden. Besonders interessant ist die Wahl der Ermittlung von frequenzabhängigen bzw. –unabhängigen Absorptionsgraden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Simulationsergebnisse zu optimieren, welche von RAPO vorab verarbeitet und als Datei im *.mat Format gespeichert worden sind, sowie die nutzerdefinierte Einstellung von Raumeigenschaften wie beispielsweise Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck mit welchen die Simulation an die jeweiligen vergleichbaren Messbedingungen angepasst werden kann. Somit wird die Notwendigkeit einer wiederholten Simulation vermieden. Als letztes können einzelne Parameter, wie die Rate der Neuabtastung (für die Erstellung der Kostenfunktion) und die Anfangsbedingungen des Optimierungsvorganges individuell gewählt werden.

RAPO verwendet einen Optimierungsalgorithmus basierend auf der im Kap. *Optimierung und Bestimmung der Kostenfunktion* vorgestellten Methode der nicht-linearen Fehlerquadrate. Dabei wird das Ergebnis der Simulation anhand der Absorptionsgrade über ein iteratives Verfahren solange manipuliert, bis sich simulierte und gemessene Abklingkurve so gut wie möglich ähneln und die quadratische Abweichung beider Kurven einen minimalen Betrag erreicht. Das Ergebnis beschreibt die zu verwendenden frequenzabhängigen bzw. –unabhängigen materialbezogenen Absorptionsgrade, welche in der Simulation berücksichtigt werden müssen, damit die akustischen Eigenschaften des simulierten Raumes denen des reellen entsprechen.

Um dieses Ergebnis zu erreichen, verarbeitet RAPO die aus einer Simulation und einer Messung gewonnenen Daten unabhängig voneinander und verknüpft diese über

den Vorgang der Optimierung. Dieser Prozess wird im Folgenden erläutert (s. auch [Anhang C:](#)):



Die Simulation erfolgt über das Simulationsprogramm EASE[®] mit Hilfe des Moduls *Ray Tracing Impacts*. Hierbei erzeugt EASE[®] eine Datei des Formates *.mpc, welche die Informationen der von den Empfängern erfassten Strahlen zusammenfasst. Aus dieser Datei lässt sich die Information als *.dat Datei exportieren. Weiterhin benötigt RAPO für die Optimierung die Information aller in der Simulation einbezogenen Flächen. Diese lassen sich im Modul als *.xfc Datei direkt exportieren (s. [Anhang C:](#)).



Die in EASE[®] exportierte *.dat Datei wird zunächst über die Funktion *ReadRaytraceFile.m* in MATLAB[®] abgelesen. Auf Grund der hohen Anzahl an vorhandenen Rays und des damit verbundenen Anspruches an Arbeitspeicherkapazität entnimmt RAPO nur die für die Optimierung benötigte Strahleninformation aus der Datei und erzeugt ein *struct*, das zeilenweise die Informationen aller Ereignisse bezüglich jedes einzelnen Strahls enthält (s. [Abbildung 4.6](#)). Mit Ereignissen sind die jeweiligen Vorgänge gemeint, die einen Strahl, beginnend mit der Immission und gefolgt von den einzelnen Reflexionen und Detektion, erfährt.

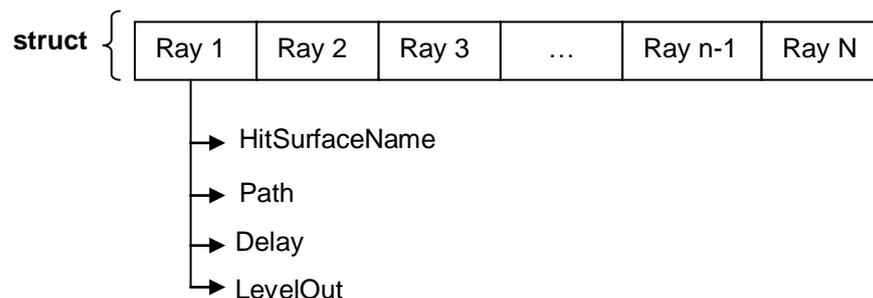


Abbildung 4.6: Strukturdarstellung des Outputs der Funktion *ReadRaytraceFile.m*

Die Spaltenmatrix *HitSurfaceName* enthält die Bezeichnung aller Flächen und Elemente, welche in jedem Ereignis eines Strahls eine Rolle spielen. Der erste Beitrag ist demnach eine Quelle und der letzte ein Empfänger. Die Spaltenmatrix *Delay* beschreibt die kumulative Verzögerungszeit, die zwischen den einzelnen Ereignissen, beginnend mit dem Aussenden des Impulses am Zeitpunkt $t = 0$, vergeht. Die Spaltenmatrix *Path* beschreibt für jedes Ereignis den zurückgelegten Weg eines Strahles und die Matrix *LevelOut* beschreibt den nach einem Ereignis übrigbleibenden Schalldruckpegel für jede Frequenz.

Nach dem Ablesen der Datei werden alle Strahlen über die Funktion *sorttracedfile.m* nach der Verzögerungszeit und dem Empfänger sortiert. Es entsteht eine neue übergeordnete Struktur (s. Abbildung 4.7).

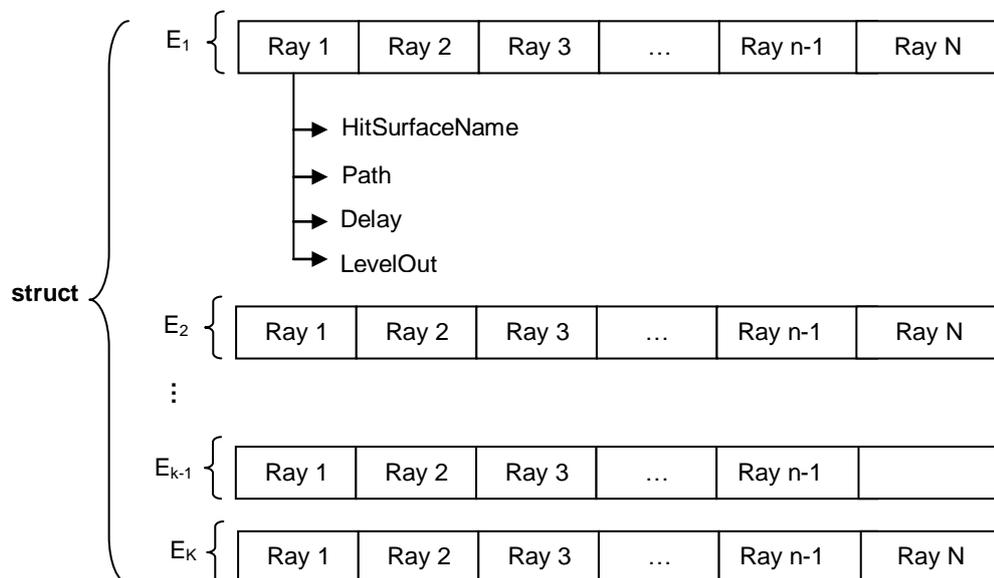
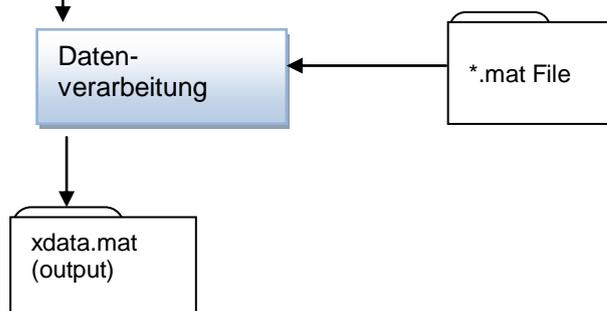
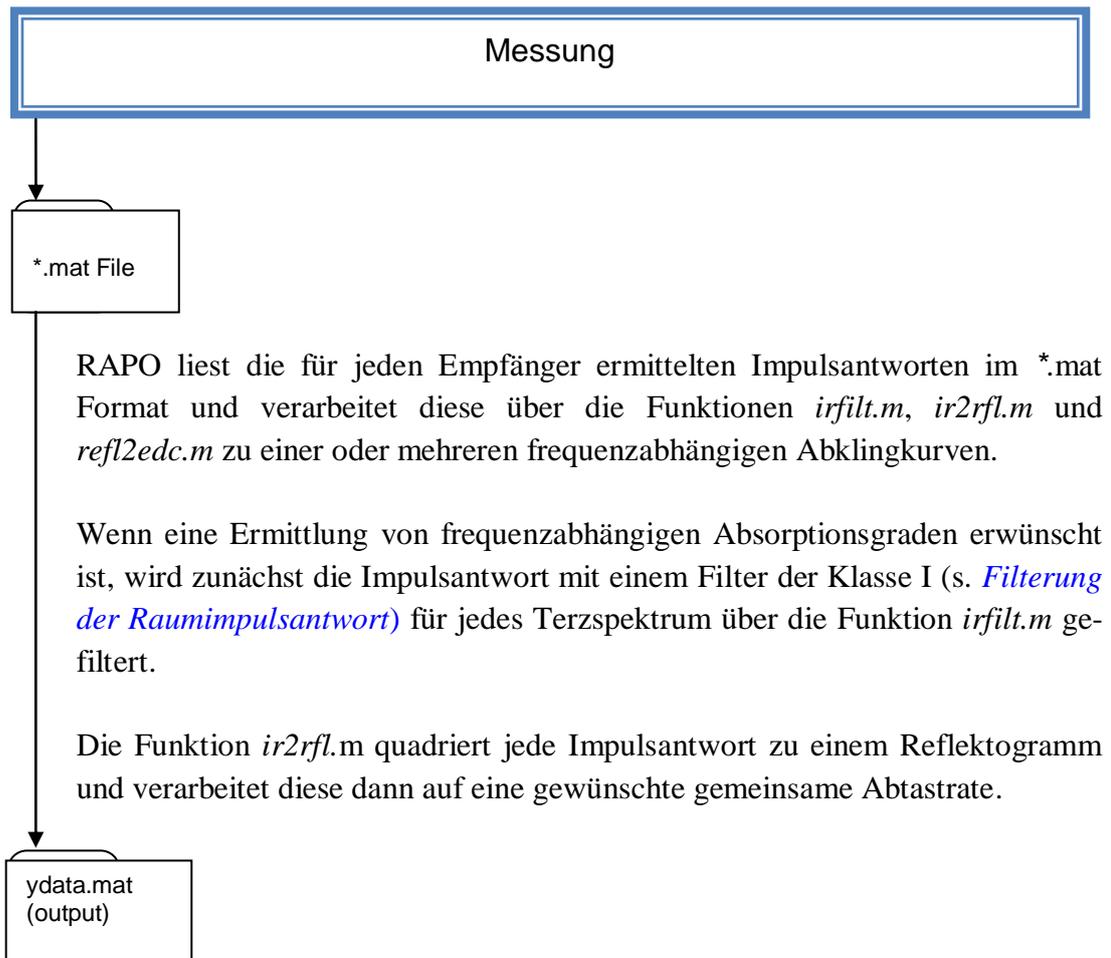


Abbildung 4.7: Strukturdarstellung des Outputs der Funktion *readtracedfile.m*

Das Ergebnis der Funktion *readtracedfile.m* wird als *.mat Datei automatisch gespeichert, um eine Weiterverarbeitung der Daten zu einem späteren Zeitpunkt gewährleisten zu können. Somit muss der bisherige Vorgang nicht wiederholt werden.



Aus dem Datenimport werden nun über die Funktion *createxdata.m* die Parameter für die Berechnung der Reflektogramme ermittelt. Es entsteht eine für die Optimierung verwendbare *xdata.mat* Datei, die ebenfalls gespeichert wird. Die gespeicherte Datei enthält die benötigten Informationen, um mit Hilfe der im Kap. [Nachberechnung der Simulation in MATLAB](#) präsentierten Berechnung die Abklingkurven aller simulierten Empfänger berechnen zu können.



Die Berechnung der für die Kostenfunktion benötigten Abklingkurven wird durch die Rückintegration der jeweiligen Reflektogramme gemäß der Gleichungen 2.41 und 2.42 ermittelt. Als Ergebnis der Funktion *refl2edc.m* entsteht eine Matrix, in welche die berechneten Abklingkurven für jeden Empfänger reihenweise aufgetragen sind. Ist eine spektrale Zerteilung in Terzen gewünscht, entsteht eine solche Matrix für jedes Terzband. Diese werden in einer Variablen *ydata.mat* gespeichert und als Basis für den Optimierungsvorgang verwendet.

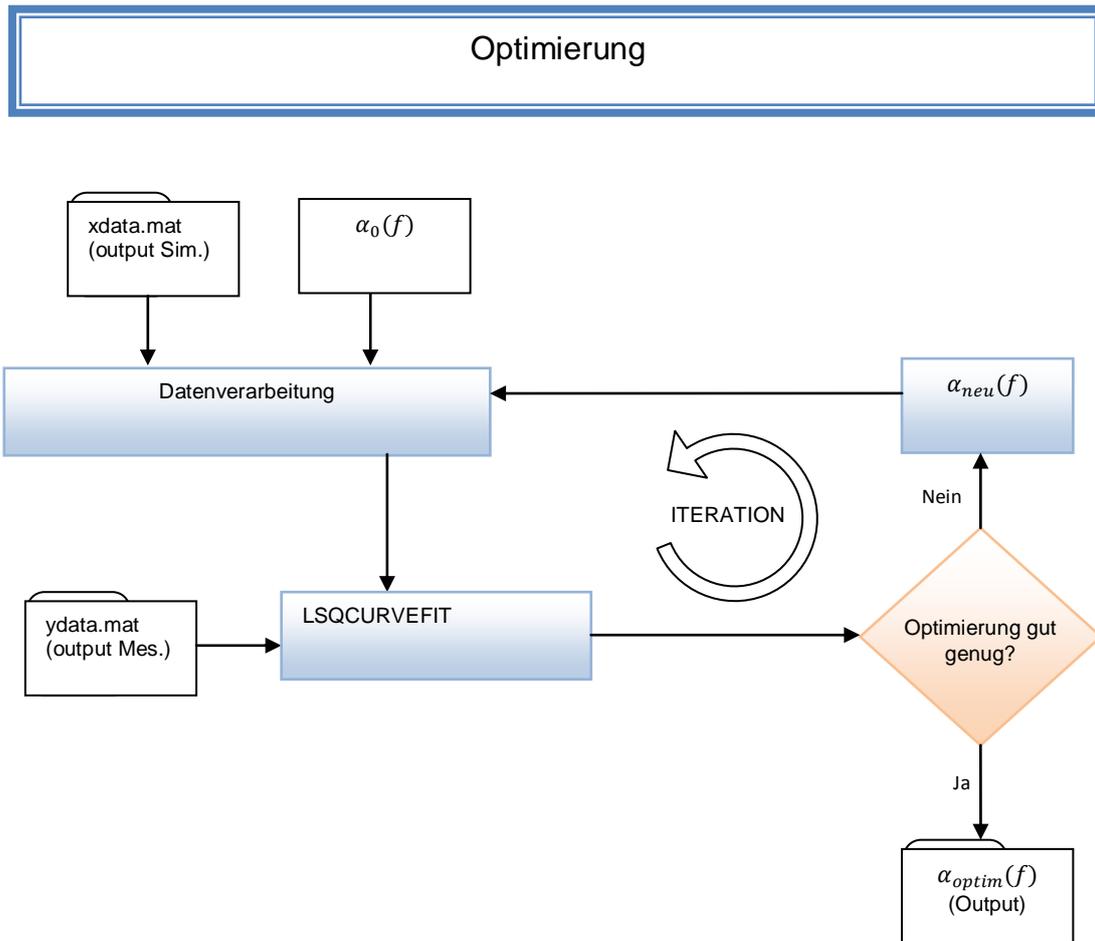


Abbildung 4.8: Flussdiagramm des Optimierungsvorganges

Das für die vorliegende Arbeit verwendete Optimierungsverfahren wird über das Abrufen des von MATLAB[®] bereitgestellten Befehls LSQCURVEFIT ausgeführt, welcher auf Basis einer Methode der nicht-linearen Fehlerquadrate die minimale quadratische Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Abklingkurven zu finden versucht. Dies erfolgt über ein iteratives Verfahren, in welcher die Absorptionsgrade der Simulation so getrimmt werden, dass die Simulation der reellen Messung so gut wie möglich ähnelt (s. Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9).

Das zu lösende Problem wird bezogen auf die von RAPO angewandte Methodik wie folgt aufgebaut:

$$\min_{\alpha} \|f(\alpha_0, xdata) - ydata\|_2^2 = \min_{\alpha} \sum_i [f(\alpha_0, xdata_i) - ydata_i]^2$$

Hierbei sind $xdata$ die aus der Simulation verarbeiteten Daten und α_0 einen für die Iteration wählbaren Ausgangswert für den Absorptionsgrad, aus welcher eine simu-

lierte Abklingkurve über eine Funktion $f(\alpha_0, xdata)$ berechnet wird. Die aus der Messung gewonnenen Abklingkurven sind im Beitrag $ydata$ enthalten.

Die Funktion $f(\alpha_0, xdata)$ ist in RAPO als *creaedc.m* zu finden. Diese entnimmt die Information aus *xdata.mat* und berechnet zunächst für jeden Empfänger ein (frequenzabhängiges) Reflektogramm in Abhängigkeit von den als Spaltenmatrix angegebenen Absorptionsgraden α . Folglich werden alle Reflektogramme neu abgetastet und über eine zeitliche Rückintegration gemäß Gleichungen 2.41 und 2.42 zu den entsprechenden Abklingkurven umgerechnet.

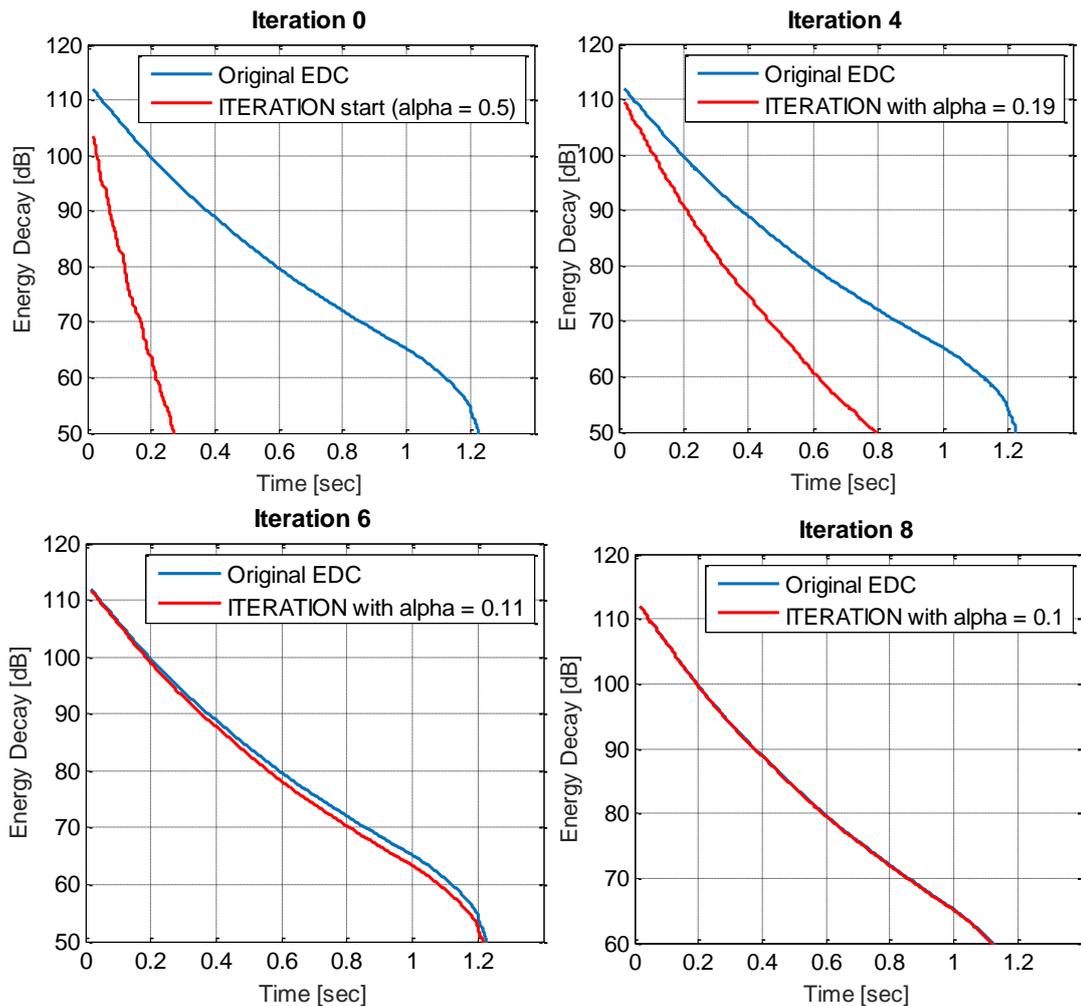


Abbildung 4.9: Optimierungsziel erreicht in acht Iterationen

Das Ergebnis der über die Funktion *creaedc.m* berechnete bzw. berechneten Abklingkurven werden dann in jeder Iteration mit den aus den Messdaten *ydata.m* entnommenen Abklingkurven verglichen (s. Abbildung 4.8). Das Ergebnis der Optimierung über den Befehl *LSQCURVEFIT* stellt diejenigen Absorptionsgrade dar, die in EASE für jedes Raummaterial eingesetzt werden müssen, damit das Modell im optimalen Fall das selbe akustische Abklingverhalten hat, wie das des vergleichbaren gemessenen Raumes.

5 Verifikation und Validierung des inversen Verfahrens

Die vorliegende Arbeit präsentiert als Ergebnis ein Berechnungshilfsprogramm, das auf den Grundlagen der geometrischen Raumakustik und der akustischen Simulation mittels Ray Tracing beruht. Um die Verlässlichkeit des vorliegenden Programms zu testen, wird dieses unter definierten Bedingungen getestet, die aus der Sicht des Verfassers als sinnvoll beurteilt werden.

Die Kostenfunktion der Optimierung setzt sich aus experimentellen und numerischen Daten zusammen, welche aus einer Messung und einer vergleichbar aufgebauten, aber dennoch von der Messung unabhängigen Simulation stammen. Um eine erfolgreiche Ermittlung der zu bestimmenden Absorptionsgrade der Simulation gewährleisten zu können, ist somit vorab sicher zu stellen, dass die Qualität dieser Eingangsdaten das Ermitteln eines plausiblen Ergebnisses überhaupt gewährleistet.

Einleitend zu diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationen mit Ray Tracing in Bezug auf die Bedienung der Simulationsparameter (s. Kap. *Simulationsparameter*) präsentiert. Die Simulationsaufbauten sind hierbei räumlich gleichwertig. Es werden ausschließlich die interessierenden Simulationsparameter variiert.

Untersuchungen unter Berücksichtigung experimenteller Daten werden nicht durchgeführt, da sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit numerischen Simulationsmodellen auseinandersetzt.

Anschließend wird RAPO über die im Kap. *Simulationsmodelle* präsentierten Räume auf die Probe gestellt. Hierfür werden den Raumflächen vordefinierte Absorptionsgrade zugewiesen, welche von RAPO über den Optimierungsalgorithmus nachberechnet werden, wobei zusätzlich mit Hilfe der Kostenfunktion ein Einblick in die möglichen Lösungen des Problems gegeben wird.

Abschließend wird ein möglichst reales Szenario für den Einsatz von RAPO simuliert, wobei hier eine als Ersatz für die Messung simulierte Impulsantwort zum Einsatz kommt.

5.1 Einfluss der Eingangsparameter auf das Ergebnis der Abklingkurve

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wurde festgestellt, dass eine inadäquate Bedienung der im Kap. *Simulationsparameter* vorgestellten Parameter zu erheblichen Unterschieden hinsichtlich der Reproduzierung des Abklingverhaltens eines Raumes führt. Um dies näher zu untersuchen, wurden diverse Simulationen erstellt, deren Werte hinsichtlich der maximalen Verzögerungszeit τ_{max} , der Reflexionsordnung n_{max} , des Energieverlustes e_{min} und der Anzahl der simulierten Strahlen N_Q pro Lautsprecher variiert werden. Der für diese Untersuchung verwendete Raum entspricht dem im Kap. *Simulationsmodelle* vorgestellten Modell „Test_room_3“, dessen Raumflächen einen Absorptionsgrad von 10% für alle Terzen zugewiesen bekommen.

Zudem wird ein weiterer von EASE[®] ermittelter Simulationswert untersucht. Hierbei geht es um den sogenannten *impact-chance*-Wert, welcher in der vorliegenden Arbeit als IMPC abgekürzt wird. Der IMPC-Wert entspricht einer Vorhersage hinsichtlich der Anzahl an erfassten Strahlen, welche ins Verhältnis zu einer vergleichbaren Simulation mittels der Methode der Spiegelschallquellen gesetzt wird. Die AMFG[®] weist darauf hin, dass ein IMPC-Wert von über 80% zu präziseren Ergebnissen führe (AFMG).

Die Abbildung 5.1 zeigt einen drastischen Unterschied der Abklingkurven eines simulierten Raumes hinsichtlich der Simulationsparameter (s. Tabelle 5.1), wobei hier der Parameter bzgl. des Energieverlustes zunächst außen vor gelassen wird. Eine detailliertere Beschreibung der Simulation ist im *Anhang A* zu finden.

Tabelle 5.1: Eingesetzte Parameter bzgl. der in Abbildung 5.1 dargestellten Simulationen

Abklingkurve	Datum der Simulation	Parameter					Erfasste Strahlen
		N_Q	e_{min}	τ_{max}	n_{max}	IMPC	
Sim1.E1	01.09.2015	500.000	-	1,229s	20	50,403%	17.633
Sim2.E1	01.09.2015	50.000	-	1,229s	20	6,772%	8.981
Sim3.E1	01.09.2015	500.000	-	1,229s	50	50,403%	53.383
Sim3.E2	01.09.2015	500.000	-	1,229s	50	50,403%	67.575
Sim4.E1	11.09.2015	500.000	-	1,229s	80	50,403%	68.168
Sim5.E1	16.09.2015	2.000.000	-	1,429s	80	87,441%	72.842
Sim6.E1	14.09.2015	3.000.000	-	1,529s	120	99,753%	48.341

Die Beiträge E1 und E2 beziehen sich auf die im Kap. *Simulationsmodelle* vorgestellten Empfänger. Um ein ortsbezogenes Abklingverhalten im Raum zu vergleichen, wird in der Simulation Sim.3 ein zweiter Empfänger E2 einbezogen.

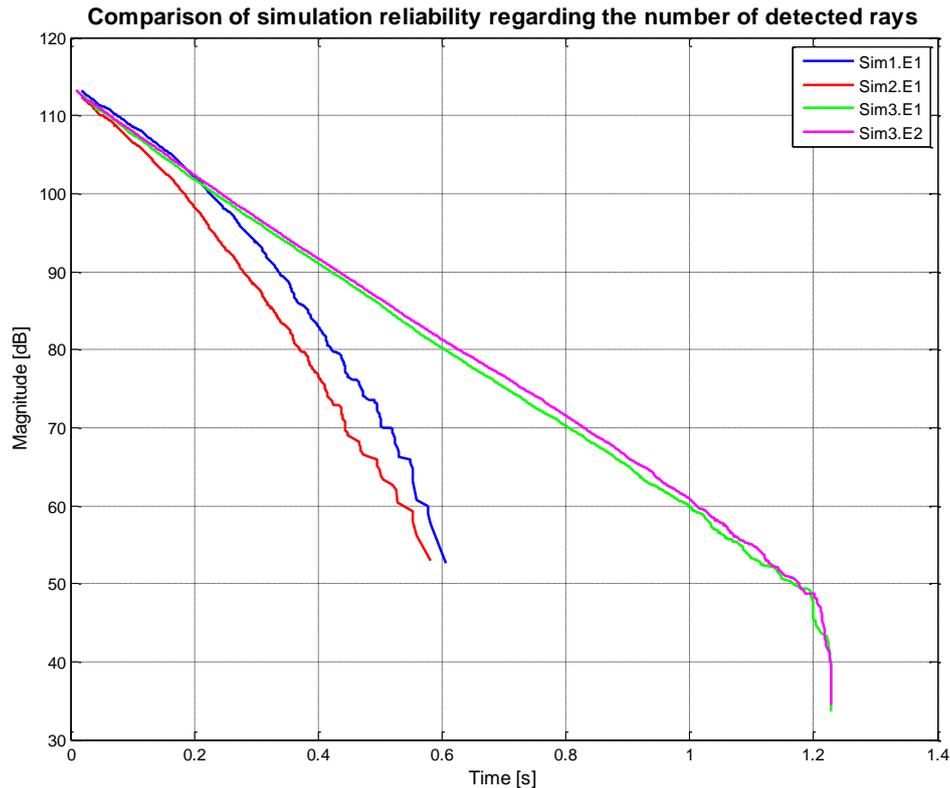


Abbildung 5.1: Einfluss der Simulationsparameter auf das Abklingverhalten des simulierten Raumes (1)

Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen, zeichnen sich Sim1 und Sim2 durch ein sehr starkes Abklingverhalten aus. Eigenartig ist zudem, dass beide Abklingkurven bei einer Zeit von knapp 0,6 Sekunden ein Ende finden, obwohl die Simulationsdauer mit 1,229s eingestellt ist. Zudem kann im Abklingverlauf eine deutliche Krümmung bemerkt werden.

Der Grund des fehlerhaften Abklingverhaltens der Sim1- und Sim2-Kurve ist hauptsächlich die Dichteverteilung der Strahlen im Reflektogramm. In Abbildung 5.2 wird das Reflektogramm dargestellt, welches vom Empfänger E1 über die Simulation Sim1 aufgezeichnet wurde. Wie zu erwarten, nimmt die Strahlendichte anfänglich zu. Allerdings erfährt das Reflektogramm schon nach 0,4s einen deutlichen Abfall der Reflexionsdichte. Dies wird auf Grund der niedrig angesetzten maximalen Reflexionsordnung verursacht. Den Strahlen wird demnach die Möglichkeit verwehrt, sich ausreichend auszubreiten. Somit entsteht ein bemerkbarer Informationsverlust hinsichtlich der Energie im Reflektogramm.

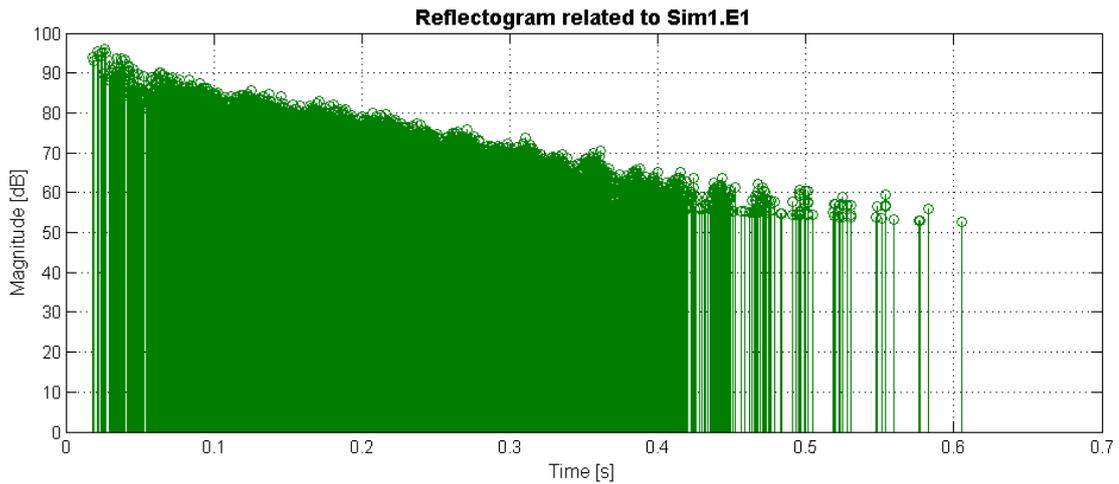


Abbildung 5.2: Darstellung des über Sim1.E1 ermittelten Reflektogramms

Einen Vergleich bietet Abbildung 5.3. Diese stellt das über Sim3.E1 ermittelte Reflektogramm dar. Eine spätere Abnahme der Reflexionsdichte ist hier zu erkennen. Der nahezu lineare Verlauf der Sim3.E1-Abklingkurve weist auf eine konstante Energiedichte im mittleren Bereich des Reflektogramms hin. Zwischen den über Sim.E1 und Sim.E2 berechneten Abklingkurven ist kaum ein Unterschied festzustellen (s. Abbildung 5.3).

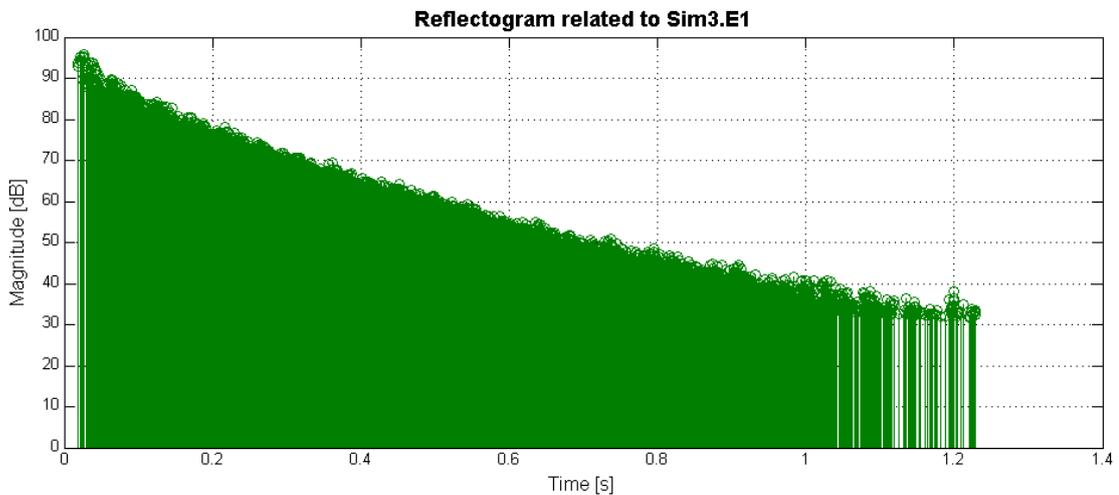


Abbildung 5.3: Darstellung des über Sim3.E1 ermittelten Reflektogramms

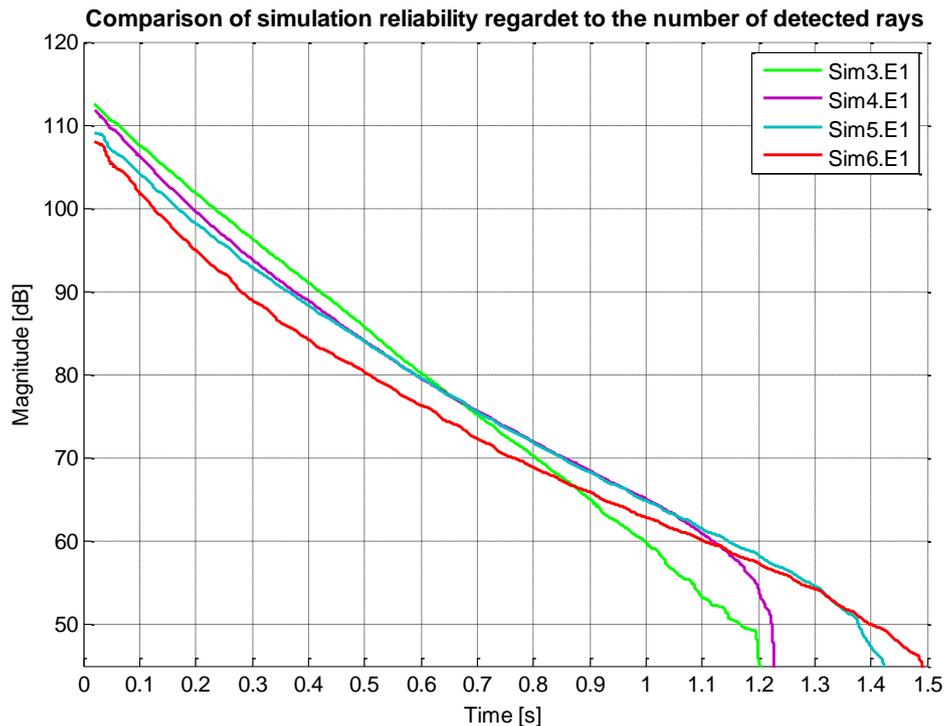


Abbildung 5.4: Einfluss der Simulationsparameter auf das Abklingverhalten des simulierten Raumes (2)

Die Abbildung 5.4 zeigt das Abklingverhalten der über Sim3, Sim4, Sim5 und Sim6 ermittelten Abklingkurve. Hierbei ist weiterhin ein deutlicher Unterschied zwischen den Abklingkurven zu sehen. Besonders interessant ist hier die Krümmung der Abklingkurven aus Sim4 und Sim6, allerdings entgegengesetzt zur vorhanden Krümmung aus Sim1 und Sim2. Darüber hinaus kann angemerkt werden, dass der aus den Abklingkurven ablesbare Pegel des diffusen Schallfeldes im stationären Zustand (Startpunkt der jeweiligen Kurven) zwischen den Simulationen unterschiedlich ist.

Beim Analysieren der Tabelle 5.1 können des Weiteren folgende Fakten bemerken werden, welche aus der Sicht des Verfassers besonders widersprüchlich sind:

1. Die Anzahl an simulierten Strahlen wird bei Sim.5 im Vergleich zu Sim.4 um ein Vierfaches erhöht und wird um 200ms verlängert. Dennoch werden bei Sim.5 lediglich 4.674 Strahlen mehr erfasst, als bei Sim.4.
2. Die Anzahl an simulierten Strahlen wird bei Sim.6 im Vergleich zu Sim.4 um ein Sechsfaches erhöht und die Simulationsdauer um 300ms verlängert. Es wird ein IMPC von 99,7% erzielt. Zusätzlich wird die Reflexionsordnung um 50% erhöht. Dennoch werden weniger Strahlen als bei Sim.5 und Sim.4 erfasst. Die Anzahl an erfassten Strahlen beträgt 48.341.
3. Aus den eben genannten Fakten wäre zu erwarten, dass sich die Anzahl der erfassten Strahlen über die Simulationen Sim4, Sim5 und Sim6 stets erhöht.

4. Im *Anhang A* kann zusätzlich festgestellt werden, dass die für Sim4, Sim5, und Sim6 zugehörigen Dateien jeweils einen Speicherplatz von knapp über $2 \cdot 10^9$ Bytes (ca. 1,86 GB) in Anspruch nehmen. Sie unterscheiden sich lediglich um einige Kilobytes, obwohl deutlich unterschiedliche Simulationsparameter gewählt wurden.

Die oben genannten Fakten lassen vermuten, dass die für die vorliegende Arbeit vorhandenen Ressourcen einer vom Verfasser nicht geklärten Einschränkung unterliegen. Die Simulationen wurden von einem Rechner mit folgenden Eigenschaften durchgeführt:

- Prozessor: Intel® Core™ i3-2100 CPU mit 3.1GHz
- Arbeitsspeicher: 4 GB RAM
- Systemtyp: 64-Bit
- Betriebssystem: Windows 7 Enterprise

wobei dieser mit Einstellungen vom Hause der Airbus Operation GmbH ausgestattet ist.

Eine Einschränkung bezüglich der von der EASE® erstellbaren Dateigrößen würde alle obengenannten Fakten 1-4 erklären. Die Erhöhung der maximalen Verzögerungszeit und der Reflexionsordnung als Parameter der Simulation führt dazu, dass vor allem Strahlen höherer Reflexionsordnung einen erhöhten Speicheranspruch haben. Sollte es zu einer Einschränkung kommen, könnte es dazu führen, dass für einen Strahl hoher Reflexionsordnung die Information von mehreren Strahlen geringerer Reflexionsordnung verloren gehen bzw. nicht in der Datei gespeichert werden. Somit sinkt die Anzahl an speicherbaren Strahlen drastisch. Es sind jedoch die Strahlen geringerer Reflexionsordnung, welche den wichtigen Anteil der Energie für die Reproduzierung der Abklingkurve transportieren. Der Unterschied zwischen den ablesbaren Pegeln des diffusen Schallfeldes im stationären Zustand (Anfang der jeweiligen Abklingkurven) ließe sich dementsprechend auf Grund des energetischen Informationsverlustes, welches von der Einschränkung hervorgerufen wird, erklären.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit bereitgestellten Ressourcen reichen vermutlich für Sim4, Sim5 und Sim6 nicht aus. Die AMFG® weist darauf hin, dass der Verlauf einer simulierten Abklingkurve ab einem gewissen Simulationsaufwand keine Änderungen mehr erfährt. Dies konnte allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht erzielt werden.

Vom Verfasser kann somit nur nahegelegt werden, dass die gewählte maximale Verzögerungszeit der Simulation weit über die vorhersehbare Sabin'sche Nachhallzeit gewählt wird. Bei einer Nachhallzeit von 0,7 Sekunden wird eine Simulationsdauer von mindestens zwei Sekunden empfohlen. Bezüglich der zu wählenden Simulationsparameter hinsichtlich der Reflexionsordnung und des Energieverlustes muss ein

Kompromiss zur Verzögerungszeit und Raumabsorption gefunden werden. Zu hohe Werte für e_{min} und n_{max} erhöhen den Aufwand der Simulation erheblich und stehen in keinem Verhältnis zur Qualität der Resultate. Bei zu geringeren Werten leidet die Qualität.

5.2 Testfälle

Dieses Kapitel dient zur Untersuchung der Güte der Optimierung. Dies erfolgt über die Analyse der möglichen Lösungen des Problems anhand des Verlaufes der Kostenfunktion.

Das für diese Untersuchung beanspruchte Modell entspricht dem im Kap. *Simulationsmodelle* vorgestellten Modell „Test_room_3“. Die dazu gehörigen Flächeneigenschaften (s. Tabelle 4.2) sowie flächenbezogenen Absorptionsgrade (s. Tabelle 4.3) variieren zwischen den Testfällen. Somit wird eine Veränderung hinsichtlich der Anzahl an berücksichtigten Absorptionsgraden, sowie hinsichtlich der auf diese zugewiesenen Flächengröße im Raum erzielt.

Es ist allerdings wichtig zu erwähnen, dass die Abklingkurven, welche für die Kostenfunktionen der jeweiligen Testfälle berücksichtigt werden, stets aus derselben Simulation stammen. Es wird somit eine nachberechnete Abklingkurve (s. Kap. *Nachberechnung der Simulation in MATLAB*) bezüglich einer aus derselben Simulationsdatei abgelesenen Abklingkurve optimiert. Ein beinahe perfektes Optimum, dessen Residuum zu Null geht, ist somit vorhergesagt. Die Wahrscheinlichkeit dass ein solches Szenarium bei der Berücksichtigung realer Messungen vorkommt, ist sehr viel geringer.

Abschließend zu diesem Kapitel werden die vom Verfasser erzielten Erkenntnisse zusammengefasst.

5.2.1 Testfall I: Uniforme Raumabsorption

Im Testfall I wird das Verhalten der Kostenfunktion über einen für alle Raumflächen gleichwertigen und über das Frequenzspektrum gemittelten Absorptionsgrad von 10% erprobt. Die für diese Untersuchung verwendete Simulation entspricht der Datei:

„Test_room_3_Test_NumOfRays_500K_2.mpc“ (s. *Anhang A*).

Als Neuabtastung der Reflektogramme wird 1kHz gewählt, wobei der erste Strahl zum Zeitpunkt $t_0 = 0,0184\text{s}$ erfasst wird. Bei einer Simulationsdauer von 1,229 Sekunden liegen für die Kostenfunktion zwei Abklingkurven als Zeilenmatrix mit jeweils $K = 1210$ diskreten Werten für den energetischen Zerfall vor.

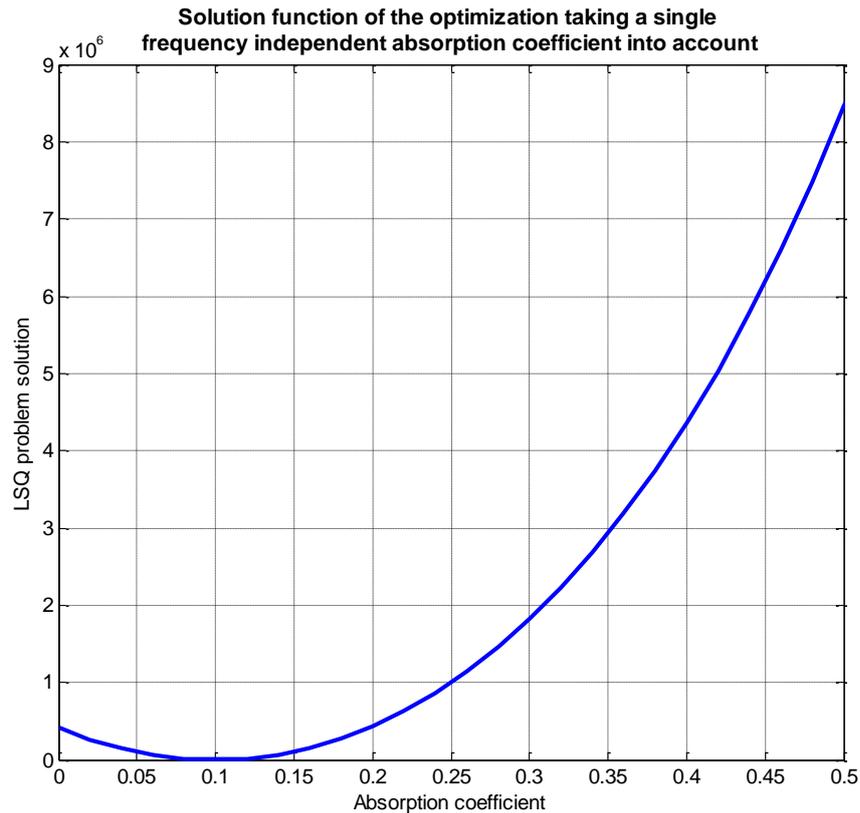


Abbildung 5.5: Plot der Kostenfunktion einer uniformen mittleren Raumabsorption (Testfall I)

Der Verlauf der Kostenfunktion wird in Abhängigkeit vom Absorptionsgrad in Abbildung 5.5 graphisch dargestellt. Hierbei ist ein globales Minimum der Kostenfunktion bei $\alpha = 0,1$ deutlich zu sehen.

Als Ergebnis schlägt die Optimierung einen Absorptionsgrad von

$$\alpha_{opt} = 0,1005$$

vor. Zu erwarten ist $\alpha_{exp} = 0,1$. Das Residuum^[1] der Optimierung bei α_{opt} beträgt

$$\mu = 0,0076.$$

Die mittlere Abweichung der Abklingkurven wird aus der Summe der Abweichung einzelner Zeitschritte n gemäß Gleichung 5.1 ermittelt.

$$\Delta\bar{L} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |L_{read,n}(\alpha_{exp}) - L_{sim,n}(\alpha_{opt})| \quad 5.1$$

^[1] Das Residuum beschreibt den zurückgebliebenen Wert der Kostenfunktion nach dem Abschließen des Optimierungsvorganges.

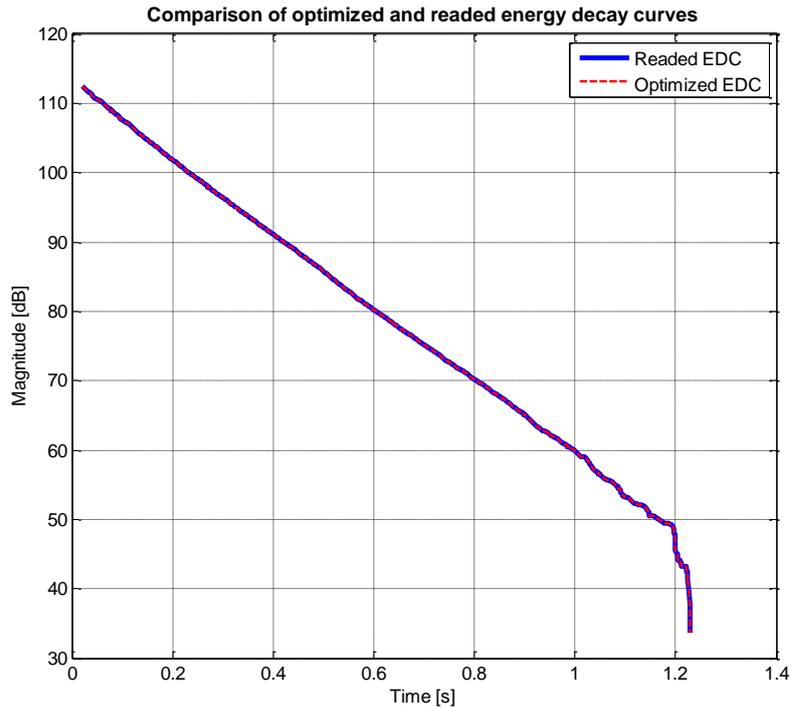


Abbildung 5.6: Vergleich zwischen optimierter und abgelesener Abklingkurve (Testfall I)

worin L_{read} die abgelesene und L_{sim} die optimierte Abklingkurve darstellt. In diesem Testfall beträgt die mittlere Abweichung beider Kurven:

$$\Delta \bar{L} = 0,0014\text{dB.}$$

Die nahezu perfekte Übereinstimmung der Abklingkurven wird über Abbildung 5.6 graphisch bestätigt.

5.2.2 Testfall II: Biforme Raumabsorption

Im Testfall II wird das Ergebnis der Kostenfunktion hinsichtlich zweier frequenzunabhängiger gemittelter Absorptionsgrade von $\alpha_1 = 0,1$ und $\alpha_2 = 0,4$ erprobt. Die für diese Untersuchung verwendete Simulation entspricht der Datei mit dem Namen:

„Test_room_3_2absorbers.mpc“ (s. [Anhang A](#))

Das für diese Untersuchung beanspruchte Modell entspricht dem im Kap. [Simulationsmodelle](#) vorgestellten Modell „Test_room_3“. Die dazu gehörigen Flächeneigenschaften (s. Tabelle 4.2) sowie die flächenbezogenen Absorptionsgrade (s. Tabelle 4.3) variieren zwischen den numerischen Versuchen. Somit wird eine Veränderung hinsichtlich der Anzahl an berücksichtigten Absorptionsgraden sowie hinsichtlich der zugewiesenen Flächengröße im Raum erzielt.

Als **Testfall II-1** dieser Untersuchung wird der Decke des Quaderraumes der Absorptionsgrad α_2 zugewiesen. Den restlichen vier Wänden und dem Boden werden α_1 zugewiesen. Folgend werden wichtige flächenbezogene Informationen aufgelistet, welche für den vorliegenden Versuch von Interesse sein könnten:

Gesamte Raumfläche	$A_{ges} = 304\text{m}^2$
Gesamte äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,ges} = 54,4\text{m}^2$
α_1 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha_1} = 224\text{m}^2$
- resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha_1} = 22,4\text{m}^2$
- Anteil bezogen auf A_{ges}	74%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	41%
α_2 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha_2} = 80\text{m}^2$
- resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha_2} = 32\text{m}^2$
- Anteil bezogen A_{ges}	26%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	59%
Mittlerer Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$	0,18

Als Neuabtastung der Reflektogramme wird hierbei ebenfalls 1kHz gewählt, wobei der erste Strahl zum Zeitpunkt $t_0 = 0,0184\text{s}$ erfasst wird. Bei einer Simulationsdauer von 1,529 Sekunden liegen für die Kostenfunktion zwei Abklingkurven als Zeilenmatrix mit jeweils $K = 1510$ diskreten Werten für den energetischen Zerfall vor.

Der Verlauf der Kostenfunktion über die Absorptionsgrade wird in Abbildung 5.7 graphisch dargestellt. Hierbei ist es interessant zu sehen, dass das Ergebnis der Kostenfunktion überwiegend von α_1 beeinflusst wird. Der Verlauf der Kostenfunktion über α_2 erweckt auf den ersten Blick den Eindruck, nahezu konstant zu sein. Weiterhin ist die flache Steigung der Kostenfunktion im Bereich $0 < \alpha_1 < 0,3$ zu beobachten. Dies könnte ein Problem für die Optimierung darstellen, da das Optimum über die Steigung der Kostenfunktion ermittelt wird (s. Gleichung 4.9). Ein definiertes klares Optimum ist in Abbildung 5.7 nicht zu erkennen.

Die möglichen Lösungen machen sich erst bei der Darstellung der Kostenfunktion in einer logarithmischen Skala bemerkbar (s. Abbildung 5.8). Hierbei ist ein klares Optimum in der Koordinate $\alpha_1 = 0,1$ und $\alpha_2 = 0,4$ zu sehen. Es sind jedoch drei weitere Stellen zu finden, an denen die Steigung der Kostenfunktion gegen Null läuft. Diese werden als lokale Optima bezeichnet und könnten von der Optimierung ebenfalls als Ergebnis vorgeschlagen werden.

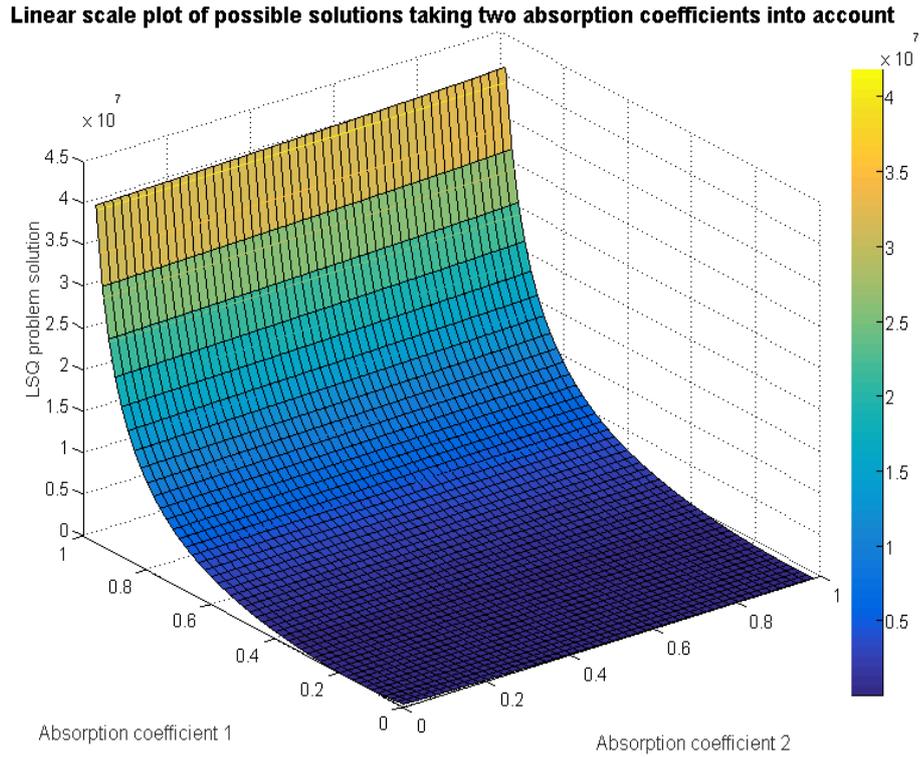


Abbildung 5.7: Mögliche Ergebnisse der Kostenfunktion einer biformen Raumabsorption mit $A_{\alpha_1} \gg A_{\alpha_2}$ in linearer Darstellung (Testfall II-1)

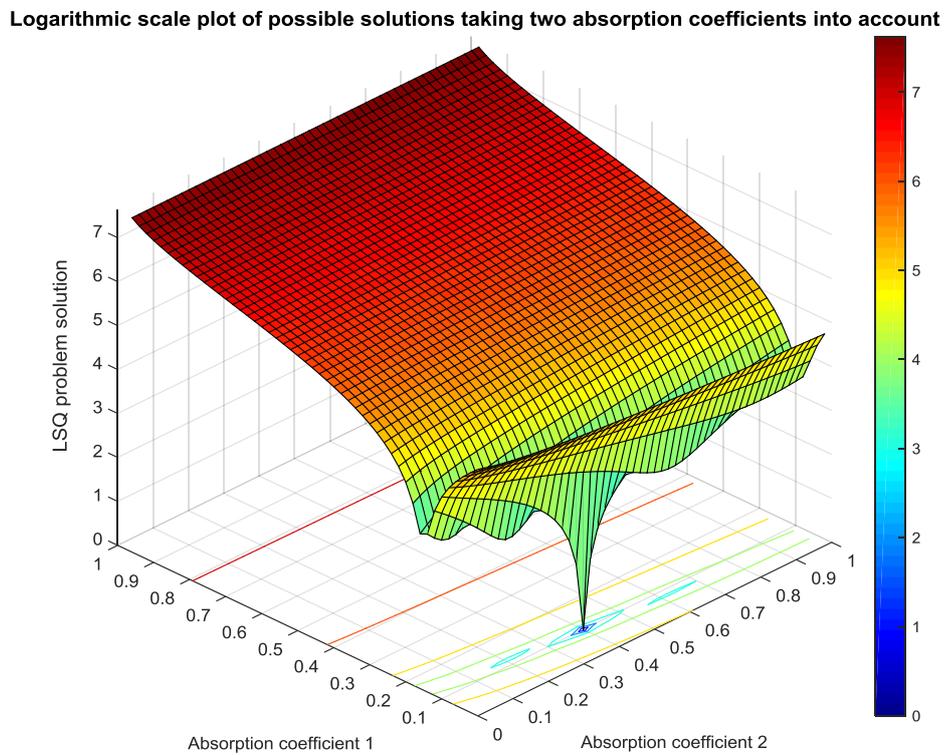


Abbildung 5.8: Mögliche Ergebnisse der Kostenfunktion einer biformen Raumabsorption mit $A_{\alpha_1} \gg A_{\alpha_2}$ in logarithmischer Darstellung (Testfall II-1)

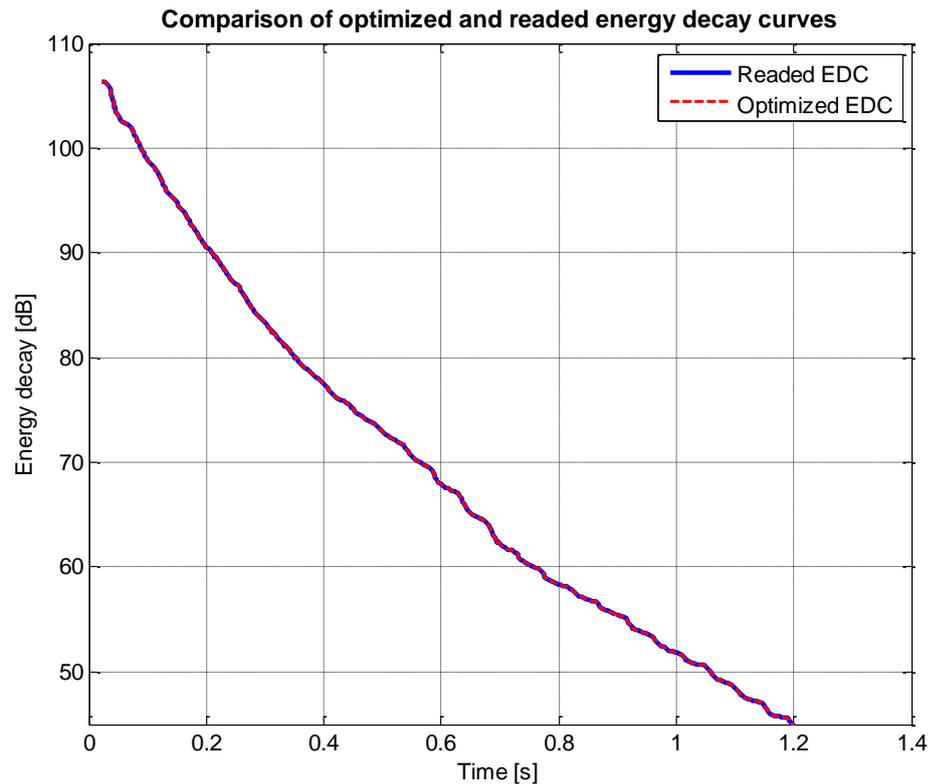


Abbildung 5.9: Vergleich zwischen optimierter und abgelesener Abklingkurve (Testfall II-1)

Als Ergebnis schlägt die Optimierung die zu erwartenden Absorptionsgrade

$$\alpha_{opt,1} = 0,1 \text{ und } \alpha_{opt,2} = 0,4$$

vor. Das Residuum des globalen Optimums beträgt

$$\mu = 1,3 \cdot 10^{-8}$$

und die mittlere Abweichung aller diskreten Werte der Abklingkurven (s. Gleichung 5.1)

$$\Delta \bar{L} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ dB.}$$

Die nahezu perfekte Übereinstimmung der Abklingkurven wird über Abbildung 5.9 graphisch bestätigt.

Für einen weiteren Vergleich der Versuche im Rahmen dieses Testfalls wird die auf Basis eines energetischen Abfalls von 30dB extrapolierte Nachhallzeit nach (ISO:3382, 2009) berechnet. Diese beträgt für diesen Versuch

$$T_{30} = 0,76s,$$

wobei hier erneut auf die Größe der Simulationsdatei geachtet werden muss (s. *Anhang A*). Diese beansprucht ca. 1,87GB Speicherplatz und könnte somit ebenfalls von der im Kap. *Einfluss der Eingangsparameter auf das Ergebnis der Abklingkurve* erwähnten Vermutung bezüglich des Informationsverlustes betroffen sein und somit von der Realität abweichen. Dies gilt dann für alle weiteren Versuchen des Testfalls II.

Als **Testfall II-2** wird im Unterschied zum Testfall II-1 der Decke des Quaderraumes den Absorptionsgrad α_1 zugewiesen. Den restlichen vier Wänden und dem Boden wird α_2 zugewiesen. Die Eigenschaft des Raumes in Bezug auf die Fläche ändert sich folglich zu:

Gesamte Raumfläche	$A_{ges} = 304\text{m}^2$
Gesamte äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,ges} = 97,6\text{m}^2$
α_1 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha_1} = 80\text{m}^2$
- Resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha_1} = 8\text{m}^2$
- Anteil bezogen auf A_{ges}	26%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	8,2%
α_2 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha_2} = 224\text{m}^2$
- Resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha_2} = 89,6\text{m}^2$
- Anteil bezogen A_{ges}	74%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	91,8%
Mittlerer Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$	0,32

Alle weiteren Einstellungen bezüglich der Simulation und der darauf folgenden Nachberechnung in MATLAB[®] bleiben unverändert.

Die Abbildung 5.10 zeigt die Darstellung der Kostenfunktion in einer logarithmischen Skala in Abhängigkeit der Absorptionsgrade. Hierbei ist wie erwartet zu bemerken, dass das Ergebnis der Kostenfunktion hauptsächlich von α_2 beeinflusst wird. Die Variation von α_1 verursacht lediglich die in der Darstellung zu sehenden lokalen Optima. Das globale Optimum ist wie zu erwarten bei $\alpha_1 = 0,1$ und $\alpha_2 = 0,4$ zu finden.

Als Ergebnis schlägt die Optimierung die Absorptionsgrade $\alpha_{opt,1} = 0,1031$ und $\alpha_{opt,2} = 0,3999$ vor, wobei hier als Ausgangswert der Optimierung die Absorptionsgrade $\alpha_{0,1} = 0,7$ und $\alpha_{0,2} = 0,3$ gewählt sind. Der Grund für die Abweichung

Logarithmic scale plot of possible solutions taking two absorption coefficients into account

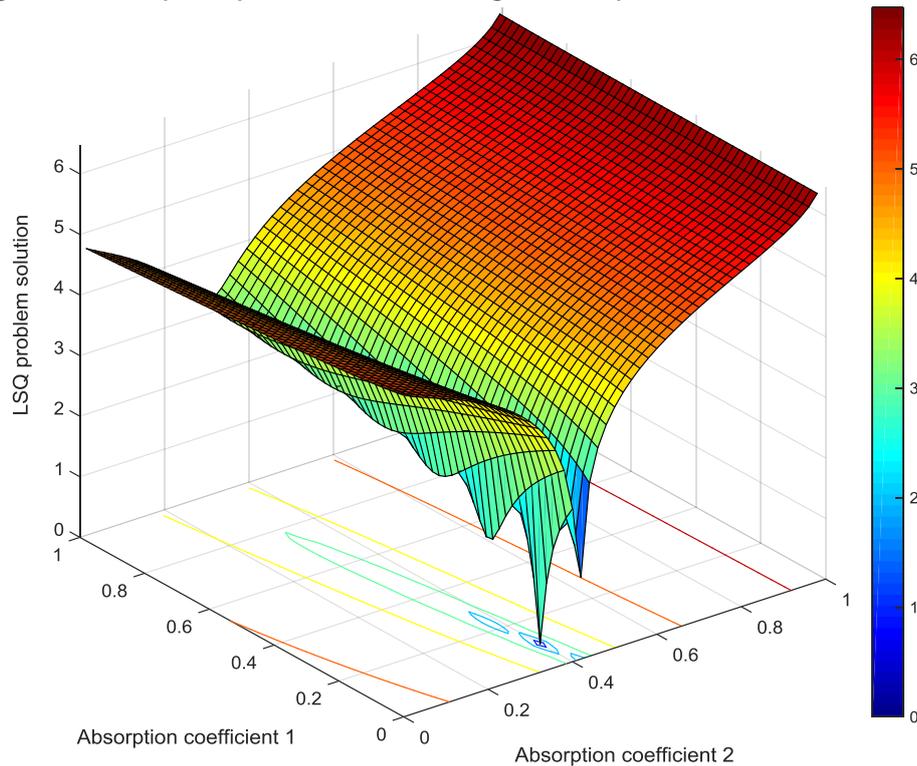


Abbildung 5.10: Mögliche Ergebnisse der Kostenfunktion einer biformen Raumabsorption mit $A_{\alpha_2} \gg A_{\alpha_1}$ in logarithmischer Darstellung (Testfall II-2)

der von der Optimierung vorgeschlagenen Absorptionsgrade in Bezug auf die zu erwartenden Werte ist auf die extrem flache Steigung der Kostenfunktion im Bereich des globalen Optimums zurückzuführen.

Beim Einleiten eines erneuten Optimierungsvorganges mit den Ausgangswerten $\alpha_{0,1} = 0,5$ und $\alpha_{0,2} = 0,5$ schlägt die Optimierung die zu erwartenden Absorptionseigenschaften

$$\alpha_{opt,1} = 0,1 \text{ und } \alpha_{opt,2} = 0,4$$

vor. Das Residuum des globalen Optimums beträgt hierbei

$$\mu = 5 \cdot 10^{-6}$$

und die mittlere Abweichung aller diskreten Werte der Abklingkurven (s. Gleichung 5.1)

$$\Delta \bar{L} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ dB.}$$

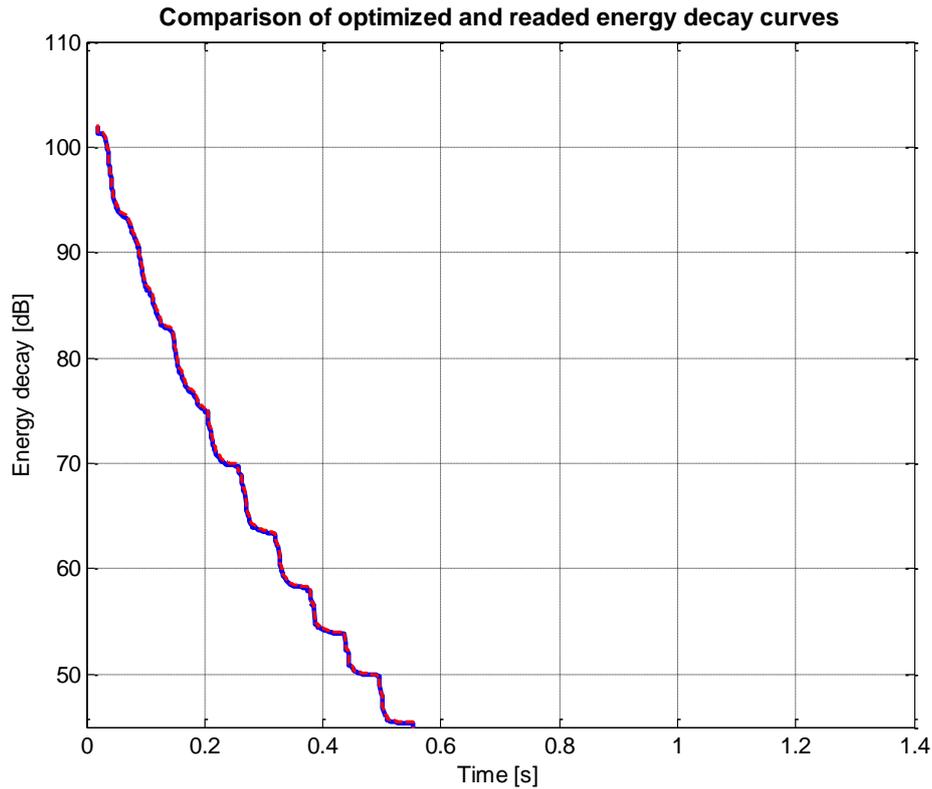


Abbildung 5.11: Vergleich zwischen optimierter und abgelesener Abklingkurve (Testfall II-2)

Die nahezu perfekte Übereinstimmung der Abklingkurven wird über Abbildung 5.11 graphisch bestätigt. Es ist hierbei zu bemerken, wie sich die Steigung der Kurve im Vergleich zum ersten Versuch auf Grund der höheren Absorption drastisch verändert. Die auf Basis eines energetischen Abfalls von 30dB extrapolierte Nachhallzeit beträgt in diesem Versuch

$$T_{30} = 0,4s.$$

Als **Testfall II-3** dieser Untersuchung werden die Absorptionsgrade α_1 und α_2 gleichmäßig im Raum verteilt. Die Eigenschaft des Raumes hinsichtlich der Flächen ändert sich wie folgt:

Gesamte Raumfläche	$A_{ges} = 304\text{m}^2$
Gesamte äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,ges} = 76\text{m}^2$
α_1 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha_1} = 152\text{m}^2$
- resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha_1} = 15,2\text{m}^2$
- Anteil bezogen auf A_{ges}	50%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	20%
α_2 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha_2} = 152\text{m}^2$
- resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha_2} = 60,8\text{m}^2$
- Anteil bezogen auf A_{ges}	50%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	80%
Mittlerer Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$	0,25

Alle weiteren Einstellungen bezüglich der Simulation und der darauf folgenden Nachberechnung in MATLAB[®] bleiben unverändert.

Der Verlauf der Kostenfunktion über die Absorptionsgrade wird in Abbildung 5.12 in einer linearen Skala graphisch dargestellt. Man bemerke hierbei den nahezu symmetrischen Aufbau der Kostenfunktion über die Achsendiagonale und somit den fast gleichmäßigen Einfluss beider Absorptionsgrade auf das Ergebnis der Kostenfunktion. Weiterhin ist erneut eine besonders flache Steigung der Kostenfunktion hauptsächlich im Wertebereich von $0,3 < \alpha_1 < 0,6$ und $0,3 < \alpha_2 < 0,6$ zu beobachten.

Die Abbildung 5.13 zeigt die Kostenfunktion über eine logarithmische Skala der Base 10. Das globale Minimum ist hierbei klar bei $\alpha_1 = 0,1$ und $\alpha_2 = 0,4$ wiederzufinden. Allerdings ist die Anzahl an lokalen Optima deutlich gestiegen. Die Kostenfunktion wurde über eine Schrittweite von $\Delta\alpha = 0.02$ für α_1 und α_2 berechnet. Bei einer höheren Auflösung können weitere lokale Optima vorkommen.

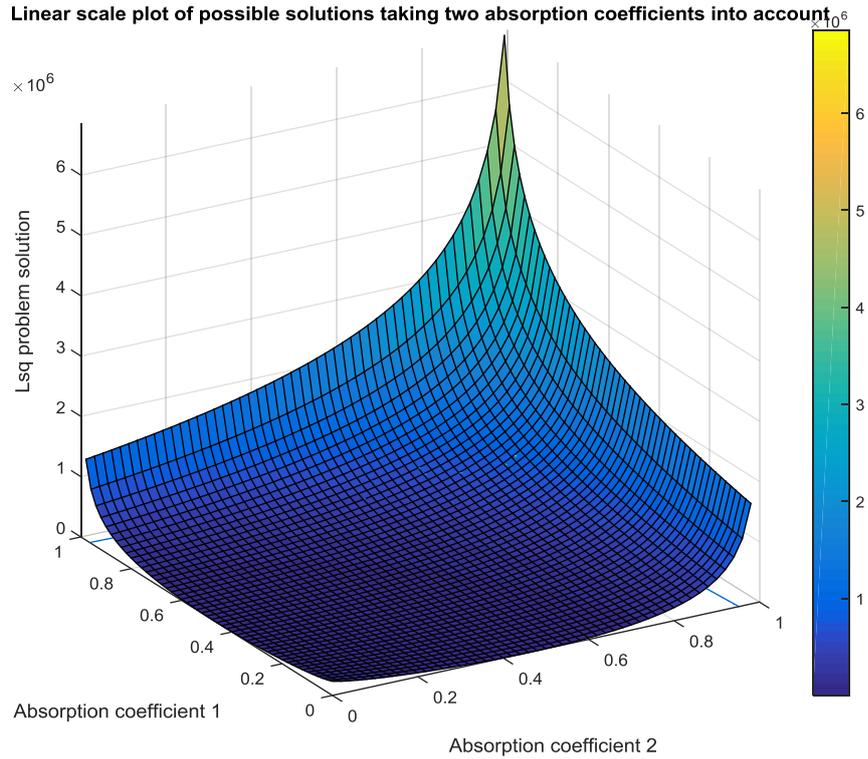


Abbildung 5.12: Mögliche Ergebnisse der Kostenfunktion einer biformen Raumabsorption mit $A_{\alpha_1} = A_{\alpha_2}$ in linearer Darstellung (Testfall II-3)

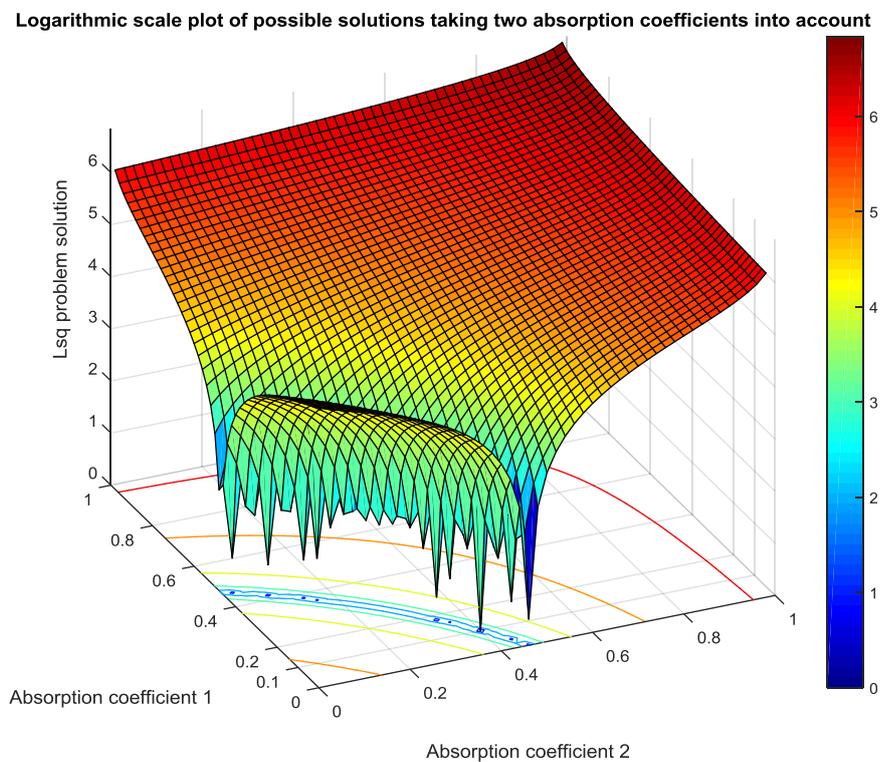


Abbildung 5.13: Mögliche Ergebnisse der Kostenfunktion einer biformen Raumabsorption mit $A_{\alpha_1} = A_{\alpha_2}$ in logarithmischer Darstellung (Testfall II-3)

Die Anzahl der vorkommenden lokalen Optima machen sich in diesem Versuch bemerkbar. Als Beispiel werden vier Optimierungen durchgeführt, wobei die Ausgangswerte der Optimierung hinsichtlich der Absorptionsgrade $\alpha_{0,1}$ und $\alpha_{0,2}$ variiert werden. Die Lösungen der Optimierungen sind in Tabelle 5.2 aufgelistet

Tabelle 5.2: Lösungen der beispielbezogenen Optimierungen (Testfall II-3)

		Optim.: a	Optim.: b	Optim.: c	Optim.: d
Ausgangswerte	$\alpha_{0,1}$	0,5	0,7	0,2	0,14
	$\alpha_{0,2}$	0,5	0,4	0,1	0,44
Lösungen	$\alpha_{opt,1}$	0,25	0,31	0,30	0,12
	$\alpha_{opt,2}$	0,27	0,21	0,22	0,38
Daraus resultierender					
Mittlerer Absorptionsgrad	$\bar{\alpha}$	0,26	0,25	0,24	0,25
Residuum	μ	44,78	80,5	72,47	1,456
Mittlere Abweichung (s. Gleichung 5.1)	$\Delta\bar{L}$	0,14dB	0,18dB	0,17dB	0,027dB

Interessanterweise lässt sich aus Tabelle 5.2 feststellen, dass jede einzelne Optimierung zu einer neuen Lösung führt. Allerdings weicht der im Raum resultierende mittlere Absorptionsgrad kaum ab. Verglichen mit Abbildung 5.13 entspricht dies dem blaufarbig limitierten Bereich.

Die erwartete Lösung wird erst anhand der vorgelegten Optimierung „d“ erzielt, wobei hier Ausgangswerte gewählt sind, welche der zu erwartenden Lösung ähneln. Die Abweichung zwischen beiden Lösungen könnte auf folgende Gründe zurückzuführen sein:

1. Es liegt in diesem Bereich der Kostenfunktion eine nahezu flache Steigung vor, sodass der Optimierungsvorgang vorzeitig abgebrochen wird, oder
2. es liegt ein weiteres lokales Optimum in unmittelbarer Nähe des globalen Optimums vor, welches auf Grund der Auflösung in Abbildung 5.13 nicht zu erkennen ist.

Eine nähere Auflösung der Kostenfunktion bestätigte die zweite Vermutung. MATLAB® verwies allerdings darauf hin, dass die Optimierung auf Grund der ersten abgebrochen war.

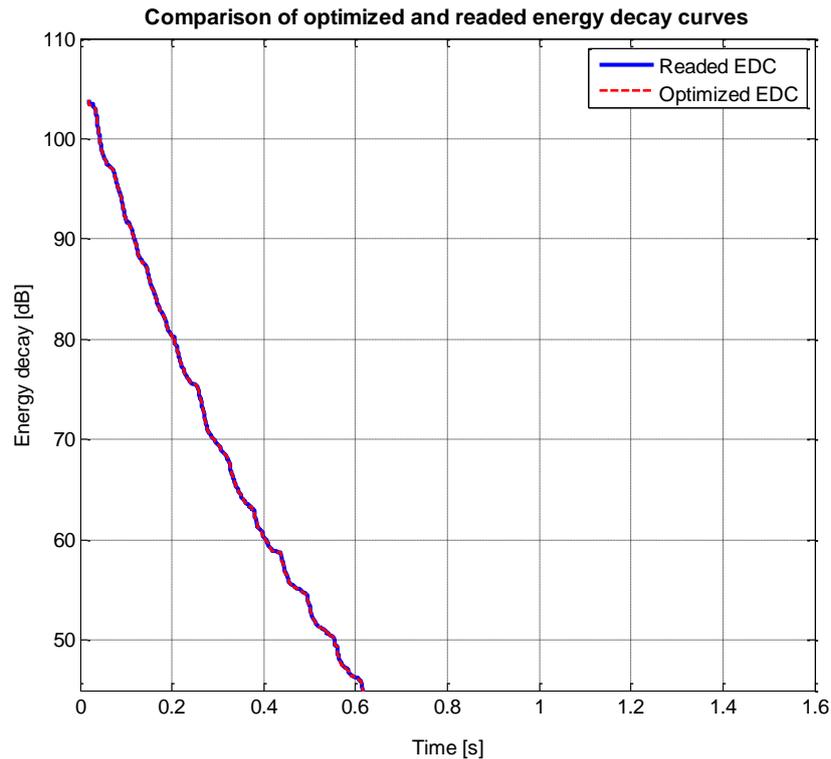


Abbildung 5.14: Vergleich zwischen optimierter und abgelesener Abklingkurve (Testfall II-3-b)

Die in diesem Versuch „ungenaueste“ Lösung entspricht der in der Tabelle 5.2 vorgelegten Optimierung b, deren mittlere Abweichung zwischen optimierten und abgelesenen Abklingkurven 0,18dB beträgt. Der visuelle Vergleich beider Kurven wird über Abbildung 5.14 bereitgestellt. Die auf Basis eines energetischen Abfalls von 30dB extrapolierte Nachhallzeit beträgt in diesem Versuch

$$T_{30} = 0.48s$$

Abschließend zu diesem Testfall wird **Testfall II-4** gestartet, wobei die zugewiesenen Flächengrößen der Absorptionsgrade erneut verändert werden. Der Decke und dem Boden wird der Absorptionsgrad $\alpha_2 = 0,4$ und den vier Wände der Absorptionsgrad $\alpha_1 = 0,1$ zugewiesen (s. Abbildung 4.2). Somit besitzen 53% des Raumes einen Absorptionsgrad von 0,1 und 47% des Raumes einen Absorptionsgrad von 0,4.

Gesamte Raumfläche	$A_{ges} = 304\text{m}^2$
Gesamte äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,ges} = 73,6\text{m}^2$
α_1 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha 1} = 160\text{m}^2$
- Resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha 1} = 16\text{m}^2$
- Anteil bezogen auf A_{ges}	53%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	22%
α_2 zugewiesene Raumfläche	$A_{\alpha 2} = 144\text{m}^2$
- Resultierende äquivalente Absorptionsfläche	$A_{eq,\alpha 2} = 57,6\text{m}^2$
- Anteil bezogen A_{ges}	47%
- Anteil bezogen auf $A_{eq,ges}$	78%
Mittlerer Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$	0.24

Alle weiteren Einstellungen bezüglich der Simulation und der darauf folgenden Nachberechnung in MATLAB[®] bleiben unverändert.

Die Abbildung 5.15 zeigt die Kostenfunktion anhand einer logarithmischen Skala der Base 10. Das globale Minimum ist hierbei erneut bei $\alpha_1 = 0,1$ und $\alpha_2 = 0,4$ wiederzufinden. Eine leichte Symmetrie der Kostenfunktion sowie klare lokale Minima sind ebenfalls zu sehen, deren Residuen allerdings verglichen mit dem vorherigen Versuch, deutlich größer sind. Die Kostenfunktion wird über eine Schrittweite von $\Delta\alpha = 0.02$ für α_1 und α_2 berechnet.

Im Versuch 4 wurden drei Optimierungsvorgänge durchgeführt, deren Ausgangswerte hinsichtlich der Absorptionsgrade $\alpha_{0,1}$ und $\alpha_{0,2}$ erneut variieren. Die Ergebnisse der jeweiligen Optimierungen sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Die Startwerte und die Lösung sind in Abbildung 5.15 graphisch dargestellt.

Logarithmic scale plot of possible solutions taking two absorption coefficients into account

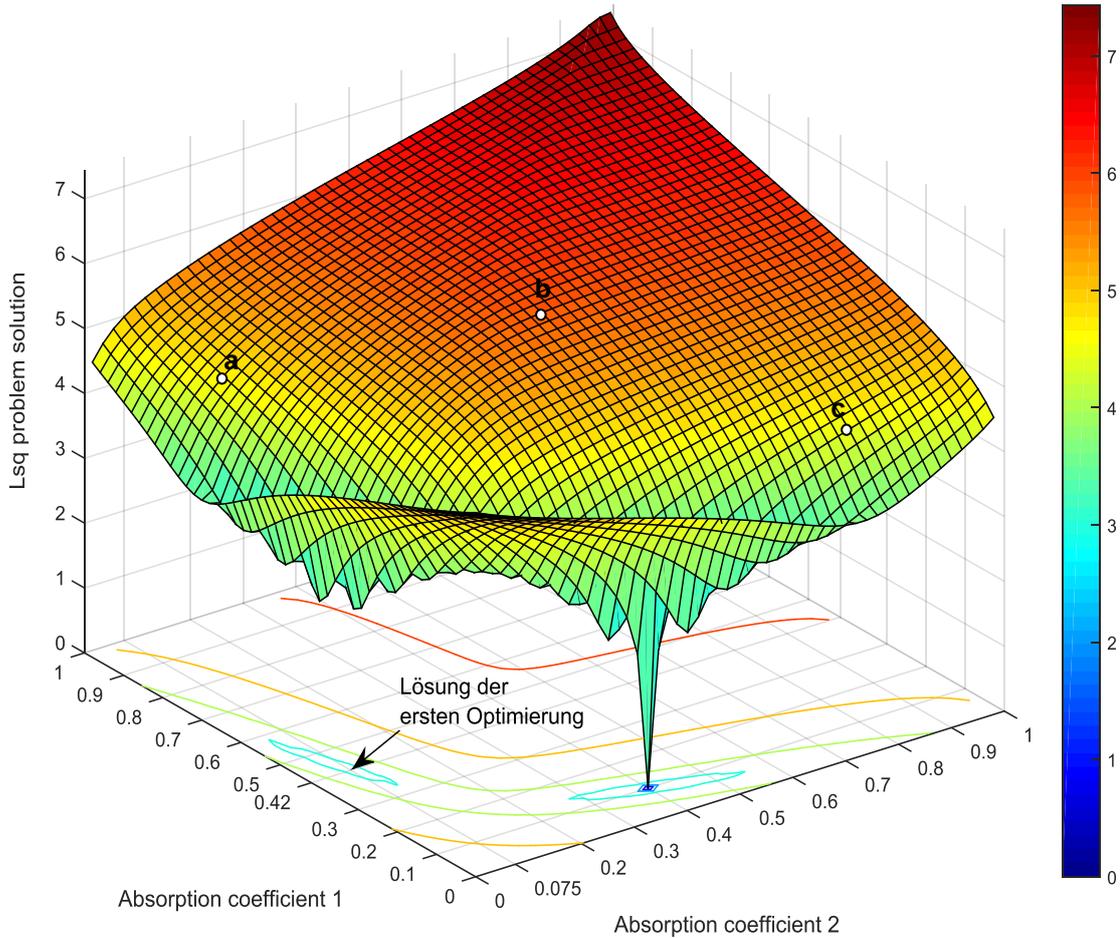


Abbildung 5.15: Mögliche Ergebnisse der Kostenfunktion einer bifurmierten Raumabsorption mit $A_{\alpha_1} \neq A_{\alpha_2}$ in logarithmischer Darstellung (Testfall II-4)

Tabelle 5.3: Lösungen der Optimierungen (Testfall II-4)

		Optim.: a	Optim.: b	Optim.: c
Ausgangswerte	$\alpha_{0,1}$	0,8	0,5	0,1
	$\alpha_{0,2}$	0,1	0,5	0,8
Lösungen	$\alpha_{opt,1}$	0,422	0,1	0,1
	$\alpha_{opt,2}$	0,075	0,4	0,4
Daraus resultierender	$\bar{\alpha}$	0,26	0,24	0,24
Mittlerer Absorptionsgrad				
Residuum	μ	9738	$1,8 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-6}$
Mittlere Abweichung (s. Gleichung 5.1)	$\Delta \bar{L}$	1,8dB	$6,7 \times 10^{-6}$ dB	$3,7 \times 10^{-6}$ dB

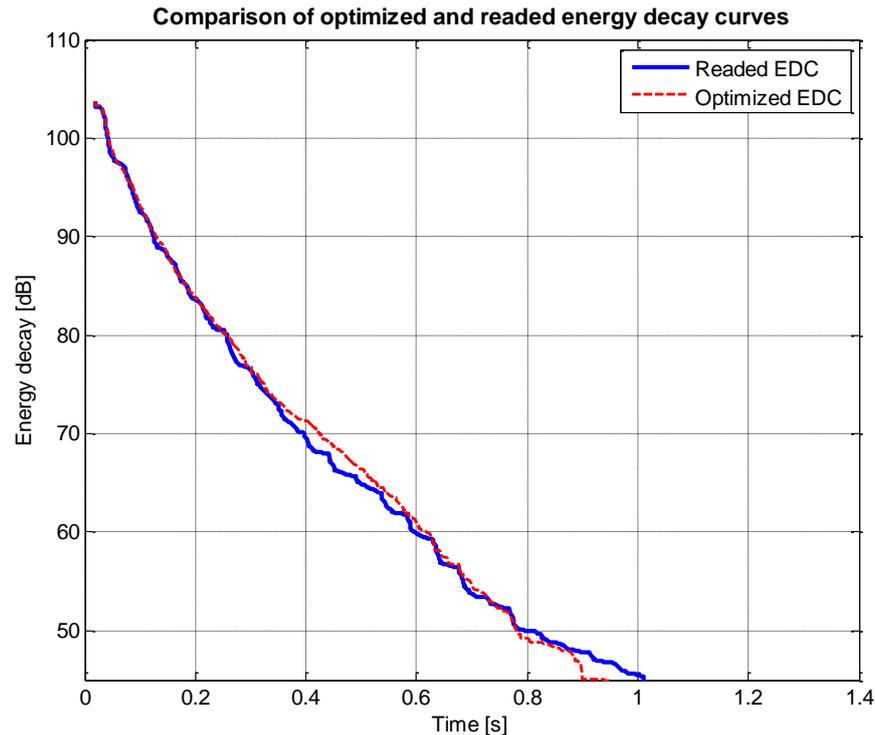


Abbildung 5.16: Vergleich zwischen optimierter und abgelesener Abklingkurve (Testfall II-4-a) mit $\alpha_1 = 0,422$ und $\alpha_2 = 0,075$

Interessanter Weise lässt sich aus Tabelle 5.3 feststellen, dass die Lösung der Optimierung „a“ erwartungsähnliche Werte vorschlägt, allerdings in umgekehrter Reihenfolge. Die aus den jeweiligen Lösungen ermittelten mittleren Absorptionsgrade ähneln sich, wie im vorherigen Versuch, auch.

Die in diesem Versuch „ungenaueste“ Lösung entspricht der in der Tabelle 5.3 vorgelegten Optimierung „a“, deren mittlere Abweichung zwischen optimierten und abgelesenen Abklingkurven 1,8dB beträgt. Der visuelle Vergleich beider Kurven wird über Abbildung 5.16 bereitgestellt.

Die auf Basis eines energetischen Abfalls von 30dB extrapolierte Nachhallzeit beträgt in diesem Versuch:

$$T_{30} = 0.67s$$

Die über der Optimierung „a“ ermittelte Nachhallzeit beträgt:

$$T_{30,a} = 0.65s$$

5.2.3 Testfall III: Extrema

Anhand des Testfalls III werden extreme Raumbedingungen hinsichtlich der Absorption simuliert.

Im **Testfall III-1** wird die Optimierung an einem vollabsorbierenden Raum erprobt, dessen Raumflächen ein frequenzunabhängiger Absorptionsgrad von $\alpha = 0,99$ zugewiesen wird. Die Abklingkurven der Kostenfunktion werden über die Frequenzen gemittelt betrachtet. Die für diese Untersuchung verwendete Simulation entspricht der Datei mit dem Namen:

„Test_room_3_Extremas_[500000N,1529s,1000n,35IMPC].mpc“ (s. [Anhang A](#))

Die darin gespeicherte Simulation wird mit folgenden Einstellungen bzw. Parametern durchgeführt:

- Raum:	Test_room_3“
- Raumfläche:	304m ²
- Raumeigenschaft:	reflexionsarmer Raum (s. Tabelle 4.2)
- Flächeneigenschaften:	Absorber (s. Tabelle 4.3)
- Einbezogene Quelle:	S1 und S2 (s. Abbildung 4.2)
- Einbezogener Empfänger:	E1 (s. Abbildung 4.2)
- Simulierte Strahlen pro Quelle:	500.000
- Reflexionsordnung:	1000
- Simulationsdauer:	1529s
- IMPC:	35%

Aus der hohen Einstellung bezüglich der Raumabsorption entsteht eine äquivalente Absorptionsfläche von 301m². Man kann sich dies als einen Raum vorstellen, welcher zu 99% offen ist. Somit ist zu erwarten, dass der simulierte Raum eine extrem steile Abklingkurve besitzt (s. Abbildung 5.17).

Die Nachhallzeit des simulierten Raumes beträgt:

$$T_{30} = 49\text{ms},$$

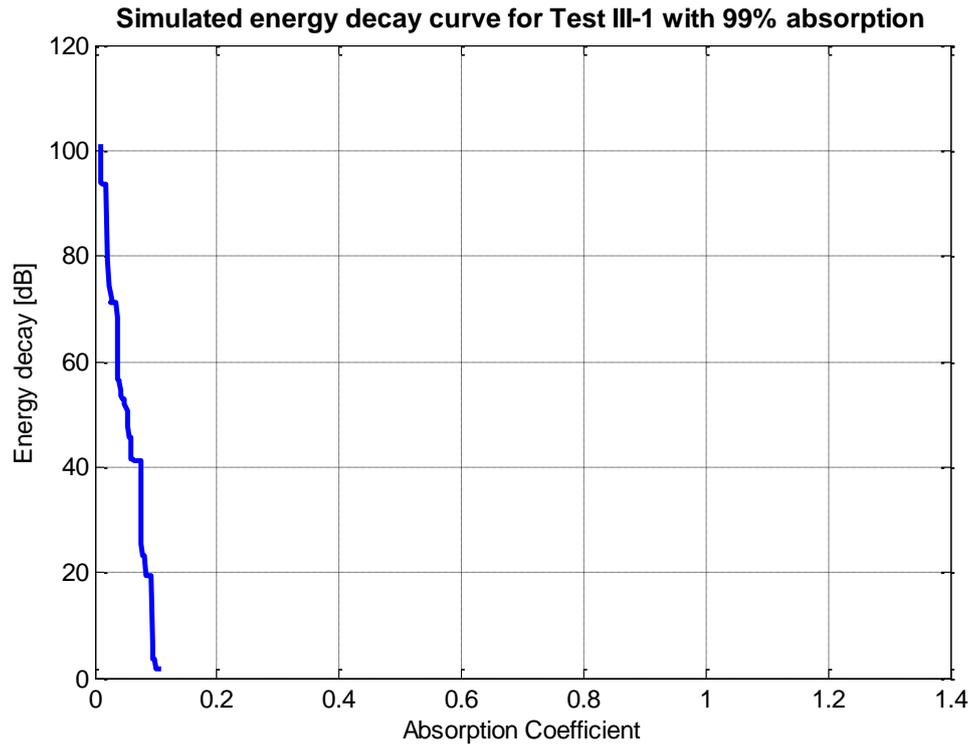


Abbildung 5.17: Abklingkurve (Testfall III-1)

Die extrem kurze Nachhallzeit führt im Rahmen dieses Versuches zum folgenden Urteil:

Durch die extrem kurze Nachhallzeit entsteht ein Reflektogramm, dessen Werte sehr schnell abnehmen. Bereits ab dem Zeitpunkt $t = 623,2\text{ms}$ liegen diese im Bereich 10^{-45} und werden auf Grund der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Datenformartierung des Typs *single* auf null abgerundet. Somit gehen die Werte der Abklingkurve ab diesem Zeitpunkt ins Unendliche.

$$L(623,2\text{ms}) = 10 \cdot \log_{10} 0 = -\infty\text{dB}$$

Die Optimierung kann somit nicht durchgeführt werden, da die Summe der quadratischen Abweichung zwischen abgelesener und nachgerechneter Abklingkurve zu jeder Iteration unendlich groß ist. Infolgedessen ist es notwendig die Abklingkurven zeitlich zu begrenzen, um unendlich große Werte als Ergebnis der Kostenfunktion zu vermeiden.

In diesem Versuch wird nur der Bereich optimiert, in dem die abgelesene Kurve um 100dB abklingt. Dies erfolgt zum Zeitpunkt $t = 109,8\text{ms}$. Mit einer Neuabtastung von 1kHz liegen somit für die Optimierung zwei Abklingkurven als Zeilenmatrix mit jeweils 120 Werten vor. Der Verlauf der Kostenfunktion über den Absorptionsgrad kann nun berechnet werden.

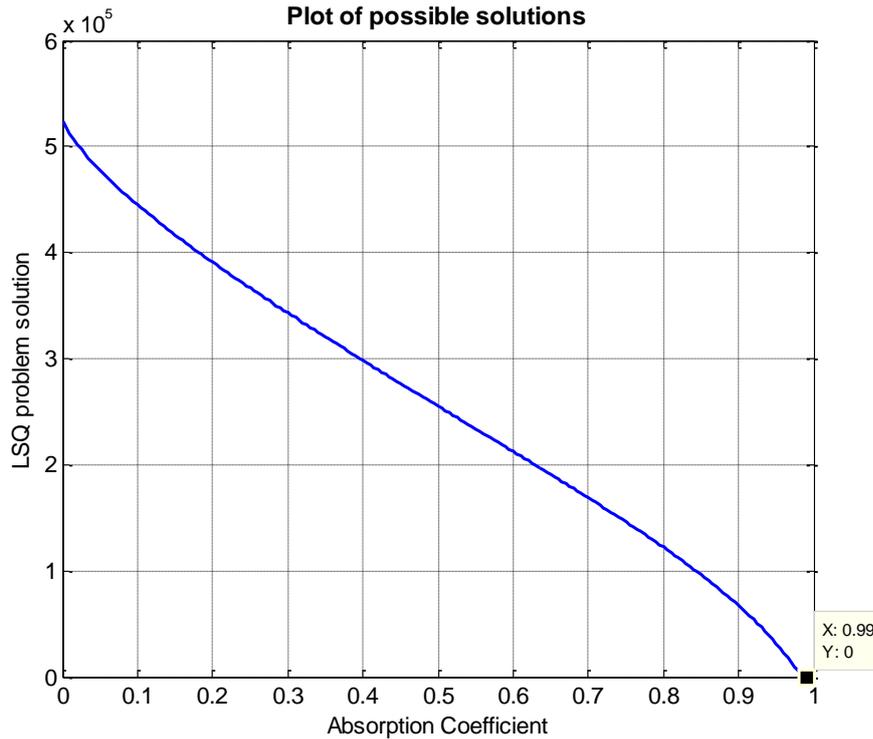


Abbildung 5.18: Verlauf der Kostenfunktion in Abhängigkeit vom Absorptionsgrad (Testfall III-1)

Die Abbildung 5.18 zeigt eine Kostenfunktion frei von lokalen Minima. Die Kostenfunktion wird über eine Schrittweite von $\Delta\alpha = 0,01$ berechnet. Bei einer höheren Auflösung sind diesbezüglich keine Veränderungen zu erwarten.

Als Ergebnis schlägt die Optimierung folgenden Absorptionsgrad vor:

$$\alpha_{opt} = 0,99$$

Das Residuum der Optimierung bei α_{opt} beträgt:

$$\mu = 6,3970 \cdot 10^{-10},$$

Die mittlere Abweichung beträgt für dieses Experiment gemäß Gleichung 5.1:

$$\Delta\bar{L} = 1,76 \cdot 10^{-4} \text{dB}$$

Die nahezu perfekte Übereinstimmung der Abklingkurven wird über Abbildung 5.19 graphisch bestätigt.

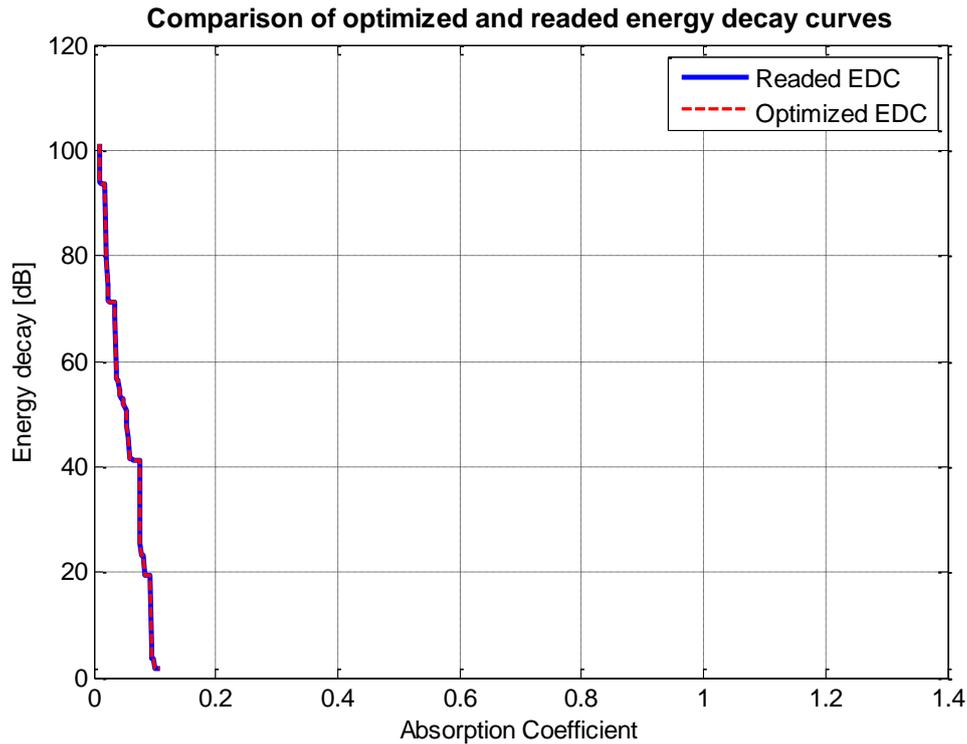


Abbildung 5.19: Vergleich zwischen abgelesener und nachgerechneter Abklingkurve (Testfall III-1)

Im **Testfall III-2** wird die Optimierung an einem simulierten Hallraum erprobt, dessen Raumflächen ein frequenzunabhängiger Absorptionsgrad von $\alpha = 0,01$ zugewiesen wird. Die Simulationsdatei entspricht derselben wie im Versuch 1. Es entsteht ein folgender simulierter Raum:

- Raum:	Test_room_3“
- Raumfläche:	304m ²
- Raumeigenschaften:	Hallraum (s. Tabelle 4.2)
- Flächeneigenschaften:	Reflektor (s. Tabelle 4.3)
- Einbezogene Quelle:	S1 und S2 (s. Abbildung 4.2)
- Einbezogener Empfänger:	E1 (s. Abbildung 4.2)
- Simulierte Strahlen pro Quelle:	500.000
- Reflexionsordnung:	1000
- Simulationsdauer:	1529s
- IMPC:	35%

Aus der hohen Einstellung in Bezug auf die Raumabsorption entsteht eine äquivalente Absorptionsfläche von 3m². Somit ist zu erwarten, dass der simulierte Raum eine extrem flache Abklingkurve besitzt (s. Abbildung 5.20).

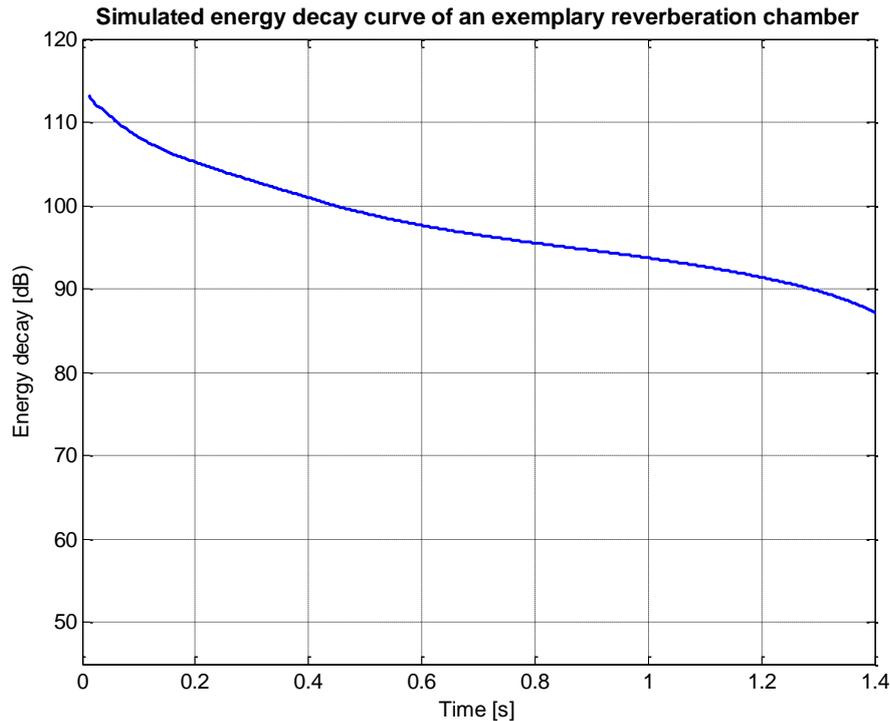


Abbildung 5.20: Abklingkurve (Testfall III-2)

Die Nachhallzeit des simulierten Raumes beträgt:

$$T_{30} = 4,15\text{s}$$

Wobei hier erneut darauf hingewiesen wird, dass die Ergebnisse der Simulation behutsam zu betrachten sind (s. Kap *Einfluss der Eingangsparameter auf das Ergebnis der Abklingkurve*). Die Simulationsdauer ist beispielsweise geringer als die Nachhallzeit des Raumes. Dieser Wert entspricht wahrscheinlich nicht der Realität. Die Daten werden lediglich als Erprobung hinsichtlich der Optimierung verwendet.

Mit einer Neuabstimmung von 1kHz liegen für die Optimierung zwei Abklingkurven als Zeilenmatrix mit jeweils 1510 Werten vor. Die Kostenfunktion wird in Abbildung 5.21 graphisch dargestellt. Diese zeigt im Vergleich zu Testfall-I und Testfall III-1 einen bemerkenswerten Anstieg des Residuums über den Absorptionsgrad. Dieser entsteht auf Grund der Anzahl an diskreten Werten und der vom Absorptionsgrad abhängigen Abweichung beider Kurven.

Bei einem hohen Absorptionsgrad neigt das Residuum der Kostenfunktion zum unendlichen. Im Hinblick auf eine erfolgreiche Optimierung muss dies verhindert werden, indem der ein Absorptionsgrad für die erste Iteration so eingesetzt wird, dass dieser schätzungsweise dem Optimum entspricht oder indem die Rate der Neuabstimmung verringert wird, um die Anzahl an diskreten Werten der jeweiligen Abklingkurven zu reduzieren (s. Abbildung 5.22).

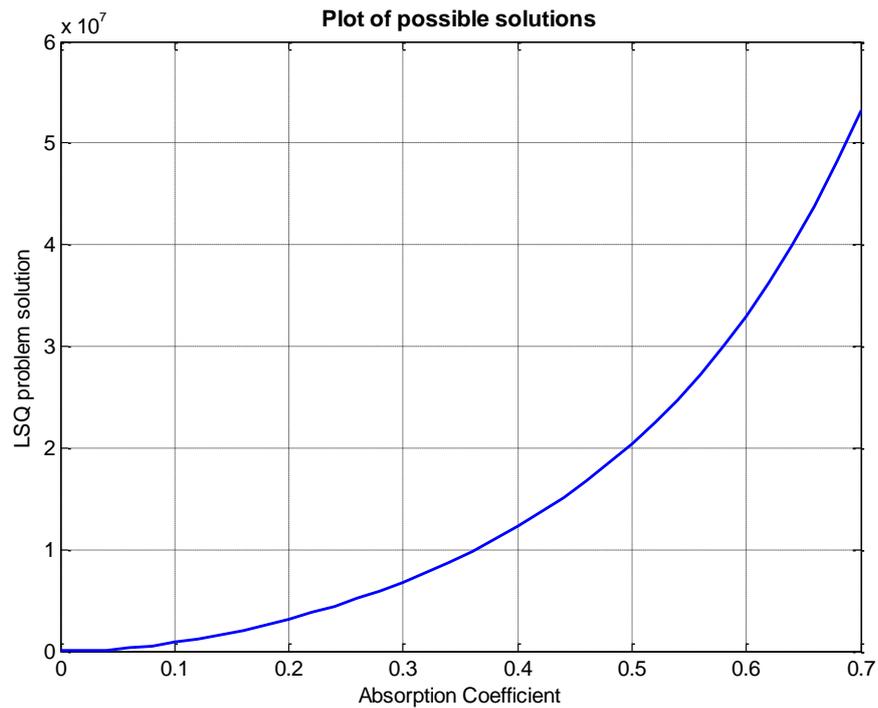


Abbildung 5.21: Verlauf der Kostenfunktion in Abhängigkeit vom Absorptionsgrad (Testfall III-2)

Als Ergebnis schlägt die Optimierung den zu erwartenden Absorptionsgrad von

$$\alpha_{opt} = 0,01$$

vor. Das Residuum der Optimierung bei α_{opt} beträgt:

$$\mu = 2,19 \cdot 10^{-8}$$

Die mittlere Abweichung beider Abklingkurven beträgt für dieses Experiment (s. Gleichung 5.1):

$$\Delta \bar{L} = 3.1 \cdot 10^{-6} \text{ dB}$$

Die nahezu perfekte Übereinstimmung der Abklingkurven wird über Abbildung 5.23 graphisch bestätigt.

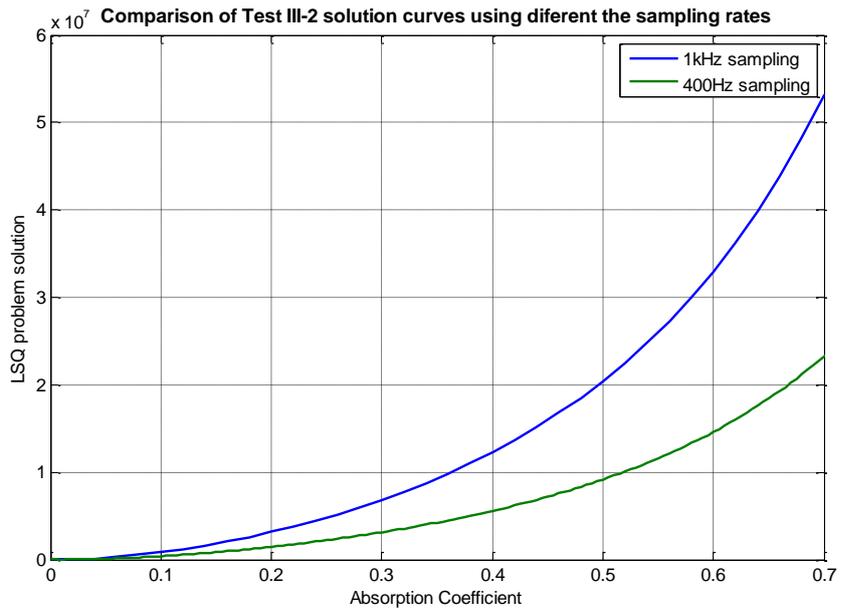


Abbildung 5.22: Vergleich der Kostenfunktion hinsichtlich der Abtastrate (Testfall III-2)

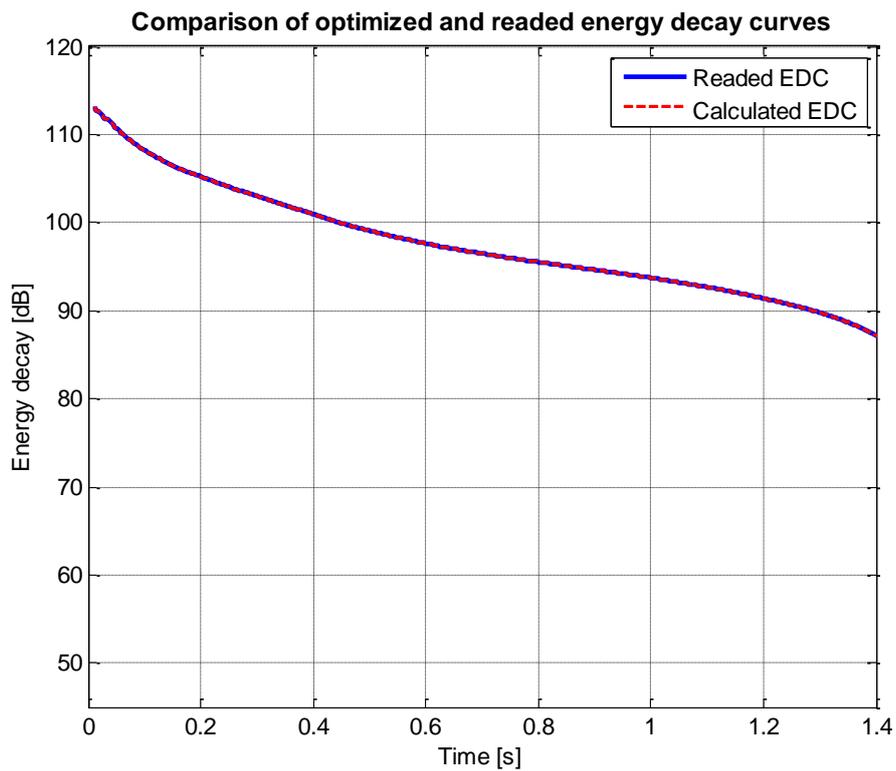


Abbildung 5.23: Vergleich zwischen abgelesener und nachgerechneter Abklingkurve (Testfall III-2)

Tabelle 5.4: Versuchsergebnisse Testfall IV

	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2
Ausgangswerte	0.5	0.5	0.8	0.1	0.1	0.8
Ergebnisse						
100 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2983	0.3017
125 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2983	0.3017
160 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2983	0.3017
200 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2983	0.3017
250 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2983	0.3017
315 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2983	0.3017
400 Hz	0.295	0.2005	0.3	0.2	0.2989	0.2013
500 Hz	0.295	0.2005	0.3	0.2	0.2989	0.2013
630 Hz	0.295	0.2005	0.3	0.2	0.2989	0.2013
800 Hz	0.295	0.2005	0.3	0.2	0.2989	0.2013
1000 Hz	0.295	0.2005	0.3	0.2	0.2989	0.2013
1250 Hz	0.295	0.2005	0.3	0.2	0.2989	0.2013
1600 Hz	0.292	0.1509	0.3001	0.1499	0.3	0.15
2000 Hz	0.292	0.1509	0.3001	0.1499	0.3	0.15
2500 Hz	0.292	0.1509	0.3003	0.1497	0.2997	0.1504
3150 Hz	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2995	0.1006
4000 Hz	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2989	0.1015
5000 Hz	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2989	0.1014
6300 Hz	0.3	0.05	0.3022	0.0471	0.2991	0.00512
8000 Hz	0.3	0.05	0.3021	0.0471	0.3	0.05
10000 Hz	0.3	0.05	0.3021	0.0472	0.2999	0.0502

Für diesen Testfall wurden somit erneut drei Versuche gestartet, wobei die Ausgangswerte der Optimierung variieren. Diese sind gemeinsam mit deren Lösungen in Tabelle 5.4 aufgelistet, wobei die Ausgangswerte jeweils für ein Terzband gelten.

Die Ergebnisse aller drei Versuche stimmen sehr gut mit den zu erwartenden Werten überein. Die Lösungen hinsichtlich der Absorptionsgrade werden in Abbildung 5.24 graphisch dargestellt. Abbildung 5.25 bestätigt die Übereinstimmung der Abklingkurven im 1000Hz Terzband.

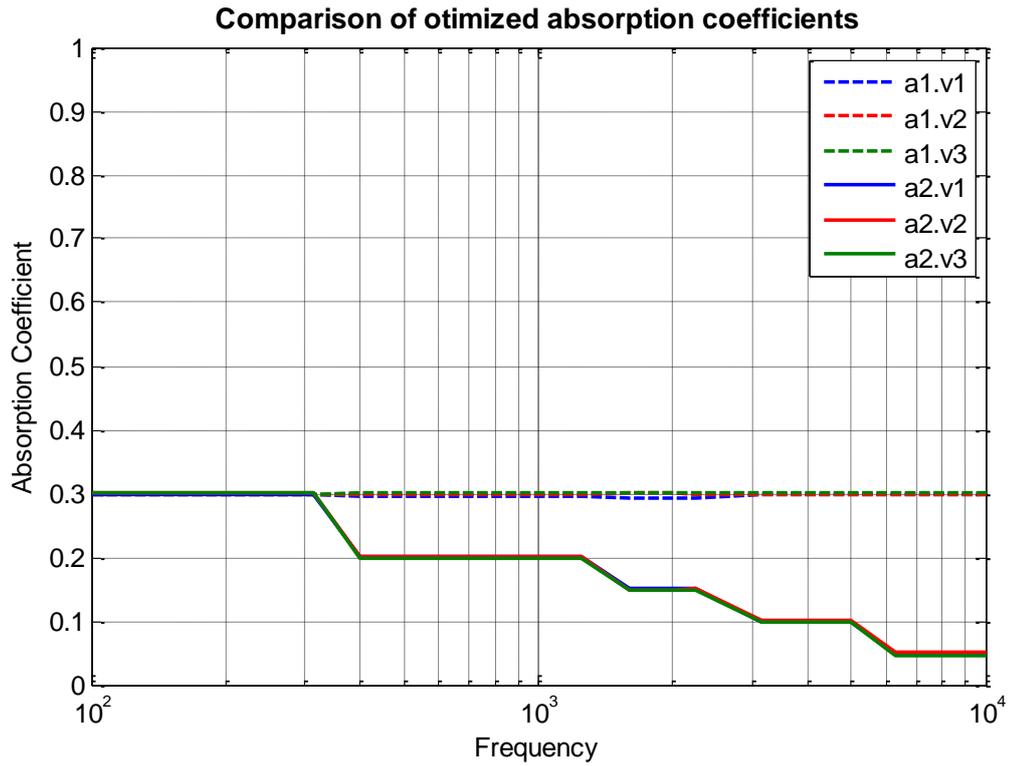


Abbildung 5.24: Vergleich der Lösungen hinsichtlich der Absorptionsgrade (Testfall IV)

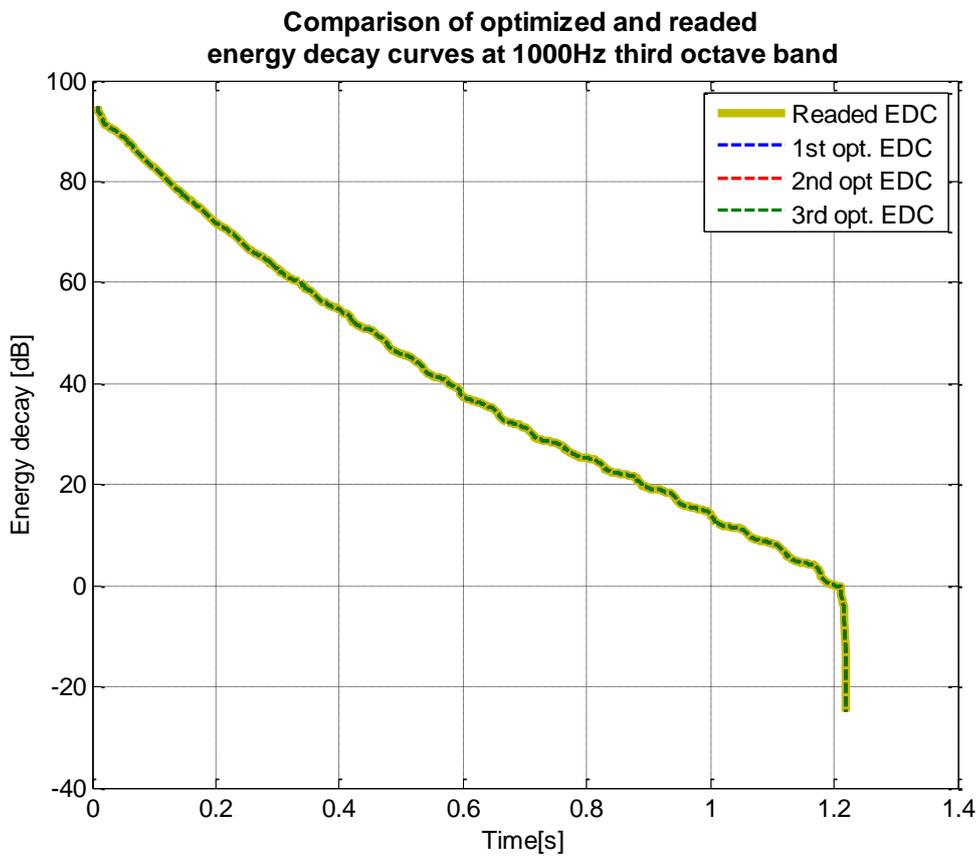


Abbildung 5.25: Vergleich zwischen optimierten und berechneten Abklingkurven (Testfall IV)

5.2.5 Diskussion der Ergebnisse

In allen vorgelegten Testfällen werden von der Optimierung die zu erwartenden Absorptionsgrade vorgeschlagen, obwohl manche mehr als einen Versuch benötigen. Allerdings ist es wichtig zu erwähnen, dass RAPO in diesen Fällen die kleinste Summe der Fehlerquadrate zweier Abklingkurven sucht, welche aus derselben Simulation stammen, wobei die zu optimierende Kurve anhand der im Kap. *Nachberechnung der Simulation in MATLAB* vorgelegten Methode in MATLAB[®] nachberechnet wird. Somit ist ein definiertes globales Optimum in den jeweiligen Testfällen vorhanden, dessen Residuum nahezu Null beträgt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Fall bei der Implementierung realer Messdaten vorkommt ist sehr viel geringer.

Das Ergebnis der Optimierung bezüglich Testfall I schlägt einen Absorptionsgrad von 0,1005 vor. Dieser weicht von der erwarteten Absorption um 0.5% aus. Der Grund für die Abweichung ist die flache Steigung der Kostenfunktion in unmittelbarer Nähe des Optimums. Allerdings bewirkt diese beim Vergleich beider Abklingkurven keine nennenswerte Diskrepanz.

Die Flächenverteilung von mehreren Absorptionsgraden scheint gemäß dem Testfall II den Verlauf der Kostenfunktion stark zu beeinflussen. Vor allem interessant ist, dass die Absorptionsgrade kleinerer Flächen einen geringen Einfluss auf das Ergebnis der Kostenfunktion haben, obwohl die aus diesen stammenden äquivalenten Absorptionsflächen A_{eq} gegebenenfalls größer sind als die der großen Raumflächen mit geringem Absorptionsvermögen (s. *Testfall II-1*). Vermutlich ist dies eine Folge der geringeren Wahrscheinlichkeit von einem Strahl getroffen zu werden. Somit stellt sich die Frage, inwiefern eine Fläche im simulierten Raum berücksichtigt werden muss, um ein Gleichgewicht zwischen Simulationsaufwand und Simulationsgüte zu finden.

Eine gleichmäßige Flächenverteilung der Absorptionsgrade bewirkt in Bezug auf die Kostenfunktion einen drastischen Anstieg lokaler Optima und somit möglicher Lösungen hinsichtlich der Optimierung. Zudem entsteht im Verlauf der Kostenfunktion eine leichte Symmetrie, welche zu einer Verwechslung bzw. Mittelung der optimierten Absorptionsgrade führt (s. *Testfall III-3* und *Testfall III-4*).

Testfall III-1 zeigt die ersten Grenzen der Optimierung mittels RAPO. Bei der Datenverarbeitung von realen Messdaten kann es durchaus vorkommen, dass die Energie des Reflektogramms einer gemessenen Raumimpulsantwort zum Ende der Messdauer Null ist. Auf Grund dieser Erkenntnis wird während des Optimierungsvorganges eine Grenze implementiert, welche die gemessene Abklingkurve im Optimierungsvorgang benutzerdefiniert eingrenzt und die Länge der simulierten Abklingkurve auf die Erste anpasst.

Dies ist vor allem bei Messungen in hallreichen Räumen vorteilhaft und erfolgt über eine Schnittstelle zum Anwender.

Hinsichtlich der Erkenntnis zu Testfall III-2 wird vom Verfasser der vorliegenden Arbeit empfohlen stets realistische Ausgangswerte für die Optimierung einzusetzen. Somit kann verhindert werden, dass das Residuum der Kostenfunktion unendlich groß ist.

Testfall IV bestätigt die Möglichkeit einer Optimierung hinsichtlich der Ermittlung frequenzabhängiger Absorptionsgrade. Die Ermittlung von frequenzunabhängigen Absorptionsgraden wurde mit den Testfällen I-III ebenfalls bestätigt.

Die für RAPO angewandte Methodik gilt aus der Sicht des Verfassers unter Berücksichtigung der ebengenannten Erkenntnisse somit als validiert.

5.3 Reales Szenario

Abschließend zur Verifikation und Validierung von RAPO, wird dieser in ein reales Szenario versetzt. Hierbei wird eine Simulation mit Ray Tracing unter den Einsatz einer Impulsantwort optimiert, wobei die Impulsantwort ebenfalls aus einer numerischen Simulation gewonnen wird.

Das Ziel dieses Szenario ist ein Durchlauf der Optimierung unter denjenigen Bedingungen durchzuführen, welche im realen Einsatz von RAPO vorkommen werden. Hierbei liegt der Fokus auf der fehlerfreien Durchführung der Optimierung, vom Einlesen der Dateien bis zur Ausgabe der optimierten Absorptionsgrade.

Die Validierung von RAPO erfolgt über die Ergebnisse der Optimierung. In diesem Szenario wird jedoch nicht essenziell auf das Ergebnis einzelner Absorptionsgrade geachtet, sondern auf deren Plausibilität hinsichtlich des Verlaufes über die jeweiligen Terzbänder und der mittleren Absorption. Grund hierfür ist der im Kap. *Einfluss der Eingangsparameter auf das Ergebnis der Abklingkurve* vorgestellte Verdacht auf eine einstellungsbedingte Einschränkung der Dateigröße in der Simulation und den damit hervorgerufenen Informationsverlust, welcher sich auf den Verlauf der simulierten Abklingkurve auswirkt. Das wichtigste Kriterium hinsichtlich der Validierung ist somit, dass die optimierten Abklingkurven den aus der Impulsantwort gefilterten und berechneten Abklingkurven ähneln. Die Filterung der Impulsantworten erfolgt über das im Kap. *Filterung der Raumimpulsantwort* präsentierte Filter Klasse 1 der zweiten Ordnung.

Die Raumimpulsantwort wurde mit Hilfe von EASE[®] über das Simulationsmodul AURA simuliert, welches auf einen an der RWTH-Aachen entwickelten Simulationsalgorithmus namens CAESAR basiert. Dieses Modul dient unter anderem der Ermittlung von abklingkurvenbezogenen Parametern, wie die Nachhallzeit oder die Sprachverständlichkeit (AFMG) sowie der Auralisation ortsfester Positionen.

Das für dieses Szenario beanspruchte Modell entspricht dem „Test_room_3“, dessen Raumeigenschaft entsprechend der in Tabelle 4.2 präsentierten Variante „Frequenzabhängig Biform 2“ eingestellt wird. Dieses Szenario ähnelt somit dem Testfall IV, nur dass hierfür eine simulierte Impulsantwort eingesetzt wird. Die Ergebnisse der Simulation mit Ray Tracing sind in folgender Datei gespeichert:

„test_room_3_Frequenzabhängig_Biform[5000000N,80n,99,98ICP]“
(s. *Anhang A*)

Es gilt erneut die Ermittlung zweier unterschiedlicher Absorptionsgrade (s. Tabelle 4.3), wobei diese gemäß der eben erwähnten Raumeigenschaft gleichmäßig verteilt sind. α_1 wird hierbei als frequenzunabhängig jedoch für dieses numerische Experiment mit einer mittleren Absorption von 50% betrachtet:

$$\mathbf{a}_1 = [0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \dots \\ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5]^T$$

α_2 wird frequenzabhängig betrachtet, welcher tiefe Frequenzen stärker absorbiert als hohe Frequenzen:

$$\mathbf{a}_2 = [0,3 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \ 0,2 \dots \\ 0,15 \ 0,15 \ 0,15 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,1 \ 0,05 \ 0,05 \ 0,05]^T$$

Die Angaben gelten erneut für die Frequenzen:

$$\mathbf{f} = [100 \ 125 \ 160 \ 200 \ 250 \ 315 \ 400 \ 500 \ 630 \ 800 \ 1000 \ 1250 \\ 1600 \ 2000 \ 2250 \ 3150 \ 4000 \ 5000 \ 6300 \ 8000 \ 10000]^T \text{ Hz}$$

Da den akustischen Simulationen mittels Ray Tracing und mittels AURA unterschiedliche Algorithmen zu Grunde liegen, werden die Abklingkurven der jeweiligen Simulationen zunächst verglichen, um die von RAPO optimierte Werte für die Absorptionsgraden objektiv bewerten zu können. Hierbei werden die Abklingkurven aus der simulierten Datei zunächst mit den „richtigen“ Absorptionsgraden berechnet und mit der Abklingkurve aus AURA für jedes Terzband von \mathbf{f} verglichen.

Die Abbildung 5.26 zeigt den Vergleich der Abklingkurven im 100Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz 8000Hz und 10000Hz Terz-Spektrum. Eine gute Übereinstimmung des Abklingverhaltens ist hierbei nur begrenzt feststellbar. Somit ist mit Abweichungen zwischen den zu erwartenden Werten und den Lösungen aus der Optimierung zu rechnen. Dies gilt vor allem im hochfrequenten Bereich.

Die Nachhallzeit des Raumes beträgt:

$$T_{30} = 0.45\text{s}$$

Bei einem Raumvolumen von 320m^3 beträgt die Schröderfrequenz des Simulierten Raumes gemäß Gleichung 2.34 eine Frequenz von:

$$f_s = 75\text{Hz}.$$

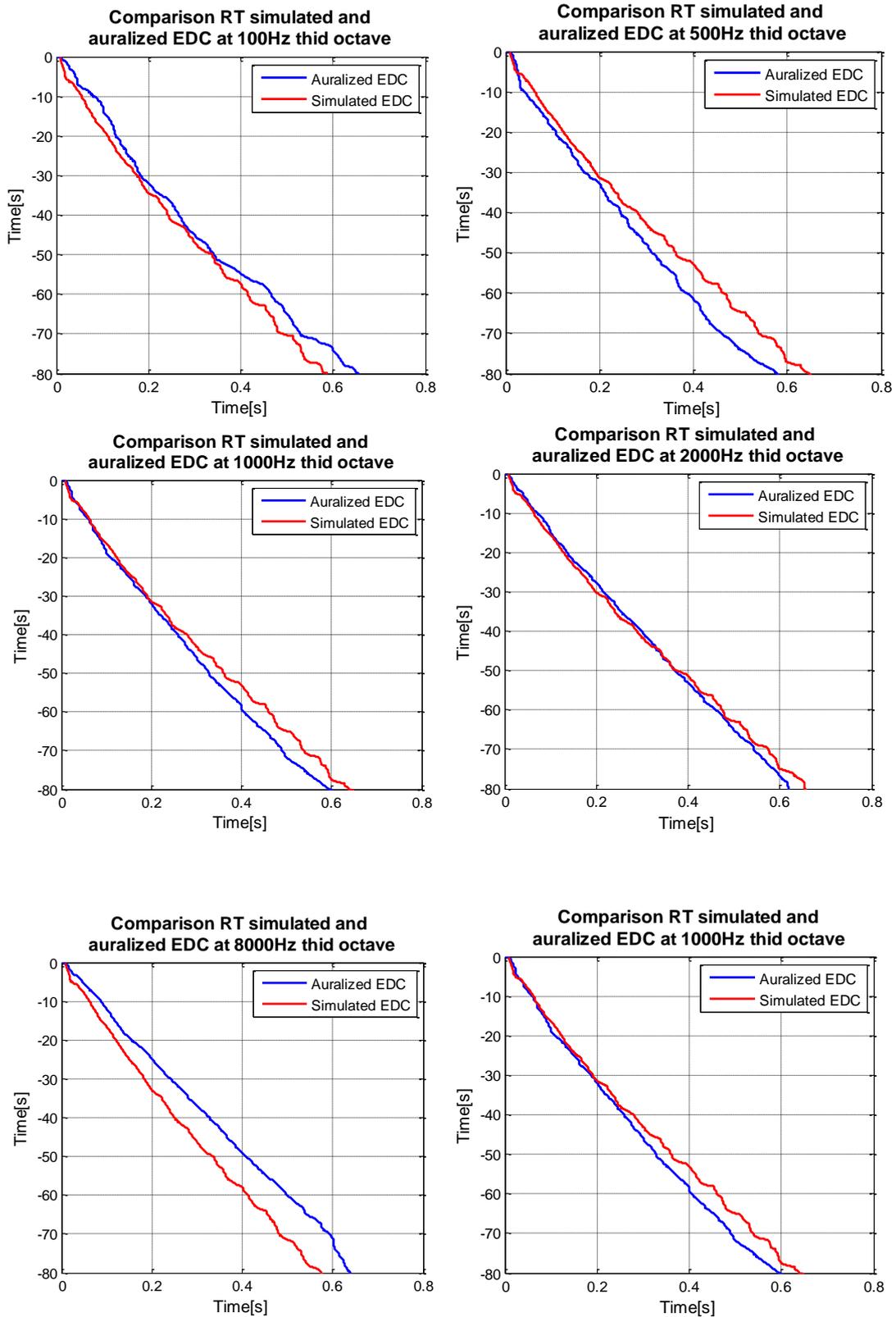


Abbildung 5.26: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Ray Tracing Simulation und der Auralisation

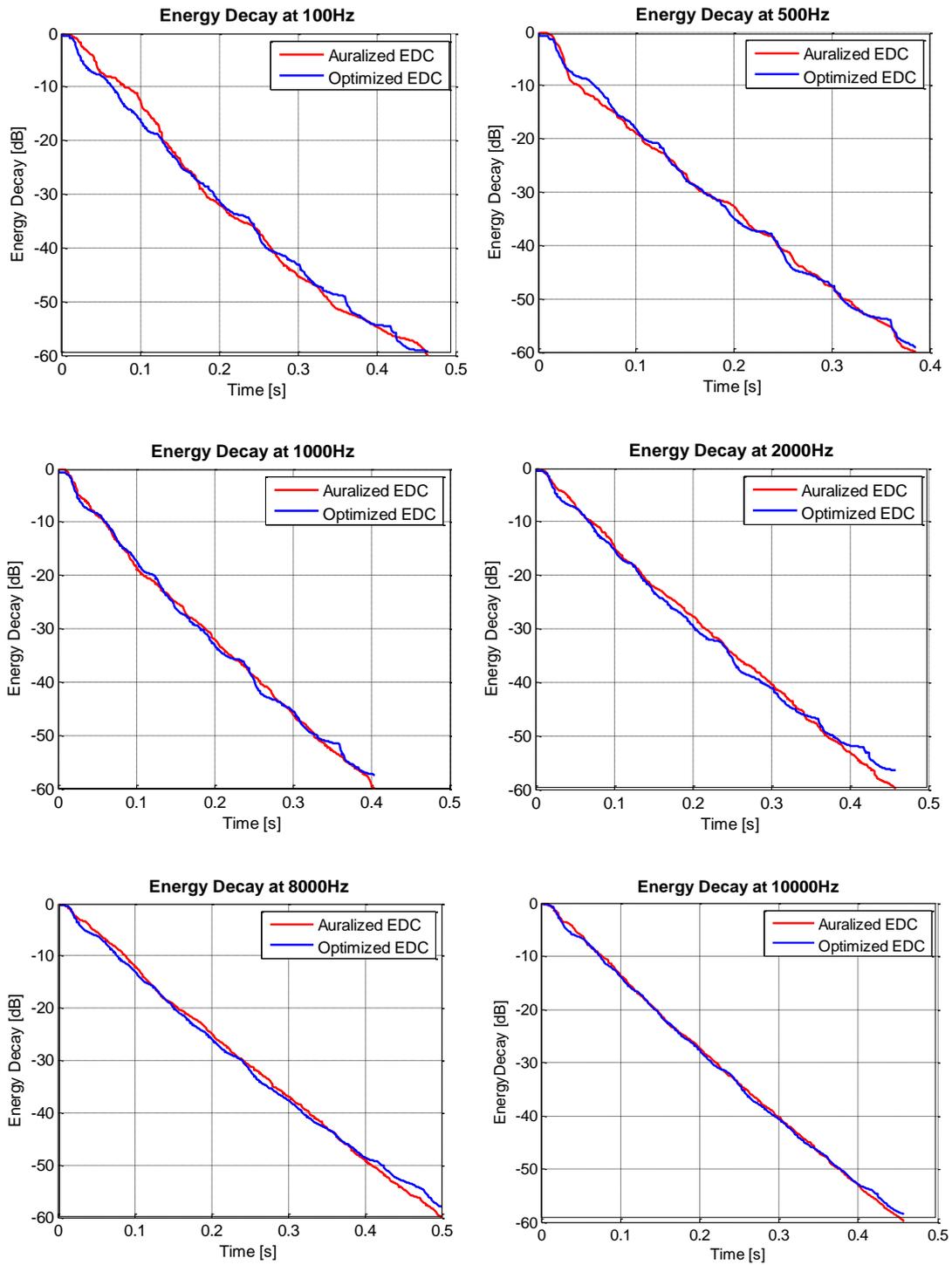


Abbildung 5.27: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Optimierung und der der Auralisation (1)

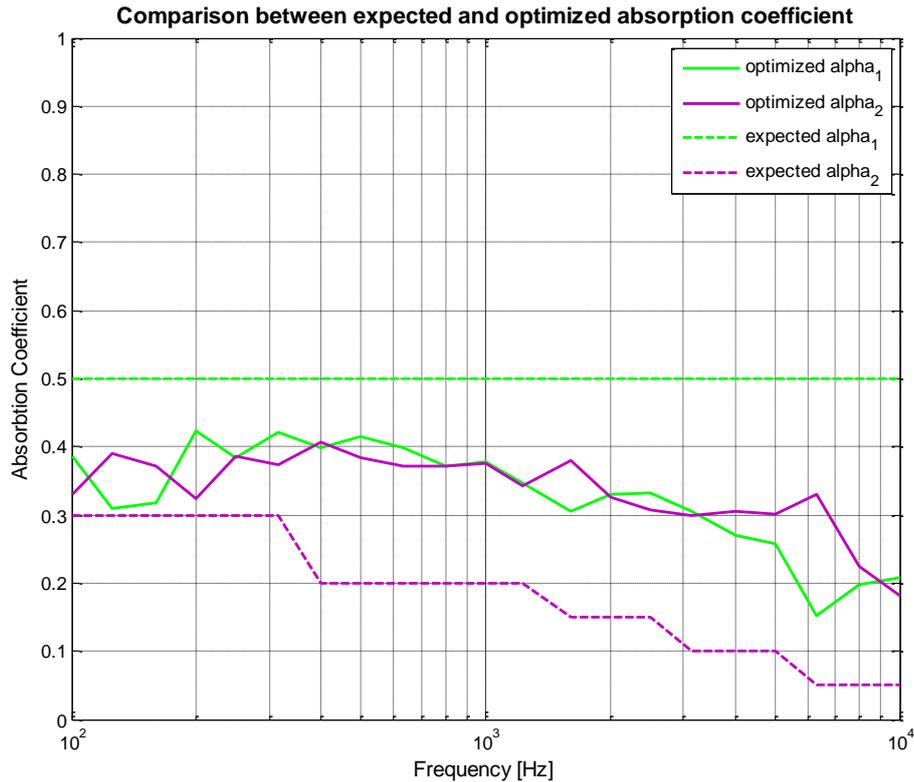


Abbildung 5.28: Verlauf der optimierten Absorptionsgrade und deren Erwartungswerte

Wie in Abbildung 5.27 zu sehen, findet eine erfolgreiche Anpassung der simulierten Abklingkurven an die der Auralisation statt. Wie von der Optimierung erwartet, überlagern sich die Abklingkurven im 8000Hz Frequenzband ebenfalls. Somit erfüllt die Optimierung ihren Zweck.

Die Lösung des Problems scheint allerdings etwas pragmatischer zu sein. Zu Erwar- ten ist ein gleichmäßiger Abfall der Absorptionsgrade über die Frequenzbänder. Stattdessen zeigt das Ergebnis in Abbildung 5.28 ein ungleichmäßiges „auf und ab“ dieser. Dies lässt sich über die Erkenntnis hinsichtlich der Symmetrie der Kosten- funktion erklären (s. [Testfall II: Biforme Raumabsorption](#)).

Der Erkenntnis entsprechend wird diese von einer gleichmäßigen Flächenverteilung der Absorptionsgraden hervorgerufen, dessen Folge in Tabelle 5.3 wiederzufinden ist. In diesem Szenario lässt sich vermuten, dass eine ähnliche Situation hervorgeru- fen wird, wobei die Absorptionsgraden hier nur anteilig verwechselt werden. Weitere diesbezügliche Überlegungen sind im Ausblick niedergeschrieben.

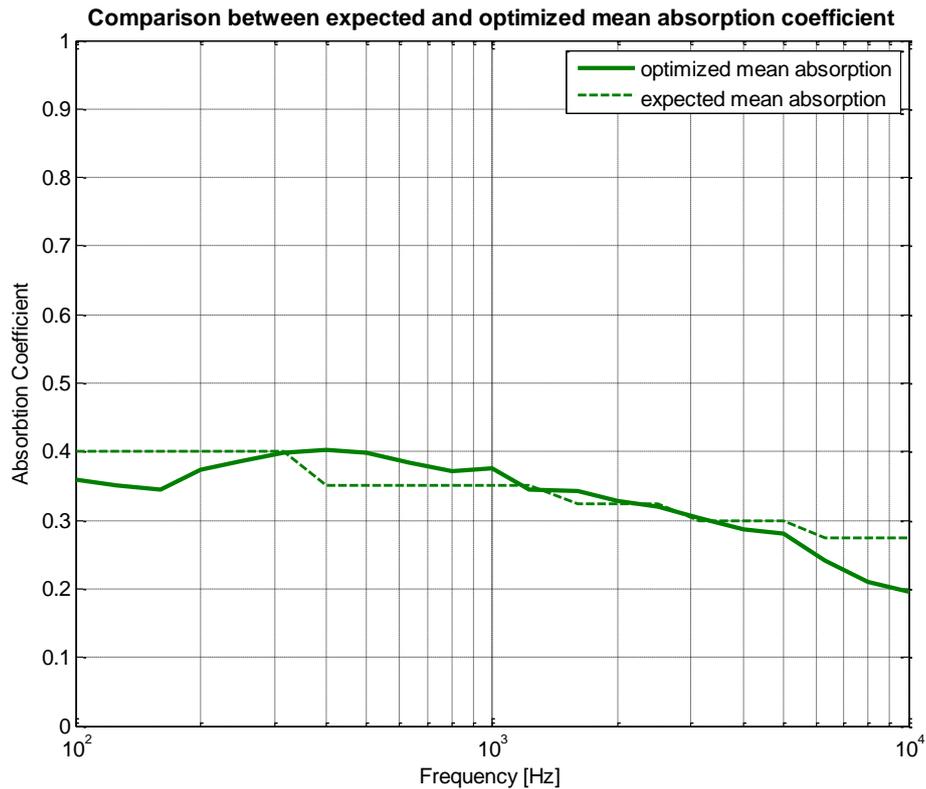


Abbildung 5.29: Ergebnisse hinsichtlich der gemittelten Absorption

Der erwartungsgemäße Verlauf der Absorptionsgrade über die Frequenzen macht sich erst bei der Betrachtung der Absorptionsgrade im Mittel bemerkbar (s. Abbildung 5.29). Die Ergebnisse machen hierbei einen besseren Eindruck.

Wie zu erwarten fallen die gemittelten Absorptionsgrade im tieffrequenten Bereich tiefer aus als erwartet. Dies lässt sich erklären, da in diesem Bereich die Steigung der Abklingkurve der Simulation etwas steiler ausfällt als die der Auralisation (s. Abbildung 5.26). Dies wird über die Optimierung anhand einer Verminderung der Absorptionsgrade ausgeglichen. Im 500Hz und 1000Hz Terzband erfolgt genau das Gegenteil. Im 2000Hz Terzband stimmen die Erwartungswerte und die der Optimierung überein, da in dem Frequenzband eine gute Ausgangslage vorhanden ist. Die Situation im 8kHz Terzband ähnelt der im tieffrequenten Bereich. Nur die hohe Abweichung im 10kHz Terzband hinterlässt einen dubiosen Eindruck, da die Steigung der simulierten Abklingkurve in Bezug auf die in Abbildung 5.26 präsentierte Ausgangslage geringer ist als die der Auralisation. Somit ist eine Erhöhung der Absorption zu erwarten.

Nichtdestotrotz liegt eine gute Übereinstimmung der Abklingkurven nach der Optimierung vor. Die Optimierung wurde von RAPO fehlerfrei durchgeführt. Die Ergebnisse werden hinsichtlich des Zweckes des vorgelegten Szenarios als akzeptabel bewertet. Die Validierung von RAPO hinsichtlich dessen Güte unter Berücksichtigung realer Messdaten ist weiterhin anhand nachfolgender Arbeiten zu prüfen.

6 Ausblick

Die vorliegende Arbeit präsentiert als Ergebnis ein Berechnungshilfsprogramm, das auf den Grundlagen der geometrischen Raumakustik und der akustischen Simulation mittels Ray Tracing beruht. Um die Verlässlichkeit des vorliegenden Programms zu erproben, wurde dieses unter bestimmten Bedingungen getestet, allerdings sind aus der Sicht des Verfassers weitere Untersuchungen nötig, welche auf Grund der begrenzten Bearbeitungszeit der vorliegenden Arbeit nicht umgesetzt werden konnten.

1. Wie bereits erwähnt wird RAPO im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich anhand numerisch aufgebauter Testfälle untersucht, deren Lösung hinsichtlich der Kostenfunktion ein nahezu perfektes globales Optimum besitzt. Weiterhin wird der Hintergrundlärm vernachlässigt und der Einsatz von Filtern nur begrenzt berücksichtigt. Beide eben genannten Aspekte beeinflussen allerdings den linearen Verlauf einer Abklingkurve. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine perfekte Überlagerung der Abklingkurven bei der Implementierung realer Messdaten vorkommt sehr viel geringer als in den vorgelegten Testfällen. Es besteht somit die Notwendigkeit, die Qualität der Ergebnisse von RAPO unter Verwendung realer Messdaten zu prüfen. RAPO wurde anhand der im Kap. *Reales Szenario* vorgelegten Untersuchung für den Einsatz realer Messdaten nur begrenzt getestet.
2. Aus dem Testfall II.4 der im Kap. *Testfälle* vorgelegten numerischen Erprobungen führt die Optimierung „a“ zu einer weiteren wichtigen Überlegung. Das Ergebnis dieser Optimierung schlägt zwar die Erwartungswerte der Optimierung vor, allerdings in umgekehrter Reihenfolge. Die Werte der Absorptionsgrade wurden demnach erfolgreich ermittelt, allerdings nicht deren Position im Raum. Das System scheint unterbestimmt zu sein. Dies ist eine Folge der Symmetrie der Kostenfunktion. Es ist deshalb sinnvoll, weitere Untersuchungen durchzuführen hinsichtlich einer möglichen Behebung der eben erwähnten Symmetrie beispielsweise durch den Einsatz mehrerer Quellen und Empfänger.
3. Es stellt sich zudem die Frage, ob sich die von RAPO ermittelten optimierten Absorptionsgrade für andere Simulationsmodelle einsetzen lassen oder auf Grund vereinfachter Modellbildung und der Simulationsparameter lediglich eine simulationsindividuelle Lösung repräsentieren.

4. Neben LSQCURVEFIT stellt MATLAB[®] weitere Optimierungsbefehle bereit, welche ebenfalls einem Algorithmus der nichtlinearen Fehlerquadrate zu Grunde liegt (Beispielsweise LSQNONLIN). Zudem können Anwender diverse Optimierungsparameter über den Befehl OPTIMTOOL variieren beziehungsweise je nach Vorhaben anpassen. Eine Optimierung kann ebenfalls hinsichtlich der Suche nach dem globalen Optimum über ein „multiples“ Optimierungsverfahren verbessert werden. Hierbei wird beim Einleiten eines Optimierungsprozesses gleich mehrfach ein Optimiervorgang aus verschiedenen Ausgangspositionen ausgeführt. Dies hat jedoch die Folge, dass sich die Optimierungsdauer deutlich erhöht. Es besteht somit die Möglichkeit, den von RAPO in Anspruch genommenen Optimierungsalgorithmus zu verbessern. Somit kann beispielsweise eine Verbesserung der Güte der Optimierung aber auch eine Verringerung der von RAPO beanspruchten Rechenzeit erzielt werden.

5. Abschließend besteht die dringende Notwendigkeit die in Kap. *Einfluss der Eingangsparameter auf das Ergebnis der Abklingkurve* vorgelegte Vermutung hinsichtlich des einstellungsbedingten Informationsverlustes nachzugehen. Vom Verfasser wird nahegelegt, die Güte der Ergebnisse einer Ray Tracing Simulation vor dem Einsatz von RAPO zu prüfen.

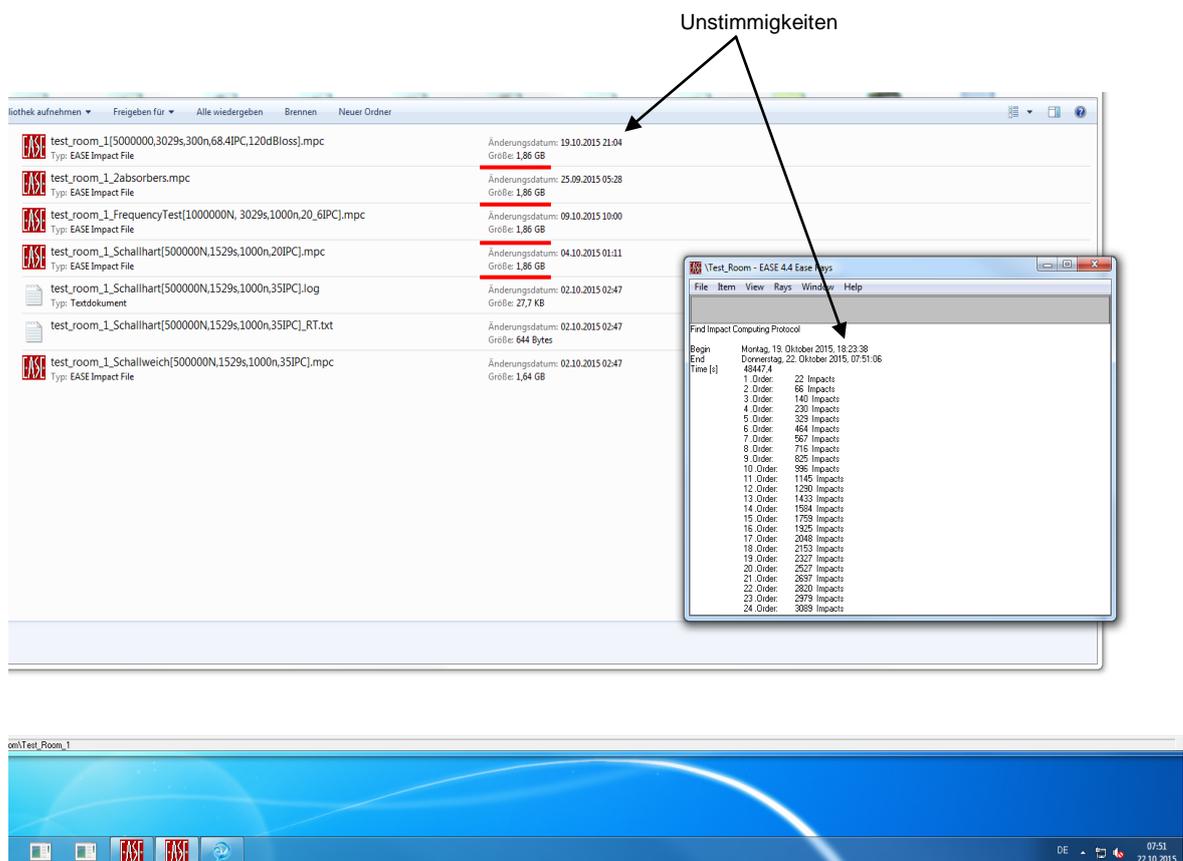


Abbildung 6.1: Screenshot vom 22.10.2015

In Abbildung 6.1 sind diese Vermutungen erneut bestätigt. Am 19. Oktober 2015 wurde um 18:23 Uhr die Simulation

„Test_room_1[5000000N, 3029s, 300n,68.4IPC,120dBloss].mpc“
(s. *Anhang A*)

ausgeführt, welche am 22. Oktober 2015 um 07:51 Uhr abgeschlossen war. Unmittelbar danach wurde die Aufnahme gemacht. Darin ist zu erkennen, dass die letzte Änderung der Simulationsdatei am 19. Oktober 2015 um 21:04 Uhr bereits nach 161 Minuten Rechenzeit erfolgte. Im Vergleich zu den benachbarten Dateien beanspruchen vier davon denselben Speicherplatz von knapp über $2 \cdot 10^9$ Bytes (ca. 1,86 GB), obwohl diese von Grund auf unterschiedlich sind.

RAPO ist zum Zeitpunkt der Abgabe der vorliegenden Arbeit auf Grund der begrenzten Anzahl an vorgelegten Untersuchungen nur für bestimmte Simulationen ausgelegt. Beispielsweise zeichnen sich die Eigenschaften aller eingesetzten Quellen durch eine uniforme Richtcharakteristik aus. Dies gilt für alle vorgelegten Untersuchungen. Eine Implementierung der quellen- und empfängerbezogenen Simulationseigenschaften als Eingangsdatei für die Nachberechnung der Abklingkurven über RAPO steht noch bevor und ist durchaus empfehlenswert. Die Wahrscheinlichkeit, dass RAPO Programmierfehler aufweist, ist gegeben.

7 Fazit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Umsetzung eines inversen Verfahrens zur Bestimmung von Absorptionsgraden durch einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Impulsantworten.

Als Ergebnis liegt ein vom Verfasser entwickelter *Room Absorption Property Optimizer* (RAPO) vor, welcher auf Basis der Grundlagen der geometrischen Raumakustik und der akustischen Simulation mittels Ray Tracing beruht. RAPO ist ein Berechnungshilfsprogramm, dessen Quellcode über MATLAB[®] erstellt wurde und dessen Einsatz eine kommerzielle lizenzierte Version von MATLAB[®] sowie von EASE[®] erfordert.

Das inverse Verfahren zur Ermittlung der interessierenden Absorptionsparameter wird anhand eines Optimierungsalgorithmus basierend auf der Methode der nicht-linearen Fehlerquadrate eingeleitet. Hierbei werden zunächst die aus einer Messung gewonnene Impulsantwort und das von einer numerischen Simulation mittels Ray Tracing ermittelte Reflektogramm zu zwei Abklingkurven umgerechnet, wobei der Zweiten eine Abhängigkeit zu den ermittelten Absorptionsgraden zugewiesen wird. Über ein iteratives Verfahren wird dann die zweite Kurve der ersten solange angepasst bis die quadratische Abweichung beider Kurven ein Minimum erreicht.

Um die Güte des vorliegenden Berechnungshilfsprogramms zu testen, wird RAPO an einem exemplarischen vereinfachten Modell getestet. Die vorgelegten Untersuchungen werden in drei Phasen aufgeteilt.

1. Zunächst wird RAPO hinsichtlich der Verarbeitung der Simulation getestet. Hierfür entstehen Variationen des Modells bezüglich der Anzahl an vorhandenen Flächen, Quellen und Empfänger sowie der zu bestimmenden Absorptionsgrade. Als Ziel dieser Variationen, konnte eine erfolgreiche Nachbearbeitung der Simulation sowie eine Aufbereitung der Daten für die Optimierung unter unterschiedlichen Bedingungen vorgewiesen werden.
2. Anschließend wird die Güte der Simulation untersucht, mit dem Ziel, die „richtigen“ Anfangsbedingungen für die Optimierung zu gewährleisten. Hierbei werden diverse Probleme hinsichtlich der Datenverarbeitung erkannt, beseitigt bzw. wird über die vorgelegte Arbeit drauf hingewiesen.

3. Die dritte Phase der Untersuchung befasst sich mit der Optimierung. Hierbei wird die Kostenfunktion hinsichtlich möglicher Lösungen analysiert und die Bedeutung der Veränderung von Flächeneigenschaften auf das Ergebnis erforscht.

Abschließend wird RAPO in ein ausgedachtes reales Szenario versetzt, um dessen Umgang mit realen Messdaten testen zu können. Hierbei kommt zum ersten Mal die Implementierung einer Impulsantwort vor, wobei diese ebenfalls numerisch über EASE[®] simuliert wird. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt bei der Datenverarbeitung, dessen Ziel, das erfolgreiche bzw. abbruchfreie Ausführen von RAPO unter Berücksichtigung realer Messdaten, erfolgreich umgesetzt wird. Die Ergebnisse der Optimierung werden vom Verfasser der vorliegenden Arbeit als zufriedenstellend beurteilt.

Die in den vorliegenden Testfällen eingeleiteten Optimierungsvorgänge führten stets zu einem plausiblen Ergebnis. Somit ist RAPO in den Augen des Verfassers ein voll funktionstüchtiges Berechnungshilfsprogramm, welches weiterhin Optimierungsbedarf hinsichtlich der Datenverarbeitung sowie hinsichtlich des Optimierungsalgorithmus aufweist.

Unter Berücksichtigung der im Ausblick niedergeschriebenen Überlegungen wird mit den obengenannten Angaben die der vorliegenden Arbeit entsprechende Aufgabenstellung aus der Sicht des Verfassers vollständig umgesetzt und hiermit abgeschlossen.

Literaturverzeichnis

AFMG. *EASE® 4.4 User Manual.* Berlin, Germany : s.n.

Aretz, Mark. 2012. *Combined wave and ray based room acoustic simulation in rooms.* ITA, RWTH Aachen. Berlin : Logos, 2012. Disertation.

Cremer, Lothar und Müller, Helmut. 1976. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik.* Stuttgart : S.Hirzel, 1976. Bd. II.

Cremer, Lothar und Müller, Helmut. 1978. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik.* Stuttgart : S. Hirtzel, 1978. Bd. I.

DIN:61260. 2003. *Electroacoustics - Octave-band and fractional octave band filters.* s.l. : Deutsches Institut für Normung e.V., 2003.

Hoffmann, Josef und Quint, Franz. 2012. *Signalverarbeitung mit MATLAB® und Simulink®, Anwendungsorientierte Simulationen.* Oldenbourg : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2012. Bd. II.

IEC:60268-5. 2009. *Elektroakustische Geräte - Teil 5 Lautsprecher.* s.l. : Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.

ISO:3382. 2009. *Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume.* s.l. : Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.

ISO:9613. 1993. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation; Calculation of the absorption of sound by atmosphere.* 1993. Bd. I, Deutsches Institut für Normung e.V.

Knauber, Fabian, Sönke, Pelzer und Vorländer, Michael. 2013. *Inverse Ray Tracing for the optimization of acoustical properties in auralizations of real rooms.* AIA-DAGA. 2013.

Kuttruff, Heinrich. 2009. *Room acoustics.* 5. London, New York : Spon Press, 2009.

Lerch, Richard, Sessler, Gehard und Wolf, Dietrich. 2009. *Technische Akustik - Grundlagen und Anwendungen.* Berlin Heidelberg : Springer, 2009.

Möser, Michael. 2012. *Technische Akustik.* 9. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012.

Pelzer, Soenke und Vorländer, Michael. 2013. *Inversion of a room acoustics model for the determination of acoustical surface properties in enclosed spaces.* Proceedings of Meetings on Acoustics. 2013, Bd. 19.

Vorländer, Michael. 2008. *Auralisation - Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality.* 1. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008.

Weinzierl, S., et al. 2014. Seminarreihe Audiokommunikation. *Raumakustik. Theorie Messungen und Praxis.* Berlin : s.n., 2014.

Anhang A: Protokollführung der Simulationen

Tabelle A.1: Protokollführung der Simulationen

Datum der Simulation	Dateiname	Raum	Beanspruchter Speicherplatz	Simulationsparameter										Ausgangsparameter				Zweck der Simulation				
				Raumeigenschaften Druck/ Temperatur/ Feuchtigkeit	Raum- volumen in m ³	Raum- fläche in m ²	Anzahl Quellen	Koordinaten Quellen [m]	Anzahl Empfänger	Koordinaten Empfänger [m]	Absorptions-graden	Anzahl der Strahlen (pro Quelle)	Cutoff Reflexions- ordnung	Cutoff Energie- verlust [dB]	Cutoff Zeit [ms]	Impact Chance [%]	Empfänger 1		Empfänger 2	Empfänger 3	Empfänger 4	
17.06.2015	test_room_1.mpc	test_room_1	2.156.575 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	400	340	1	S1(1/1/1)		1	E1(9/7/1)	uniform	1.000	40	-	5.029	0,008	230	-	-	-	Systemtest Uniforme Absorption
25.06.2015	test_room_1_10K.mpc	test_room_1	16.886.001 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	400	340	1	S1(1/1/1)		1	E1(9/7/1)	uniform	10.000	100	60	1.029	2,096	-	-	-	-	Systemtest Erhöhung der Anzahl an Rays
25.06.2015	test_room_1_ChangedAbsorption.mpc	test_room_1	9.375.033 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	400	340	1	S1(1/1/1)		1	E1(9/7/1)	triform	10.000	1.000	60	-	-	1.489	-	-	-	Systemtest Mehrfachabsorption
03.07.2015	test_room_2_2LSPK.mpc	test_room_2	58.019.240 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1/1/1), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1)	Raum: Triform Bett: Biform	100.000	50	60	2.029	5,016	8.256	-	-	-	Systemtest Multisender + Erhöhung der Anzahl an Flächen
21.07.2015	test_room_2_2LSPK_new.mpc	test_room_2	111.226.880 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1,1/1,05/0,98), S2(9,05/0,93/2,98)		1	E1(8.5/7/1)	Raum: Triform Bett: Biform	50.000	40	-	1.029	9,537	10.373	-	-	-	Systemtest Multisender
23.07.2015	test_room_2_5LSPK.mpc	test_room_2	108.222.259 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	5	S1(1/1/2), S2(9/1/3), S3 (3/7/1), S4(2/3/1), S5(9/4/1.5)		1	E1(9/7/1)	Raum: Triform Bett: Biform	20.000	40	-	1.029	3,922	10.859	-	-	-	Systemtest Multisender
31.07.2015	test_room_2_3Seats.mpc	test_room_2	15.210.968 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		3	E1(9/7/1), E2(3/3/1), E3(2/6/1)	Raum: Triform Bett: Biform	10.000	10	-	1.029	2,096	1.157	1.393	1.405	-	Systemtest Multiempfänger
31.07.2015	test_room_2_3Seats_new.mpc	test_room_2	14.781.482 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		3	E1(9/7/1), E2(3/3/1), E3(2/6/1)	Raum: Triform Bett: Biform	10.000	10	-	1.029	2,096	1.135	1.373	1.348	-	Optimierungstest mit identischer Simulationsparameter
31.07.2005	test_room_2_3Seats_new_2.mpc	test_room_2	36.824.850 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		3	E1(9/7/1), E2(3/3/1), E3(2/6/1)	Raum: Triform Bett: Biform	5.000	30	-	-	(keine Angabe weil keine Zeiteinstellung)	1.420	1.771	1.747	-	Optimierungstest mit ungleichen Simulationsparameter
05.08.2015	test_room_2_4Seats.mpc	test_room_2	134.623.232 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		3	E1(9/7/1), E2(3/3/1), E3(2/6/1)	Raum: Triform Bett: Biform	15.000	30	-	0.529	10,734	3.654	4.445	4.411	4.406	Optimierungstest mit exportierter Impulsantwort (*.wav)
19.08.2015	test_room_2_4Seats_2.mpc	test_room_2	1.707.266.048 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	314	314	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		3	E1(9/7/1), E2(3/3/1), E3(2/6/1)	Raum: Triform Bett: Biform	1.000.000	30	-	0.729	98,143	36.234	42.823	44.373	43.950	Test high Impact Chance
01.09.2015	test_room_3_Test_NumOfRays_500K.mpc	test_room_3	260.819.499 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		2	E1(9/7/1), E2(3/3/1)	Uniform	500.000	20	-	1.229	50,403	17.633	19.015	-	-	Simulationstest: Vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierte Impulsantwort
01.09.2015	test_room_3_Test_NumOfRays_50K.mpc	test_room_3	129.092.621 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		2	E1(9/7/1), E2(3/3/1)	Uniform	50.000	20	-	1.229	6,772	8.981	10.322	-	-	Simulationstest: Vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierte Impulsantwort
01.09.2015	test_room_3_Test_NumOfRays_500K.mpc	test_room_3	2.000.017.676 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		2	E1(9/7/1), E2(3/3/1)	Uniform	500.000	50	-	1.229	50,403	58.383	67.575	-	-	Simulationstest: vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierter Impulsantwort. Später auch Optimtest: Uniforme Absorption
11.09.2015	test_room_3_Test_NumOfRays_500K_2.mpc	test_room_3	1.697.431.805 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1)	Uniform	500.000	80	-	1.229	50,403	68.168	-	-	-	Simulationstest: Vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierte Impulsantwort
14.09.2015	test_room_3_Test_2s_3.mpc	test_room_3	380.079.055 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1)	Uniform	100.000	100	-	2.029	5,016	12.365	-	-	-	Simulationstest: Vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierte Impulsantwort
14.09.2015	test_room_3_NumOfRays_3M.mpc	test_room_3	2.000.004.773 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1)	Uniform	3.000.000	120	-	1.529	93,402	48.341	-	-	-	Simulationstest: Vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierte Impulsantwort
16.09.2015	test_room_3_[N2Mps;t1429;n80;ic87_4].mpc	test_room_3	2.000.014.019 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1)	Uniform	2.000.000	80	-	1.429	87,441	72.842	-	-	-	Simulationstest: Vergleich simuliertes Reflektogramm mit simulierte Impulsantwort
25.09.2015	test_room_3_2absorbers.mpc	test_room_3	2.000.012.035 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1)	Verschiedene Kombinationen; um Kostenfunktion zu Analysieren	3.000.000	150	-	1.529	93,402	42.514	-	-	-	Optimierungstest, Kostenfunktion biforme Absorption
29.09.2015	test_room_3_[N1Mps;t2029;n1000;ic40_2].mpc	test_room_3	2.000.065.521 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E2(3/3/1)	Uniform	1.000.000	1.000	-	2.029	40,224	-	19.165	-	-	Optimierungstest, Kostenfunktion uniforme Absorption
04.10.2015	test_room_3_Extremas[500000N,1529s,1000n,35IPC]	test_room_3	1.770.326.415 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E2(3/3/1)	Reflexionsarmer Raum / Hallraum	500.000	1.000	-	1.529	36,432	-	39.467	-	-	Optimtest, extreme Bedingungen
22.10.2015	test_room_3_[5000000N,3029s,300n,68.4IPC,120dBloss].mpc	Rechteckiger Raum	2.000.026.528 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E1(9/7/1), E2(3/3/1)	Frequenzabhängig Biform	5.000.000	300	120	3.029	68,4	7.432	8.774	-	-	Optimtest biforme frequenzabhängige Raumabsorption
24.10.2015	test_room_3_Frequenzabhängig_Biform[5000000N,80n,99,98ICP]	test_room_3	2.000.043.094 Bytes	1013hPa / 20°C / 60%	320	304	2	S1(1/1/2), S2(9/1/3)		1	E2(3/3/1)	Frequenzabhängig Biform 2	5.000.000	80	100	1.229	99,98	-	75.604	-	-	Optimtest biforme frequenzabhängige Raumabsorption

Anhang B: Quellcodes

```
function [ Results ] = RAPO( input_args )
%
% [ Results ] = RAPO( input_args )
%
% The tool Room Absorption Property Optimizer (RAPO) were developed
% to optimize the absorption coefficient of simulated room materials
% by adjusting a ray tracing based simulation taken from EASE(R) to
% a measured room impulse response.
%
% The function handling is described at the user's manual.
%
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Author: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%=====
%% function start

% Settings

savelink = 'C:\Users\NG47E12\Documents\1. Masterarbeit';

loaddata = 'No'; %if Yes, RAPO is going to ask you to open a
                %*.dat file. If No, RAPO is going to ask you
                %to open an existing %*.mat file.

thrdoct = 'Yes'; %if Yes, absorption coefficient are going to
                %be %estimated for each third octave band
                %if No, it is going to be estimated a mean
                %absorption coefficient for each material

Samplerate = 1000; %Measurement and Raysdata need a common sam-
                  %ple %rate

%Air parameters
Pressure = 1013.25; %Pressure in hPa
Temperature = 293.15; %Temperature in Kelvin
Humidity = 60; %Humidity in %
Airparameters = [Pressure Temperature Humidity];
```

```

%optimization settings
alpha0      = 0.5;      %Initial point for optimization
idt         = 80;

%% Load and sort Raysdata information

if strcmp('Yes',loaddata)

    % Load and sort and save Data
    h = msgbox('Reading raytrace file... This could take a while');
    Raysdata_unsort = ReadRaytraceFile;
    close (h)

    [Raysdata, NumOfReceivers] = sorttracedfile(Raysdata_unsort);
    save([savelink '\RAPO\Temp\' 'Raysdata'],'Raysdata')

elseif strcmp('No',loaddata)
    [FileName, PathName] = uigetfile('*.mat','Select an already
        processed ray trace file');
    load([PathName FileName]);
    NumOfReceivers = str2double(inputdlg('Define number of
        receivers','Input',1));
end

%% Load and Process Measurement Data

[FileName, PathName] = uigetfile('*.mat','Select an Impulse Response
    mat file');
IR = load([PathName FileName]);      %Impulse response(s) must be a
                                     vector or a %matrix mxn where m
                                     denotes the impulse %index

FS = str2double(inputdlg('Set impulse response sampling frequency.
    By pressing cancel, RAPO uses a default sampling frequency
    of 48kHz','Input',1));

if isempty(FS)
    FS = 48000;
elseif isnan(FS)
    FS = 48000;
end

Timevector = 0:1/FS:(size(IR,2)-1)/FS;

if strcmp('No',thrdoct)
    for thisReceiver = 1:NumOfReceivers
        [MeasuredData(thisReceiver,:)] = rfl2edc(ir2rfl...
            (IR(thisReceiver,:),Timevector,Samplerate));
    end
end
if strcmp('Yes',thrdoct)
    Fmvec = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1225 ...
        1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000];

```

```

for thisReceiver = 1:NumOfReceivers
    EDCf = rfl2edc(ir2rfl(irfilt(IR(thisReceiver,:)),...
        Timevector,Samplerate));
    for thisFrequency = 1:21    %filtering impulse response be-
                                %tween 100Hz %to 1kHz third fre-
                                %quency band as usual in %EASE
        MeasuredData.(['f' num2str(Fmvec(thisFrequency))...
            'Hz'])(thisReceiver,:) = EDCf(thisFrequency,:);
    end
end
end

save([savelink '\RAPO\Temp\' 'Measurement_Data'], 'MeasuredData')

%% Proseses Simulation

[xdata] = createxdata(Raysdata, Airparameters, thrdoct, ...
    NumOfReceivers);

save([savelink '\RAPO\Temp\' 'xdata'], 'xdata')

%% Optimization via lsqcurvefit

if strcmp('Yes',thrdoct)

    Fmvec = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1225 ...
        1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000];
    xdata.Samplerate = Samplerate;
    xdata.NumOfReceivers = NumOfReceivers;
    x    = alpha0*ones(length(xdata.UniqueMaterials),1);
    xu   = .01*ones(1,length(xdata.UniqueMaterials));
    xo   = .99*ones(1,length(xdata.UniqueMaterials));
    hw = waitbar(0, 'Optimizing absorpion coefficients...');

    for thisFrequency = 1:21
        waitbar(thisFrequency/21,hw)
        ydata = MeasuredData.(['f' num2str(Fmvec(thisFrequency)) ...
            'Hz']);
        helpvar = zeros(1,NumOfReceivers);

        for thisReceiver = 1:NumOfReceivers
            ydata(thisReceiver,:) = ydata(thisReceiver,:) - ...
                ydata(thisReceiver,1);
            helpvar(thisFrequency,thisReceiver) = length(find(...
                ydata(thisReceiver,:)>=ydata(thisReceiver,1)-...
                idt));
        end

        idtstop = logical(1:min(helpvar(thisFrequency,:)));
        ydata = ydata(:,idtstop);
        xdata.Frequency = thisFrequency;
        xdata.idtstop = idtstop;

        %Optimization via lsqcurvefit

```

```

[alpha(thisFrequency,:),resnorm(:,thisFrequency)]= ...
    lsqcurvefit(@creaedc,x,xdata,ydata,xu,xo);

EDC_Sim = creaedc(alpha(thisFrequency,:), xdata);
tvec = 0:1/Samplerate:(length(ydata)-1)/Samplerate;

%compare Seat 1
figure('Name','Energy Decay Comparison')
hold on
plot(tvec,ydata(1,:),'-b','Linewidth',2);
plot(tvec,EDC_Sim(1,:),'-r','Linewidth',2);
title(['Energy Decay at ' num2str(Fmvec(thisFrequency))...
    'Hz'],'FontSize',12,'FontWeight','bold')
hold off
legend('Measurement','Simulation')
xlabel('Time [s]','FontSize',11)
ylabel('EnergyDecay in dB','FontSize',11)
grid on
end

Results.AbsorptionCoefficients = alpha';
Results.Residual = resnorm;
Results.idtStop = helpvar;
close(hw)

elseif strcmp('No',thrdoct)

ydata = MeasuredData;
for thisReceiver = 1:NumOfReceivers
    ydata(thisReceiver,:) = ydata(thisReceiver,:) - ...
        ydata(thisReceiver,1);
    helpvar(:,thisReceiver) = ...
        length(find(ydata(thisReceiver,:) >= ...
            ydata(thisReceiver,1)-idt));
end

idtstop = logical(1:min(helpvar));
ydata = ydata(:,idtstop);

xdata.Frequency = 'Pegelsumme';
xdata.Samplerate = Samplerate;
xdata.NumOfReceivers = NumOfReceivers;
xdata.idtstop = idtstop;
x = alpha0*ones(length(xdata.UniqueMaterials),1);
xu = .01*ones(1,length(xdata.UniqueMaterials));
xo = .99*ones(1,length(xdata.UniqueMaterials));

[alpha, residual, deviation]=lsqcurvefit(...
    @creaedc,x,xdata,ydata,xu,xo);
tvec = 0:1/Samplerate:(length(ydata)-1)/Samplerate;

EDC_Sim = creaedc(alpha, xdata);

%compare Seat 1
figure('Name','Energy Decay Comparison')
hold on

```

```
plot(tvec,ydata(1,:),'-b','Linewidth',2);
plot(tvec,EDC_Sim(1,:),'-r','Linewidth',2);
title('Comparison of Energy Decay
      Curve','FontSize',12,'FontWeight','bold')
hold off
legend('Measurement','Simulation')
xlabel('Time [s]','FontSize',11)
ylabel('EnergyDecay in dB','FontSize',11)
grid on

Results.AbsorptionCoefficients = alpha';
Results.Residual = residual;
Results.Deviation = deviation;
Results.idtStop = helpvar;
Results.TimeVector = tvec;
Results.EDC_Sim = EDC_Sim;
Results.EDC_Measure = ydata;

end

%Save Results
save([savelink '\RAPO\Temp\' 'Results'],'Results')

% function end
%=====
end
```

```

function [ Rays ] = ReadRaytraceFile( PredefinedFileName )
%[ Rays ] = ReadRaytraceFile( PredefinedFileName )
%
% READRAYTRACEFILE returns the information of a ray tracing based
% simulation RAYS exported from EASE(R).
%
% To use this function, the ray tracing simulation should be
% exported from EASE(R) as specified in the RAPO user's manual.
% Otherwise this function must be modified according to the export
% data structure.
%
% First Author: Dr. Kay Kochan
%
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % Modified by: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%=====
%% function start

if nargin < 1
    [FileName,PathName] = uigetfile('*.dat','Select the EASE Trace
    file');
else
    FileName = PredefinedFileName;
    PathName = '';
end
fid = fopen([PathName, FileName], 'r');

%read the file and store it in data
NumberOfLines = 0;
hw = waitbar(0, 'Textdatei wird gelesen...');
ThisRay = 0;
ThoseRays = 0;
ExpectedNumOfRays = ...
    inputdlg('Just for the wait bar, estimate number of rays:');

while (~feof(fid))
    string = fgetl(fid);

    NumberOfLines = NumberOfLines + 1;
    data(NumberOfLines,1) = cellstr(strtrim(string));

    % detect ray hits and store the information in the variable Ray
    if strcmp(data(NumberOfLines), '')
        ThoseRays = ThoseRays + 1;
        data = data(1:end-1);
        ThisRay = ThisRay+1;
        HitTextLines = data(3:end);
    end
end

```

```

for ThisHit = 1:length(HitTextLines)

    cache = ...
    strread(HitTextLines{ThisHit,:}, '%s', 'delimiter', ',');

    HitSurfaceName = cache{1};
    Rays(ThisRay).HitSurfaceName{ThisHit} = ...
        strtrim(HitSurfaceName(strfind(cache{1}, '.')+1:end));

    Rays(ThisRay).Delay(ThisHit,1) = str2double(cache{2});
    Rays(ThisRay).Path(ThisHit,1) = str2double(cache{3});

    Rays(ThisRay).Distance{ThisHit,1} =str2double(cache{7});

    %example to export additional ray tracing information
    %Rays(ThisRay).additionalinformation(ThisHit,1) =...
    %         additionalinformation(cache{n})

    % collect the frequency dependend informations
    for ThisFrequency = 0:20
    %     Rays(ThisRay).LevelIn(ThisHit,ThisFrequency+1) =...
    %         str2double(cache{4+ThisFrequency*2});
    %     Rays(ThisRay).LevelOut(ThisHit,ThisFrequency+1) =...
    %         str2double(cache{5+ThisFrequency*2});
    %
    end

    Rays(ThisRay).Source = Rays(ThisRay).HitSurfaceName{1};
    Rays(ThisRay).Receiver = ...
        Rays(ThisRay).HitSurfaceName{end};
    end
    waitbar(ThoseRays/str2double(ExpectedNumOfRays),hw)
    NumberOfLines = 0;
    clear data;
end
end

close(hw);
feof(fid);

% function end
%=====
end

```

```

function [NewTracedFile, NumOfReceivers]= sorttracedfile(TracedFile)
% [ NewTracedFile, NumOfReceivers ] = sorttracedfile( TracedFile )
%
% SORTTRACEFILE returns a struct NEWTRACEDFILE, witch contains a
% imported ray tracing based simulation data sorted over each
% receiver and over the detection time of each ray. Thus it is
% possible to recreate a reflectogram and to calculate a energy
% decay curve for each receiver.
%
% To use this function, it is required to import the ray tracing
% information via READRAYTRACEFILE.m in MATLAB(R), whose output can
% be directly used as input for SORTTRACEDFILE.
%
% Example:
%     RayTraceData = ReadTraceFile(RayTraceFile)
%     [SortedRayTraceData] = sorttracedfile(RayTraceData)
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Author: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%=====
%% function start

NumOfRays = size(TracedFile,2);

%find and ignore faulty traced rays
idUsableRays = zeros(size(TracedFile));
newrayID = 0;
hw = waitbar(0,'sorting Rays...');

for ThisRay = 1:NumOfRays

    tunsort(ThisRay) = TracedFile(ThisRay).Delay(end);
    Receivers(ThisRay) = str2double(TracedFile(ThisRay).Receiver);

    waitbar(ThisRay/NumOfRays,hw)
end

close (hw)
Receivers = sort(unique(Receivers));
NumOfReceivers = length(Receivers)

[~,idx]=sort(tunsort);
TracedFile = TracedFile(idx);

%sort TraceFile structure over amount of receivers
if length(Receivers) > 1
    for ThisReceiver = 1:NumOfReceivers;

```

```
idRay = 0;
hw = waitbar(0,['sorting Receivers ' num2str(...
    ThisReceiver) '/' num2str(length(Receivers)) '...']);

for ThisRay = 1:NumOfRays
    if str2double(TracedFile(ThisRay).Receiver) == ...
        ThisReceiver;

        idRay = idRay+1;
        Receiverstruct(idRay) = TracedFile(ThisRay);
        waitbar(ThisRay/NumOfRays,hw);

    end

end
NewTracedFile.(['Receiver_' num2str(ThisReceiver)]) =...
    Receiverstruct;
clear Receiverstruct
close (hw)
end
else
    NewTracedFile.Receiver_1 = TracedFile;
end

% function end
%=====
end
```

```

function [Hits, idSurface]=CalculateSurfaceHits (RayTraceData)
%[Hits, idSurface]=CalculateSurfaceHits (RayTraceData)
%
% CALCULATESURFACEHITS returns the amount of HITS of each ray at
% each surface contained in IDSURFACE according to the ray tracing
% based simulation data RAYTRACEDATA exported from EASE(R). HITS is
% a [mxn]-matrix, where 'm' denotes the amount of simulated rays and
% 'n' the amount of considered surfaces.
%
% Source and receiver are also contained in output HITS. According
% to default settings of EASE(R), sources are usually signaled
% with 'S' and surfaces with 'F'. Receivers don't carry a letter.
%
% To use this function, the exported simulation data from EASE must
% be imported in Matlab with the function 'ReadTraceFile.m', whose
% output can be directly used as input for this function
%
% Example:
%
% - RayTraceData = ReadTraceFile(RayTraceFile)
% - [Hits, idSurface] = CalculateSurfaceHits(RayTraceData)
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Author: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

=====
%% function start

%set start Parameters
NumOfRays = size(RayTraceData,2);

%create hitsurface matrix
Wallhits = zeros(1,length(NumOfRays));

for ThisRay = 1:NumOfRays;
    Wallhits(ThisRay)
length(RayTraceData(ThisRay).HitSurfaceName);
end

NumOfWallHits = max(Wallhits);
HitSurfaceMatrix = cell(NumOfRays,NumOfWallHits);

for ThisRay = 1:NumOfRays
    HitSurfaceMatrix(ThisRay,1:Wallhits(ThisRay)) = RayTraceData...
(ThisRay).HitSurfaceName;
end

%Find Surfaces
idEmpty = cellfun(@isempty,HitSurfaceMatrix);

```

```
idSurface = unique(HitSurfaceMatrix(~idEmpty));

Hits = zeros(NumOfRays, size(idSurface,1));

%calculate amounts of hits at each surface for each Ray
for ThisRay = 1:NumOfRays;
    for ThisSurface = 1:length(idSurface);
        Hits(ThisRay,ThisSurface) = nansum(strcmp(...
            idSurface(ThisSurface), HitSurfaceMatrix(ThisRay,:)),2);
    end
end

% function end
%=====
end
```

```

function [MediumDamping,fvec] = CalculateMediumDamping(...
    AtmospherePressure,Temperature, Humidity)
%
%[MediumDamping,fvec] = CalculateMediumDamping(...
%    AtmospherePressure,Temperature, Humidity)
%
% CALCULATEMEDIUDDAMPING returns sound pressure damping properties
% of air as a row vector MEDIUDDAMPING as specified in ISO 9613.
% Output FVEC contains those frequencies, which are considered for
% the calculation.
%
% To use this function, following inputs arguments should be de
% fined:
%
% - Atmosphere pressure in hPa,
% - Atmosphere temperature in Kelvin
% - Humidity in % (H=60 -> 60% Humidity)
%
% Output MEDIUDDAMPING denotes damping property of air in dB/m.
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Author: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%=====
%% function start

%Calculate molar concentration of water vapour, h, on air
h = (Humidity*10^(-6.8346*((273.16/Temperature)^1.261)+4.6151))/...
    (AtmospherePressure/1013.25);

%Calculate relaxation frequencies, frO and frN, of oxigen and nitrogen
frO = (AtmospherePressure/1013.25)*(24+(4.04*(10^4)*h*((0.02+h)/...
    (0.391+h))));
frN = (AtmospherePressure/1013.25)*((Temperature/293.15)^(-0.5))...
    *(9+280*h*exp(-4.170*((Temperature/293.15)^(-1/3))-1));

%Calculate Damping Coefficient, m, for each third octave band
fvec = [100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 ...
    2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000];
MediumDamping = zeros(1,length(fvec));
for ThisFrequency = 1:length(fvec)
    MediumDamping(ThisFrequency) = 8.686*fvec(ThisFrequency)^2*...
        ((1.84*10^(-11))*(AtmospherePressure/1013.25)^(-1)*...
        (Temperature/293.15)^(0.5))+((Temperature/293.15)^(-5/2))*...
        ((0.01275*exp(-2239.1/Temperature))*...
        ((frO+((fvec(ThisFrequency)^2)/frO))^(-1)))+(0.1068*...
        exp(-3352.0/Temperature))*...
        ((frN+((fvec(ThisFrequency)^2)/frN))^(-1))));
end
% function end
%=====
end

```

```

function [IRFILT]= irfilt(IR)
%[IRFILT]= irfilt(IR)
%
% IRFILT filters an impulse response in third octave bands based on
% EN ISO 18233.
%
% To use this function, check following details:
%
% - IR is a row vector, which contains a measured impulse response
% - Both inputs are required to run IRFILT
% - The filter design is shown at line 46
%
% The Output argument IR_FILTERED contains all filtered impulse
% responses between 100Hz and 10kHz third octave band. These are
% usually the bandwidth used for EASE ray tracing simulation.
%
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Autor: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%=====
%% function start

%design third octave Bandpass
fm = 1000; %Reference frequency in Hz as speciefied in EN DIN 61260
n1 = -10:10;%Index for third octave frequency filtering

%set inicial conditions for filtering
IRFILT = zeros(length(n1),length(IR));

for ThisFrequency = n1+11

    %third octave mid frequency
    f = fm*10^((3/10)*((ThisFrequency-11)/3));

    %filter design
    D = fdesign.octave(3,'class 1','N,F0',2,f,48000);
    H = design(D);

    %filter impulse response
    IRFILT(ThisFrequency,:) = filter(H,IR);
end

%function end
%=====
end

```

```

function [Reflectogram, NewTimeVector]= ir2rfl(IR, time, SampleRate)
%[Reflectogram, NewTimeVector]= ir2rfl(IR, time, SampleRate)
%
% IR2RFL returns a vector containing the discrete energy of a
% measured impulse response IR at each time slot given at output
% vector %NEWTIMEVECTOR.
%
% To use this function check following details:
%
% - This function is linked to the function RESAMPREFL. Thus
%   MATLAB must have access to RESAMPRFL
%
% - If needed, a new sample rate SAMPLERATE in Hz can be
%   implemented for the output REFLECTOGRAM.
%
% - IR can be a matrix or a vector.
%
% - The input TIME must be a vector. The length of TIME must
%   accord to the second dimension of IR
%
% This has been developed for the tool RAPO to calculate an Energy
% Decay Curve from measurements.
%
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Author: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%=====
%% function start

tstart = time(1);
tend = time(end);
ER = IR.^2;
NumOfIR = size(ER,1);

if nargin < 2
    error('TimeVector is needed')

elseif nargin < 3
    for thisIR = 1:NumOfIR
        EnergyResponse = ER(thisIR,:);
        Refl = zeros(1,length(time));
        for ThisSample = 1:length(time)-1
            Refl(ThisSample) = trapz([time(ThisSample)...
                time(ThisSample+1)], [EnergyResponse(ThisSample)...
                EnergyResponse(ThisSample+1)]);
        end
        Reflectogram(thisIR,:) = Refl;
    end
    NewTimeVector = time;

```

```

else
    OriginalSamplingRate = (length(time)-1)/(tend-tstart);

    for thisIR = 1:NumOfIR
        EnergyResponse = ER(thisIR,:);
        NewTimeVector = tstart:(1/SampleRate):tstart+...
            ((length(EnergyResponse)-1)/SampleRate);

        for ThisSample = 1:length(NewTimeVector)-1
            Refl(ThisSample) = trapz([NewTimeVector(ThisSample)...
                NewTimeVector(ThisSample+1)],...
                [EnergyResponse(ThisSample) ...
                EnergyResponse(ThisSample+1)]);
        end

        Reflectogram(thisIR,:) = resamprefl(Refl,time,SampleRate);

        if thisIR == NumOfIR
            [~,NewTimeVector] = resamprefl(Refl,time,SampleRate);
        end
    end

    NewTimeVector = NewTimeVector(1:end-1);

end

% function end
%=====
end

```

```

function [ SampledRefl,NewTimeVector ] = resamprefl(Reflectogram,...
    OriginalTimeVector, SamplingRate)
%
%[ SampledRefl,NewTimeVector ] = resamprefl(Reflectogram, %Original
%   TimeVector, SamplingRate)
%
% RESAMPREFL returns a reflectogram SAMPLEDREFL considering a new
% sampling frequency SAMPLERATE for the input REFLECTOGRAM.
%
% To use this function:
%   - REFLECTOGRAM can be a vector or a matrix containing the
%     energy values of each reflectogram row wise.
%   - ORIGINALTIMEVECTOR is a row vector of the same length
%     according to the second dimension of REFLECTOGRAM
%   - All parameters must be given
%
%
%
%   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   % First Author: Jens Hellemann                               %
%   % HAW-Hamburg                                                %
%   % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau                %
%   %                                                            %
%   % 17.12.2015                                                %
%   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%=====
%% function start

tstart = OriginalTimeVector(1);
tend = OriginalTimeVector(end);
n = ((tend - tstart)*SamplingRate);
NewTimeVector = linspace(tstart,tend,n);
%Resample if Reflectogram is a vector
if size(Reflectogram,1) == 1
    for ThisSample = 1:length(NewTimeVector);
        if ThisSample <= length(NewTimeVector)-1;

            helpvar = ...
                find(OriginalTimeVector>=NewTimeVector(ThisSample)...
                    & OriginalTimeVector<NewTimeVector(ThisSample+1));

            if ~isempty(helpvar)
                SampledRefl(ThisSample) = ...
                    nansum(Reflectogram(helpvar));
            else
                SampledRefl(ThisSample) = 0;
            end

        elseif ThisSample == length(NewTimeVector)

            helpvar = ...
                find(OriginalTimeVector>=NewTimeVector(ThisSample));

```

```

        if length(helpvar) > 1
            SampledRefl(ThisSample) = ...
                nansum(Reflectogram(helpvar:end));
        elseif length(helpvar) == 1
            SampledRefl(ThisSample) = Reflectogram(end);
        elseif isempty(helpvar)
            disp('Sampling Error')
            break
        end
    end
end

%Resample if Reflectogram is a matrix
elseif size(Reflectogram,1) > 1
    for ThisColumn = 1:size(Reflectogram,1);
        for ThisSample = 1:length(NewTimeVector)-1;

            helpvar = find(OriginalTimeVector(ThisColumn)>=...
                NewTimeVector(ThisSample) & OriginalTimeVector...
                (ThisColumn)<NewTimeVector(ThisSample+1));

            if isempty(helpvar)
                SampledRefl(ThisColumn,ThisSample) = 0;
            elseif ThisSample == length(NewTimeVector)-1
                SampledRefl(ThisColumn,ThisSample) = ...
                    mean(Reflectogram(ThisColumn, (helpvar(end)+1):end));
            end

            SampledRefl(ThisSample) =...
                mean(Reflectogram(ThisColumn,helpvar));
        end
    end
end

% function end
%=====
end

```

```

function [ EDC ] = rfl2edc( Reflectogram )
%[ EDC ] = rfl2edc( Reflectogram )
%
% RFL2EDC returns an energy decay curve from a reflectogram. The
% input "reflectogram" can be a matrix or a vector. If REFLECTOGRAM
% is a matrix, each energy decay curve is going to be calculated row
% wise.
%
%
%      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      % First Author: Jens Hellemann                               %
%      % HAW-Hamburg                                               %
%      % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau                %
%      %                                                            %
%      % 17.12.2015                                               %
%      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%=====
%% function start

    EDC = 10*log10(fliplr(cumsum(fliplr(Reflectogram),2))/1e-12);

% function end
%=====
end

```

```

function [xdata] = createxdata(Raysdata,Airparameters,...
    thrdoct,NumOfReceivers )

%[xdata] = createxdata(Raysdata,Airparameters,...
%   thrdoct,NumOfReceivers )
%
% CREATEXDATA returns a XDATA struct containing the information of a
% ray tracing based Simulation data RAYSDATA via EASE(R) to recreate
% an absorption coefficient dependent and receiver related energy
% decay curve via function CREAEDC. Thus, the output XDATA is needed
% from RAPO to solve the a ray tracing based optimization problem.
%
% To use this function, check following details:
%
% - RAYSDATA must be imported and sorted via ReadRaytraceFile.m
%   and sorttracedfile.m
%
% - Input "Airparameters" is a vector a = [p T H], with p =
%   Airpressure in hPa, T = Temperature in Kelvin, and
%   H = humidity %
%
% - If a distinction of each third octave bandwidth is needed
%   insert thrdoct = 'Yes', else insert thrdoct = 'No'
%
% - NUMOFRECEIVERS denotes the amount of receivers exported from
%   the simulation data.
%
% - CREATEXDATA must be provided with all four input parameters.
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   First Author: Jens Hellemann
%   HAW-Hamburg
%   Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
%   17.12.2015
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%=====
%% function start

Materials = ReadMaterialFile;
UniqueMaterials = unique(Materials(:,2));
xdata.UniqueMaterials = UniqueMaterials;

for thisReceiver = 1:NumOfReceivers
    ThisData = Raysdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]);
    NumOfRays = length(ThisData);

    %Initial conditions
    L0 = ThisData(1).LevelOut(1,:);
    Delay = zeros(1,NumOfRays);

    for ThisRay = 1:NumOfRays
        Delay(ThisRay) = (ThisData(ThisRay).Delay(end))/1000;
    end
end

```

```

end

%Calculate energy loss by air damping
[M] = CalculateMediumDamping(Airparameters(1), ...
    Airparameters(2), Airparameters(3));

%calculate Energy Loss
if strcmp('Yes',thrdoct)
    dLlossbyairdamping = zeros(21,NumOfRays);
elseif strcmp('No',thrdoct)
    dLlossbyairdamping = zeros(1,NumOfRays);
end

dLlossbydistancelaw = zeros(1,NumOfRays);

for ThisRay = 1:NumOfRays
    dLlossbydistancelaw(ThisRay) = ...
        20*log10(ThisData(ThisRay).Path(end));

    Lloss = M.*(ThisData(ThisRay).Path(end));
    dL = L0-Lloss;
    if strcmp('Yes',thrdoct)
        dLlossbyairdamping(:,ThisRay) = (L0-dL)';
    elseif strcmp('No',thrdoct)
        dLlossbyairdamping(ThisRay) = ...
            Pegelsumme(L0) - Pegelsumme(dL);
    end
end

%Calculate HitParameters
[Hits,Surfaces]=CalculateSurfaceHits(ThisData);
idnonWalls = cellfun(@isempty,regexp(Surfaces,'^F'));
idWalls = idnonWalls == 0;
Hits = Hits(:,idWalls');

% find unique materials and convert "Hit"-matrix
MaterialdependantHits = ...
    zeros(NumOfRays,length(UniqueMaterials'));

for ThisMaterial = 1:length(UniqueMaterials);
    idSurface = ismember(Surfaces(idWalls), Materials(...
        strcmp(Materials(:,2),UniqueMaterials(...
            ThisMaterial)),1));
    MaterialdependantHits(:,ThisMaterial) = ...
        nansum(Hits(:,idSurface),2);
end

xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).Materialhits =...
    MaterialdependantHits;

if strcmp('Yes',thrdoct)
    xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).L0 = L0;
    xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).E0 = ...
        10^(-12)*10.^(L0/10);
end

```

```
elseif strcmp('No',thrdoct)
    xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).L0 = ...
        Pegelsumme(L0);
    xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).E0 = ...
        nansum(10^(-12)*10.^(L0/10),2);
end

xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).Distancelaw = ...
    dLlossbydistancelaw;
xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).Airdamping = ...
    dLlossbyairdamping;
xdata.(['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).Delay = Delay;

end

% function end
%=====
end
```

```

function [ f ] = creaedc(x, xdata)
%[ f ] = creaedc(x, xdata)
%
% CREAEDC returns a frequency dependent energy decay curve F
% according to given absorption coefficients x.
%
% To use this function check following details:
%
% - the input "xdata" contains the needed parameters to calculate
%   the energy decay curve as function of x. This variable
%   is a struct and has to be calculated via function
%   createxdata.m
%
% - the input x contains row wise a single frequency dependent
%   absorption coefficients for each wall material included in a
%   ray tracing based Simulation via EASE
%
%       x = [alpha1, alpha2, ... , alphaN]'
%
% - This Function considers just one frequency band. If the
%   energy decay curve of more than one frequency band is needed,
%   this function must be implemented in a loop.
%
% - RAPO uses this function to solve the non-linear last square
%   optimization problem via LSQCURVEFIT. If this function
%   is used without RAPO, following settings must to be
%   implemented:
%
%       - xdata.Samplerate; in [Hz] to specify sampling rate
%
%       - xdata.NumOfReceivers; to specify the amount of
%         receivers
%
%       - xdata.Frequency = 'Pegelsumme'; for mean absorption
%         properties or...
%       - xdata.Frequency = i, where i denotes the index of
%         following frequency band vector:
%
%       - Fmvec = [100 125 160 200 ... 10000]
%
%           Example: xdata.Frequency = 3
%           -> calculate the EDC of 160Hz third octave band
%
%       - xdata.SamplingRate in [Hz] to resample the
%         reflectogram
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Autor: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

```

```

=====
%% function start

if ischar(xdata.Frequency)

    f = zeros(xdata.NumOfReceivers,length(xdata.idtstop));

    for thisReceiver = 1:xdata.NumOfReceivers

        dElossbyhit = exp(xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].Materialhits*log(1-x));
        Elossbyhits = xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].E0.*(dElossbyhit');
        Llossbyhits = xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].L0-10*log10(Elossbyhits/(10^(-
            12))));

        %Calculate reflectogram
        Reflectogram_raytracing = 10.^((xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].L0*ones(1,length(...
            xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].Distancelaw))-Llossbyhits-...
            xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].Distancelaw-...
            xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].Airdamping)/10);

        %Resample reflectogram and Lrevision
        Resamplefun = @(x,y,z)resamprefl(x,y,z);

        [NEWReflectogram_Calc, ~] = Resamplefun(double(...
            Reflectogram_raytracing),xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].Delay, xdata.Samplerate);

        EDC = 10*log10(fliplr(cumsum(...
            fliplr(NEWReflectogram_Calc))));

        f(thisReceiver,:) = EDC(xdata.idtstop)-EDC(1,1);
    end

else

    f = zeros(xdata.NumOfReceivers,length(xdata.idtstop));

    for thisReceiver = 1:xdata.NumOfReceivers

        dElossbyhit = exp(xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].Materialhits*log(1-x));
        Elossbyhits = xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].E0(xdata.Frequency).*(dElossbyhit
            ');
        Llossbyhits = xdata.(['Receiver_' ...
            num2str(thisReceiver)].L0(xdata.Frequency)-...
            10*log10(Elossbyhits/(10^(-12))));
    end
end

```

```

%Calculate Reflectogram
Reflectogram_raytracing = 10.^((xdata.(['Receiver_' ...
    num2str(thisReceiver)]) .L0(xdata.Frequency)*...
    ones(1,length(xdata.(['Receiver_' ...
    num2str(thisReceiver)]).Distancelaw))-Llossbyhits-...
    xdata.(['Receiver_' ...
    num2str(thisReceiver)]).Distancelaw-xdata.(...
    ['Receiver_' num2str(thisReceiver)]).Airdamping(...
    xdata.Frequency,:))/10);

%Resample Reflectogram and Lrevision
Resamplefun = @(x,y,z) resamprefl(x,y,z);

[NEWReflectogram_Calc, ~] = Resamplefun(double(...
    Reflectogram_raytracing),xdata.(['Receiver_' ...
    num2str(thisReceiver)]).Delay, xdata.Samplerate);

EDC = 10*log10(fliplr(cumsum(...
    fliplr(NEWReflectogram_Calc))));

f(thisReceiver,:) = EDC(xdata.idtstop)-EDC(1,1);

    end
end

% function end
%=====
end

```

```

function [ t20, t30 ] = calextraT60( edc, t )
%[ t20, t30 ] = calextraT60( edc, t )
%
% CALEXTRAT60 returns de extrapolated reverberation time T20 and T30
% of an energy decay curve EDC as function of the time T. Therefore,
% this function uses a linear regression via POLIFIT.
%
% To use this function, check following details:
%
% - EDC is a row vector, which contains the discrete energy decay
%   of a diffuse sound field as function of the time T.
% - T is a row vector of the same length as EDC
%
%
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% % First Author: Jens Hellemann %
% % HAW-Hamburg %
% % Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau %
% % %
% % 17.12.2015 %
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%=====
%% function start

%Regression Parameters
EDChelp = edc-edc(1,1);
n20 = find(EDChelp<(-5) & EDChelp>(-25));
n30 = find(EDChelp<(-5) & EDChelp>(-35));

EDCrev20 = edc(1,n20); %Section for Reverberation calculation T20
EDCrev30 = edc(1,n30); %Section for Reverberation calculation T30
tvec20 = t(n20); %timevector for reverberation calculation T20
tvec30 = t(n30); %timevector for reverberation calculation T30

%Linear Regression T20
LRT20 = polyfit(tvec20,EDCrev20,1);
t20= -60/LRT20(1); %Linear regression slope for T20

%Linear Regression T30
LRT30 = polyfit(tvec30,EDCrev30,1);
t30 = -60/LRT30(1); %Linear regression slope for T30

%function end
%=====
end

```

```

function [ Summe ] = Pegelsumme(L,dim)
%[ Summe ] = Pegelsumme(L,dim)
%
% PEGELSUMME returns the total sound intensity level of L in dB.
%
% To use this function check following details:
%
% - SPL can be a vector or a matrix. For vector input L, SUMME is
%   the sum of the non-NaN elements in L. For matrix input, SUMME
%   is a vector containing the sum of non-NaN elements in each
%   column or each row according to the selected dimension DIM.
%
% - For N-D arrays, NANSUM operates along the highest
%   non-singleton dimension.

%=====
%% function start

if nargin==1
    [~,dim]=max(size(L));
end
Summe=10*log10(nansum(10.^(L/10),dim));

%function end
%=====
end

```

Anhang C: Bedienungsanleitung RAPO