

Übekabine eines Marimbaphons

Masterarbeit

durchgeführt von

Thomas Kumar, BSc

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

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

Betreuer/Begutachter: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, im November 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine relativ kleine schallisolierte Übekabine für Marimbaphon raumakustisch untersucht. Dabei wurde die Akustik dieser durch verschiedenste Konfigurationen mit porösen Absorbern teils drastisch verändert. Die daraus erhaltenen Messergebnisse wurden miteinander verglichen sowie mit denen eines gewöhnlichen Überaums mit gängigen Abmessungen gegenübergestellt. Bei den Messungen in der Übekabine wurden normative Anforderungen bewusst missachtet und deren Auswirkungen auf die Messergebnisse nachvollzogen. Es konnte gezeigt werden, dass in Umgebungen mit geringen Nachhallzeiten die Grenzen des Konflikts zwischen Zeit- und Frequenzauflösung erreicht werden. Die Filterung mit Terzbandfiltern hoher Ordnung verursachte vor allem zu tieferen Frequenzen hin gravierende Messfehler. Als mögliche Alternative zu den gängigen breitbandigen Messungen mit anschließender Filterung wurden in weiterer Folge Einzelsinussmessungen durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass die resultierenden Abklingkurven quasi nur bei Anregung einer einzelnen Mode und Messung in einem ihrer Druckmaxima einen annähernd glatten Verlauf aufweisen. Die Bestimmung des -60 dB Pegelabfalls durch lineare Extrapolation wurde für die Frequenzen und Messpositionen, an denen starke Welligkeiten in den Abklingkurven entstanden, in Frage gestellt. Zudem konnte durch Messungen des Schalldruckpegelverlaufs veranschaulicht werden, dass durch Erstreflexionen stark ausgeprägte Pegeleinbrüche aufgrund von destruktiven Interferenzen auftreten.

Abstract

The primary subject of this thesis was to look into the room acoustics of a relatively small soundproofed booth, which is used for practicing Marimba. Therefore, the acoustics of that booth was changed radically in parts via different configurations with porous absorbers. The measurement results were checked against each other and confronted with those of a usual room with common dimensions. During the measurements inside the booth normative requirements were disobeyed on purpose. The consequent effects on the measurement results were tracked. It could be shown, that in surroundings with low reverberation times the limits of the conflict between time and frequency resolution are reached. The filtering with high-order one-third octave band filters caused grave measuring errors, especially towards lower frequencies. As a potential alternative to the usual broadband measurements with subsequent filtering, single sine measurements were implemented. At this was discovered, that the resulting decay curves were only smooth, when exciting just a single mode and measuring in one of the sound pressure maxima. The assignation of the -60 dB level decay via linear extrapolation of decay curves with strong waviness got disputable. Furthermore, severe notches in the sound pressure level spectrum due to destructive interferences of early reflections were displayed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Angestrebte Ziele	2
1.3	Zusammenfassung.....	2
2	Akustik des Marimbaphons	3
2.1	Aufbau.....	3
2.1.1	Klangstäbe	4
2.1.2	Resonatoren	5
2.1.3	Spezifikationen des genutzten Marimbaphons.....	6
2.2	Spektrum des abgestrahlten Klangs	8
2.3	Zusammenfassung.....	9
3	Raumsituationen	11
3.1	Überaum.....	11
3.2	Übekabine	11
3.2.1	Raumakustische Simulation	11
3.2.2	Überlegungen zu voraussichtlichen Schwierigkeiten.....	15
3.3	Zusammenfassung.....	16
4	Erste Messreihe	17
4.1	Messequipment und Konfiguration.....	17
4.2	Messungen im Überaum	19
4.3	Messungen in der Übekabine	21
4.3.1	Messaufbau.....	21
4.3.2	Gemessene Konfigurationen	22
4.3.3	Messablauf.....	22
4.4	Zusammenfassung.....	24
5	Auswertungen und erste Erkenntnisse	25
5.1	Überaum.....	26
5.2	Übekabine	29
5.2.1	Erste Auswertungen der Nachhallzeitverläufe und raumakustischen Gütemaße.....	29
5.2.2	Analytische Berechnung der Nachhallzeitverläufe	34
5.2.3	Einfluss der verwendeten Filter.....	36
5.2.4	Zweite Auswertung der Nachhallzeitverläufe	50

5.2.5 Auswertungen der Schalldruckpegelverläufe.....	53
5.2.6 Subjektiver Höreindruck	59
5.3 Zusammenfassung.....	59
6 Zweite Messreihe	61
6.1 Messkonfiguration.....	61
6.1.1 Messequipment und Einstellungen.....	62
6.1.2 Messaufbau.....	64
6.1.3 Messablauf.....	66
6.2 Auswertung der Nachhallzeitmessungen	70
6.3 Auswertung der Einzelsinusmessungen	74
6.3.1 Algorithmische Auswertung der Abklingzeiten.....	74
6.3.2 Manuelle Analyse der An- und Abklingvorgänge	79
6.3.3 Untersuchung der Messsignalwellenformen	87
6.3.4 Schalldruckpegel im eingeschwungenen Zustand.....	91
6.3.5 Erkenntnisse	94
6.4 Auswertung der Schalldruckpegelverläufe	95
6.5 Nähere Untersuchungen zur Ausprägung von destruktiven Erstreflexionen	99
6.5.1 Einfluss des Quelllautsprechertyps	99
6.5.2 Einfluss von geringfügigen Positionsänderungen des Quelllautsprechers.....	101
6.5.3 Einfluss der Ausrichtung der Quelllautsprechermembran	102
6.5.4 Dämpfung der destruktiv interferierenden Erstreflexionen.....	104
6.5.5 Erkenntnisse und möglicher Erklärungsansatz.....	106
6.6 Subjektiver Eindruck.....	108
6.7 Zusammenfassung.....	109
7 Konklusion und Ausblick	111
Anhang A1 – An- und Abklingkurven (Eckmessungen)	113
Anhang A2 – Messsignalwellenformen (Eckmessungen)	127
Anhang B1 – An- und Abklingkurven (Marimbatonmessungen)	141
Anhang B2 – Messsignalwellenformen (Marimbatonmessungen)	167
Anhang C – Softwaretools	193

Literaturverzeichnis

[ÖNORM EN ISO 3382-1] ÖNORM EN ISO 3382-1: *Akustik – Messung von raumakustischen Parametern, Teil 1: Aufführungsplätze*. Austrian Standards Institute, Wien, 2009

[ÖNORM EN ISO 3382-2] ÖNORM EN ISO 3382-2: *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik, Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*. Austrian Standards Institute, Wien, 2009

[ÖNORM EN ISO 18233] ÖNORM EN ISO 18233: *Akustik – Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2006

[ÖVE/ÖNORM EN 61260+A1] ÖVE/ÖNORM EN 61260+A1: *Elektroakustik – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik und Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2003

[GUTMANN] GUTMANN Peter, Projektarbeit: *Nachhallakustik langgestreckter Räume*. Graz, 2007

[KUMAR] KUMAR Thomas, Bachelorarbeit: *Amplitudengangoptimierung am Studio-Abhörplatz durch Resonanzabsorber*. Graz, 2016

[SPÖTL1] SPÖTL Jakob, Projektarbeit: *Implementierung einer Nachhallzeitmessung mit Sinus-Sweep*. Graz, 2013

[SPÖTL2] SPÖTL Jakob, Masterarbeit: *Untersuchung des Einflusses der Mikrofonpositionen in einem Hallraum*. Graz, 2014

[FUCHS SPÄH ZHA] FUCHS Helmuth, SPÄH Moritz, ZHA Xueqin: *Messung des effektiven Absorptionsgrades in kleinen Räumen*. Rundfunktechnische Mitteilungen Heft 3, 1996

[GÖRNE] GÖRNE Thomas: *Mechanische Schwinger: Saiten, Stäbe, Membranen, Platten*. HAW Hamburg, 2009

[JIANG NOCKE SPÄH ZHA] JIANG G., NOCKE C., SPÄH M., ZHA X.: *Neuer Laborraum für Untersuchungen an Schallabsorbern bei tiefen Frequenzen*. IBP-Mitteilung 317, 1997

[KUTTRUFF] KUTTRUFF Heinrich: *Eigenschaften und Auswertung von Nachhallkurven*. III. Physikalisches Institut der Universität Göttingen, 1958

[MORRISON ROSSING YOO] MORRISON Andrew, ROSSING Thomas, YOO Junehee: *Acoustics of percussion instruments: An update*. Physics Department, Northern Illinois University, DeKalb, 2004

[OELMANN ZHA] OELMANN Jürgen, ZHA Xueqin: *Zur Messung von „Nachhallzeiten“ bei geringer Eigenfrequenzdichte*. Rundfunktechnische Mitteilungen Heft 6, 1986

[ROSSING1] ROSSING Thomas: *Acoustics of percussion instruments: Recent progress*. Physics Department, Northern Illinois University, DeKalb, 2001

[SCHROEDER] SCHROEDER Manfred Robert: *New Method of Measuring Reverberation Time*. Bell Telephone Laboratories, Inc., Murray Hill, New Jersey, 1964

[RA] GRABER Gerhard, WESELAK Werner, Skriptum der Vorlesung: *Raumakustik*. Version 5.5, WS2014/15

[TA] WESELAK Werner, Skriptum der Vorlesung: *Technische Akustik*. SS2016

[FLETCHER ROSSING] FETCHER Neville, ROSSING Thomas: *The Physics of Musical Instruments*. Springer, 1998

[ROSSING2] ROSSING Thomas: *Science of percussion instruments*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000

[FASOLD VERES] FASOLD Wolfgang, VERES Eva: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen, Berlin 1998

[SMITH] SMITH Steven W.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing: Second Edition*. California Technical Publishing, San Diego 1999

Symbol-Quellenangaben

Das in dieser Arbeit verwendete Lautsprechersymbol stammt von EpicCoders und wurde unter der „CC Attribution 3.0 Unported“-Lizenz auf <https://icon-icons.com/de/symbol/Lautsprecher/64764> (15.11.2018) kostenlos zur Verfügung gestellt.

Das verwendete Mikrofonsymbol stammt von J.P.Lon und wurde unter den Bedingungen der „GNU-Lizenz für freie Dokumentation“ auf <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Mic-IEC-Symbol.svg> (15.11.2018) kostenlos zur Verfügung gestellt.

Die für Abb. 4.5 und Abb. 6.5 verwendete symbolhafte Darstellung einer Marimbaklaviatur wurde aus <https://www.vancore.nl/wp-content/uploads/2017/08/productsheet-ccm-8001.pdf> (14.10.2018) entnommen.

Genderhinweis

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Masterarbeit die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.¹

¹ Zitat von <http://forum.asasonline.com/masterarbeit/gender-hinweis-oder-geschlechtsneutrale-formulierung-in-der-masterarbeit/> (15.11.2018)

1 Einleitung

Die gewohnte Übeumgebung – ein Raum mit $\sim 30 \text{ m}^2$ Grundfläche ($\sim 100 \text{ m}^3$ Volumen) – eines Marimba-Spielers wird aufgrund des ein- und austretenden Schallpegels von einer schallisolierten Übekabine – eine Konstruktion mit $\sim 5 \text{ m}^2$ Grundfläche ($\sim 10 \text{ m}^3$ Volumen) – ersetzt. Die Übekabine kann in verschiedenen – voneinander teils drastisch unterschiedlichen – Raumausstattungs Zuständen untersucht werden. In diesem Kapitel sollen nun die Problemstellung sowie die angestrebten Ziele der Arbeit formuliert werden.

1.1 Problemstellung

Insbesondere in sehr kleinen quaderförmigen Räumen kommt es in der Regel zu massiven raumakustischen Problemen. Hauptverantwortlich hierfür ist die Lage von sogenannten Raummoden im Frequenzbereich, welche sowohl den Schalldruckpegelverlauf als auch die Abklingvorgänge im Inneren der Räumlichkeit gravierend beeinflussen und die Entstehung eines diffusen Schallfelds verhindern. Zudem sorgen die geringen Abstände zwischen Hör- bzw. Mikrofon- und Quellpositionen sowie Raumbegrenzungsflächen – solange diese nahezu schallhart ausgeführt sind – für starke Reflexionen, welche zu Kammfiltern sowie einer erhöhten wahrgenommenen Lautheit führen.

Eine weitere Problematik stellen geringe Raumabmessungen hinsichtlich der Durchführbarkeit sowie Gültigkeit von normativ geregelten Messungen dar. Geforderte Mindestabstände zwischen Quell- und Mikrofonpositionen sowie Begrenzungsflächen können nicht eingehalten werden. Zudem ist die Nachhallzeit direkt proportional zum Volumen der Räumlichkeit. Besonders wenn aus den vorhin genannten Gründen eine Dämpfung der Reflexionen erfolgt, ist von äußerst geringen Nachhallzeiten auszugehen. Dies führt dazu, dass zusätzlich gewisse Normanforderungen an die bei der Auswertung verwendeten Filter nicht mehr zur Gänze eingehalten werden können.

Hinzukommend stellt das Marimbaphon hohe Anforderungen an die Übekabine. Zumindest die Längsabmessung des Instruments entspricht nahezu jener der Übekabine => die Platzverhältnisse sind entsprechend eingeschränkt und die akustischen Anregungspunkte liegen quasi entlang der gesamten Längsachse von selbiger verteilt. Die Klangerzeugung beruht auf Anregung eines gekoppelten Systems => das akustische Zentrum ist nur schwer feststellbar. Der Tonumfang ist verhältnismäßig groß => ein entsprechend breiter Frequenzbereich sollte hinsichtlich der Raumakustik möglichst problemfrei sein.

1.2 Angestrebte Ziele

Im Zuge dieser Arbeit soll die Möglichkeit der Dämpfung von Raummoden und Erstreflexionen in einer äußerst kleinen Übekabine sowie die Messbarkeit von jenen Maßnahmen überprüft werden. Dabei soll durch Untersuchungen von verschiedenen Raumausstattungs-zuständen ein Herantasten an die Grenzen von normativ geregelten Nachhallzeitmessungen bzw. eine bewusste Übertretung von selbigen erfolgen. So soll es gelingen, diese Grenzen näher zu spezifizieren und deren Entstehen sowohl theoretisch als auch messtechnisch nachvollziehbar zu machen. Nachdem diese Grenzen detailliert geschildert wurden, soll ein Entwurf von alternativen Mess- und Auswertungsmethoden für jene Bereiche erfolgen, in denen die klassischen normativ geregelten Nachhallzeitmessungen ihre Aussagekraft verlieren.

Zudem sollen durch aufwändige Messabläufe und Auswertungsmethoden möglichst neue Erkenntnisse sowohl zur zeitlichen als auch örtlichen Ausbildung des Schallfelds in entsprechend kleinen Volumina gewonnen sowie Wechselwirkungen zwischen diesem und eingebrachten porösen Absorbern veranschaulicht werden.

Dabei sollen alle Untersuchungen im Hinblick auf die spätere Verwendung der Übekabine als Übeumgebung für Marimbaphon erfolgen.

1.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel gewährte einen kleinen Überblick über das Thema der vorliegenden Arbeit. Die Problemstellung wurde geschildert sowie die angestrebten Ziele verdeutlicht. Im nächsten Kapitel soll das verwendete Marimbaphon näher beschrieben sowie die zugrundeliegenden akustischen Prinzipien dieser Instrumentengattung erläutert werden.

2 Akustik des Marimbaphons

In diesem Kapitel geht es um die theoretische Betrachtung der akustischen Prinzipien, die den Marimbaphonen im Allgemeinen zugrunde liegen. Zudem erfolgt die Nennung der konkreten Eigenschaften des verwendeten Instruments (vgl. Abschnitt 2.1.3). So kann das akustische Verhalten des Marimbaphons bereits im Vorhinein grob abgeschätzt sowie erste Überlegungen hinsichtlich der Messaufbauten und den zu erwartenden raumakustischen Problemen angestellt werden (vgl. Kapitel 3.2.2).

2.1 Aufbau

Das Marimbaphon zählt zur Instrumentenfamilie der gestimmten Idiophone. Es handelt sich also um ein Schlaginstrument, welches nach einem perkussiven Anschlag in der Lage ist, mit einer deutlich wahrnehmbaren Tonhöhe auszuklingen. Im Wesentlichen tragen zwei Mechanismen zur Klangabstrahlung bei. Zum einen die angeschlagenen Elemente, welche als Klangstäbe bezeichnet werden, und zum anderen Resonatoren, welche sich unter den Klangstäben befinden (vgl. Abb. 2.1 bzw. Abb. 2.2).²



Abb. 2.1: Klangstab mit zugehörigem Helmholtz-Resonator (C#)

² Vgl. [FLETCHER ROSSING S. 533]



Abb. 2.2: Klangstab mit zugehörigem $\lambda/4$ -Resonator (a#‘‘‘) und Aufhängungsvorrichtung

Um ein besseres Verständnis für das zu erwartende akustische Verhalten zu schaffen, bedarf es einer näheren Beschreibung der beiden letztgenannten Mechanismen.

2.1.1 Klangstäbe

Die annähernd quaderförmigen Klangstäbe von Marimbas werden meist aus Palisanderholz gefertigt. Die beiden Enden der Stäbe werden durchbohrt, sodass diese freischwingend horizontal – die geringste Seitenabmessung entspricht also deren Höhe – über dem Rahmen des Instruments aufgehängt werden können (vgl. Abb. 2.2). Somit sind Klangstäbe von Marimbaphonen in die idealisierte Kategorie der freien rechteckigen Stäbe – also eindimensionale Schwinger ohne Spannungen im Material – einzuordnen. Diese werden durch ihren Elastizitätsmodul E ($\cong 9\text{--}13 \text{ kN/mm}^2$)³, welcher ein Parameter für die innere Steifigkeit des Materials ist, charakterisiert. Die Frequenz f_n des jeweils n -ten Teiltons, welcher sich bei so einem idealen rechteckigen Stab ausbildet, folgt näherungsweise dem nachstehenden Zusammenhang.

$$f_n = \alpha_n \frac{\pi K}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

mit $\alpha_n \approx \frac{(2n+1)^2}{8}$ (freie Schwingung) und $K = \frac{d}{\sqrt{12}}$ [m] (rechteckiger Stab)

Dabei entspricht ρ der Materialdichte ($\cong 750\text{--}900 \text{ kg/m}^3$)⁴, L der Länge und d der Dicke bzw. Höhe des Schwingers.⁵

³ <http://www.materialarchiv.ch/app-tablet/#detail/1429> (07.09.2018)

⁴ <http://www.materialarchiv.ch/app-tablet/#detail/1429> (07.09.2018)

⁵ Vgl. [GÖRNE S. 2]

Prinzipiell wird bei Marimbaphonen also je Grundton ein eigener Klangstab gefertigt. Dabei wird üblicherweise mit steigender Grundtonhöhe f_1 die Stablänge L sowie Stabdicke d entsprechend Gl. (2.1) verringert. Zudem wird auch die Breite der Klangstäbe reduziert. Die Anordnung der Klangstäbe erfolgt analog zur Klaviatur und umfasst üblicherweise einen Tonumfang von fünf (C–c^{'''}) Oktaven. Bei genauerer Betrachtung von Gl. (2.1) ist allerdings zu erkennen, dass die entstehenden Teiltöne in einem nichtharmonischen Verhältnis zueinander stehen ($1 : 2,8 : 5,4 : 9 : 13,4 : 18,8$).⁶ Um zumindest den zweiten bzw. manchmal auch den dritten Teilton harmonisch zum Grundton zu stimmen und die erforderlichen Längen zum Erreichen der tiefsten Grundtöne zu reduzieren, werden die Klangstäbe auf ihrer Unterseite ausgehend von der Mitte ausgehöhlt (vgl. Abb. 2.1 bzw. Abb. 2.2). Durch diesen Vorgang werden die relativen Frequenzabstände der Teiltöne zueinander so stark vergrößert, dass üblicherweise bereits der erste Oberton die vierfache und der zweite die neunfache Frequenz zum Grundton aufweist ($1 : 4 : 9$).⁷

2.1.2 Resonatoren

Unter jedem Klangstab befindet sich ein dazu passender Resonator, dessen Zweck die Verstärkung des abgestrahlten Klangs bzw. Grundtons ist (vgl. Abb. 2.1 bzw. Abb. 2.2). Üblicherweise sind die Resonatoren in $\lambda/4$ -Bauweise, also als Rohre, deren Unterseite geschlossen, deren Oberseite geöffnet und deren Länge $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge des Grundtons des darüberliegenden Klangstabs beträgt, ausgeführt. Als platzsparende Alternative wird für die tiefsten Klangstäbe oft auf Helmholtz-Resonatoren zurückgegriffen. Die Resonanzfrequenz beider Resonatorarten weist einen direkten Zusammenhang mit der Schallgeschwindigkeit auf, wodurch die Stimmung der Resonatoren stark von der umgebenden Lufttemperatur abhängig ist.

Da es sich bei allen Resonatorformen um passive Elemente handelt, geschieht die Verstärkung auf Kosten einer Reduktion der Ausklingzeit. Allerdings kann es sein, dass sich die wahrgenommene Klangdauer durch den Resonator sehr wohl erhöht, da Hintergrundgeräusche den Klang des Instruments ohne verstärkenden Resonator bereits früher maskieren (vgl. Abb. 2.3).

⁶ Vgl. [FLETCHER ROSSING S. 533]

⁷ Vgl. [FLETCHER ROSSING S. 535–539]

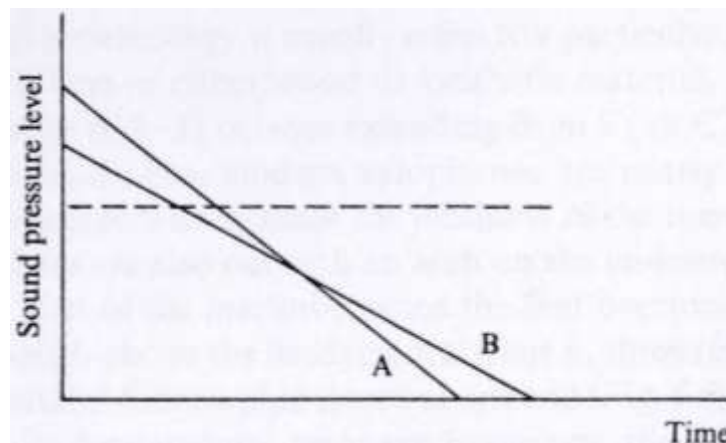


Abb. 2.3: Schalldruckpegelabklingkurven eines Klangstabs mit (A) bzw. ohne (B) Resonator und beispielhafter Hintergrundgeräuschpegel (strichliert) [FLETCHER ROSSING S. 542]

Zudem sind Ausklingdauer und Grundtonhöhe im Allgemeinen umgekehrt proportional zueinander.⁸

2.1.3 Spezifikationen des genutzten Marimbaphons

Das im Zuge dieser Arbeit verwendete Instrument ist ein sogenanntes C-Marimbaphon und weist den üblichen Tonumfang von fünf Oktaven (C–c^{'''}) auf. Es befinden sich somit 61 Klangstäbe und Resonatoren, welche für die Töne C–F in Helmholtz- und für die darüberliegenden in $\lambda/4$ -Bauweise gefertigt sind, am Instrument (vgl. Abb. 2.4). Die Klangstäbe an diesem Instrument weisen eine Länge von ~58 cm bis ~19 cm, eine Dicke von ~2,5 cm bis ~2 cm und eine Breite von ~6,4 cm bis ~4,5 cm auf.



Abb. 2.4: C-Marimbaphon in Übekabine mit provisorischen Schallabsorptionsmaßnahmen

⁸ Vgl. [FLETCHER ROSSING S. 542–544]

Das Marimbaphon ist 2,55 m lang und 0,90 m hoch. Die Breite verringert sich von 1,05 m bei den tief zu 0,45 m bei den hoch gestimmten Klangstäben. Der Kopf des stehenden Marimba-Spielers bewegt sich während des Übens grob 0,70 m nach links bzw. rechts ausgehend von der Mittenposition. Die Stimmung des Marimbaphons erfolgte laut Hersteller auf $a' \approx 443$ Hz bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C. Nachfolgend sind die sich daraus ergebenden Grundtonfrequenzen sowie deren Zuordnung zum jeweils entsprechenden technischen Terzband angeführt.

Ton	Frequenz [Hz]	Terzband [Hz]	Ton	Frequenz [Hz]	Terzband [Hz]
C	66	63	f#'	373	400
C#	70		g'	395	
D	74	80	g#'	418	
D#	78		a'	443	
E	83		a#'	469	500
F	88		h'	497	
F#	93	100	c''	527	
G	99		c#''	558	630
G#	105		d''	591	
A	111		d#''	626	
A#	117	125	e''	664	
H	124		f''	703	800
c	132		f#''	745	
c#	140	125/160	g''	789	
d	148	160	g#''	836	
d#	157		a''	886	1000
e	166		a#''	939	
f	176		h''	995	
f#	186	200	c'''	1054	
g	197		c#'''	1116	1250
g#	209		d'''	1183	
a	222		d#'''	1253	
a#	235	250	e'''	1328	
h	249		f'''	1406	1600
c'	263		f#'''	1490	
c#'	279		g'''	1579	
d'	296	315	g#'''	1673	
d#'	313		a'''	1772	2000
e'	332		a#'''	1877	
f'	352		h'''	1989	
			c'''	2107	

Tab. 2.1: Töne und Frequenzen des Marimbaphons mit Zuordnung zu den technischen Terzbändern für $a' = 443$ Hz

2.2 Spektrum des abgestrahlten Klangs

In Abb. 2.5 ist der zeitliche Verlauf der ersten drei Teiltöne nach Anschlagen eines a-Klangstabs dargestellt.

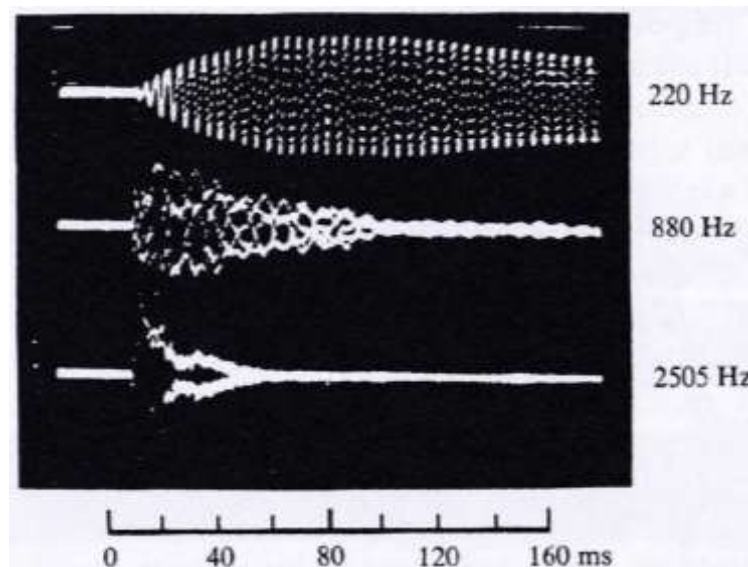


Abb. 2.5: Zeitlicher Verlauf der ersten drei Teiltöne (hier 1 : 4 : 11) nach Anschlagen eines a-Klangstabs (zweiter und dritter Teilton mit verstärkter Amplitude dargestellt) [FLETCHER ROSSING S. 539]

Es lässt sich gut erkennen, dass bereits nach den ersten 100 ms der Grundton den deutlich größten Beitrag zum abgestrahlten Klang leistet. Für alle höheren Teiltöne ist von einem noch schnelleren Abklingen auszugehen. Allerdings wird in Abb. 2.5 auch deutlich, dass der Grundton im Vergleich zu den ersten beiden Obertönen wesentlich länger bis zum Erreichen seiner maximalen Amplitude benötigt. Auch eine mit dem NTi XL2 Analysator experimentell durchgeführte Messung widerspiegelte dieses Verhalten. Zudem wurde bei dieser Messung deutlich, dass mit steigender Grundtonhöhe neben einer enormen Verringerung der Klangdauer auch eine Reduktion der tonalen Ausprägung im Spektrum einhergeht.

Neben den bisher erwähnten Mechanismen haben zudem auch die verwendeten Mallets (dt. Schlägel) sowie die Anschlagsstärke und der Anschlagsort eine Auswirkung auf den entstehenden Klang. Die Mallets variieren sowohl in ihrer Härte und ihrem Gewicht als auch in ihrer Form. Prinzipiell lässt sich sagen, dass harte Mallets einen strahlenden obertonreichen Klang und weiche Mallets einen dunklen grundtonbetonten Klang erzeugen. Das Gewicht der Mallets spielt eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der Energieübertragung. Um diese zu maximieren sollten dynamische Masse des Klangstabs und Schlägelmasse im Gleichgewicht zueinander stehen. Weiters hat die Schlägelmasse auch einen Einfluss auf das Klangspektrum, da leichte Mallets im Gegensatz zu schweren deutlich schneller vom Klangstab zurückprallen. Daher besteht bei schweren Mallets ein wesentlich längerer Kontakt mit dem Klangstab,

wodurch eine Dämpfung der höheren Teiltöne erfolgt.⁹ Hinsichtlich des Anschlags lässt sich festhalten, dass eine Erhöhung der Anschlagstärke mit einer Betonung der höheren Teiltöne zusammenhängt. Zudem prägen sich all jene Teiltöne besonders gut aus, deren entsprechende Schwingungsmoden am Anschlagsort einen Wellenbauch aufweisen. Teiltöne, bei denen dort ein Knotenpunkt vorliegt, können nicht angeregt werden. Für den typischen Anschlagsort in der Mitte des jeweiligen Klangstabs bedeutet dies, dass lediglich ungeradzahlige Teiltöne – beim Anschlagen des Randes hingegen alle Teiltöne – angeregt werden können.¹⁰ Die nachfolgende Abbildung zeigt die Lage der Schwingungsknoten und -bäuche für die ersten sieben Moden eines e-Marimbaklangstabs sowie deren zugehörige Frequenzen. Die Schwingungsknoten wurden zudem mit strichlierten Linien verbunden.

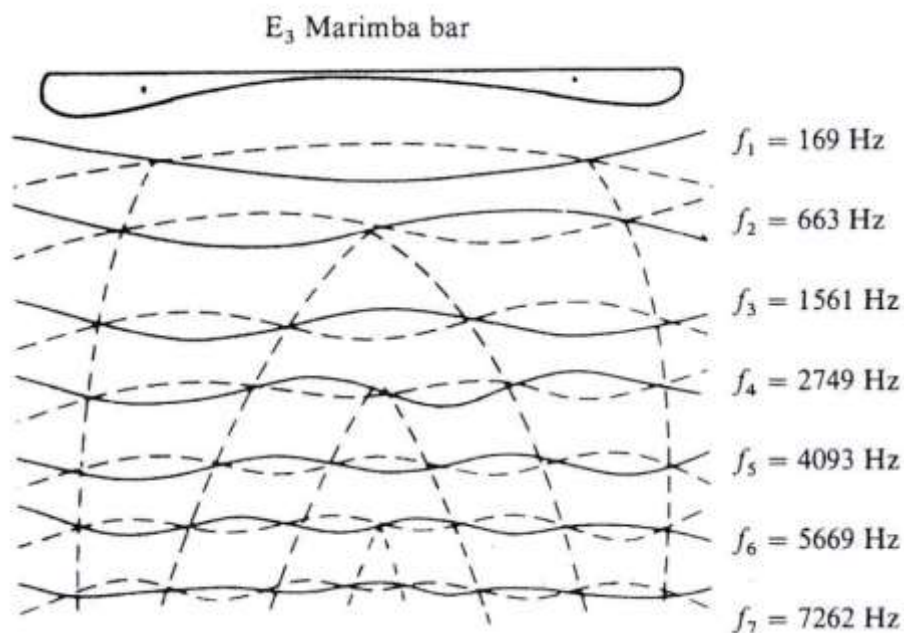


Abb. 2.6: Schwingungsknoten und -bäuche eines e-Klangstabs für die ersten sieben Schwingungsmoden (hier 1 : 4 : 9 : 16) [FLETCHER ROSSING S. 536]

2.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden der Aufbau und die Funktionsweise von Marimbaphonen erläutert, auf die Idealisierung mithilfe eines sogenannten „freien Stabs“ eingegangen und die Auswirkungen durch den Einsatz von $\lambda/4$ - bzw. Helmholtz-Resonatoren angeführt. Zudem erfolgte eine nähere Spezifizierung des im Zuge dieser Arbeit verwendeten Instruments. Im nachfolgenden Kapitel soll nun der bisherige Überaum sowie die neugebaute Übekabine mit den zu erwartenden Problemstellungen näher beschrieben werden.

⁹ Vgl. [FLETCHER ROSSING S. 547–548]

¹⁰ Vgl. [FLETCHER ROSSING S. 536]

3 Raumsituationen

Um ein geeignetes Messsetup entwerfen zu können, werden hier die relevanten Räume spezifiziert. Weiters wird die Übekabine raumakustisch simuliert (vgl. Abschnitt 3.2.1) und sowohl die zu erwartenden raumakustischen als auch messtechnischen Schwierigkeiten in selbiger erläutert (vgl. Abschnitt 3.2.2).

3.1 Überaum

Hierbei handelt es sich um einen gewöhnlichen Raum im Parterre eines für Graz typischen Altbaus. Der Raum besitzt eine Grundfläche von 5,4 x 5,6 m und eine Raumhöhe von 3,35 m. Somit weist dieser ein Volumen von $\sim 100 \text{ m}^3$ auf. Zur Optimierung der Raumakustik sind in drei vertikalen Raumkanten poröse Absorber positioniert. Da die Altbaufenster dieses Raumes zu einer sowohl von Kraftfahrzeugen als auch Straßenbahnen stark befahrenen Straße orientiert sind, kommt es vor allem tagsüber zu massiven Lärmeinwirkungen von außen.

3.2 Übekabine

Die Übekabine ist aus doppelwandigen Holzleichtbauwänden mit porösem Füllmaterial gefertigt und sorgt dadurch sowohl für eine gute Dämmung als auch Dämpfung des ein- bzw. aus tretenden Schalls. Zumindest für den hochfrequenten Bereich kann die Oberfläche an der Kabineninnenseite als schallhart angenähert werden. Die Grundfläche beträgt 1,65 x 2,95 m und die Höhe 2,15 m. Somit ergibt sich ein Volumen von $\sim 10 \text{ m}^3$ und eine gesamte Oberfläche von $\sim 30 \text{ m}^2$ im Inneren der Übekabine. Der Zugang zur Kabine erfolgt über eine doppelte Holztür mit dichtendem Balkontürschließmechanismus und einem doppelten Isolierglasfenster.

3.2.1 Raumakustische Simulation

Um ein näheres Verständnis für die akustischen Vorgänge im Inneren der Übekabine zu schaffen, ist zuerst die Erläuterung der Unterscheidung zwischen Erstreflexionen und Raummoden essentiell. In weiterer Folge werden die Eigenmoden der Übekabine für den tiefen Frequenzbereich berechnet.

3.2.1.1 Theorie der Unterscheidung von Erstreflexionen und Raummoden

Hier soll kurz näher auf die wichtige Unterscheidung zwischen (rasch eintreffenden) Erstreflexionen und Raummoden eingegangen werden, welche – obwohl es sich hierbei um zwei unterschiedliche akustische Phänomene handelt – beide den Schalldruckpegelverlauf beeinflussen können (vgl. Abschnitt 5.2.5 und 6.4).

Als Erstreflexionen werden jene Schallereignisse bezeichnet, welche von der Schallquelle über lediglich einen – oder nur wenige – Reflexionspunkte zum Hör- respektive Mikrofonort reflektiert werden. Ist die Begrenzungsfläche am Reflexionspunkt groß im Vergleich zur Wellenlänge (ebene Spiegelung¹¹ entsprechend der aus der geometrischen Raumakustik bekannten Strahlentheorie) und nahezu schallhart sowie die Differenz zwischen dem Direktschall- und Reflexionsweg relativ kurz, so ist von einer entsprechend geringen Pegeldifferenz zwischen dieser Reflexion und dem von der Schallquelle abgestrahlten Direktschall am Aufnahmeort auszugehen. Wenn nun die Längendifferenz zwischen dem Reflexionsweg und der Strecke des Direktschalls ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des abgestrahlten Schallereignisses beträgt, interferieren diese beiden Schallereignisse destruktiv, wodurch sich der Schalldruckpegel am Aufnahmeort drastisch reduziert. Beträgt diese Wegdifferenz hingegen ein ganzzahliges Vielfaches der ganzen Wellenlänge des abgestrahlten Schallereignisses, so kann sich aufgrund von konstruktiven Interferenzen der Schalldruckpegel am Aufnahmeort um bis zu 6 dB erhöhen. Erstreflexionen, die erst nach zirka 50–70 ms am Aufnahmeort eintreffen, werden in der Regel als Echo wahrgenommen¹² – im Frequenzbereich kommt es dennoch zur Ausprägung des entsprechenden Kammfilters.

Bei Raummoden handelt es sich hingegen um gleichphasige Überlagerungen von Reflexionen, welche zu einem resonanzartigen Aufschaukeln der Schallenergie im Raum führen. Dies geschieht aufgrund eines oder mehrerer in sich geschlossener Reflexionswege deren Länge genau ein ganzzahliges Vielfaches der jeweiligen Wellenlänge beträgt. Bei axialen Moden eines Quader-raums entspricht also der Hin- und Rückweg jeweils einer halben Wellenlänge (vgl. Gl. (3.1)). Zudem führt die Überlagerung von hin- und rücklaufenden Wellen zu ortsfesten Schalldruckmaxima und -minima¹³, wodurch es je nach Aufnahmeort und Modendämpfung zu durchaus massiven Schalldruckpegelerhöhungen bzw. -einbrüchen im Schalldruckpegelverlauf kommen kann.

¹¹ Vgl. [RA S. 85]

¹² Vgl. [RA S. 88]

¹³ Vgl. [RA S. 42]: Abb. 2.22

3.2.1.2 Berechnung der Eigenmoden

Da die Übekabine im leeren Zustand quasi ideal quaderförmig ist, können mit nachfolgender Formel deren Eigenmoden f_{n_x, n_y, n_z} anhand der Raumabmessungen L, B, H mit der Schallgeschwindigkeit $c \approx 344,6 \text{ m/s}$ (bei 22°C (vgl. Kapitel 6.1.3)) bzw. $c \approx 347,5 \text{ m/s}$ (bei 27°C (vgl. Kapitel 4.3.3)) für die verschiedenen Modenordnungen n_x, n_y, n_z berechnet werden.¹⁴

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (3.1)$$

In nachfolgender Tabelle sind die somit erhaltenen Modenfrequenzen mit zugehörigen Modenindizes und der daraus resultierenden Modenart angeführt. Zusätzlich sind die Moden nummeriert, den entsprechenden Terzbändern zugeordnet und die Modenanzahl je Terzband angegeben. Die Tabelle zeigt all jene Terzbänder, deren Anzahl an zugehörigen Moden unter 20 liegt und somit die Bedingung für ausreichende Diffusität noch nicht erfüllen.¹⁵

¹⁴ Vgl. [RA S. 42]

¹⁵ Vgl. [OELMANN ZHA S. 262] und [FUCHS SPÄH ZHA S. 78]

#	Art	$n_x - n_y - n_z$	f_{n_x, n_y, n_z} [Hz]		Terzband [Hz]	Anzahl
			22 °C	27 °C		
1	axial	0 – 1 – 0	58	59	63	1
2	axial	0 – 0 – 1	80	81	80	1
3	tangential	0 – 1 – 1	99	100	100	2
4	axial	1 – 0 – 0	104	105		
5	axial	0 – 2 – 0	117	118	125	3
6	tangential	1 – 1 – 0	120	121		
7	tangential	1 – 0 – 1	132	133		
8	tangential	0 – 2 – 1	142	143	160	7
9	oblique	1 – 1 – 1	144	145		
10	tangential	1 – 2 – 0	157	158		
11	axial	0 – 0 – 2	160	162		
12	tangential	0 – 1 – 2	171	172		
13	axial	0 – 3 – 0	175	177		
14	oblique	1 – 2 – 1	176	177		
15	tangential	1 – 0 – 2	191	193	200	8
16	tangential	0 – 3 – 1	193	194		
17	tangential	0 – 2 – 2	198	200		
18	oblique	1 – 1 – 2	200	202		
19	tangential	1 – 3 – 0	204	206		
20	axial	2 – 0 – 0	209	211		
21	tangential	2 – 1 – 0	217	219		
22	oblique	1 – 3 – 1	219	221		
23	tangential	2 – 0 – 1	224	226	250	19
24	oblique	1 – 2 – 2	224	226		
25	oblique	2 – 1 – 1	231	233		
26	axial	0 – 4 – 0	234	236		
27	tangential	0 – 3 – 2	237	239		
28	tangential	2 – 2 – 0	239	241		
29	axial	0 – 0 – 3	240	242		
30	tangential	0 – 4 – 1	247	249		
31	tangential	0 – 1 – 3	247	249		
32	oblique	2 – 2 – 1	252	254		
33	tangential	1 – 4 – 0	256	258		
34	oblique	1 – 3 – 2	259	262		
35	tangential	1 – 0 – 3	262	264		
36	tangential	2 – 0 – 2	263	265		
37	tangential	0 – 2 – 3	267	270		
38	oblique	1 – 4 – 1	268	270		
39	oblique	1 – 1 – 3	269	271		
40	oblique	2 – 1 – 2	270	272		
41	tangential	2 – 3 – 0	273	275		

Tab. 3.1: Raummoden der Übekabine für den tiefen Frequenzbereich bei den zwei relevanten Lufttemperaturen mit Zuordnung zu technischen Terzbändern und Angabe der Anzahl an Moden je Terzband

3.2.2 Überlegungen zu voraussichtlichen Schwierigkeiten

Da es sich bei der Übekabine um eine für dieses Instrument (vgl. Abb. 2.4) sehr klein dimensionierte Konstruktion handelt, ist in dieser Umgebung sowohl von messtechnischen als auch raumakustischen Schwierigkeiten auszugehen.

3.2.2.1 Zu erwartende messtechnische Probleme

Aufgrund der geringen Abmessungen der Übekabine kann keiner der in der Norm geforderten Mindestabstände eingehalten werden. Die Mikrofone sind gezwungenermaßen sowohl zu nah an den Begrenzungsflächen als auch zu wenig weit von der Quelle und den weiteren Mikrofonen entfernt. Die geforderte Anzahl an Mikrofon- und Quellpositionen gilt es zu hinterfragen.¹⁶

Es ist davon auszugehen, dass die Einbringung des Marimbaphons wegen der geometrischen Veränderungen große Auswirkungen auf die Ausbildung des Schallfelds hat. Bei Messung mit Marimbaphon im Inneren der Übekabine ist allerdings die Einhaltung der zuvor genannten Mindestabstände und Positionen zusätzlich erschwert. Weiters muss bei diesem Messsetup berücksichtigt werden, dass sowohl die Resonatoren als auch die Klangstäbe durch die Messschallquelle angeregt werden und somit das Schallfeld noch weiter beeinflussen. Zudem ist anzunehmen, dass diese Auswirkungen von denen, bei der das Marimbaphon selbst als Schallquelle dient, abweichen.

Bei den heute üblichen, auf Impulsantworten basierenden, Messmethoden zur Berechnung der Nachhallzeit ist eine homogene Schalldruckverteilung im Raum Grundvoraussetzung.¹⁷ Wie in Tab. 3.1 bereits veranschaulicht wurde, ist bis zum Terzband von 315 Hz jedoch nicht von einem diffusen Schallfeld in der Übekabine auszugehen. Weiters zeigt Tab. 2.1, dass eine aussagekräftige und reproduzierbare Vermessung allerdings bis zum 63 Hz-Terzband wünschenswert ist.

3.2.2.2 Zu erwartende raumakustische Probleme

Wie im vorhergehenden Abschnitt ist davon auszugehen, dass die geringen Abmessungen der Übekabine auch für die größten raumakustischen Probleme verantwortlich sind. Sowohl der Marimba-Spieler als auch das Instrument wird sich immer in relativer Nähe zu einer Begrenzungsfläche befinden. Die Grundtöne der unteren beiden Oktaven des Marimbaphons liegen im Modalbereich der Übekabine (vgl. Tab. 2.1 und Tab. 3.1). Es ist anzunehmen, dass aufgrund der getrennt auftretenden Raummoden in diesem Frequenzbereich einzelne Töne an bestimmten Orten übermäßig verstärkt und an anderen wiederum stark gedämpft werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Lage der Raummoden in Bezug auf eine Klaviatur ($a' =$

¹⁶ Vgl. [ÖNORM EN ISO 3382-1 S. 9–10] und [ÖNORM EN ISO 3382-2 S. 8]

¹⁷ Vgl. [OELMANN ZHA S. 258], [FUCHS SPÄH ZHA S. 78] bzw. [RA S. 63]

443 Hz) im Bereich von C ($\triangleq$ tiefster Klangstab des Marimbaphons (vgl. Tab. 2.1)) bis 280 Hz $\cong c\sharp'$ (= obere Grenzfrequenz jenes Terzbands, das gerade noch keine ausreichende Diffusität aufweist (vgl. Tab. 3.1)).

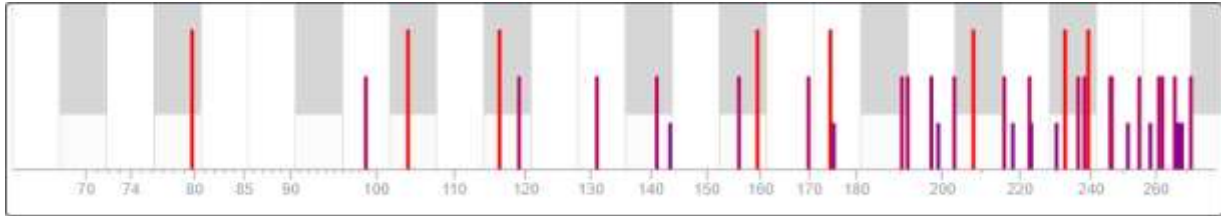


Abb. 3.1: Moden der Übekabine mit hinterlegter Klaviatur ($a' = 443$ Hz) im Bereich von C bis 280 Hz ($\cong c\sharp'$)
[<https://trikustik.at/raummoden-rechner/> (22.08.2018)]

Außerdem wird aufgrund des geringen Volumens im mittleren und hohen Frequenzbereich eine deutlich geringere Nachhallzeit als in der bisherigen Übeumgebung feststellbar sein. Da die größte Seitenabmessung der Übekabine 2,95 m beträgt, ist die Reflexionsdauer zwischen zwei parallelen Begrenzungsflächen stets < 20 ms. Die daraus resultierenden Klangereignisse bei impulsartiger Anregung werden daher nicht als einzeln wahrnehmbare Flatterechos, sondern als – ebenso unerwünschtes – tonales „Ringing“ (= periodisch eintreffende Reflexionen in einem Abstand von < 50 ms ($\triangleq 20$ Hz) zueinander) empfunden werden. Wegen der quaderförmigen Bauform und dem Fehlen von Objekten innerhalb der leeren Übekabine ist davon auszugehen, dass sich nur verhältnismäßig langsam eine räumlich einhüllende Diffusschallverteilung ausprägt und es aufgrund von rasch eintreffenden frühen Reflexionen zusätzlich zu den spektralen Auswirkungen der Moden auch zu klangfärbenden Kammfiltern kommt.

3.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die in dieser Arbeit zu vermessenden und zueinander sehr unterschiedlichen Räume näher spezifiziert sowie die Übekabine raumakustisch simuliert. Es stellte sich heraus, dass in der Übekabine aufgrund der extrem kleinen Abmessungen sowohl mit messtechnischen als auch raumakustischen Herausforderungen zu rechnen ist. Im nächsten Kapitel werden die Messaufbauten und -abläufe für die erste Messreihe in den zuvor beschriebenen Räumen erläutert.

4 Erste Messreihe

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung der ersten Messreihe, welche zur Identifizierung der bereits vorliegenden raumakustischen Situationen durchgeführt wurde. Ziel dieser Messreihe war es, die akustischen Unterschiede zwischen der gewohnten Übeumgebung und der schallisolierten Übekabine nachzuweisen sowie die sowohl akustischen als auch messtechnischen Probleme in letzterer aufzuzeigen.

4.1 Messequipment und Konfiguration

Zum Einsatz kam das akustische Messequipment des SPSC der TU Graz, bestehend aus dem Müller-BBM Messsystem PAK in Kombination mit 6 G.R.A.S. $\frac{1}{2}$ “-Messmikrofonen, einem möglichst breitbandig kugelförmig abstrahlenden Norsonic Nor276 Dodekaeder-Lautsprecher (vgl. schwarzes Symbol in Abb. 4.2 bzw. Abb. 4.4) mit zugehörigem Nor280 Leistungsverstärker sowie einem Laptop mit RME Babyface Pro. Als zusätzliche Quelle mit weitestgehend linearem SPL-Frequenzverlauf kam ein aktiver Genelec 1030A Studiomonitor (vgl. oranges Symbol in Abb. 4.4) in der Übekabine zum Einsatz. Die Abstrahlung dieses 2-Wege-Lautsprechersystems variiert laut Herstellerdatenblatt¹⁸ entlang der 0°-Achse im Frequenzbereich von 55 Hz bis 18 kHz um weniger als $\pm 2,5$ dB (vgl. Abb. 4.1). Da, wie ebenfalls in Abb. 4.1 ersichtlich, für Frequenzen kleiner als 500 Hz weiters von einer grob angenähert kugelförmigen Abstrahlung ausgegangen werden kann, ist in Anbetracht der erwarteten Einflüsse der einzelnen Raummoden die Verfälschung durch den Lautsprecher vernachlässigbar. Somit müssten die einzelnen getrennt auftretenden Raummoden zumindest innerhalb des relevanten Frequenzbereichs im SPL-Verlauf deutlich erkennbar sein.

¹⁸ <https://www.genelec.com/sites/default/files/media/Previous%20models/2-way%20loudspeakers/1030A/ds1030a.pdf> (14.10.2018)

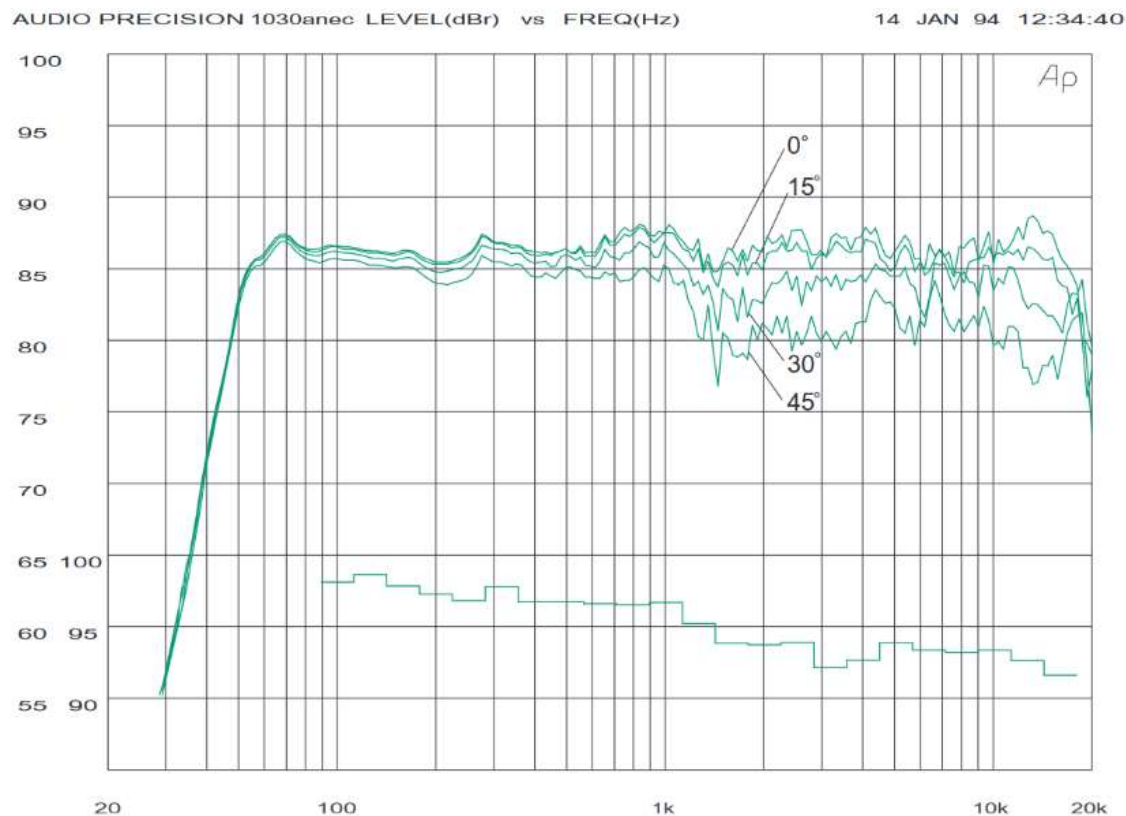


Abb. 4.1: Richtungsabhängiger SPL-Verlauf des vertikal platzierten Genelec 1030A Studiomonitors in 1 m Entfernung [oben] und terzbandgefilterter Schallleistungsverlauf [unten] aus Herstellerdatenblatt [<https://www.genelec.com/sites/default/files/media/Previous%20models/2-way%20loudspeakers/1030A/ds1030a.pdf>] (14.10.2018)]

Bei allen Messungen wurde der Messbereich der Mikrofone auf 10 V eingestellt. Kanal 1 des PAK Systems wurde für das Direktsignal – die Kanäle 2–7 für die Mikrofonsignale verwendet. Für die Ansteuerung des Dodekaeder-Lautsprechers wurde der Ausgang der RME TotalMix Software auf 0 dBFS gestellt – für die Messungen mit dem Genelec 1030A auf -18 dBFS. Beim Norsonic-Verstärkungsregler wurde die Stellung -15 dB gewählt – mit dem Eingangsregler des Studiomonitors wurde eine zusätzliche Dämpfung von -6 dB vorgenommen. Diese Einstellungen wurden so gewählt, dass einerseits ein ausreichend großer Signal-Störabstand erzeugt und andererseits aber keine extremen, den Lautsprecher gefährdenden, Verzerrungen auftreten konnten. Im späteren Verlauf der Arbeit (vgl. Abschnitt 6.1.1) stellte sich jedoch heraus, dass der Genelec Studiomonitor über eine integrierte Schutzschaltung¹⁹ verfügt, welche bei entsprechend hoher Dauerlast die Verstärkung intern reduziert – dies wurde bei der ersten Messreihe noch nicht berücksichtigt. Als Messsignal diente ein sechs Sekunden langer exponentieller Sinussweep mit einer Amplitude von 0 dBFS, einem Frequenzbereich von 25 Hz bis 25 kHz und einer Abtastrate von 65536 Hz. Zwar wurde auch das PAK-System auf eine Abtastrate von 65536 Hz eingestellt, bei der

¹⁹ Vgl. <https://www.genelec.com/sites/default/files/media/Previous%20models/2-way%20loudspeakers/1030A/ds1030a.pdf> (22.10.2018): „Long term output power is limited by driver unit protection circuitry“ auf S. 4

Wiedergabe des Sweepsignals erfolgte allerdings aufgrund der Audiotreibereinstellungen ein Downsampling auf 48 kHz mit entsprechender Anti-Aliasingfilterung, sodass nicht bis zur oberen Grenzfrequenz von 25 kHz angeregt und gemessen werden konnte. Die Messdauer betrug acht Sekunden. Somit hätte theoretisch sogar im 20 kHz-Terzband eine Nachhallzeit von bis zu zwei Sekunden korrekt ausgewertet werden können.

4.2 Messungen im Überaum

Die Vermessung des Überaumes geschah in Anlehnung an die Empfehlungen der ÖNORM EN ISO 3382-1/2 zur Messung von raumakustischen Parametern in Aufführungsräumen bzw. gewöhnlichen Räumen.

Der gewählte Messaufbau ist in Abb. 4.2 skizzenhaft (nicht maßstabsgetreu) veranschaulicht. Aufgrund der geometrischen Raumbeschaffenheit konnten die in der Norm geforderten Mindestabstände für die verschiedenen Messpositionen nicht ganz eingehalten werden. Es war jedoch möglich, dass alle Mikrofone zumindest 1,5 m sowohl voneinander als auch zur Quelle entfernt waren und dabei einen Abstand von mindestens 1 m zu allen Begrenzungsflächen hatten. Zudem wurden die Mikrofone in unterschiedlichen Höhen positioniert.

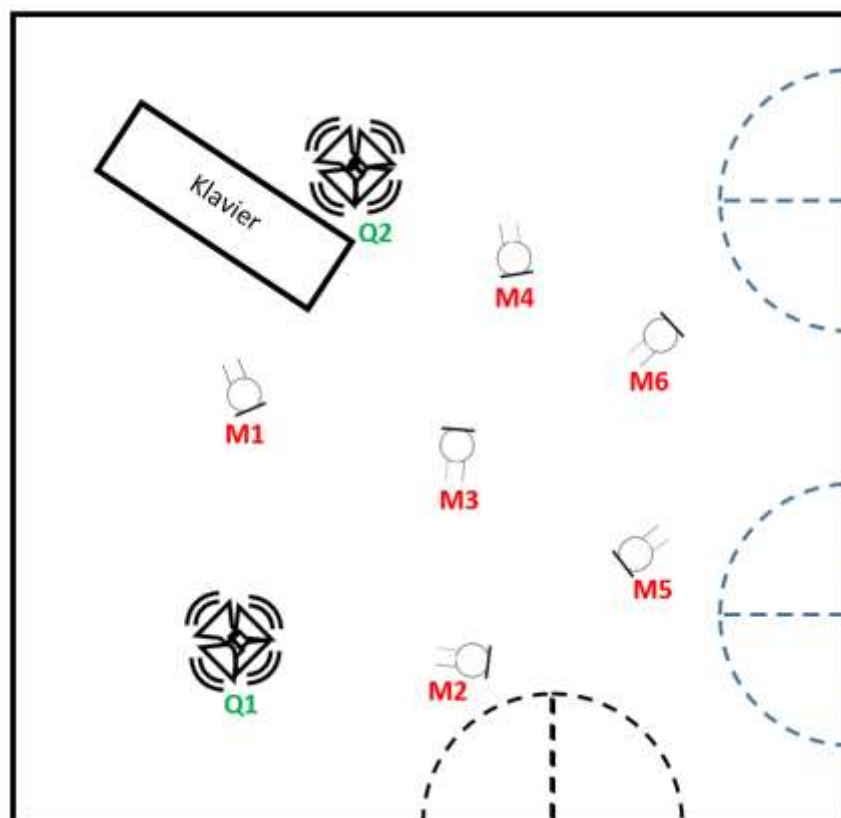


Abb. 4.2: Skizzenhafte Darstellung des Messaufbaus im Überaum (nicht maßstabsgetreu, Mikrofone und Lautsprecher auf unterschiedlichen Höhen)

Bei der Durchführung der Messungen erfolgte die Anregung zuerst von Quellposition 1 (**Q1**) und danach von Quellposition 2 (**Q2**) aus. Die nachfolgende Abbildung soll eine grobe Impression von der Messsituation vor Ort geben.



Abb. 4.3: Messsituation Überraum

4.3 Messungen in der Übekabine

Die Messungen in der Übekabine wurden mit dem Wissen der Anforderungen laut ÖNORM EN ISO 3382-1/2 durchgeführt, wobei aufgrund der engen Platzverhältnisse die geforderten Mindestabstände jedoch keinesfalls mehr eingehalten werden konnten.

4.3.1 Messaufbau

Der Aufbau zu den durchgeführten Messungen ist in Abb. 4.4 skizzenhaft (nicht maßstabsgetreu) dargestellt. Die zusätzlich zu den üblichen Eckpositionen (**QE**) und (**M1**) gewählten Aufstellungsorte wurden so gut wie möglich an die späteren Nutzungsverhältnisse angelehnt.

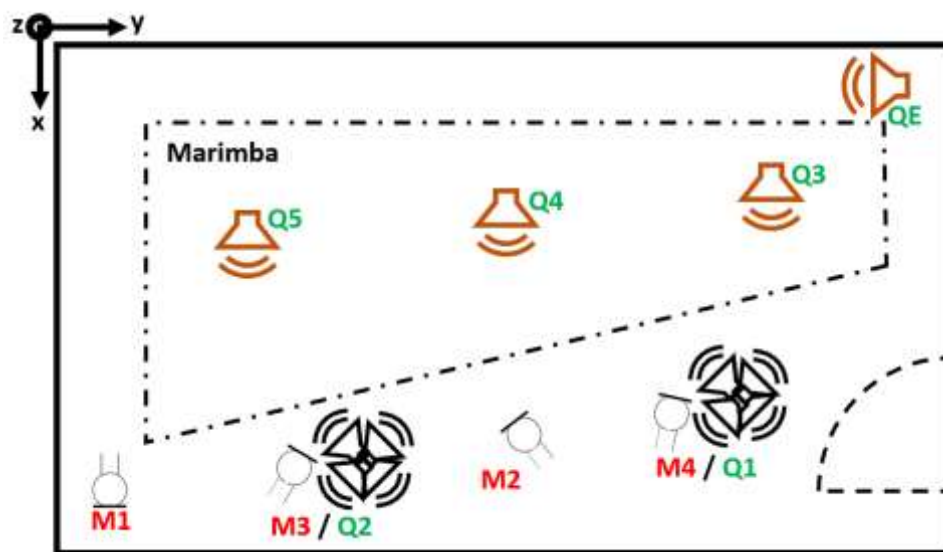


Abb. 4.4: Skizzenhafte Darstellung des Messaufbaus in der Übekabine (nicht maßstabsgetreu, Mikrofone und Lautsprecher auf unterschiedlichen Höhen)

Um eine gute Vergleichbarkeit von verschiedenen Messreihen in der Übekabine zu ermöglichen, ist eine ausreichend genaue Rekonstruktion des Messaufbaus notwendig. Daher wurden die Mikrofon- und Lautsprecherpositionen in ein Koordinatensystem eingeordnet. Die daraus erhaltenen Koordinaten sind in Tab. 4.1 angeführt.

Bezeichnung	x [m]	y [m]	z [m]	Bezeichnung	x [m]	y [m]	z [m]
M1	1,45	0,35	1,95	Q1	1,00	2,20	1,00
M2	1,05	1,55	1,60	Q2	1,35	0,90	1,00
M3	1,15	0,85	1,60	Q3	0,60	2,25	1,00
M4	1,00	2,10	1,60	Q4	0,70	1,50	1,00
				Q5	0,80	0,75	1,00
				QE	0,15	2,70	0,30

Tab. 4.1: Koordinaten der Mikrofon- und Lautsprecherpositionen

Die Positionierung des Genelec Studiomonitors in der Ecke (**QE**) erfolgte abhängig von den Einschränkungen durch die teils vorhandene Raumausstattung so, dass möglichst geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen eingehalten werden konnten.

4.3.2 Gemessene Konfigurationen

Da zum einen das Marimbaphon in Relation zur Übekabine ein großes Luftvolumen verdrängt sowie das Verhalten der darauf montierten Klangstäbe inkl. Resonatoren überprüft werden sollte (vgl. Abschnitt 3.2.2.1) und zum anderen die Auswirkungen der bereits vorhandenen raumakustischen Absorber interessiert, wurden für jeden nachfolgend angeführten Raumausstattungszustand Messungen durchgeführt.

- (1) Basotect-Keilabsorber mit 25 cm Kantenlänge (24 Stück $\triangleq$ $\sim 6 \text{ m}^2$), 20 cm dicke und 2 m hohe Basotect-Quadersäulen in 2 vertikalen Raumkanten ($\triangleq 1,6 \text{ m}^2$) und 5 cm dicke Pyramiden-PU-Schaumabsorber ($10,5 \text{ m}^2$) inkl. Teppich
 - a. mit zugedecktem Marimbaphon
 - b. mit freistehendem Marimbaphon
 - c. ohne Marimbaphon
- (2) nur 5 cm dicke Pyramiden-PU-Schaumabsorber ($10,5 \text{ m}^2$) inkl. Teppich ohne Marimbaphon
- (3) leere Übekabine ohne jeglicher Raumausstattung

4.3.3 Messablauf

Während der ersten Messreihe betrug die Temperatur im Inneren der Übekabine 27°C und die relative Luftfeuchtigkeit 47 %. Die Türen der Übekabine waren während den Messungen vollständig geschlossen. Die Kabel für die Mess- und Quellsignale wurden mittels einer hochwertigen Studiokabeldurchführung durch die doppelt ausgeführten Holzwände aus der Übekabine geleitet. Bei allen Messungen mit dem Dodekaeder-Lautsprecher befand sich der Studimonitor in der Eckposition (**QE**). Für alle Messungen mit dem Studimonitor wurde der Dodekaeder-Lautsprecher außerhalb der Übekabine platziert. Bei den Raumausstattungskonfigurationen (1) und (2) kamen nur die Mikrofone an den Positionen 1 (**M1**) und 2 (**M2**) und die Quellpositionen 1 (**Q1**) und 2 (**Q2**) des Dodekaeder-Lautsprechers sowie die Eckposition (**QE**) des Studiomonitors zum Einsatz. Zur Simulation des Marimbaphons als Schallquelle wurden für die Raumausstattungskonfiguration (3) die zusätzlichen Quellpositionen 3 (**Q3**), 4 (**Q4**) und 5 (**Q5**) des Studiomonitors eingesetzt. Dabei sollte Quellposition 5 (**Q5**) grob den Tonumfang C–c', Quellposition 4 (**Q4**) g–g' und Quellposition 3 (**Q3**) c'–c'' des Marimbaphons abdecken. Hier sei allerdings anzumerken, dass für die erste Messreihe noch keine Messung der genauen Position des aufgestellten Marimbaphons in

der Übekabine durchgeführt wurde und daher lediglich eine Schätzung der relativen Positionen zu den Marimbaklangstäben erfolgen konnte. Die Zuordnung der Quellpositionen zu den Marimbaklangstäben ist in Abb. 4.5 grafisch veranschaulicht.

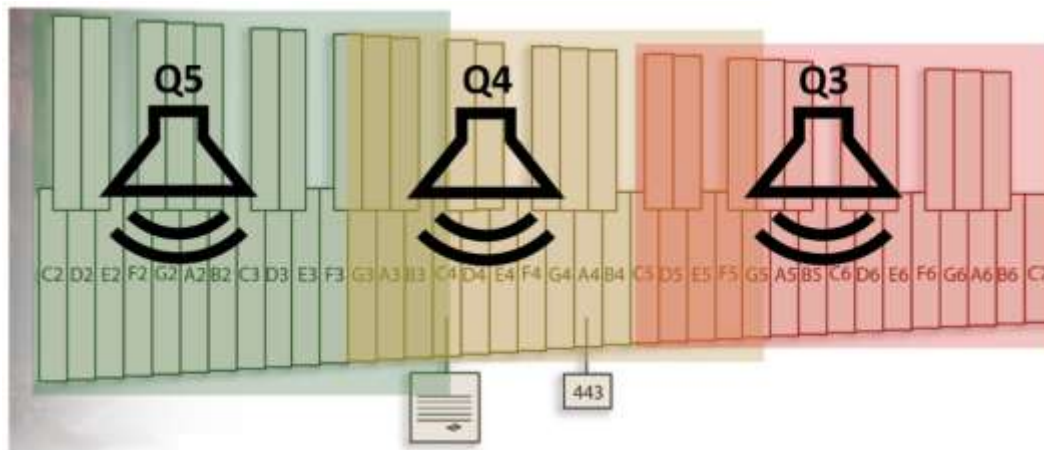


Abb. 4.5: Quellpositionen mit grober Zuordnung zu den zu simulierenden Marimbaklangstäben

Zudem wurden für eine feinere örtliche Auflösung des Hörbereichs des Marimba-Spielers bei allen Messungen mit dem Studiomonitor an den Positionen in der Konfiguration (3) zwei weitere Mikrofone an den Positionen 3 (**M3**) und 4 (**M4**) platziert. Die nachfolgende Abbildung soll einen kleinen Einblick in die Situation vor Ort gewähren.



Abb. 4.6: Messsituation Übekabine zu den Raumausstattungs Zuständen (1)a [links], (2) [mittig] und (3) [rechts]

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das im Zuge der ersten Messreihe zum Einsatz kommende Mess-equipment sowie die gewählten Konfigurationen von selbigem beschrieben. Weiters wurden die Messaufbauten und -abläufe im Überaum und der Übekabine sowie die zugrunde-liegenden Überlegungen dazu angeführt. Zudem erfolgte eine Listung der verschiedenen Raumausstattungs Zustände der Übekabine, zu welchen jeweils Messungen erfolgten. Im fol-genden Kapitel sollen die durchgeführten Messungen ausgewertet, die messtechnischen Prob-lematiken verdeutlicht sowie erste Erkenntnisse zu den unterschiedlichen raumakustischen Situationen – sowohl zwischen dem Überaum und der Übekabine als auch zwischen den ver-schiedenen Raumausstattungs Zuständen der Übekabine – aufgestellt werden.

5 Auswertungen und erste Erkenntnisse

Hier werden die aus den Messungen der im vorherigen Kapitel 4 beschriebenen ersten Messreihe erhaltenen Messdaten ausgewertet. Als Softwaretools (vgl. Anhang C) kommen hierbei das etablierte und in der Projektarbeit von Jakob Spötl beschriebene bzw. implementierte Verfahren zur Auswertung von Nachhallzeiten und raumakustischen Gütemaßen²⁰ (vgl. Abschnitt 5.1, 5.2.1 und 5.2.4) mit verschiedenen Modifikationen sowie die mittels MATLAB algorithmisch durchgeführte Berechnung der FFT zur Darstellung der Schalldruckpegelverläufe (vgl. Abschnitt 5.2.5) zur Anwendung.

Die Interpretation der Messdaten des Überaums (vgl. Abschnitt 5.1) erfolgt dabei lediglich für Vergleichszwecke, um so einen ungefähren Eindruck der raumakustischen Verhältnisse in selbigem zu vermitteln und die groben Unterschiede zu den akustischen Situationen in der Übekabine zu veranschaulichen. Da letztere das Kernobjekt dieser Arbeit darstellt, werden neben den bereits beschriebenen detaillierteren Messungen (vgl. Abschnitt 4.3) auch die dazugehörigen Messdaten wesentlich ausführlicher analysiert (vgl. Abschnitt 5.2.4 und 5.2.5), theoretische Berechnungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.2.2) sowie der subjektive Höreindruck in selbiger geschildert (vgl. Abschnitt 5.2.6). Zudem werden die ersten aufgetretenen messtechnischen Probleme in der Übekabine verdeutlicht sowie mögliche Lösungen dafür erläutert und zum Teil bereits umgesetzt (vgl. Abschnitt 5.2.1.1, 5.2.1.2, 5.2.3 bzw. 5.2.4). So werden erste raumakustische Details zu den vorhin beschriebenen Raumausstattungsständen der Übekabine (vgl. Abschnitt 4.3.2) erkannt und veranschaulicht.

²⁰ Vgl. [SPÖTL1]

5.1 Überaum

Zur Veranschaulichung der groben raumakustischen Verhältnisse im Überaum sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen die berechneten Frequenzverläufe der Parameter T_{20} , T_{30} und EDT sowie die Werte von relevanten raumakustischen Summenparametern für die Quellposition 1 (**Q1**) bzw. Quellposition 2 (**Q2**) in selbigem (vgl. Abb. 4.2) über alle Mikrofonpositionen gemittelt dargestellt.

Dabei erfolgte die Auswertung mithilfe des bereits implementierten Setups von Spötl²¹ mit Butterworth-Terzbandfiltern 14. Ordnung. Der Auswertungsbereich der Terzbänder wurde allerdings um eine Oktave nach unten hin auf 50 Hz bis 10 kHz erweitert.

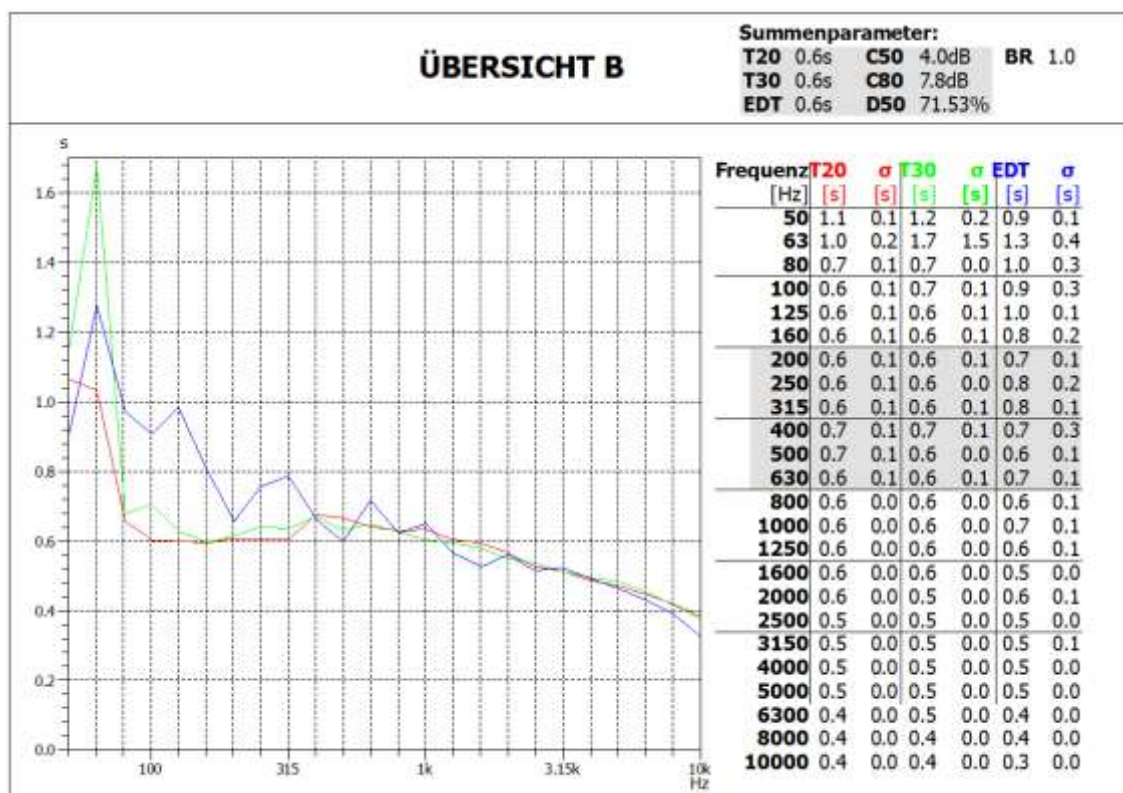
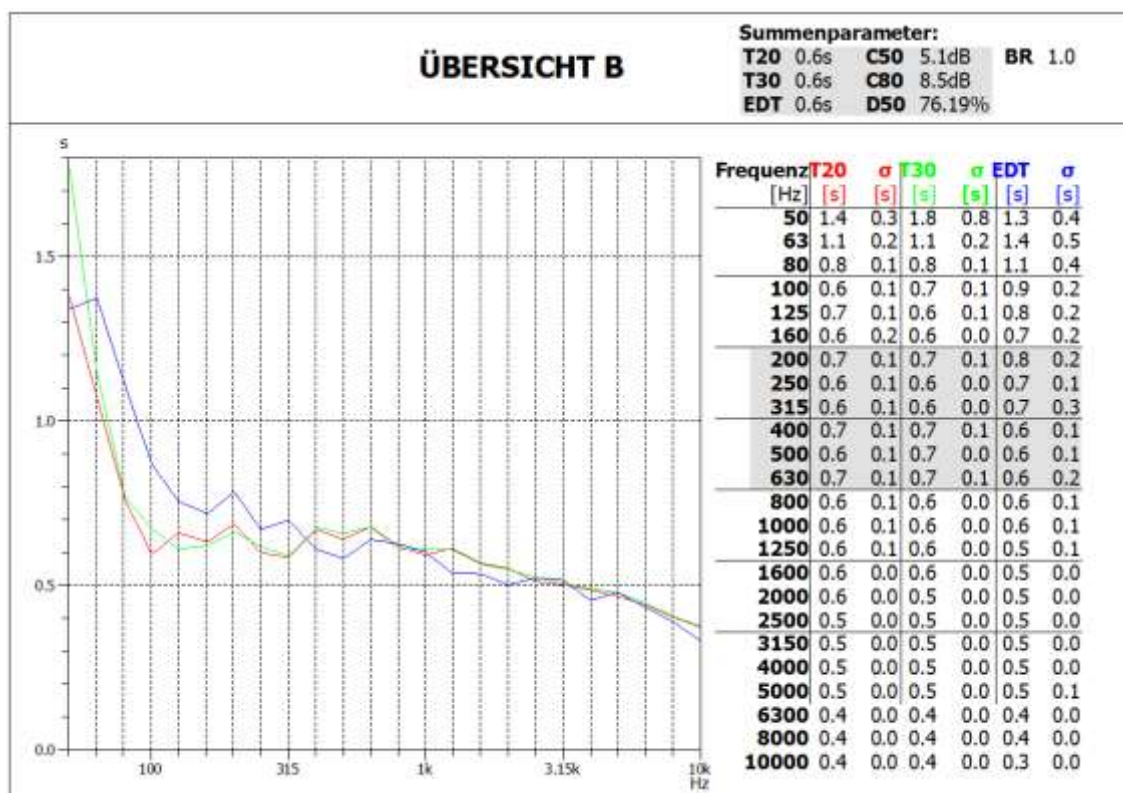
Da, wie in der Projektarbeit von Spötl beschrieben²², zur Vermeidung von ungewollten Einflüssen im Zeitbereich bewusst auf eine zusätzliche Bandpassfilterung der Impulsantworten (zum Beispiel von 25 Hz bis 25 kHz) verzichtet wurde, konnten die Messdaten jedoch aufgrund des großen Rauschanteils außerhalb des vom abgespielten Sweepsignal angeregten Frequenzbereichs nicht – wie ursprünglich erwünscht (vgl. Abschnitt 4.1) – nach oben hin bis zum 20 kHz-Terzband korrekt ausgewertet werden.

Die Berechnung der Summenparameter von T_{20} , T_{30} und EDT erfolgte den gültigen Normanforderungen entsprechend durch arithmetische Mittelung über die jeweiligen Zeitwerte der sechs Terzbänder von 400 Hz bis 1250 Hz.²³ Die Berechnung der C_{50} -, C_{80} - und D_{50} -Summenparameter erfolgte analog dazu durch Mittelung der jeweiligen Einzelwerte im entsprechenden Frequenzbereich.

²¹ Vgl. [SPÖTL1]

²² Vgl. [SPÖTL1 S.16–17]

²³ Vgl. [ÖNORM EN ISO 3382-1 S. 14]

Abb. 5.1: T₂₀, T₃₀ und EDT sowie Summenparameter für Quellposition 1 (Q1) über alle Mikrofone gemitteltAbb. 5.2: T₂₀, T₃₀ und EDT sowie Summenparameter für Quellposition 2 (Q2) über alle Mikrofone gemittelt

Betrachtet man die Nachhallzeitverläufe in Abb. 5.1 bzw. Abb. 5.2, so kann festgestellt werden, dass diese einen annähernd konstanten Verlauf im Bereich von 100 Hz bis 2 kHz mit einer Nachhallzeit von $\sim 0,6$ s aufweisen. Im Bereich unter 100 Hz kommt es zu einem Ansteigen sowie durch Moden bedingte Spitzen in den Nachhallzeitverläufen. Da sich die Terzbänder der gemessenen Nachhallzeitspitzen zwischen den beiden Abbildungen unterscheiden, wird deutlich, dass die jeweilige Quellposition entscheidend dazu beiträgt, welche Moden im Raum angeregt werden.

Die Maße zur Beschreibung der akustischen Klarheit und Deutlichkeit des Überaums (C_{50} , C_{80} und D_{50}) können durchwegs als sehr gut bezeichnet werden – eine Umhüllung kann aufgrund des hohen C_{80} -Werts jedoch nicht mehr wahrgenommen werden.²⁴ Das Bassverhältnis von 1,0 zeigt eine gut ausgewogene Balance zwischen Bässe und Mitten bzw. Höhen des Schallspektrums.

Da im Frequenzbereich von 80 Hz bis 10 kHz sowohl zwischen den beiden Quellpositionen (**Q1**) und (**Q2**) als auch den T_{20} - bzw. T_{30} -Auswertungsmethoden nur geringfügige Unterschiede auftreten, ist auch über diese Parameter eine Mittelung zulässig. Der so erhaltene Nachhallzeitverlauf für den Überaum ist in nachfolgender Abbildung grafisch dargestellt.

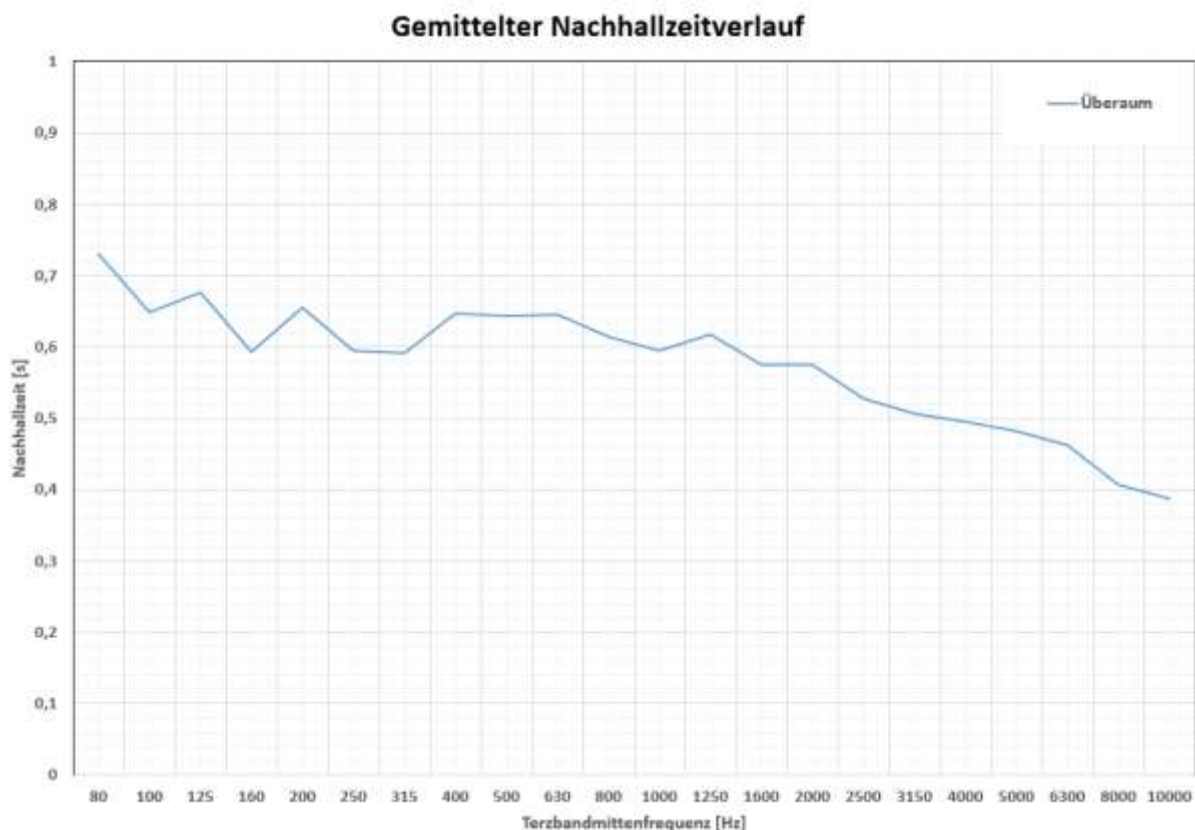


Abb. 5.3: Über alle Mikrofon- und Quellpositionen sowie T_{20} - und T_{30} -Auswertung gemittelter Nachhallzeitverlauf des Überaums

²⁴ Vgl. [RA S. 102 und S. 116]

5.2 Übekabine

Um möglichst alle messtechnischen Probleme und raumakustischen Besonderheiten der Übekabine erfassen zu können, erfolgen hier umfangreiche Auswertungen der im Zuge der ersten Messreihe aufgezeichneten Messdaten der Übekabine sowie eine subjektive Schilderung der wahrgenommenen Akustik. Zudem werden Messfehlerquellen festgestellt, detailliert analysiert und deren Auswirkungen je nach Möglichkeit reduziert.

5.2.1 Erste Auswertungen der Nachhallzeitverläufe und raumakustischen Gütemaße

Bei den hier dargestellten Messergebnissen wurde als Auswertungsmethode ebenso auf das bereits implementierte Setup von Spötl²⁵ mit Butterworth-Terzbandfilter 14. Ordnung zurückgegriffen. Neben der in Abschnitt 5.1 geschilderten Erweiterung des unteren Grenzfrequenzbands von 100 Hz auf 50 Hz wurden hier weiters zur Ermöglichung der Auswertung direkt in MATLAB die zugehörigen m-Files dahingehend verändert, dass die bereits mittels Faltung aus den PAK-Messdaten berechneten und gespeicherten Impulsantworten als wav-Files geladen werden konnten. Zudem wurde festgestellt, dass das zeitliche zirkuläre Verschieben der Impulsantworten nach rechts und die anschließende Fensterung von links keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat, weshalb dieser Schritt ebenso zur Reduktion der durchgeführten Rechenoperationen deaktiviert wurde (vgl. Anhang C).

5.2.1.1 Nachhallzeitverläufe für die Zustände (1)a, (1)c, (2) und (3)

Da die Übekabine in verschiedenen Konfigurationen vermessen wurde (vgl. Kapitel 4.3.2), sind in der nachfolgenden Abbildung die Frequenzverläufe der Nachhallzeiten für die sinnvoll vergleichbaren Raumausstattungs Zustände **(1)a**, **(1)c**, **(2)** und **(3)** einzeln aufgeführt (**(1)b** vgl. Abschnitt 5.2.1.2). Die Verläufe wurden über die Quellpositionen 1 (**Q1**) und 2 (**Q2**) (vgl. Abb. 4.4), über die Mikrofonpositionen 1 (**M1**) und 2 (**M2**) sowie über die T₂₀- und T₃₀-Auswertung gemittelt, da in den jeweiligen Messergebnissen nur geringe Abweichungen zueinander festzustellen waren.

²⁵ Vgl. [SPÖTL1]

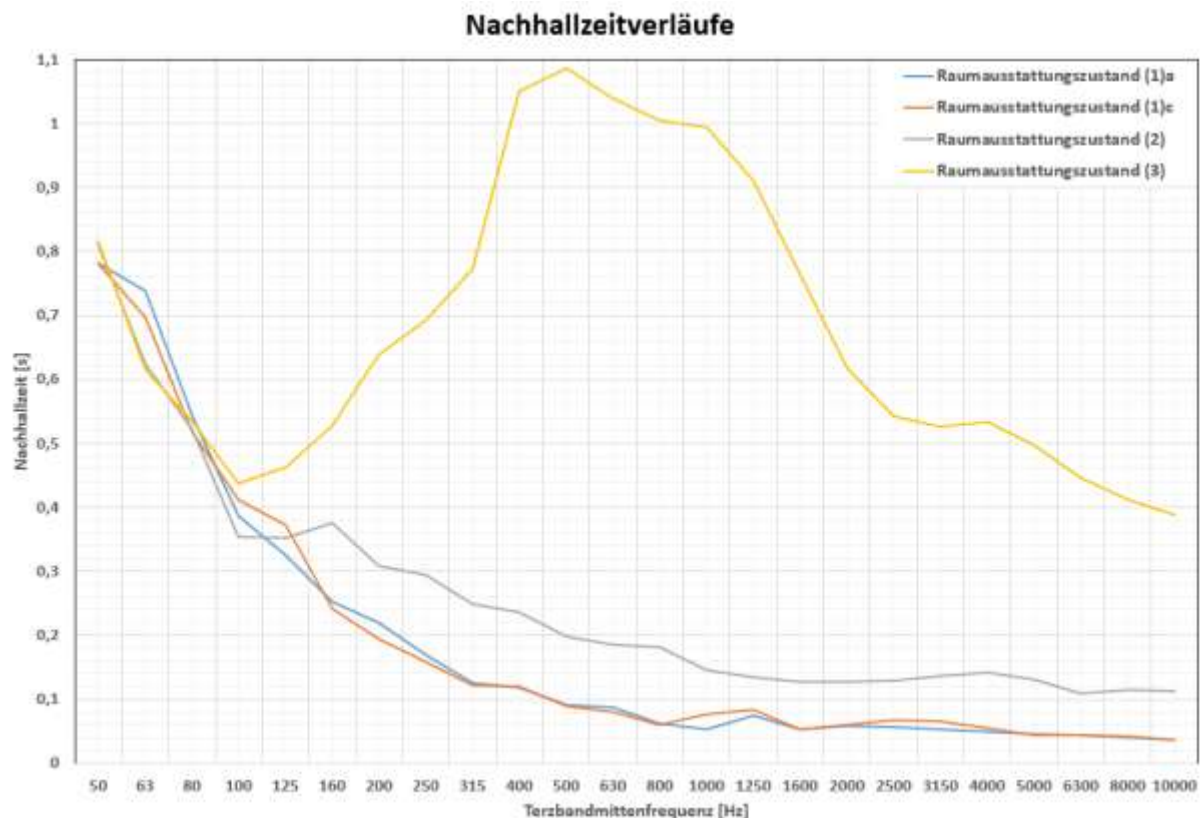


Abb. 5.4: Nachhallzeitverläufe für die Raumausstattungszustände **(1)a**, **(1)c**, **(2)** und **(3)**

Beim Nachhallzeitverlauf in der Übekabine im Zustand **(3)** zeigt sich relativ zu den Raumabmessungen eine extrem lange Nachhallzeit im Bereich von 315 Hz bis 2 kHz. Die Nachhallzeiten bei den tieferen Frequenzen werden vermutlich aufgrund von Schwingungen der nicht ideal schallharten Begrenzungsflächen sowie Transmissionen aufgrund der nicht idealen Dämmung vorerst geringer. Der erneute Anstieg der Nachhallzeit ab dem 100 Hz-Terzband zu den tieferen Frequenzen hin kann vorerst nicht erklärt werden – eine Beeinflussung durch die Terzbandfilter 14. Ordnung (vgl. Abschnitt 5.2.3) ist denkbar. Zu den verwendeten Absorberkonfigurationen bei den Raumausstattungszuständen **(2)** bzw. **(1)** lässt sich festhalten, dass diese für eine deutliche Reduktion der Nachhallzeiten zumindest ab ~200 Hz bzw. ~160 Hz sorgen. Für Frequenzen unter ~125 Hz hat es den Anschein, als ob die Nachhallzeitverläufe unverändert und für alle Raumausstattungs Zustände quasi gleich verlaufen – eine Beeinflussung durch die Terzbandfilter ist hier nicht auszuschließen (vgl. Abschnitt 5.2.3). Durch die Einbringung des zugedeckten Marimbaphons **(1)a** kann hier keine wesentliche Veränderung des Nachhallzeitverlaufs festgestellt werden.

5.2.1.2 Abklingvorgänge für den Raumausstattungszustand (1)b

In untenstehender Grafik sind der T_{20} - und T_{30} -Verlauf zum Raumausstattungszustand (1)b mit Anregung an Quellposition 2 (Q2) und Aufnahme an Mikrofonposition 1 (M1) (vgl. Abb. 4.4) dargestellt.

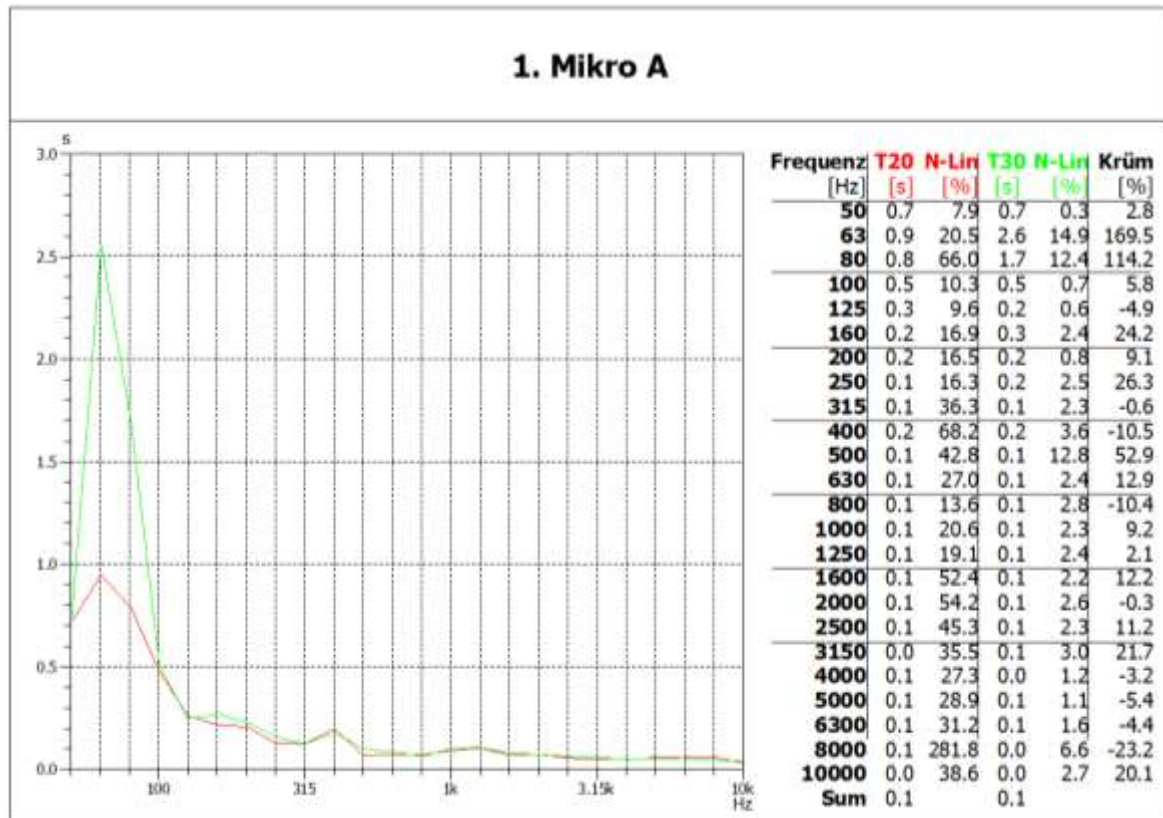


Abb. 5.5: T_{20} - und T_{30} -Verlauf zum Raumausstattungszustand (1)b für (Q2) und (M1)

Hier wird deutlich, dass quasi nur bei T_{30} -Auswertung das Ausklingen der mitangeregten Marimbaresonatoren erfasst werden konnte.

Betrachtet man, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt, die dazugehörigen berechneten Abklingkurven, so ist in allen Terzbändern, in denen die nahe der Quellposition 2 (Q2) gelegenen und tiefgestimmten Resonatoren des Marimbaphons wirken (63 Hz, 80 Hz und 100 Hz), aufgrund derer Abklingverhalten ein deutlicher „Knick“ in den entsprechenden Abklingverläufen zu erkennen. Da diese „Knicke“ erst ca. 20–30 dB unter Maximalpegel auftreten, kann das Ausklingen der Marimbaresonatoren bei T_{20} -Auswertung nur schlecht bzw. gar nicht detektiert werden. Zudem haben diese Steigungsänderungen der Abklingkurven zur Folge, dass selbst bei T_{30} -Auswertung die berechneten Nachhallzeiten in den entsprechenden Terzbändern zu den aus Abb. 5.6 händisch grob ablesbaren Zeiten bis zum Erreichen des 60 dB-Pegelabfalls große Abweichungen aufweisen. Dabei gilt es außerdem zu beachten, dass

es den Anschein hat, als hätte der verwendete Truncation-Algorithmus²⁶ den tatsächlichen Ausklingvorgang künstlich verkürzt. Da es sich im späteren Einsatz hierbei jedoch sowieso um die gewünschten Ausklingvorgänge der aktiv angeregten Klangstab-Resonator-Systeme handelt, ist die Aussagekraft dieser Messungen – wie in Kapitel 3.2.2.1 bereits erwähnt – ohnehin fragwürdig.

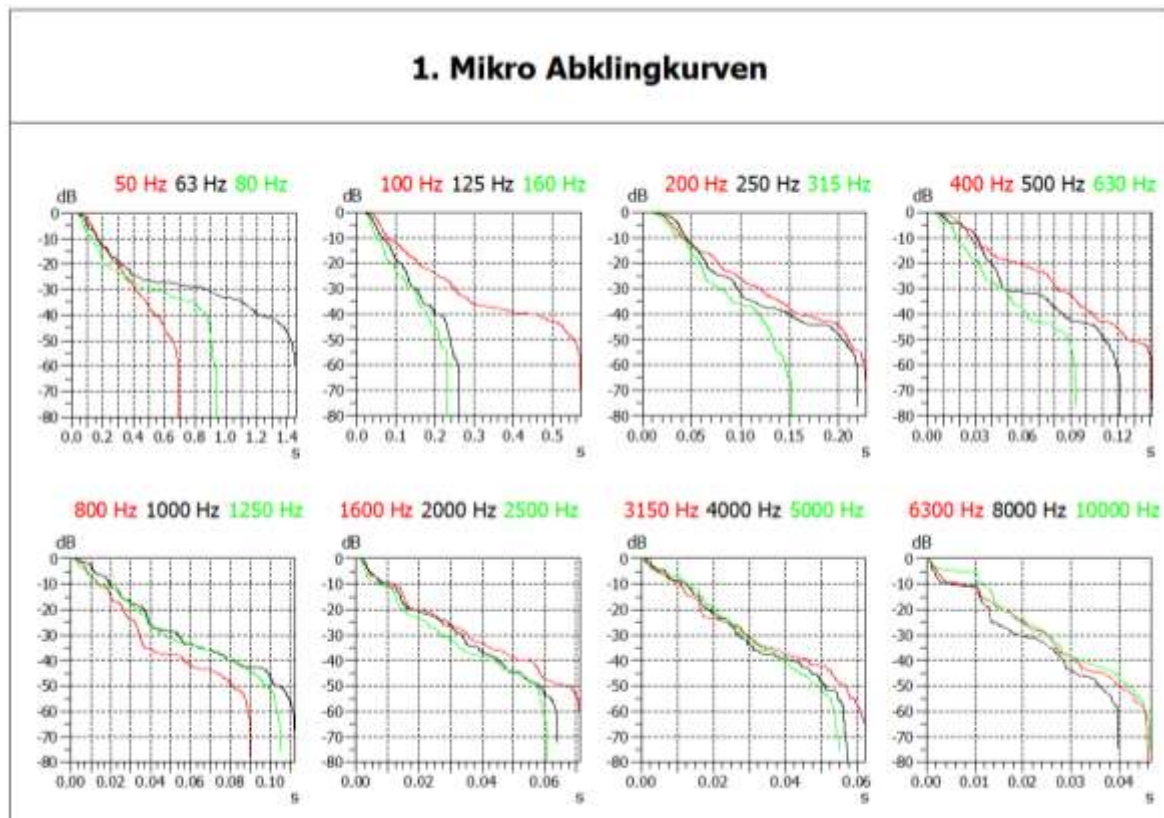


Abb. 5.6: Terzband-Abklingkurven für (Q2) und (M1) zum Raumausstattungszustand (1)b

²⁶ Vgl. [SPÖTL1 S. 23]

5.2.1.3 Raumakustische Gütemaße

Die unten angeführte Tabelle stellt die Werte der relevanten raumakustischen Gütemaße und Summenparameter über die Quell- und Mikrofonpositionen 1 (**Q1** bzw. **M1**) und 2 (**Q2** bzw. **M2**) – also vier Pfade – gemittelt für die verschiedenen Raumausstattungs Zustände **(1)c**, **(2)** und **(3)** sowie zur einfacheren Vergleichbarkeit erneut für den Überaum dar. Bei letzterem wurde über alle sechs Mikrofonpositionen und beide Quellpositionen – also zwölf Pfade – gemittelt. Die Berechnung der Einzahlwerte von T_{20} , T_{30} , EDT, C_{50} , C_{80} und D_{50} erfolgte entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 5.1.

Zustand	T_{20} [s]	T_{30} [s]	EDT [s]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]	D_{50} [%]	BR
(1)c	0,1	0,1	0,1	-	-	-	2,9
(2)	0,2	0,2	0,2	-	-	-	1,7
(3)	1,0	1,0	1,1	0,2	3,3	51	0,6
Überaum	0,6	0,6	0,6	4,6	8,2	74	1,0

Tab. 5.1: Summenparameter und raumakustische Gütemaße des Überaumes und der Übekabine zu den Zuständen **(1)c**, **(2)** und **(3)**

Hier sei anzumerken, dass die raumakustischen Maße zur Bestimmung der Klarheit bzw. Deutlichkeit (C_{50} , C_{80} und D_{50}) aufgrund der äußerst geringen Nachhallzeiten im Frequenzbereich von 400 Hz bis 1250 Hz zu den Raumausstattungs Zuständen **(1)** und **(2)** gar nicht mehr berechnet werden konnten bzw. übertrieben hohe Werte annehmen würden.²⁷ Dies lässt schlussfolgern, dass eine Raumwahrnehmung quasi nicht mehr möglich ist, was sich auch gut mit dem subjektiven Hörempfinden deckt. Da die porösen Absorber verstärkt im oberen Frequenzbereich wirken, stieg bei den entsprechenden Raumausstattungs Zuständen **(2)** und **(1)** das Bassverhältnis scheinbar auf ca. 2 bzw. 3 an (vgl. Abschnitt 5.2.4). Die Maße zur Bewertung der Deutlichkeit und Klarheit sowie das Bassverhältnis zum Zustand **(3)** zeigen deutlich geringere Werte als im Überaum. In den Summenparametern wird die drastische Reduktion der Nachhallzeit durch die porösen Absorber nochmals deutlich. Zudem decken sich bei allen Konfigurationen der Wert des für die wahrgenommene Nachhallzeit eines Raumes wichtigen EDT-Parameters²⁸ gut mit denen der T_{20} - bzw. T_{30} -Parameter.

²⁷ Vgl. [RA S. 102 und S. 116]

²⁸ Vgl. [RA S. 100–101]

5.2.2 Analytische Berechnung der Nachhallzeitverläufe

Um die Gültigkeit der Messdaten sowie der Sabine'schen Nachhallformel²⁹ in dieser speziellen Anwendungssituation zu überprüfen, sollen die bisher durchgeführten Messungen anhand der Herstellerdaten für die jeweils eingesetzten Absorber analytisch nachgewiesen werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die berechneten äquivalenten Absorptionsflächen der vorhandenen Absorber. Hier gilt es zu beachten, dass für plane Basotect-Absorber lediglich bis zu einer Dicke von 15 cm Herstellerdaten vorhanden waren und somit die äquivalente Absorptionsfläche der beiden Quadersäulen mit den α -Werten für diese Dicke berechnet wurden => die berechneten Werte sind in der Regel für tiefe Frequenzen zu gering. Bei einer experimentell durchgeführten Messung stellte sich heraus, dass die beiden Quadersäulen auch grob durch vier Basotect-Keilabsorber bei Aufstellung in vertikalen Kanten der Übekabine angenähert werden hätten können. Weiters waren für die Basotect-Keilabsorber lediglich Herstellerdaten für eine Aufstellung in Raumkanten vorhanden => da in der Übekabine die Keilabsorber zur Auskleidung von zwei Wänden eingesetzt wurden, müssten laut Theorie die berechneten Werte vor allem für tiefe Frequenzen zu hoch sein. Bei einer späteren messtechnisch durchgeführten Überprüfung dieser Theorie stellte sich jedoch heraus, dass sich diese Behauptung zumindest in diesem speziellen Anwendungsfall nicht eindeutig nachvollziehen lässt (vgl. Abb. 6.9).

Absorbertyp	Äquivalente Absorptionsfläche [m ²]					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Pyramiden-PU-Schaum (10,5 m²)	0,63	2,31	4,62	7,25	10,40	10,82
Basotect-Quadersäulen (1,6 m²)	0,85	1,30	1,43	1,53	1,56	1,59
Basotect-Keilabsorber (24 Stück)	5,70	9,90	8,94	7,56	6,30	5,10

Tab. 5.2: Berechnete äquivalente Absorptionsflächen der eingesetzten Absorber nach Herstellerdatenblättern³⁰

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Vergleich der gemessenen Nachhallzeitverläufe zu den Raumausstattungszuständen (3), (2) und (1)c (vgl. Abb. 5.4) mit den aus den gemessenen Nachhallzeitdaten von Zustand (3) und den äquivalenten Absorptionsflächen aus Tab. 5.2 berechneten Daten für Zustand (2) und (1)c. Da die Herstellerdaten für die jeweiligen Absorber

²⁹ Vgl. [RA S. 70]

³⁰ https://www.eurokustik.com/files/pupiramide_de_neu.pdf (30.08.2018): „PU PIRAMIDE 50mm“ für Pyramiden-PU-Schaum
http://www.audiotec.at/fileadmin/audiotec_at/user_upload/Prospekte_Industrie/Absorptions-___Daemmatten.pdf (30.08.2018): „S000-150“ für Basotect-Quadersäulen
 Audiotec „S681-250“ für Basotect-Keilabsorber

lediglich in Oktavbandauflösung verfügbar waren, wurde über die Nachhallzeitwerte aus den jeweils entsprechenden drei Terzbändern eine arithmetische Mittelung zur Bestimmung einer quasi Oktavbandnachhallzeit vorgenommen. Hier sei anzumerken, dass der Pegel und somit die Auswirkung des jeweiligen Terzbandes auf die entsprechende Oktavbandnachhallzeit bei tatsächlicher Oktavbandauswertung nicht berücksichtigt wurde. Da die gemessenen Nachhallzeiten allerdings einen relativ glatten Verlauf aufweisen, ist davon auszugehen, dass der dadurch entstandene Fehler vernachlässigbar ist. Der Teppich am Boden der Übekabine wurde hier bei den berechneten Nachhallzeitverläufen noch nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.2).

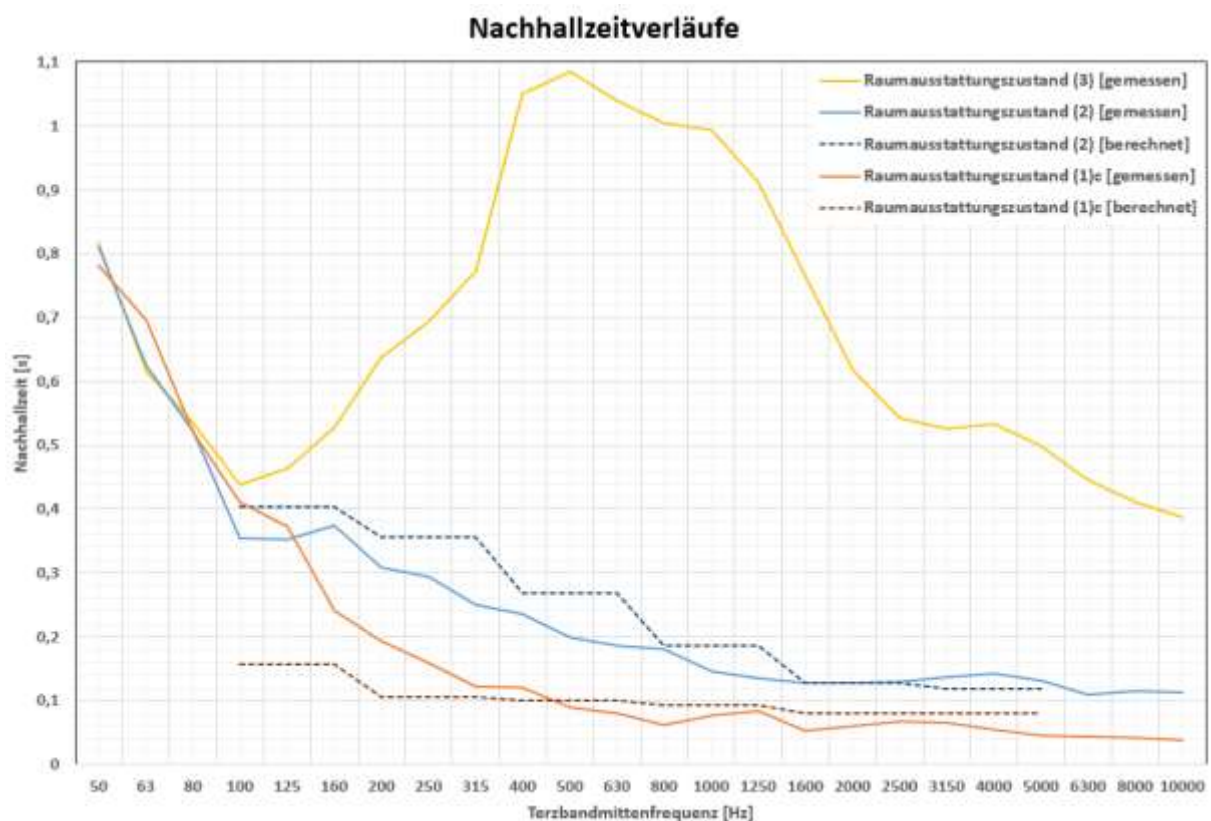


Abb. 5.7: Vergleich von gemessenen zu berechneten Nachhallzeitverläufen

Beim Betrachten von Abb. 5.7 fällt auf, dass die berechneten Nachhallzeitverläufe für den mittleren und hohen Frequenzbereich ziemlich gut mit den tatsächlich gemessenen Daten übereinstimmen. Im tiefen Frequenzbereich zeigt allerdings der berechnete Nachhallzeitverlauf eine deutlich höhere Absorption durch die Basotect-Absorber (vgl. Zustand **(1)c** [strichliert]) als bei der Auswertung von entsprechender Messung nach Abschnitt 5.2.1.1 [durchgezogen] suggeriert wurde.

5.2.3 Einfluss der verwendeten Filter

Aufgrund der in Abschnitt 5.2.1 und 5.2.2 erläuterten Vorkommnisse im tiefen Frequenzbereich sowie den Hinweisen inkl. gemessener „Filternachklingzeiten“ in der Arbeit von Spötl³¹ bedarf es einer genaueren Analyse der Auswirkungen der Terzbandfilterung. Anschließend sollen die Nachhallzeitverläufe und raumakustischen Gütemaße in der Übekabine erneut ausgewertet und analysiert werden.

5.2.3.1 Normanforderungen

Laut Norm muss für eine zuverlässige Nachhallzeitberechnung stets die Ungleichung *Filterbandbreite* [Hz] · *Nachhallzeit* [s] > 16 erfüllt sein.³² Für den Raumausstattungs-zustand **(1)c** ist dieser Zusammenhang allerdings erst ab dem 1 kHz-Terzband bzw. 250 Hz-Oktavband bei Oktavbandauswertung (vgl. Abschnitt 5.2.4) zutreffend. Zudem sollen die verwendeten Filter der IEC 61260 Norm entsprechen.³³ Diese wiederum stellt Anforderungen an die Dämpfungscharakteristika der eingesetzten Filter und teilt diese in die Klassen 0, 1 und 2 ein, wobei erstere der strengsten entspricht.³⁴

In nachfolgender Abbildung sind die Filterübertragungsfunktionen des 63 Hz-Butterworth-Terzbandfilters 14. Ordnung, welcher bei den Nachhallzeit-Auswertungen von Abschnitt 5.2.1 eingesetzt wurde, und 6. Ordnung sowie eines 63 Hz-Butterworth-Oktavbandfilters 14. Ordnung und 6. Ordnung in Bezug zu den jeweils gültigen Klasse 0 Normanforderungen dargestellt. Alle Filter wurden nach demselben Vorgehen entsprechend der Dokumentation von Spötl generiert.³⁵

³¹ Vgl. [SPÖTL1 S. 22]

³² Vgl. [ÖNORM EN ISO 3382-1 S. 14]

³³ Vgl. [ÖNORM EN ISO 3382-1 S. 8]

³⁴ Vgl. [ÖVE/ÖNORM EN 61260+A1 S. 13 und S. 31]

³⁵ Vgl. [SPÖTL1 S. 21]

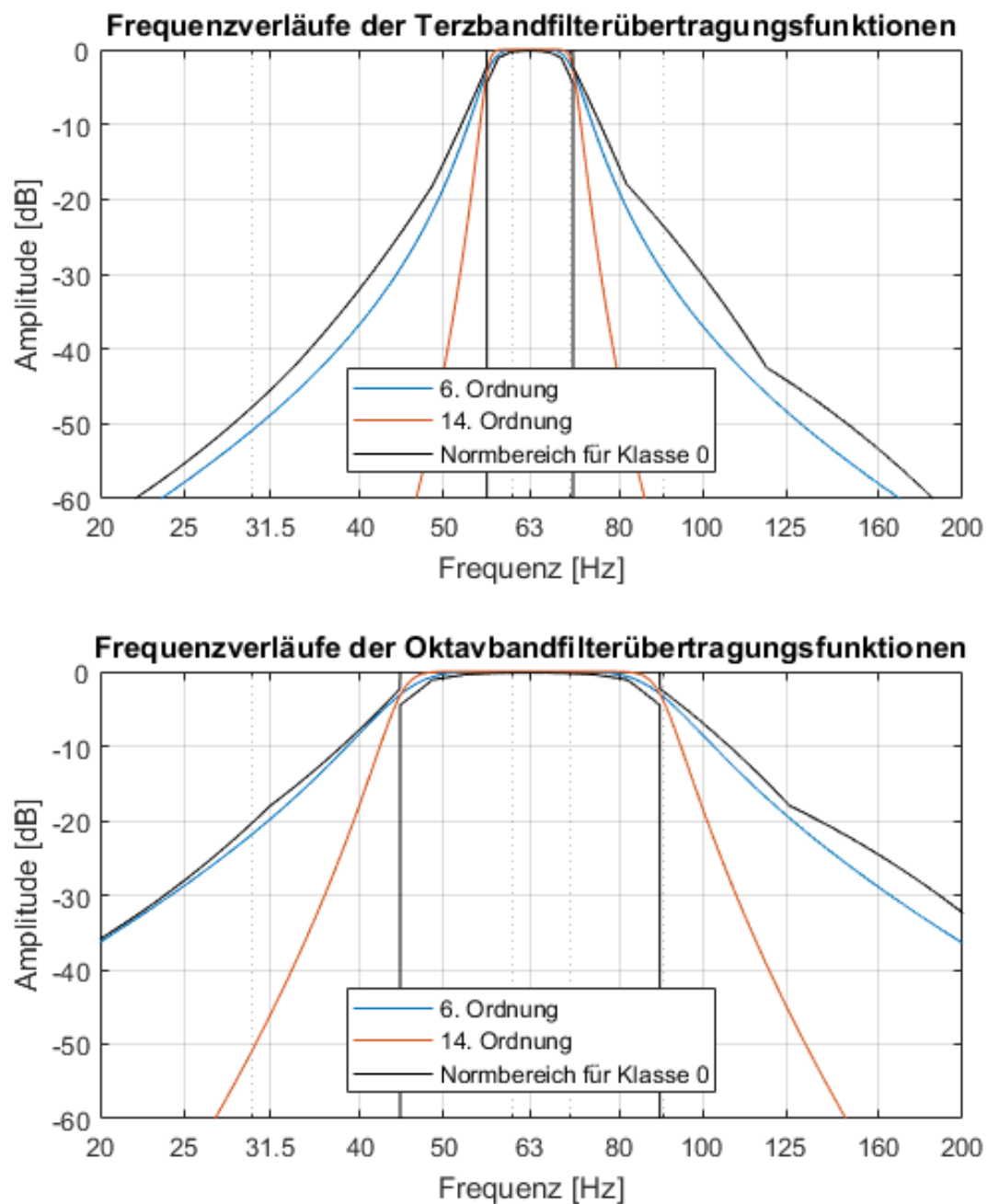


Abb. 5.8: 63 Hz-Terz- und Oktavbandfilter-Übertragungsfunktionen für 6. und 14. Ordnung in Bezug zum jeweiligen Normbereich für Klasse 0

Wie in Abb. 5.8 zu erkennen ist, erfüllen die Filter 6. Ordnung gerade noch die Anforderungen für Klasse 0 – die Filter 14. Ordnung liegen ausgewogen innerhalb des Normbereichs.

5.2.3.2 Filterabklingzeiten

Die untenstehende Abbildung zeigt die Abklingzeiten für die beiden Terz- sowie Oktavbandfilter mit 14. bzw. 6. Ordnung, welche durch Auswertung eines mit den jeweiligen Filtern gefilterten digitalen Dirac-Impulses berechnet wurden.³⁶ Dabei wurde jeweils über den T_{20} - und T_{30} -Verlauf gemittelt. Zusätzlich sind die Messergebnisse aus Abschnitt 5.2.1.1 zur besseren Veranschaulichung der Problematik hinterlegt.

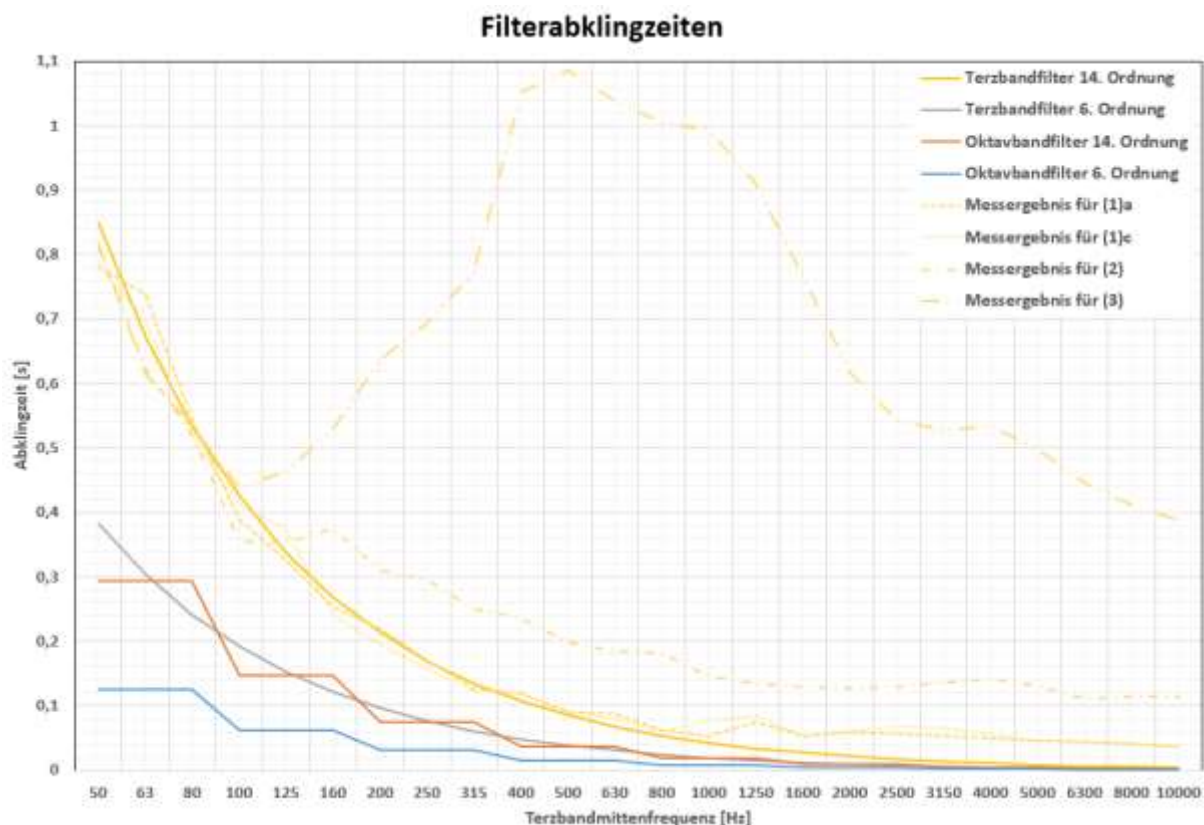


Abb. 5.9: Abklingzeiten für Terz- und Oktavbandfilter 14. bzw. 6. Ordnung mit Hinterlegung der Auswertungsergebnisse aus Abschnitt 5.2.1.1

In Abb. 5.9 wird deutlich, dass aufgrund des Zusammenhangs von Frequenz- und Zeitbereich die Abklingzeit der Filter umso größer wird, desto geringer ihre Bandbreiten und größer ihre Ordnungen – also Flankensteilheiten – sind. Die Abklingzeiten des Oktavbandfilters 14. Ordnung gleichen quasi denen des Terzbandfilters 6. Ordnung. Beim Vergleich der Abklingzeiten des Terzbandfilters 14. Ordnung mit den Auswertungsergebnissen aus Abschnitt 5.2.1.1 ist zu erkennen, dass die ausgewerteten Nachhallzeitverläufe aller Raumausstattungs Zustände im tieffrequenten Bereich unter dem 125 Hz-Terzband tatsächlich grob dem Abklingzeitenverlauf der eingesetzten Filter folgen. Durch die eingebrachten Absorber (1) und die damit einhergehende Reduktion der Nachhallzeiten vergrößert sich dieser Bereich

³⁶ Vgl. [SPÖTL1 S. 22]

sogar bis ~ 1 kHz – eine gute Übereinstimmung mit der vorhin aus der Normanforderung berechneten Grenze (vgl. Abschnitt 5.2.3.1) ist also gegeben.

Um herauszufinden, welche Filterabklingzeiten ausreichend gering sind, um die vorhandenen Messdaten aussagekräftig auswerten zu können, sind in nachfolgender Abbildung die mit Terz- sowie Oktavbandfilter 14. und 6. Ordnung berechneten Nachhallzeitverläufe zum Raumausstattungszustand **(1)c** den zugehörigen Filterabklingzeiten gegenübergestellt.

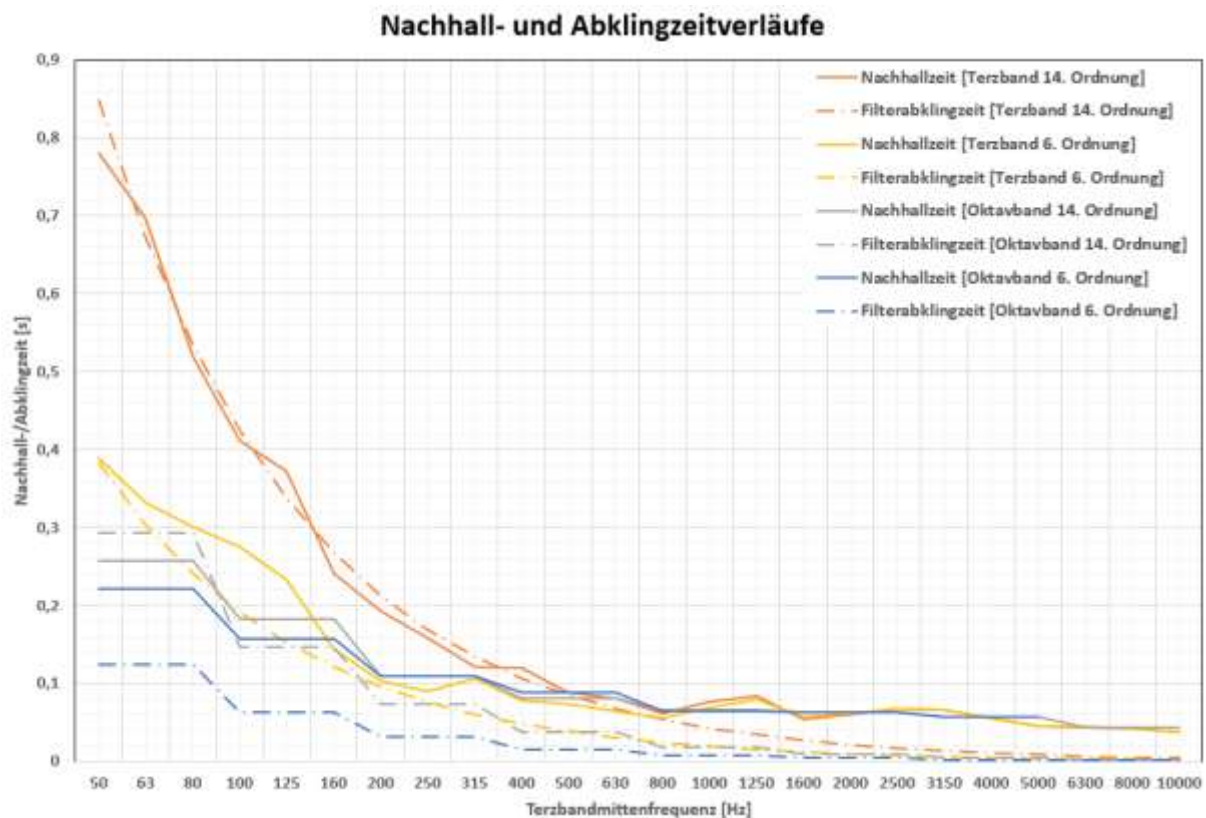


Abb. 5.10: Gegenüberstellung von Filterabkling- und Nachhallzeitverläufen zum Raumausstattungszustand **(1)c**

In Abb. 5.10 ist zu erkennen, dass eine von der entsprechenden Filterabklingzeit weitestgehend unabhängige breitbandige Messdatenauswertung lediglich bei der Filterung mit dem Oktavbandfilter 6. Ordnung möglich zu sein scheint.

5.2.3.3 Quantifizierung des durch die Filterung verursachten Messfehlers

Nun soll eine genauere Analyse des aufgrund der vorhin „gemessenen“ Filterabklingzeiten (vgl. Abb. 5.10) hervorgerufenen Messfehlers sowie eine Quantifizierung von letzterem experimentell mithilfe von Simulationen erfolgen. Dafür wurden drei verschiedene Anregungsarten gewählt – Einzelsinus-Testsignale, Multisinus-Testsignale und Pseudoransch-Impulsantworten.

Untersuchungen mit Einzelsinus-Testsignalen

Die nachfolgend geschilderten Untersuchungen wurden mit dem 63 Hz-Butterworth-Terzbandfilter 14. Ordnung durchgeführt. Dafür wurden mehrere Sinussignale mit 65536 Hz Abtastrate, 32 bit float Wortbreite, 7 Sekunden Länge (5 Sekunden konstante Amplitude, bis zu 2 Sekunden für Fade-out) und einer digitalen Amplitude von 0,9 mithilfe der frei erhältlichen Software Audacity generiert. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Frequenzen der erstellten Testsignale mit entsprechenden Anmerkungen in Bezug zum verwendeten 63 Hz-Terzbandfilter.

#	Frequenz [Hz]	Anmerkung
1	53	25 dB Dämpfung
2	56,25	3 dB Dämpfung
3	63	Mittenfrequenz
4	68	Durchlassbereich ohne Dämpfung
5	70,80	3 dB Dämpfung
6	75	25 dB Dämpfung

Tab. 5.3: Frequenzen für die Untersuchung des durch den 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung verursachten Messfehlers

Zuerst wurde auf die Testsignale beginnend bei Sekunde 5 ein 0,2 Sekunden langes exponentielles Fade-out zur Simulation des Abklingvorgangs angewandt. Das verbleibende Signal nach dem Fade-out wurde digital auf Amplitude 0 gesetzt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die mithilfe der in Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Auswertung erhaltenen Abklingkurven der ungefilterten und der mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Testsignale. Als Auswertungsbereich wurden 45 dB gewählt.

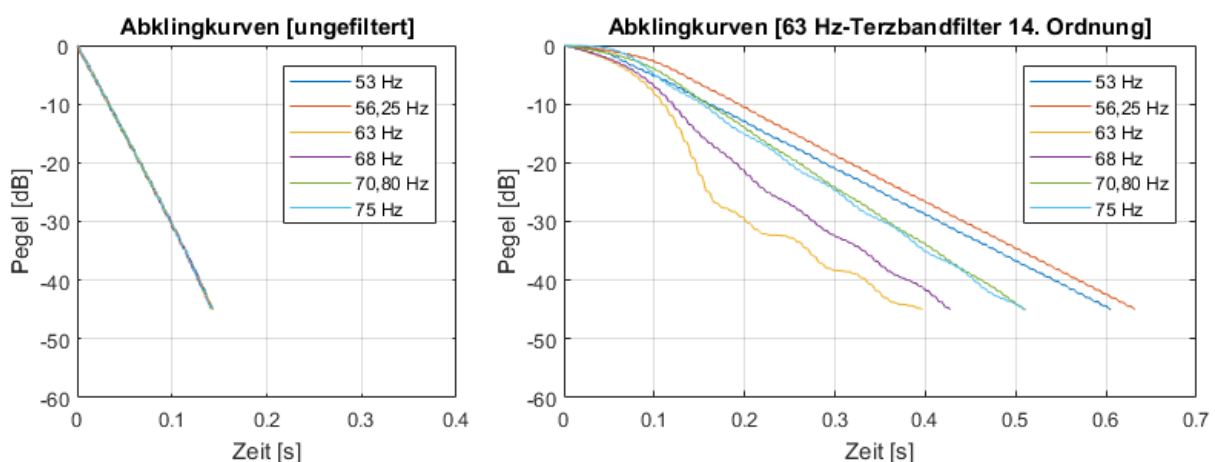


Abb. 5.11: Abklingkurven der ungefilterten sowie der mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Einzelsinus-Testsignale mit unterschiedlichen Frequenzen

In nachfolgender Tabelle sind die zugehörigen – über T_{20} - und T_{30} -Auswertung arithmetisch gemittelten – algorithmisch berechneten Abklingzeiten angeführt.

Frequenz [Hz]	Ungefilterte Abklingzeit [s]	Gefilterte Abklingzeit [s]
53	0,20	0,76
56,25	0,20	0,74
63	0,20	0,30
68	0,20	0,45
70,80	0,20	0,60
75	0,20	0,60

Tab. 5.4: Gegenüberstellung der algorithmisch berechneten Abklingzeiten der ungefilterten und mit 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Einzelsinus-Testsignale mit unterschiedlichen Frequenzen

Beim Betrachten von Abb. 5.11 und Tab. 5.4 wird deutlich, dass die Filterung der Testsignale tatsächlich zu einem großen Messfehler führt, zumindest wenn die Signalabklingzeiten deutlich geringere Werte als die gemessenen Filterabklingzeiten ($\hat{=}$ 0,66 s für 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung) aus dem vorherigen Abschnitt 5.2.3.2 (vgl. Abb. 5.9) annehmen.

Zudem ist zu erkennen, dass die durch den 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung hervorgerufene Verfälschung stark von der Testsignalfrequenz abhängig ist. Bei Anregung mit der Filtermittenfrequenz ist vorerst von einem deutlich geringeren Messfehler als bei Anregung mit benachbarten Frequenzen auszugehen. Durch den gewölbten Verlauf sowie den deutlichen Knick dieser Abklingkurve ist dafür von einer starken Abhängigkeit zwischen der berechneten Abklingzeit und dem gewählten Auswertungsbereich auszugehen – der zugehörige Messfehler ist also nicht unabhängig von der Auswertungsmethode.

Weiters wird klar, dass insbesondere Frequenzen, die durch den Filter bereits gedämpft werden, eine wesentlich erhöhte Abklingzeit aufweisen – sogar noch länger, als die im vorherigen Abschnitt 5.2.3.2 mittels Dirac-Impulsanregung aufgezeichneten Filterabklingzeiten ($\hat{=}$ 0,66 s für 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung). Außerdem zeigt sich, dass hier – anders als beim Amplitudenverlauf – keine Symmetrie bezüglich der Mittenfrequenz festzustellen ist – bei selber Dämpfung weisen Signale mit einer Frequenz unterhalb der Filtermittenfrequenz einen größeren Messfehler als jene mit einer über der Mittenfrequenz liegenden Frequenz auf.

Für die nächsten Untersuchungen erfolgt eine Beschränkung auf das 56,25 Hz-Testsignal, da dieses bereits einen sehr großen Messfehler aufweist, obwohl es nur schwach – nämlich -3 dB – vom Filter gedämpft wird und daher in der Praxis noch von großer Bedeutung ist. Für die nachfolgende Abbildung wurden nach demselben Vorgehen wie vorhin Testsignale erstellt. Die Frequenz blieb konstant auf 56,25 Hz und die Länge des Fade-outs wurde in 0,2 s-Abständen bis zu einer Länge von 1,4 s inkrementiert. Die so erhaltenen Abklingzeiten sind erneut sowohl für die ungefilterten als auch die mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Testsignale in nachfolgender Grafik veranschaulicht.

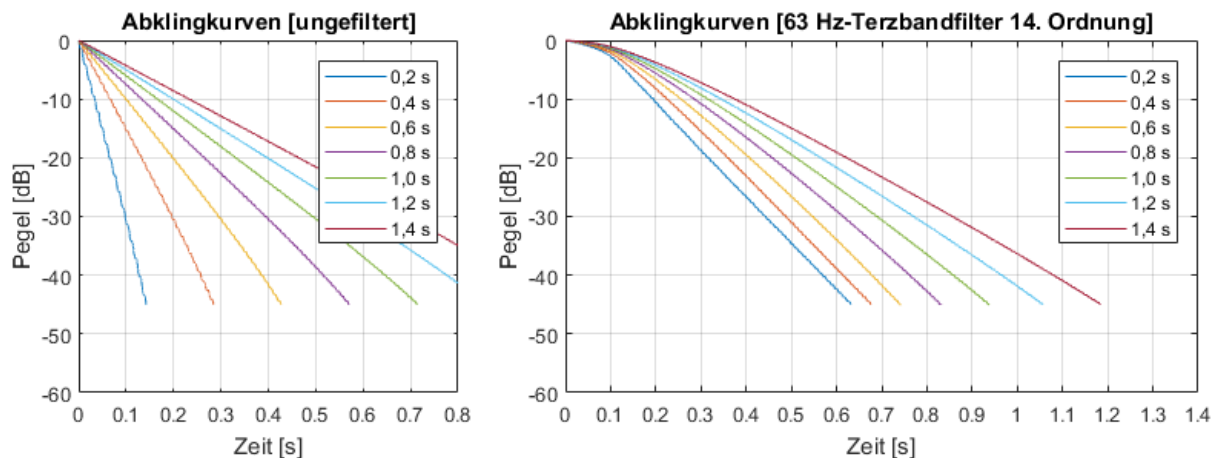


Abb. 5.12: Abklingkurven der ungefilterten sowie der mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten 56,25 Hz-Testsignale mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

Die nächste Tabelle zeigt erneut die zugehörigen – über T_{20} - und T_{30} -Auswertung arithmetisch gemittelten – algorithmisch berechneten Abklingzeiten.

Fade-out [s]	Ungefilterte Abklingzeit [s]	Gefilterte Abklingzeit [s]
0,2	0,20	0,74
0,4	0,39	0,80
0,6	0,59	0,90
0,8	0,79	1,02
1,0	0,99	1,16
1,2	1,18	1,31
1,4	1,38	1,48

Tab. 5.5: Gegenüberstellung der algorithmisch berechneten Abklingzeiten der ungefilterten und mit 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten 56,25 Hz-Testsignale mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

Abb. 5.12 und Tab. 5.5 zeigen, dass, wenn die Anregungsfrequenz der unteren -3 dB Grenzfrequenz des Filters entspricht, auch bei deutlich über den in Abschnitt 5.2.3.2 durch Dirac-Anregung gemessenen Filterabklingzeiten ($\cong 0,66$ s für 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung) liegenden Signalabklingzeiten ein nicht zu vernachlässigender Messfehler verursacht wird. Erst wenn die Abklingzeit der Anregungsfrequenz grob doppelt so groß wie die entsprechende Filterabklingzeit ist, kann ein Messfehler geringer als 10 % erreicht werden.

Untersuchungen mit Multisinus-Testsignalen

Um eine Annäherung an ein im Modalbereich eines Raumes tatsächlich gemessenes Signal zu schaffen, wurde als nächstes ein Testsignal nach oben beschriebenem Vorgehen erstellt, welches allerdings eine Zusammensetzung von Sinussignalen mit den in Tab. 5.3 angeführten Frequenzen ist. Dabei wurden alle Frequenzen mit dem gleichen Faktor in der Amplitude skaliert und das erhaltene Summsignal anschließend wieder auf eine digitale Amplitude von 0,9 normalisiert. Danach wurden auf dieses Summsignal wieder ab Sekunde 5 exponentielle

Fade-outs von 0,2 s bis 1,4 s in 0,2 s-Schritten angewandt, um so die Testsignale für die nachfolgenden Untersuchungen zu erhalten. Die nächste Abbildung zeigt die Abklingkurven sowohl der ungefilterten als auch der mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Testsignale.

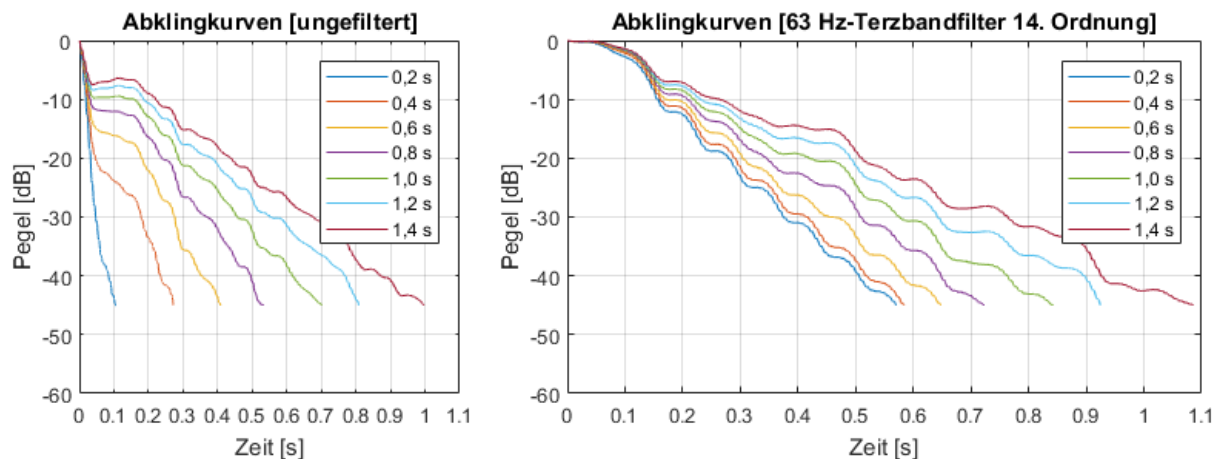


Abb. 5.13: Abklingkurven der ungefilterten sowie der mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Multisinus-Testsignale mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

In der nachfolgenden Tabelle sind wieder die zugehörigen – über T_{20} - und T_{30} -Auswertung arithmetisch gemittelten – algorithmisch berechneten Abklingzeiten angeführt.

Fade-out [s]	Ungefilterte Abklingzeit [s]	Gefilterte Abklingzeit [s]
0,2	0,09	0,65
0,4	0,50	0,69
0,6	0,95	0,79
0,8	1,08	0,98
1,0	1,15	1,19
1,2	1,32	1,34
1,4	1,50	1,52

Tab. 5.6: Gegenüberstellung der algorithmisch berechneten Abklingzeiten der ungefilterten und mit 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Multisinus-Testsignale mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

Die in Abb. 5.13 und Tab. 5.6 ausgewerteten Testdaten verdeutlichen, dass alleine die Überlagerung der wenigen einzelnen Frequenzen aus Tab. 5.3 – also noch ohne Filterung – ausreicht, um bereits einen großen Messfehler bei der Auswertung zu verursachen. Durch die Interferenz der Signale entstehen deutliche Unebenheiten sowohl im Verlauf der ungefilterten als auch der gefilterten Abklingkurven, weshalb die erhaltenen Ergebnisse mit der Wahl des Auswertungsbereichs stark variieren. Zudem ist davon auszugehen, dass bei Messungen, bei denen ein eingeschwungener Zustand im Raum erzeugt wird, die Form der Abklingkurven vom Abschaltzeitpunkt abhängig ist.

Untersuchungen mit Pseudoransch-Impulsantworten

Weiters wurde mithilfe von MATLAB ein 5 s langes weißes Pseudoransch-Testsignal (erster Samplewert auf +1 fixiert, bis zu 5 Sekunden für Fade-out), welches ausschließlich auf die Werte -1, 0 und +1 beschränkt wurde, mit einer Abtastrate von 65536 Hz generiert. Dadurch war es möglich, ohne Mittelungen sowohl breitbandige als auch unterschiedlich lange „glatte“ exponentielle Abklingvorgänge mit verschiedenen Fade-out-Dauern zu generieren. Letztere Bearbeitungen wurden wieder mit Audacity durchgeführt und die erhaltenen Signale im wav-Format mit 32 bit float Wortbreite gespeichert. Da jedes dieser Testsignale als Dirac-Impuls mit nachfolgenden – sowohl positiv als auch negativ gewichteten – weiteren Dirac-Impulsen in pseudozufälligen Abständen zueinander und mit exponentiell abklingender Amplitude betrachtet werden kann, stellen diese eine Simulation von in einem speziellen, bei dem alle Frequenzen dieselbe Nachhallzeit aufweisen, idealen Diffusfeld – also ohne tonale Resonanzen – gemessenen Impulsantworten dar. Deshalb wurden hier zur Auswertung auch die in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen und leicht veränderten m-Files von Spötl zur Berechnung der Nachhallzeiten verwendet. Die aus den ungefilterten sowie mit 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten erhaltenen Abklingkurven sind in nächster Abbildung veranschaulicht.

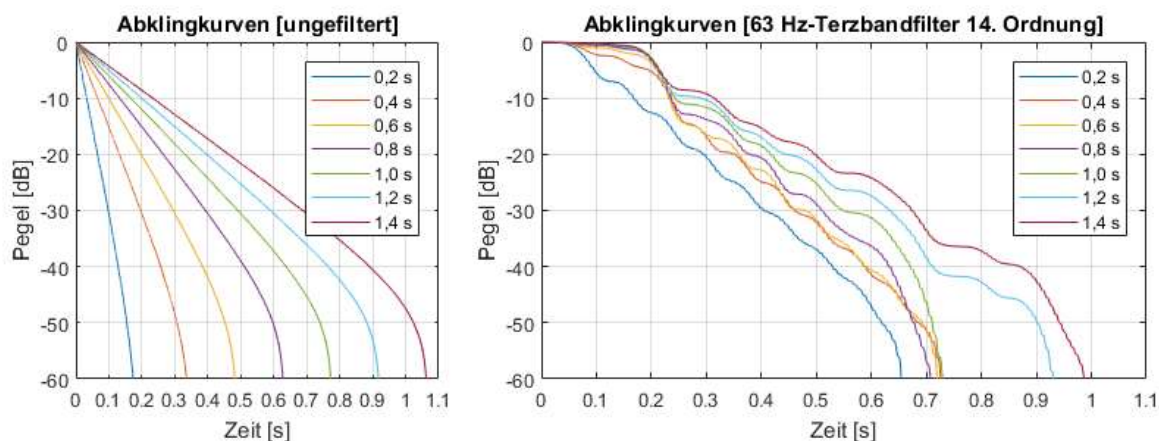


Abb. 5.14: Abklingkurven der ungefilterten sowie der mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

Nachfolgend sind die zugehörigen – über T_{20} - und T_{30} -Auswertung arithmetisch gemittelten – algorithmisch berechneten Nachhallzeiten in einer Tabelle angeführt.

Fade-out [s]	Ungefilterte Nachhallzeit [s]	Gefilterte Nachhallzeit [s]
0,2	0,20	0,74
0,4	0,39	0,68
0,6	0,59	0,77
0,8	0,78	0,82
1,0	0,98	0,91
1,2	1,18	1,05
1,4	1,37	1,18

Tab. 5.7: Gegenüberstellung der algorithmisch berechneten Nachhallzeiten der ungefilterten und mit 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

In Abb. 5.14 kann erkannt werden, dass die Filterung zum einen zu Unebenheiten in den Abklingverläufen und zum anderen zu einer Abflachung der Steilheit von letzteren bei kurzen Fade-out-Dauern führt. In Tab. 5.7 ist besonders auffällig, dass im Bereich der kürzesten Fade-out-Dauern die gefilterten Nachhallzeiten nicht mehr monoton ansteigen. Ebenso wird deutlich, dass bei Fade-out-Dauern, welche etwas länger als die mit Dirac-Anregung gemessenen Filterabklingzeiten aus Abschnitt 5.2.3.2 ($\triangleq 0,66$ s für 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung) sind, eine relativ gute Übereinstimmung zwischen gefilterten und ungefilterten Nachhallzeiten festgestellt werden kann, während die Filterung zu noch längeren Fade-out-Dauern hin bei dieser Pseudoransch-Impulsantwort sogar zu einer Verkürzung der berechneten Nachhallzeiten führt.

Zunächst wurde selbige Untersuchung mit dem 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung durchgeführt, bei welchem in Abschnitt 5.2.3.2 mithilfe der Dirac-Anregung eine wesentlich geringere Filterabklingzeit von 0,12 s gemessen wurde (vgl. Abb. 5.9). Dafür wurden noch zwei weitere Testsignale mit einer Fade-out-Dauer von 0,1 s und 0,05 s erstellt. Die untenstehende Abbildung zeigt die Abklingkurven der ungefilterten sowie mit 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten.

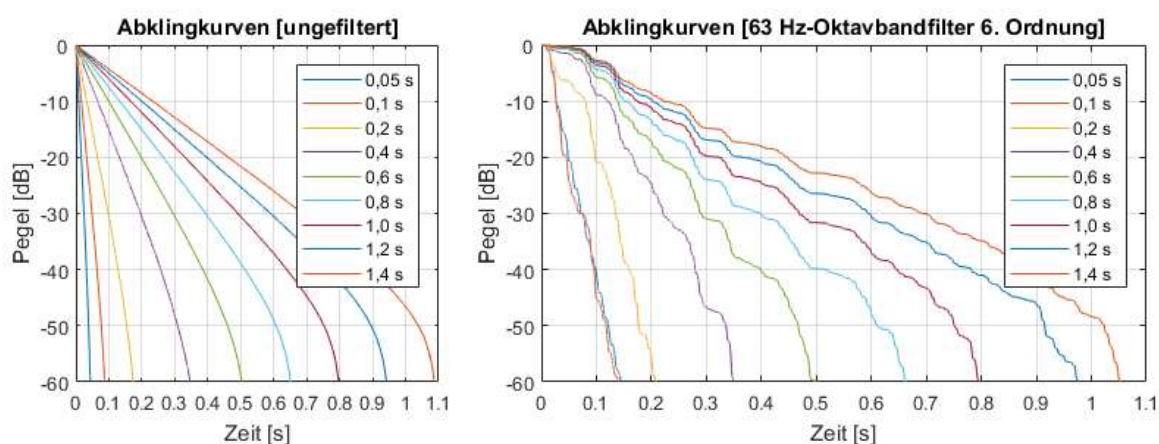


Abb. 5.15: Abklingkurven der ungefilterten sowie der mit dem 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

Die nächste Tabelle zeigt wieder die zugehörigen – über T_{20} - und T_{30} -Auswertung arithmetisch gemittelten – algorithmisch berechneten Nachhallzeiten.

Fade-out [s]	Ungefilterte Nachhallzeit [s]	Gefilterte Nachhallzeit [s]
0,05	0,05	0,13
0,1	0,10	0,12
0,2	0,20	0,25
0,4	0,39	0,34
0,6	0,59	0,51
0,8	0,79	0,68
1,0	0,98	0,89
1,2	1,18	1,13
1,4	1,37	1,38

Tab. 5.8: Gegenüberstellung der algorithmisch berechneten Nachhallzeiten der ungefilterten und mit 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten mit unterschiedlichen Fade-out-Dauern

Abb. 5.15 zeigt, dass bei den gewählten Fade-out-Dauern mit dem 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung die Unebenheiten in den Verläufen der Abklingkurven in wesentlich kürzeren Abständen als bei der Filterung mit 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung auftreten. Weiters wird deutlich, dass die Steilheiten der mit 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Abklingkurven wesentlich besser mit denen der ungefilterten übereinstimmen als bei vorheriger Auswertung mit dem 63 Hz-Terzbandfilter 14. Ordnung. Zudem kann jedoch auch erkannt werden, dass die Abklingkurven der gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten mit einer Fade-out-Dauer von 0,05 s bzw. 0,1 s – also Fade-out-Dauern, welche unter bzw. im Bereich der bei Dirac-Anregung gemessenen Filterabklingzeit aus Abschnitt 5.2.3.2 ($\triangleq 0,12$ s für 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung) liegen – sehr ähnlich verlaufen und sich der so entstandene Messfehler optisch nicht anhand von starken Welligkeiten in den Abklingkurven vermuten lässt. Es wird deutlich, dass bei entsprechend kurzen Fade-out-Dauern die Filterung zu einer Verlängerung der gemessenen Nachhallzeiten bis zum Erreichen der jeweiligen Filterabklingzeit führt (vgl. Tab. 5.8) – bei wesentlich längeren Fade-out-Dauern kommt es hier zu einer Verkürzung der gemessenen Nachhallzeiten.

Abschließend wurde untersucht, ob der durch die Filterung entstehende Messfehler bei breitbandigen Impulsantworten durch Mittelung über verschiedene Pseudoransch-Impulsantworten – welche allerdings dieselben statistischen Parameter aufweisen – reduziert werden kann. Dafür wurden fünf weitere Pseudoransch-Testsignale mit den vorhin erwähnten Eigenschaften sowie Fade-out-Dauern von 0,05 s, 0,2 s und 0,8 s erstellt. Die nächste Abbildung zeigt die ausgewerteten Abklingkurven dieser ungefilterten sowie mit 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Pseudoransch-Impulsantworten.

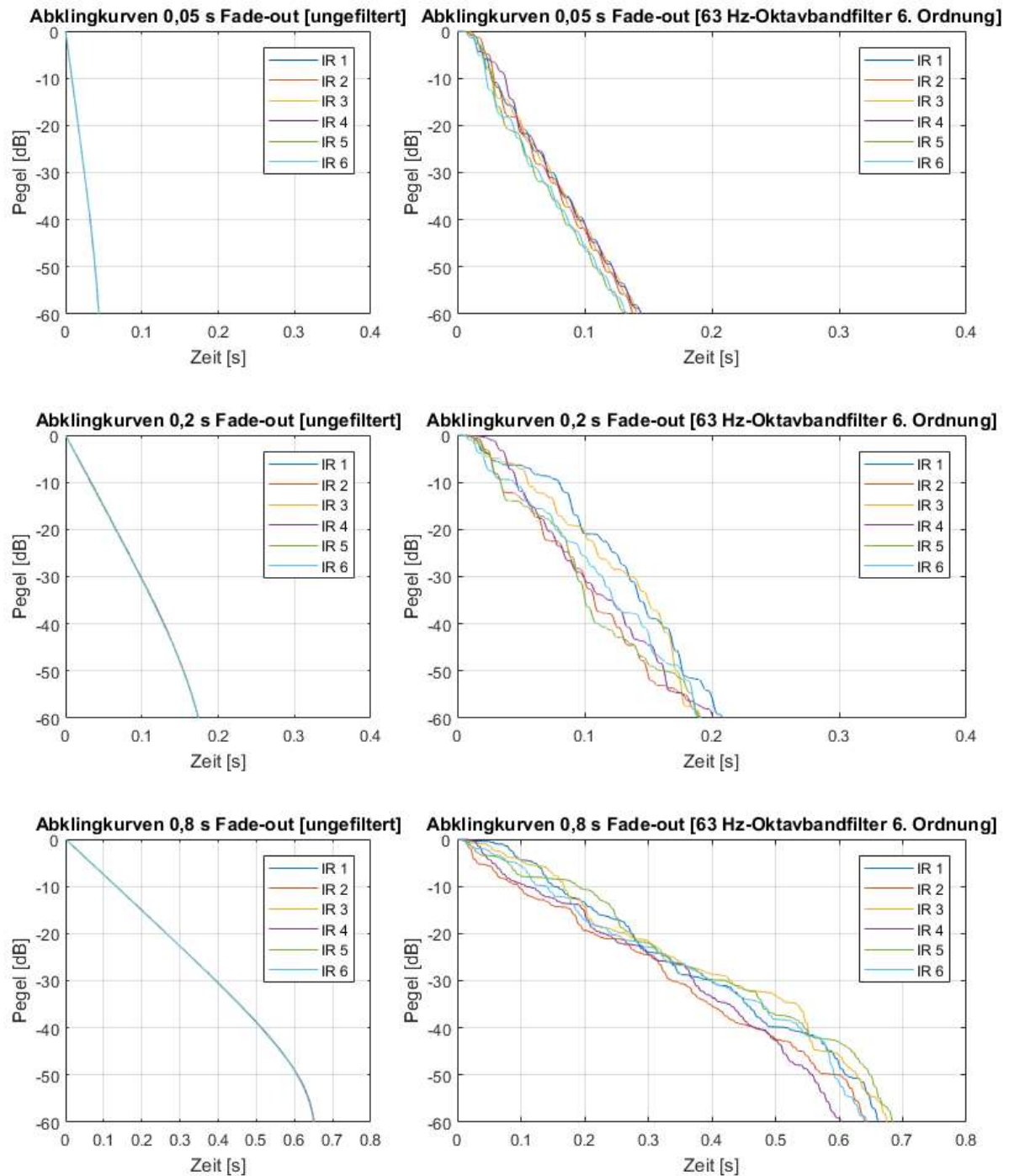


Abb. 5.16: Abklingkurven der ungefilterten sowie der mit dem 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten unterschiedlichen Pseudoransch-Impulsantworten mit 0,05 s, 0,2 s und 0,8 s Fade-out-Dauer

Die nächste Tabelle zeigt wieder die zugehörigen – über T_{20} - und T_{30} -Auswertung arithmetisch gemittelten – algorithmisch berechneten Nachhallzeiten sowie über die jeweiligen verschiedenen Pseudoransch-Impulsantworten arithmetisch gemittelten Nachhallzeiten.

#	Ungefilterte Nachhallzeit [s]				Gefilterte Nachhallzeit [s]			
	Fade out:	0,05 s	0,2 s	0,8 s	Fade-out:	0,05 s	0,2 s	0,8 s
1		0,05	0,20	0,79		0,13	0,25	0,68
2		0,05	0,20	0,78		0,12	0,19	0,78
3		0,05	0,20	0,78		0,14	0,23	0,74
4		0,05	0,20	0,78		0,11	0,15	0,77
5		0,05	0,20	0,78		0,11	0,24	0,76
6		0,05	0,20	0,79		0,12	0,24	0,76
arith. Mittel		0,05	0,20	0,78		0,12	0,22	0,75

Tab. 5.9: Gegenüberstellung der algorithmisch berechneten Nachhallzeiten der ungefilterten und mit 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Pseudoraus-Impulsantworten mit 0,05 s, 0,2 s und 0,8 s Fade-out-Dauer

Abb. 5.16 verdeutlicht, dass der genaue Verlauf der gefilterten Abklingkurven von der feinstrukturellen Beschaffenheit der Pseudoraus-Impulsantworten abhängig ist. Dieser Umstand lässt sich theoretisch gut erklären, da jeder einzelne Peak der Pseudoraus-Impulsantwort – vergleichbar mit einer eintreffenden Reflexion bei tatsächlich gemessenen Impulsantworten – mit der Filterimpulsantwort gefaltet wird. Die resultierende Abklingkurve entsteht also aus zahlreichen Überlagerungen von unterschiedlich stark skalierten und zueinander verschobenen Filterimpulsantworten. In Tab. 5.9 lässt sich allerdings erkennen, dass bei Fade-out-Dauern, welche zirka gleich oder länger als die in Abschnitt 5.2.3.2 mit Dirac-Anregung gemessene Filterabklingzeit ($\triangleq 0,12$ s für 63 Hz-Oktavbandfilter 6. Ordnung) sind, die bei der vorhergehenden Messung (vgl. Tab. 5.8) festgestellten Varianzen zwischen den ungefilterten und gefilterten Nachhallzeiten durch arithmetische Mittelungen über mehrere verschiedene Pseudoraus-Impulsantworten mit denselben statistischen Parametern – vergleichbar mit verschiedenen Quell- und Mikrofonpositionen in diesem anfangs beschriebenen speziellen idealen Diffusfeld – relativ gut verringert werden können. Bei unter die in Abschnitt 5.2.3.2 berechnete Filterabklingzeit sinkenden Fade-out-Dauern konvergiert der Mittelwert der gemessenen Nachhallzeiten gegen diese, mit Dirac-Anregung – quasi eine Pseudoraus-Impulsantwort mit unendlich schnellem Fade-out – gemessene, Filterabklingzeit – also der Abklingzeit einer einzelnen Filterimpulsantwort.

5.2.3.4 Erkenntnisse

Es lässt sich also festhalten, dass die Anforderungen der ÖNORM EN ISO 3382-1/2 bei entsprechend kurzen Nachhallzeiten kaum bis in den tiefsten Frequenzbereich hinab eingehalten werden können. Es wurde deutlich, dass dadurch das Abklingen der Filter zu teils sehr großen Messfehlern führt. Abhilfe dafür kann lediglich durch eine Reduktion der Filterordnung sowie eine Erhöhung der Filterbandbreite geschaffen werden – die Messergebnisse werden dann jedoch spektral „verwaschen“ sowie in deren Frequenzauflösung verringert.

Weiters konnte gezeigt werden, dass die resultierenden Abklingzeiten eine starke Abhängigkeit von der spektralen Zusammensetzung der Messsignale aufweisen. Bei stark tonaler Anregung konnte bei gewissen Frequenzen eine längere Filterabklingzeit (vgl. Tab. 5.4), als zuvor bei Dirac-Impulsmessung (vgl. Abb. 5.9), gemessen werden. Eine allgemein gültige Quantifizierung des Messfehlers ist somit nicht möglich, da hierbei die spektrale Zusammensetzung des Messsignals – also auch die Lage, Verteilung und Ausprägung der einzelnen Raummoden – eine entscheidende Rolle spielt. Bei einzelnen wenigen tonalen Anteilen im Bereich der Filterbandbreite wurde außerdem deutlich, dass auch ungefilterte Abklingvorgänge bei algorithmischer Auswertung einen deutlichen Messfehler aufgrund der resultierenden Unebenheiten in den Abklingkurven hervorrufen (vgl. Abb. 5.13). Dies zeigt erneut, dass die Forderung nach ausreichender Diffusität – also möglichst dichter, breitbandiger Anregung – dringend eingehalten werden sollte, um eine gültige Nachhallzeitmessung nach Norm durchführen zu können.³⁷

Abschließend konnte gezeigt werden, dass selbst bei spektral weißen Impulsantworten (keinerlei tonale Anteile – ideales Diffusfeld) durch die Filterung Messfehler entstehen, welche allerdings – wie laut Norm auch gefordert wird – durch arithmetische Mittelungen über ausreichend viele Messpositionen verringert werden können, solange die zu messenden Nachhallzeiten über den in Abschnitt 5.2.3.2 gemessenen Filterabklingzeiten liegen (vgl. Abb. 5.9). Kürzere Nachhallzeiten können aufgrund der filtereigenen Abklingzeiten nicht mehr erfasst werden – der entstehende Messfehler ist auch optisch nicht durch Welligkeiten im Verlauf der Abklingkurven erkennbar.

³⁷ Vgl. [OELMANN ZHA S. 262] und [FUCHS SPÄH ZHA S. 78]

5.2.4 Zweite Auswertung der Nachhallzeitverläufe

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Erkenntnisse, soll nun eine zweite Auswertung der Nachhallzeitverläufe für die relevanten Raumausstattungs Zustände **(1)a**, **(1)c**, **(2)** und **(3)** nach demselben Vorgehen wie in Abschnitt 5.2.1.1 beschrieben – allerdings mit Oktavbandfiltern 6. Ordnung – erfolgen. Die nachfolgende Abbildung stellt die so erhaltenen Nachhallzeitverläufe denen aus Abschnitt 5.2.1.1 (Terzbandfilter 14. Ordnung) für die Zustände **(1)c**, **(2)** und **(3)** gegenüber (**(1)a** vgl. Abb. 5.18). Zudem wurden aus den so erhaltenen oktavbandgefilterten Messergebnissen für den Raumausstattungs Zustand **(3)** erneut Nachhallzeitverläufe für die Zustände **(2)** und **(1)c** nach Abschnitt 5.2.2 – also ohne Berücksichtigung des Teppichs am Übekabinenboden – berechnet und ebenso in untenstehende Abbildung eingefügt. Wegen der erhöhten Bandbreite sowie verringerten Ordnung der verwendeten Filter, konnte hier aufgrund der am Beginn von Abschnitt 5.1 geschilderten Problematik eine korrekte Auswertung allerdings zu hohen Frequenzen hin nur noch bis zum 4 kHz-Oktavband erfolgen.

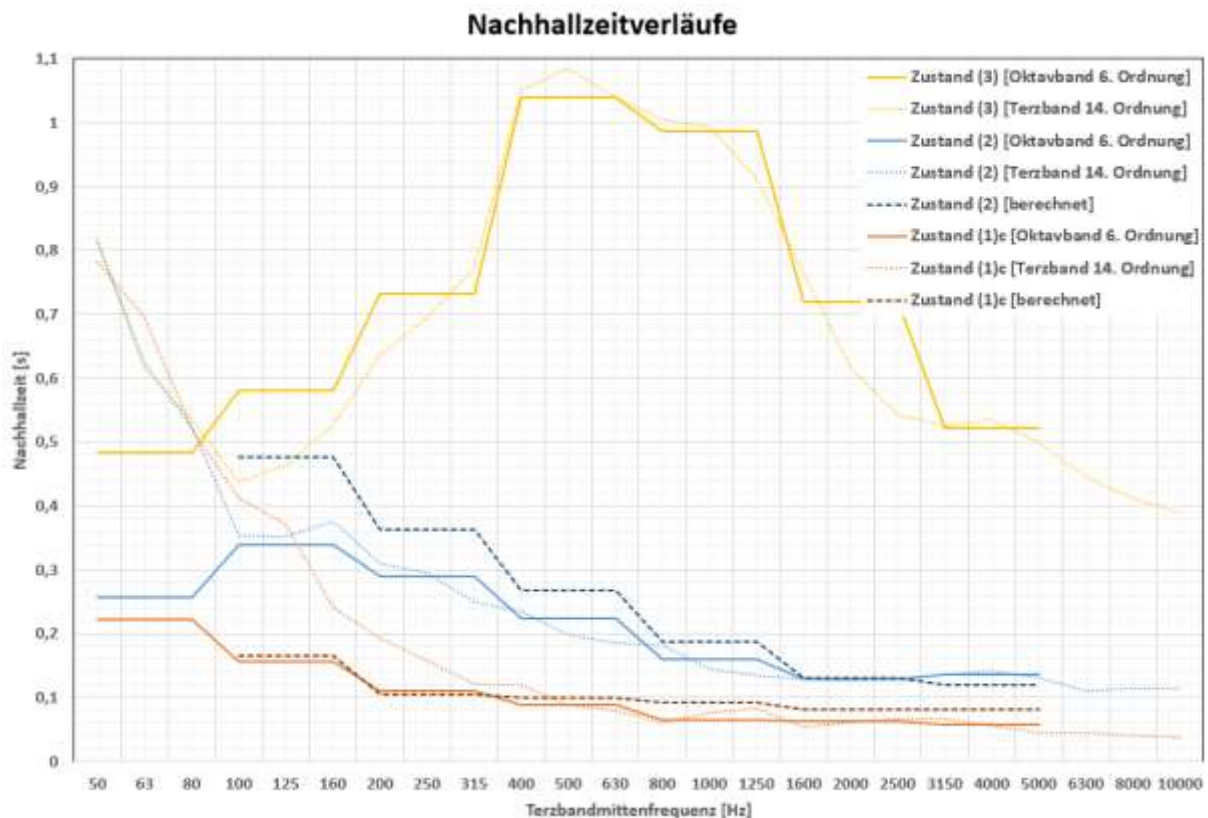


Abb. 5.17: Nachhallzeitverläufe für Raumausstattungs Zustände **(1)c**, **(2)** und **(3)** mit Oktavbandfilterung 6. Ordnung und Terzbandfilterung 14. Ordnung sowie Berechnung der Zustände **(2)** und **(1)c** aus **(3)** mit Oktavbandfilterung 6. Ordnung

Beim Betrachten von Abb. 5.17 fällt sofort auf, dass sich nun die verschiedenen Raumausstattungs Zustände sehr wohl auch im tieffrequenten Bereich unter ~ 250 Hz wesentlich voneinander unterscheiden. Im mittleren und hohen Frequenzbereich ist eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den verschiedenen gefilterten Nachhallzeitverläufen zu erkennen. Das in

Abschnitt 5.2.1.1 nicht eindeutig erklärbare gleiche Ansteigen der Nachhallzeit von ~ 125 Hz in Richtung tieferer Frequenzen für alle Raumausstattungs Zustände kann somit zumindest weitestgehend auf die Auswirkungen der Filterung zurückgeführt werden. Eine interessante Beobachtung ist, dass im Bereich von 125 Hz die berechnete Nachhallzeit für den Raumausstattungs Zustand **(3)** durch die Filter mit kürzerer Ausschwingzeit verlängert wurde. Ob dies auf die geringere Sperrbanddämpfung der Oktavbandfilter 6. Ordnung und somit ein Einwirken der höheren Frequenzen mit längerer Nachhallzeit oder das Zusammenwirken von Raum- und Filterimpulsantwort der Terzbandfilter 14. Ordnung zurückzuführen ist, kann nicht eindeutig festgestellt werden. Weiters fällt auf, dass auch im Raumausstattungs Zustand **(2)** mit den dünnen PU-Schaumabsorbern bis in den tiefen Frequenzbereich hinab eine nicht zu vernachlässigende Dämpfung erzielt werden konnte. Die Berechnungsergebnisse für diesen Zustand stimmen allerdings zu tiefen Frequenzen hin immer weniger mit den gemessenen überein und weisen nun sogar eine größere Abweichung als bei der Auswertung mit den Terzbandfiltern 14. Ordnung auf (vgl. Abb. 5.7). Dies könnte einerseits daran liegen, dass die Herstellerdaten dieses Absorbertyps von einer Anbringung in einer Flächenmitte ausgehen und nicht von vollflächigen, bis in die Kanten und Ecken der Begrenzungsflächen reichenden Verlegungen, wie sie in der Übekabine umgesetzt wurden. Andererseits könnten auch die durch die provisorische Befestigung teilweise entstandenen Luftpolster zwischen Absorber und Übekabinenwand dafür verantwortlich sein. Die drastische Nachhallzeitreduktion im 63 Hz-Oktavband kann vorerst nicht erklärt werden und bedarf einer genaueren Analyse durch Einzelsinussmessungen³⁸ (vgl. Abschnitt 6.3 und Abb. 6.12). Für den Raumausstattungs Zustand **(1)c** stimmen nun die bei dieser Auswertung erhaltenen Messdaten mit den Ergebnissen der analytischen Berechnung bis auf geringe Abweichungen überein. Die Auswirkungen der von den Herstellerdaten abweichenden Bedingungen dürften sich hier im Durchschnitt weitestgehend ausgleichen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Berechnet man anhand dieser Verläufe erneut das Bassverhältnis³⁹, so kommt man hier auf einen Wert von 1,6 für den Zustand **(2)** und 1,7 für den Zustand **(1)c**, womit diese bereits deutlich näher dem für Musik in Konzertsälen empfohlenen Wertebereich von 1,1 bis 1,3 liegen. Nachdem die gemessenen Werte der Nachhallzeit im Frequenzbereich von 400 Hz bis 1250 Hz durch die Wahl der geeigneten Filter unverändert blieben bzw. für den Raumausstattungs Zustand **(1)c** sogar noch weiter reduziert wurden, bleiben die in Abschnitt 5.2.1.3 aufgestellten Erkenntnisse für alle anderen raumakustischen Gütemaße gültig.

Da es bei der Auswertung des Nachhallzeitverlaufs mit Oktavbandfiltern 6. Ordnung auch für den Zustand **(1)a** zu großen Abweichungen im tieffrequenten Bereich zwischen den T_{20} - und T_{30} -Verläufen kam, wurden diese nicht gemittelt und einzeln im nachfolgenden Diagramm visualisiert. Zudem wurden die T_{20} - und T_{30} -Verläufe aus den Auswertungen mit Terzbandfiltern 14. Ordnung zum selbigen Zustand sowie die mit Oktavbandfilter 6. Ordnung ausgewerteten bzw. analytisch berechneten Verläufe des Zustands **(1)c** eingetragen.

³⁸ Vgl. [OELMANN ZHA]

³⁹ Vgl. [RA S. 101]

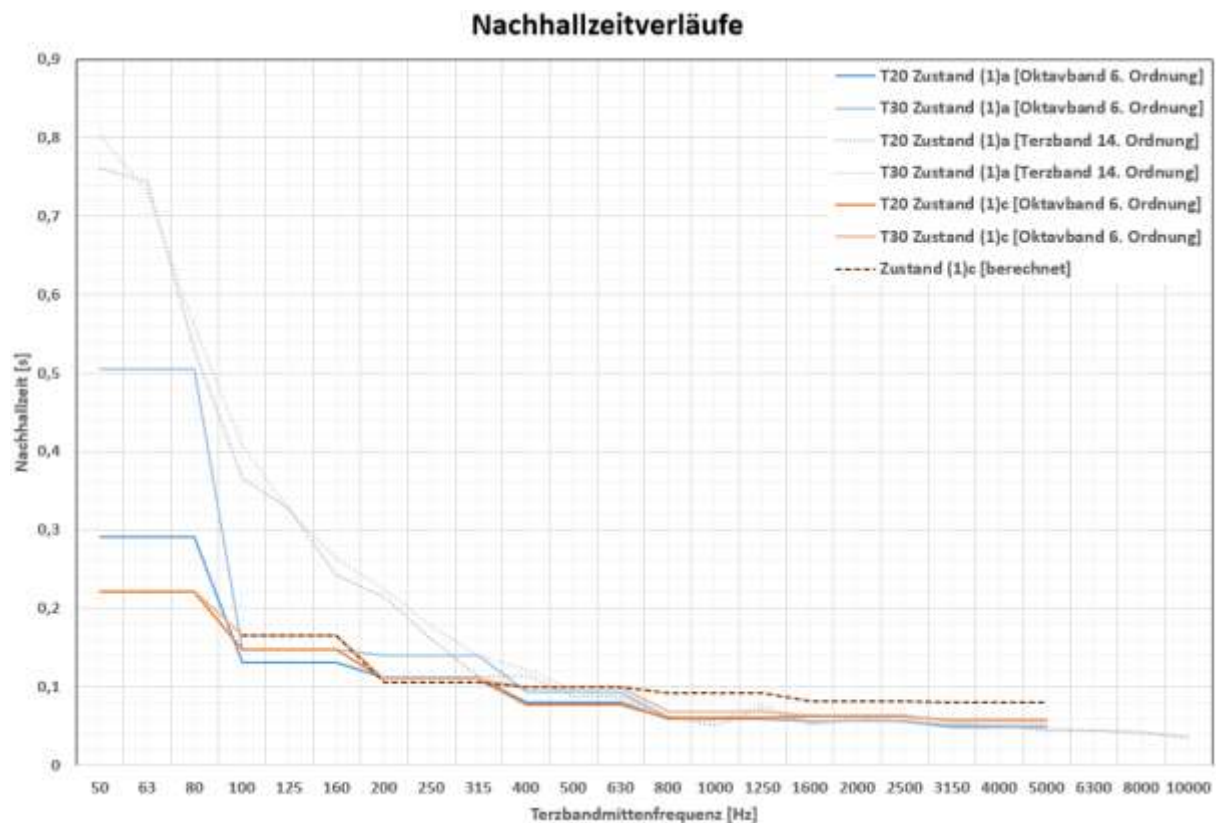


Abb. 5.18: T₂₀- und T₃₀-Nachhallzeitverläufe mit Oktavbandfilter 6. Ordnung und Terzbandfilter 14. Ordnung für Zustand (1)a sowie mit Oktavbandfilter 6. Ordnung und Berechnung für Zustand (1)c

In Abb. 5.18 wird deutlich, dass sich bei Auswertung mit Oktavbandfiltern 6. Ordnung zum Zustand (1)a im Gegensatz zum Zustand (1)c eine große Diskrepanz zwischen T₂₀- und T₃₀-Verlauf im tiefsten Oktavband einstellt. Dies lässt wiederum auf eine Beeinflussung des Nachhallzeit- bzw. vor allem des T₃₀-Verlaufs durch die tieffrequenten Marimbaresonatoren aufgrund der endlichen Dämpfung der eingesetzten Marimbaabdeckung schließen (vgl. Abschnitt 5.2.1.2). Dieser Einfluss wurde bei der Auswertung mit Terzbandfiltern 14. Ordnung offenbar durch das Nachschwingen der Filter verdeckt – T₂₀- und T₃₀-Verlauf sind sehr ähnlich. Somit ist auch dieser Raumausstattungszustand (1)a nicht für Nachhallzeit-Messungen im tieffrequenten Bereich geeignet.

5.2.5 Auswertungen der Schalldruckpegelverläufe

Zur messtechnischen Identifikation der Raummoden sowie deren Ausprägungen und Veränderungen durch die unterschiedlichen Raumausstattungs Zustände (vgl. Abschnitt 4.3.2) ist eine nähere Betrachtung der relativen Schalldruckpegelverläufe besonders gut geeignet. Dazu wurde mittels Faltung von aufgenommenem Signal mit entsprechendem invertierten Quellsignal und zeitlicher Fensterung zur Entfernung der aus Verzerrungen stammenden Artefakte die Impulsantwort der jeweiligen Messung generiert. Um die Vergleichbarkeit der einzelnen Schalldruckpegelverläufe zueinander nicht zu verzerren, wurde auf eine Normalisierung der Impulsantworten bewusst verzichtet. In nachfolgender Abbildung ist der Schalldruckpegelverlauf für die Quellposition in der Ecke (**QE**) der Übekabine (vgl. Abb. 4.4) an der Mikrofonposition 1 (**M1**) zum Raumausstattungs Zustand (**3**) dargestellt.

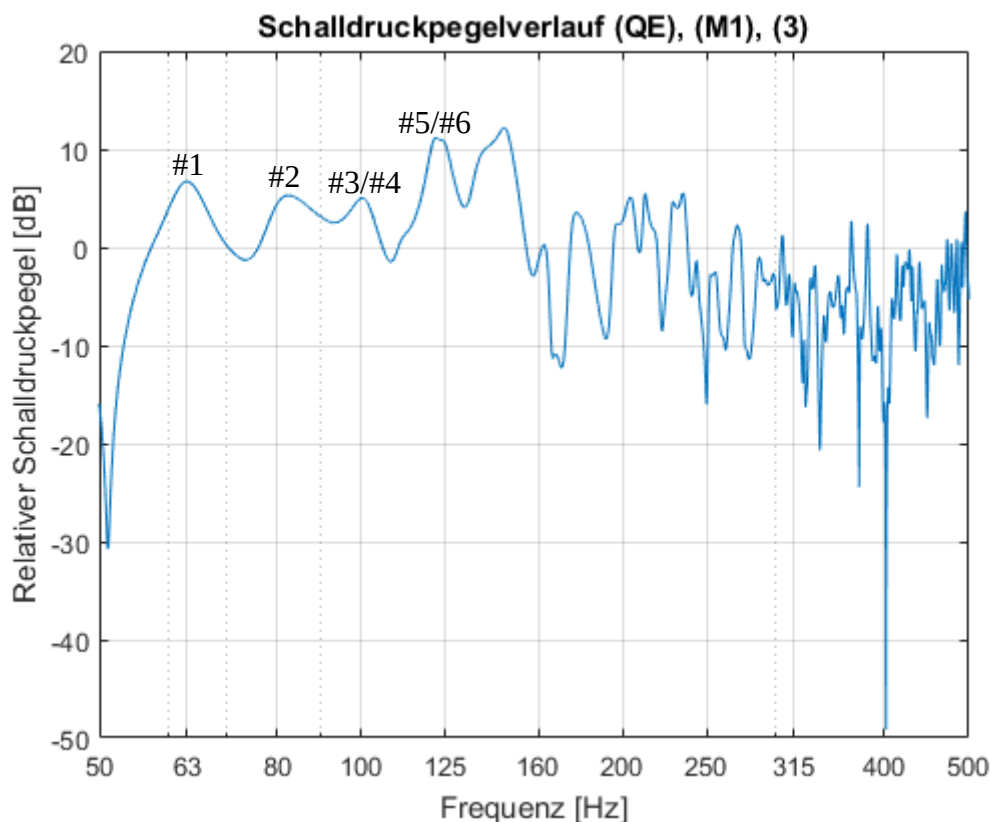


Abb. 5.19: Relativer Schalldruckpegelverlauf der „Eckmessung“ ((**QE**) und (**M1**)) zum Zustand (**3**)

Beim Vergleich von Abb. 5.19 mit Tab. 3.1 fällt auf, dass zumindest jede axiale Mode erster Ordnung bis auf geringe Frequenzabweichungen eindeutig einer lokalen Pegelüberhöhung der Messung mit Mikrofon an Position 1 (**M1**) zugeordnet werden kann. Dies stimmt gut mit der Theorie überein, da nach dieser bei einer Platzierung von sowohl Quelle als auch Mikrofon in einer Raumecke (vgl. (**QE**) und (**M1**)) das Mikrofon bei jeder Raummode ein lokales Pegelmaximum aufnehmen müsste. Mit steigenden Frequenzen und somit auch Modenordnungen und -anzahlen ist allerdings aufgrund derer Überlagerungen keine eindeutige Zuordnung einer einzelnen Mode zu einem lokalen Pegelmaximum der Messung mehr möglich.

Die nächsten Grafiken (vgl. Abb. 5.20, Abb. 5.21 und Abb. 5.22) zeigen die Schalldruckpegelverläufe bei ebenfalls leerer Übekabine ohne Absorber **(3)** für die das Marimbaphon simulierenden Quellpositionen 5 (**Q5**), 4 (**Q4**) und 3 (**Q3**) sowie die den Bewegungsbereich des Marimba-Spielers abdeckenden Mikrofonpositionen 3 (**M3**), 2 (**M2**) und 4 (**M4**). So können die Einflüsse durch isoliert auftretende Raummoden und durch Erstreflexionen hervorgerufene Interferenzen auf den Pegelverlauf im späteren praktischen Spielbetrieb grob nachgestellt und veranschaulicht werden.

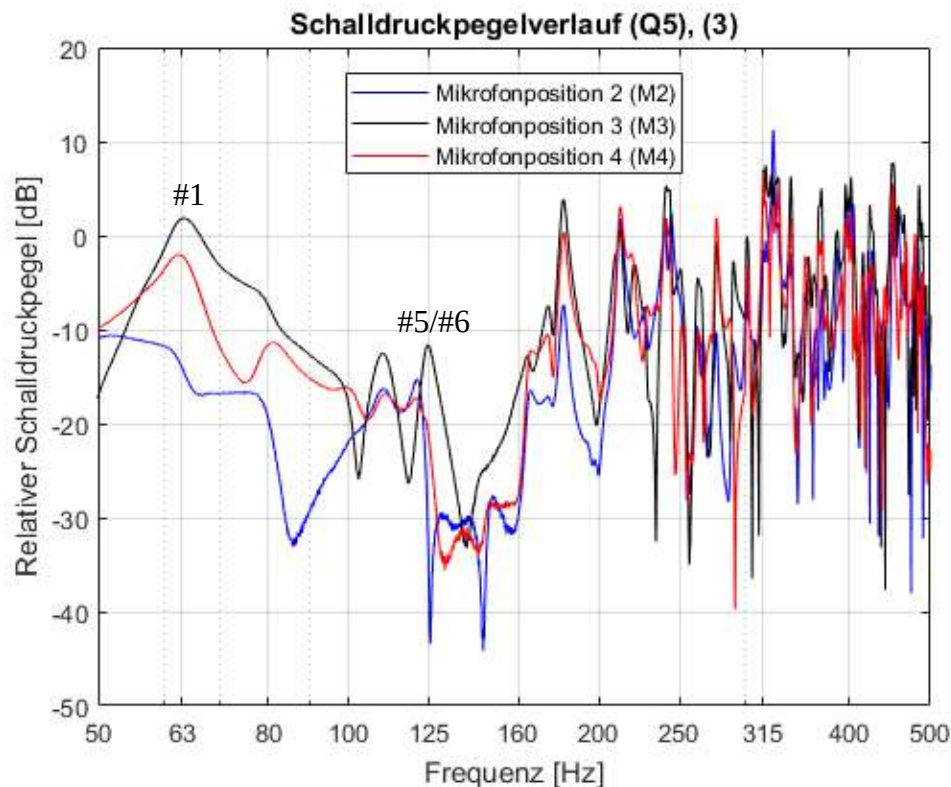


Abb. 5.20: Relative Schalldruckpegelverläufe für den tiefen Marimbatonbereich (**Q5**) zum Zustand **(3)** an der Hauptspielerposition (**M2**) sowie der linken (**M3**) und rechten (**M4**) Spielerposition

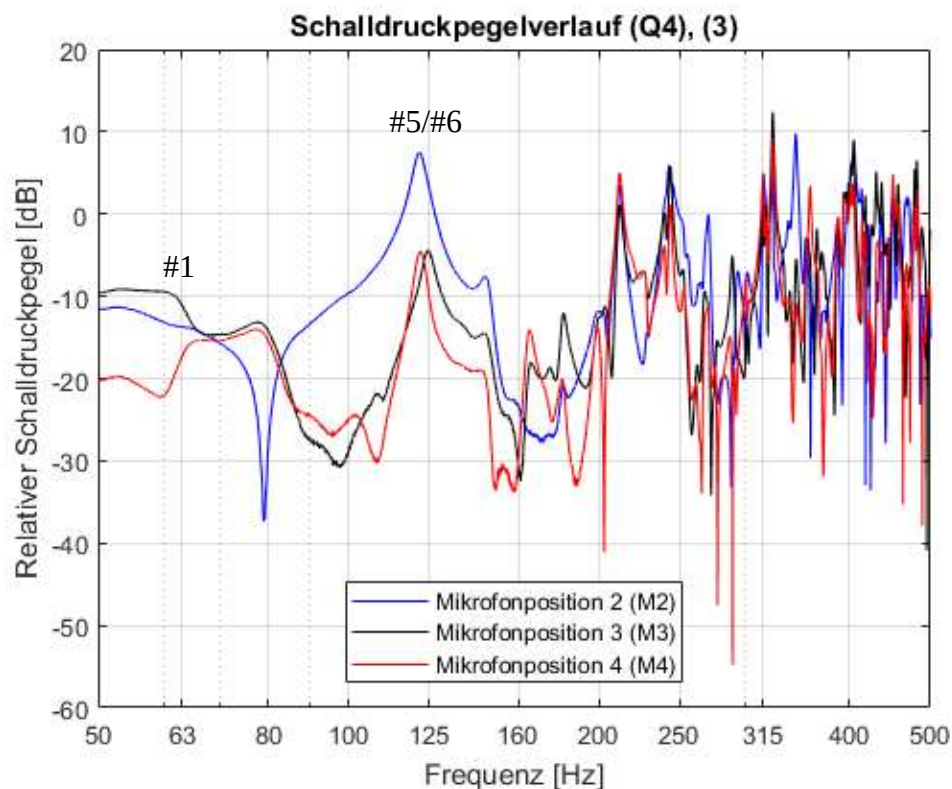


Abb. 5.21: Relative Schalldruckpegelverläufe für den mittleren Marimbatonbereich (Q4) zum Zustand (3) an der Hauptspielerposition (M2) sowie der linksten (M3) und rechten (M4) Spielerposition

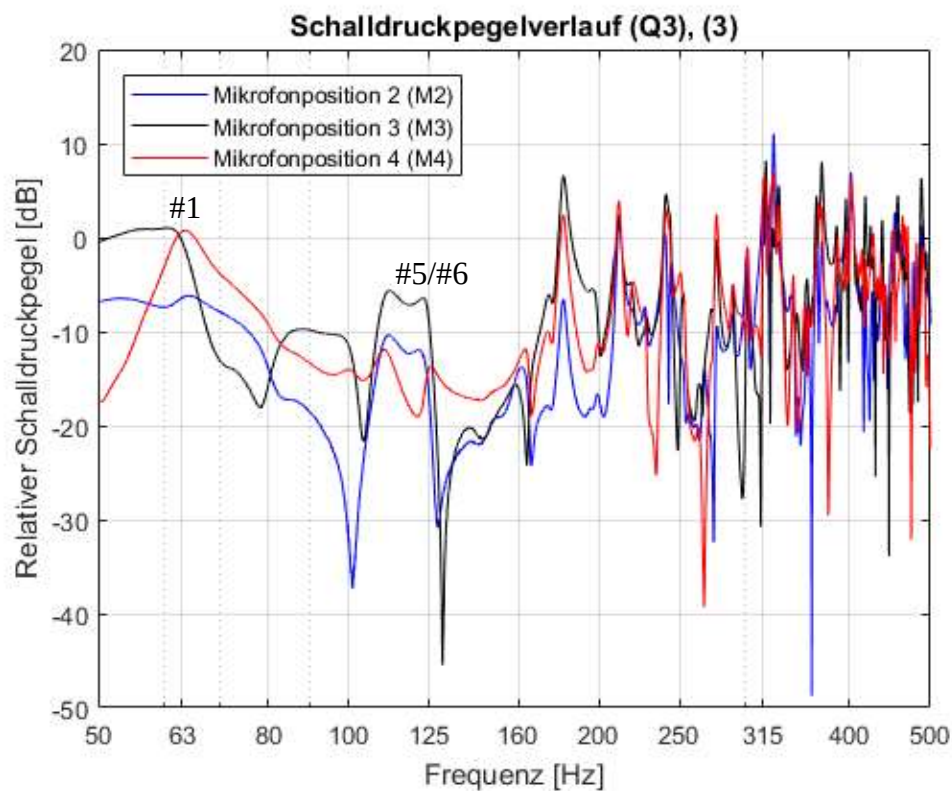


Abb. 5.22: Relative Schalldruckpegelverläufe für den hohen Marimbatonbereich (Q3) zum Zustand (3) an der Hauptspielerposition (M2) sowie der linksten (M3) und rechten (M4) Spielerposition

Beim Vergleich von Abb. 5.20, Abb. 5.21 und Abb. 5.22 ist gut zu erkennen, dass vor allem die erste Mode entlang der y-Achse ($0 - 1 - 0$) bei ~ 60 Hz (vgl. #1 in Tab. 3.1) an den beiden am Rand positionierten Mikrofonen 3 (**M3**) und 4 (**M4**) bei Anregung mit den ebenfalls außenliegenden Quellpositionen 3 (**Q3**) und 5 (**Q5**) eine starke Pegelüberhöhung verursacht. Dies deckt sich gut mit der Theorie, nach der diese Mode an den beiden xz-Begrenzungsflächen mit y-Koordinate 0 m bzw. 2,95 m die Pegelmaxima und in der xz-Querschnittsfläche mit y-Koordinate 1,48 m das Pegelminimum aufweisen sollte.⁴⁰ Da sich die Quellposition 4 (**Q4**) quasi in dieser letztgenannten xz-Querschnittsfläche befindet (vgl. Tab. 4.1), kann diese Mode nicht angeregt werden und es bildet sich an keiner Messposition eine Drucküberhöhung bei ~ 60 Hz aus (vgl. Abb. 5.21). Da sich auch die Mikrofonposition 2 (**M2**) nahe dieser xz-Querschnittsfläche befindet (vgl. Tab. 4.1), wird an dieser Position nie ein Pegelmaximum bei ~ 60 Hz gemessen. Wieso die Mode bei Anregung von Quellposition 3 (**Q3**) oder 5 (**Q5**) an dieser Messposition nicht zu einem lokalen Pegelminimum führte, kann derzeit nicht erklärt werden. Im Hinblick auf den späteren Verwendungszweck wird diese Mode allerdings höchstens beim Spielen der allertiefsten Klangstäbe – der tiefste Grundton liegt zwar bereits knapp über der berechneten Modenfrequenz (vgl. Tab. 2.1 und Tab. 3.1), die Güte der Mode ist jedoch nicht unendlich groß, zudem kann aufgrund der Position der Klangstäbe die Mode ideal angeregt werden – mit angeregt. Zwar weist die Spitze der gemessenen Pegelüberhöhung in Abb. 5.20 eine gegenüber der Berechnung leicht erhöhte Frequenz auf, allerdings ist davon auszugehen, dass die Lufttemperatur im Inneren der Übekabine meistens deutlich unter 27°C liegen wird, wodurch die Modenfrequenz tiefer wird. Um die tatsächlichen Auswirkungen dieser einzelnen Mode noch genauer zu untersuchen, bedarf es weiterer Messungen, bei denen die Lufttemperatur jener bei späterer Verwendung entspricht, die Quellposition so gut wie möglich mit den entsprechenden Klangstabpositionen übereinstimmt und die Messdaten für jede betroffene Klangstabfrequenz isoliert im Zeitbereich ausgewertet werden können (vgl. Abschnitt 6.4, 6.3.2.2 bzw. 6.3.3 sowie Anhang B1 und B2).

Bei weiterer Betrachtung der Grafiken fällt auf, dass bei bzgl. der y-Achse in der Mitte positionierter Anregung (**Q4**) die zweite y-Mode ($0 - 2 - 0$) bei ~ 120 Hz (vgl. #5 in Tab. 3.1) besonders stark zum Vorschein tritt (vgl. Abb. 5.21). Dies lässt sich gut mit den theoretischen Überlegungen zu den modalen Schalldruckverteilungen erklären.⁴¹ Da sich die Klangstäbe mit Grundtonhöhe in der Nähe von 120 Hz (A#, H) allerdings eher im Bereich von (**Q5**) befinden und von dort diese Mode sowohl laut Theorie als auch Messung (vgl. Abb. 5.20) nicht so gut angeregt werden kann, ist davon auszugehen, dass es im späteren Spielbetrieb zu keiner störenden Schalldruckpegelbeeinflussung aufgrund dieser Mode kommen wird.

Die Pegelüberhöhungen im Bereich von ~ 185 Hz (f#) (vgl. Abb. 5.20), ~ 215 Hz (g#, a) und ~ 240 Hz (a#, h) (vgl. Abb. 5.20 und Abb. 5.21) decken sich allerdings gut mit den entsprechenden Positionen der Klangstäbe bzw. des Marimba-Spielers und werden somit auch in

⁴⁰ Vgl. [RA S. 42]: Abb. 2.22

⁴¹ Vgl. [RA S. 42]: Abb. 2.22

der Spielpraxis als störende – sich aufgrund von höheren Ordnungen und Anzahlen der jeweils involvierten Moden (vgl. Tab. 3.1) zusätzlich über gewöhnliche Körperbewegungen hin verändernde – Pegelschwankungen wahrgenommen werden. Zudem sind in allen drei Abbildungen steilflankige Pegelabfälle, welche größtenteils auf destruktive Interferenzen durch Erstreflexionen zurückzuführen sind, feststellbar.

Bezüglich Abb. 5.22 gilt es zu beachten, dass sich alle Teiltonfrequenzen der Marimbaklangstäbe im Bereich der Quellposition 3 (**Q3**) schon außerhalb des sogenannten Modalbereichs der Übekabine befinden (vgl. Tab. 2.1 und Tab. 3.1). Da das perkussive Anschlaggeräusch allerdings ein näherungsweise breitbandiges Spektrum besitzt bzw. bei sehr schnellen tremoloartigen Spielweisen durch die hohe Schlagdichte sogar eine hörbare Periodizität – also äußerst tieffrequenten Schall – aufweisen kann, ist eine Betrachtung dennoch – wenn auch mit untergeordneter Priorität – sinnvoll.

Die untenstehende Abbildung soll die Veränderungen der durch die einzelnen Raummoden hervorgerufenen Schalldruckpegelabweichungen durch die Raumausstattungs Zustände veranschaulichen. Dazu werden die Schalldruckpegelverläufe aus den „Eckmessungen“ ($\triangleq$ Pfad von (**QE**) nach (**M1**)) zu den Raumausstattungs Zuständen (**1**)a, (**1**)b, (**1**)c, (**2**) und (**3**) dargestellt.

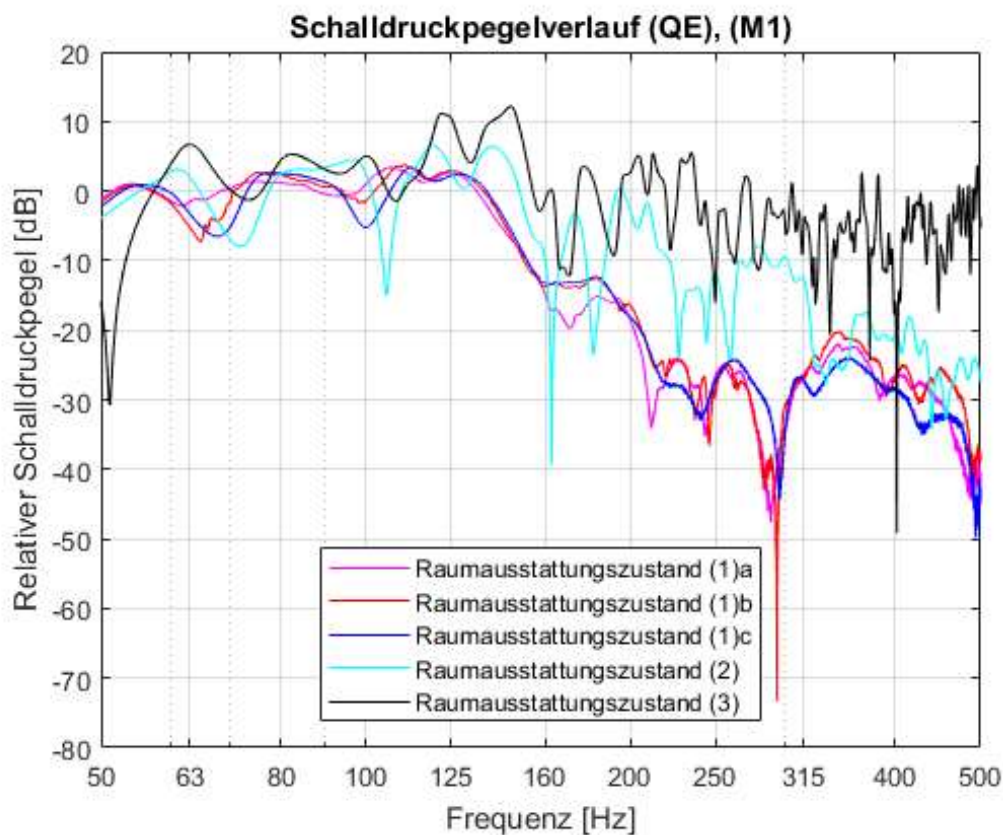


Abb. 5.23: Relative Schalldruckpegelverläufe der „Eckmessungen“ ((**QE**) und (**M1**)) zu den Zuständen (**1**)a, (**1**)b, (**1**)c, (**2**) und (**3**)

In Abb. 5.23 ist zu erkennen, dass sowohl das Einbringen des Marimbaphons als auch der bereits vorhandenen porösen Absorber zu einer Verringerung der Modenfrequenzen führte, wodurch die Frequenz der ersten Mode entlang der y-Achse (0 – 1 – 0) noch weiter von der Grundtonfrequenz des tiefsten Marimbaklangstabs wegrückte. Dies ist hauptsächlich auf die reduzierte Schallgeschwindigkeit innerhalb der porösen Absorber zurückzuführen – eine Beeinflussung durch Beugungseffekte aufgrund des eingebrachten Marimbaphons ist für die weitere Frequenzreduktion bei den Zuständen **(1)a** und **(1)b** denkbar. Zudem wird deutlich, dass die porösen Absorber zu einer drastischen generellen Pegelreduktion ab ~125 Hz aufwärts sowie Dämpfung der durch destruktive Interferenzen hervorgerufenen Pegel-einbrüche **(1)** aufgrund der Absorption von Reflexionen führten (vgl. Abb. 5.24). Außerdem ist beim Betrachten selbiger Grafik zu erkennen, dass die porösen Absorber die durch Moden bedingten Pegelüberhöhungen sogar bis in den tieffrequenten Bereich hinab abflachen konnten. Dies zeigt ebenso, dass es bei der Auswertung der Nachhallzeitverläufe in Abschnitt 5.2.1 zu einem Fehler im tieffrequenten Bereich aufgrund der Terzbandfilter 14. Ordnung kam. Weiters kann man erkennen, dass die Abdeckung des Marimbaphons den Verlauf des Schalldruckpegels noch zusätzlich linearisierte – die offenstehenden Resonatoren führten hingegen zu geringen Unebenheiten in selbigem.

Als abschließende Schalldruckpegelverlaufsauswertung soll die nachfolgende Abbildung die Auswirkungen der bereits vorhandenen Absorber auf den Pegelverlauf im breitbandigen Frequenzbereich veranschaulichen. Dafür ist der Pegelverlauf an der Mikrofonposition 2 (**M2**) bei Anregung von der Quellposition in der Ecke (**QE**) im Zustand **(3)** dem bei gleicher Anordnung im Zustand **(1)c** gemessenen gegenübergestellt.

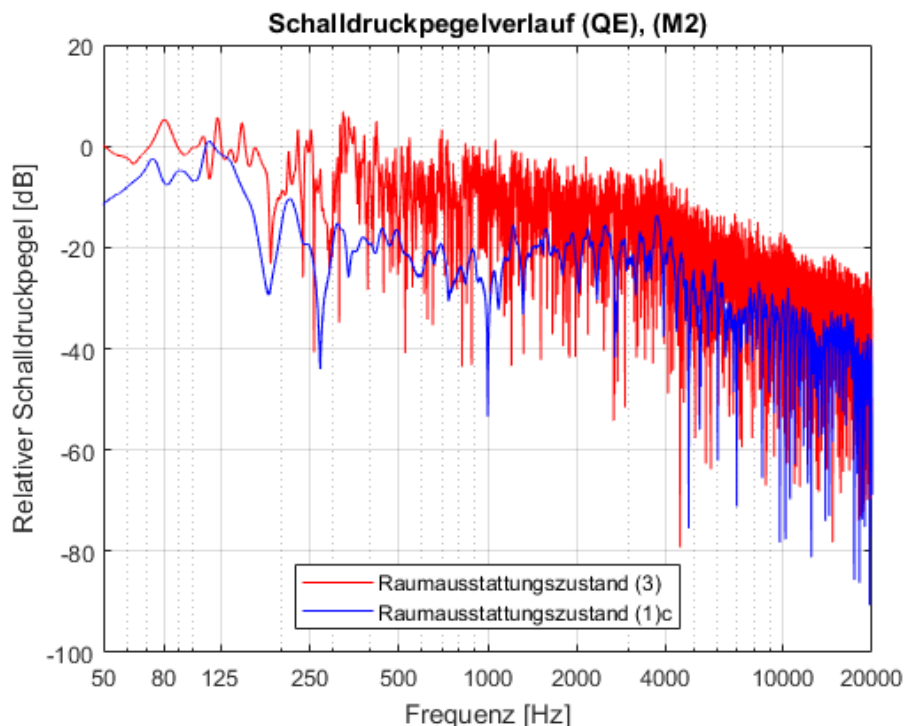


Abb. 5.24: Relative Schalldruckpegelverläufe für (**QE**) und (**M2**) zu den Zuständen **(3)** und **(1)c** von 50 Hz bis 20 kHz

Bei Betrachtung von Abb. 5.24 wird deutlich, dass die porösen Absorber wie erwartet zu einer starken Dämpfung der Reflexionen in der Übekabine und somit einer drastischen Reduktion der auftretenden Kammfilter im mittleren und hohen Frequenzbereich führen.

5.2.6 Subjektiver Höreindruck

Als subjektiver Höreindruck lässt sich festhalten, dass die Übekabine ohne jegliche Absorber **(3)** als wesentlich zu hallig empfunden wird. Dies führt dazu, dass das Marimbaphon deutlich zu laut wahrgenommen wird und somit der Marimba-Spieler lediglich mit Gehörschutz üben kann. Durch die Einbringung der bereits vorhandenen Absorber kann eine starke Dämpfung des Diffusschalls und dadurch in dieser Hinsicht eine deutliche Verbesserung zumindest für die mittleren und hohen Klangstäbe erzielt werden. Zudem führen die Absorber zu einer quasi vollkommenen Elimination jeglichen einhüllenden Raumeindrucks (vgl. Tab. 5.1), was allerdings vom Marimba-Spieler als gut gewertet wird.

Weiters konnte festgestellt werden, dass es bei schnellen periodischen Schlagfolgen zu einer störenden tieffrequenten Anregung der gesamten Übekabine kommt. Außerdem konnten vor allem in der tiefen Lage pitchbendartige Klangereignisse nach Anschlagen eines Klangstabs festgestellt werden. Diese sind vermutlich auf die ungewöhnlich hohe Lufttemperatur im Inneren der Übekabine und somit einer Verstimmung zwischen den Resonatoren und den Klangstäben zurückzuführen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Zudem klangen die Töne im Bereich der kleinen Oktave ähnlich einer Röhrensättigung verzerrt. Es wird vermutet, dass dies instrumentenbedingt ist und nun durch die Dämpfung des maskierenden Diffusschalls deutlicher wahrgenommen werden kann.

5.3 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass der Überaum von ~ 80 Hz aufwärts einen relativ linearen Nachhallzeitverlauf von $\sim 0,6$ s aufweist und sich raumakustisch gut als Überaum eignet. Anhand der Messungen in der Übekabine konnte hingegen verdeutlicht werden, dass diese in den stark gedämpften Raumausstattungszuständen **(1)** akustisch gar nicht mehr als Raum wahrgenommen wird – die Nachhallzeit liegt bei mittleren Frequenzen im Bereich von $\sim 0,1$ s.

Weiters stellte sich heraus, dass die Raumausstattungszustände **(1)a** und **(1)b** – also jene, mit Marimbaphon innerhalb der Übekabine – aufgrund des Nachklingens der Resonatoren nicht für raumakustische Nachhall- bzw. Abklingzeitmessungen geeignet sind. Zudem wurde die Möglichkeit der analytischen Nachhallzeitberechnung anhand von (näherungsweise) Absorptionskoeffizienten der verwendeten Absorber überprüft. In weiterer Folge zeigte sich, dass die Auswertung mit Terzbandfiltern 14. Ordnung in der Übekabine besonders zu tieferen Frequenzen hin drastische Messfehler verursacht. Es wurde festgestellt, dass die Messergebnisse lediglich bei Filterung mit Oktavbandfiltern 6. Ordnung und einer ausreichenden Anzahl an Messpositionen, über welche eine arithmetische Mittelung erfolgt, einigermaßen unabhängig von den zeitlichen Auswirkungen jener Operation über den gesamten interessierenden

Frequenzbereich bleiben. Dies hatte jedoch eine starke Reduktion der Frequenzauflösung sowie eine Einschränkung des Messbereichs auf die Oktavbänder 63 Hz bis 4 kHz zur Folge.

Bei zweiter Auswertung der Messdaten mit den zuvor genannten Filtern zeigte sich, dass die Übekabine im leeren Raumausstattungszustand **(3)** im mittleren Frequenzbereich die höchste Nachhallzeit aufweist und selbige sowohl zu tieferen als auch höheren Frequenzen hin kontinuierlich absinkt.

Durch die Auswertungen der Schalldruckpegelverläufe konnten die modalen Einflüsse sowohl an den Spielerpositionen als auch in der Übekabinenecke nachvollzogen werden. Bei der abschließenden Schilderung des subjektiven Höreindrucks stellte sich unter anderem heraus, dass es aufgrund der hohen Lufttemperatur im Inneren der Übekabine zu einer Verstimmung zwischen Marimbaklangstäben und –resonatoren kam, was zu pitchbendartigen Klangergebnissen führte.

Um detailliertere Erkenntnisse zu verbleibenden Fragen, wie etwa der Größe der tatsächlichen Dämpfung jeder einzelnen der tiefsten Moden durch die porösen Absorber, den zeitlichen Verläufen sowohl von Modal- als auch Marimbatonfrequenzen, den Auswirkungen der isoliert auftretenden Moden – also den vergleichsweise starken tonalen Anteilen – auf die Auswertung der Messdaten der tiefsten Oktavbänder, den Einflüssen der erhöhten Lufttemperatur oder den Änderungen im Schalldruckpegelverlauf durch die eingebrachten Absorber an den Spielerpositionen, zu erlangen, wurde eine zweite Messreihe entworfen und durchgeführt, welche im nächsten Kapitel näher erläutert wird.

6 Zweite Messreihe

Ziel dieser Messreihe war es, anhand von Optimierungen der bisherigen sowie komplett neuen Messkonfigurationen (vgl. Abschnitt 6.1) Lösungen für die im vorangegangenen Kapitel 5 aufgezeigten messtechnischen Probleme zu finden und die akustischen Phänomene in der Übekabine noch detaillierter zu untersuchen. Dafür wurden sowohl erneut klassische Sweep-Messungen (vgl. Abschnitt 6.2, 6.4 und 6.5) als auch Einzelsinusmessungen (vgl. Abschnitt 6.3) durchgeführt.

Als Auswertungstools (vgl. Anhang C) kommen hierbei erneut zahlreiche Modifikationen des von Jakob Spötl implementierten Setups⁴², FFT-Berechnungen von MATLAB zur Darstellung von Schalldruckpegelverläufen sowie unterschiedliche Darstellungen der Messdatenverläufe im Zeitbereich zum Einsatz. Ebenso wird erneut kurz auf den subjektiven Höreindruck (vgl. Abschnitt 6.6) eingegangen.

6.1 Messkonfiguration

In diesem Abschnitt erfolgt eine Beschreibung des im Zuge der zweiten Messreihe verwendeten Messequipments mit den dazugehörigen gewählten Einstellungen (vgl. Abschnitt 6.1.1), des umgesetzten Messaufbaus (vgl. Abschnitt 6.1.2) sowie des durchgeführten Messablaufs (vgl. Abschnitt 6.1.3).

⁴² Vgl. [SPÖTL1]

6.1.1 Messequipment und Einstellungen

Prinzipiell kam auch bei der zweiten Messreihe dasselbe Messequipment zum Einsatz wie bei der ersten Messreihe (vgl. Abschnitt 4.1), allerdings wurden ein paar Einstellungsanpassungen sowie Erweiterungen vorgenommen.

Zuerst wurde im Audiotreiber-Menü des RME Audiointerface die Abtastrate auf 96 kHz gestellt, sodass die Wiedergabe des Anregungssignals nicht mehr durch einen Anti-Aliasing-Filter beeinflusst wird. Zudem wurden alle Anregungssignale mit der frei erhältlichen Software Audacity generiert und als Dateien im wav-Format mit 96 kHz Abtastrate und 32bit float Wortbreite gespeichert. Die Signallänge von sechs Sekunden und die Signalart für die Sweep-Messungen – nämlich exponentielle Sweeps von 25 Hz bis 25 kHz – blieben unverändert, da der Auswertebereich der Nachhallzeitmessungen für die Oktavbänder von 63 Hz bis 4 kHz in diesem Anwendungsfall als ausreichend erachtet wurde. Für die Einzelsinussmessungen (vgl. Abschnitt 6.3) mussten außerdem noch zahlreiche einzelne Sinussignale – ebenfalls mit einer Länge von sechs Sekunden – generiert werden. Als Frequenzen wurden sowohl die ersten zwei Oktaven zzgl. c#⁴ der Marimbagrundtöne (vgl. Tab. 2.1) sowie anhand von „Eckmessungen“ bestimmte charakteristische Frequenzen der Übekabine im jeweiligen Raumausstattungs-zustand (vgl. Tab. 6.2) gewählt. Um das breitbandige Ausschaltgeräusch durch das abrupte Ende des Sinussignals – dieses ist auch bei einem Schnitt an einem Null-durchgang sowohl deutlich hör- als auch messbar – wurde auf die letzte halbe Periode des jeweiligen Signals ein lineares Fade-out angewandt.

Der Gain-Regler am Norsonic Verstärker musste diesmal auf -25 dB gestellt werden, da sonst einzelne Mikrofonsignale bei den Nachhallzeitmessungen übersteuert hätten. Weiters konnte bei der ersten Einzelsinussmessung mit dem Genelec Studiomonitor auditiv festgestellt werden, dass die integrierte Schutzschaltung⁴³ bei länger anliegenden Signalen mit dem bei der ersten Messreihe verwendeten Pegel von -18 dBFS (vgl. Abschnitt 4.1) die Verstärkung bereits intern reduziert. Um die Stärke des tatsächlich an der Membran anliegenden Signals konstant zu halten, musste der digitale Ausgang der RME Soundkarte auf -36 dBFS gestellt werden. Dies führte dazu, dass die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Schalldruckpegelverläufe durch Rauschen deutlich unschärfer als jene der ersten Messreihe wurden.

Zudem kam diesmal auch der passive Spötl-Lautsprecher des SPSC – ein passives Visaton W 200 S Lautsprecherchassis in einem geschlossenen Gehäuse⁴⁴ – in Kombination mit dem Parasound HCA-800 Verstärker für einige ausgewählte Messungen (vgl. Abschnitt 6.5) zum Einsatz. Die nachfolgende Abbildung zeigt den mittels simulierter Freifeldmessung aufgezeichneten Lautsprecherfrequenzgang.

⁴³ Vgl. <https://www.genelec.com/sites/default/files/media/Previous%20models/2-way%20loudspeakers/1030A/ds1030a.pdf> (22.10.2018): „Long term output power is limited by driver unit protection circuitry“ auf S. 4

⁴⁴ Vgl. [SPÖTL2 S. 35–37]

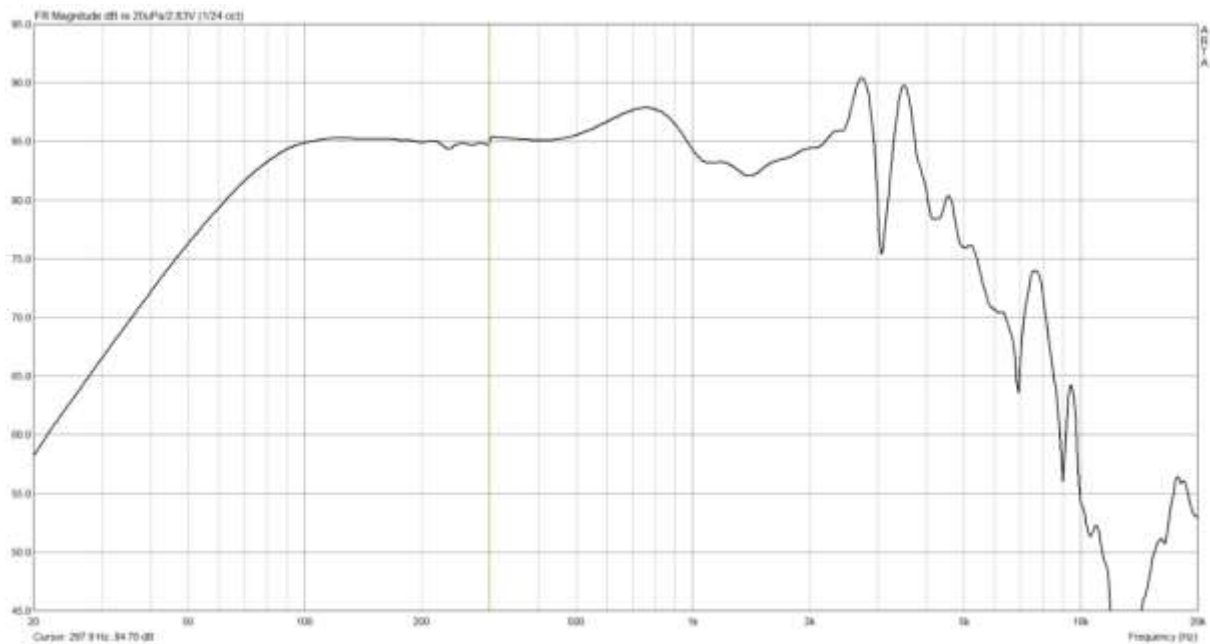


Abb. 6.1: Frequenzgang des Spötl-Lautsprechers (aufgenommen mittels simulierter Freifeldmessung)

Abb. 6.1 zeigt, dass der Spötl-Lautsprecher ungefähr im Bereich von 100 Hz bis 500 Hz einen quasi linearen Frequenzverlauf aufweist. Zu tieferen Frequenzen hin kann die für geschlossene Gehäuse charakteristische Tiefpassfilterwirkung mit einem Abfall von 12 dB/Oktave erkannt werden. Die nächste Grafik zeigt die aufgenommene Abstrahlcharakteristik dieses Lautsprechers.

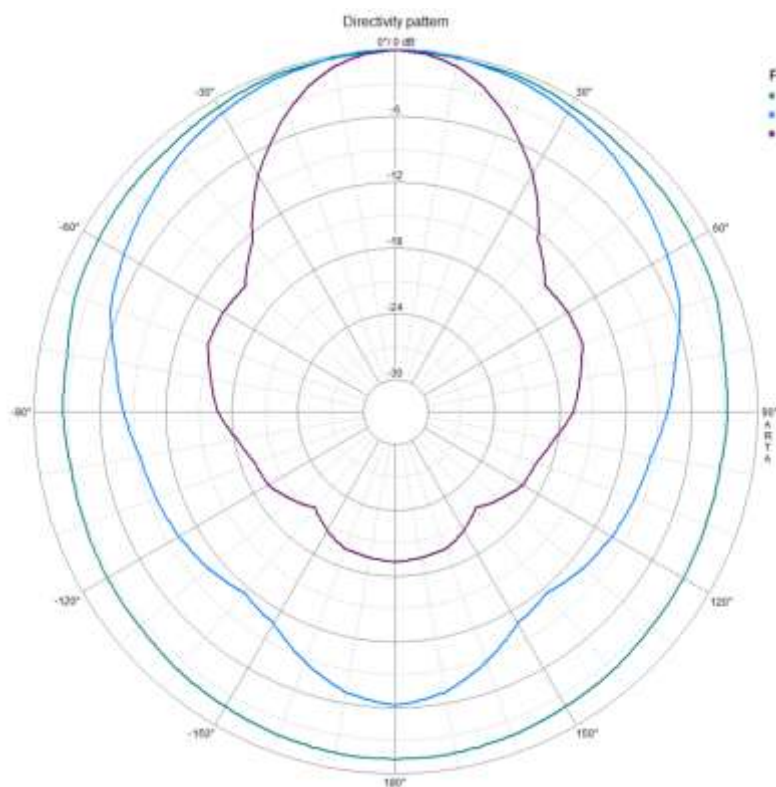


Abb. 6.2: Polardiagramm mit Abstrahlcharakteristik des Spötl-Lautsprechers

In Abb. 6.2 ist zu erkennen, dass der Spötl-Lautsprecher bereits bei 250 Hz eine um maximal -3 dB abweichende Kugelabstrahlcharakteristik aufweist. Es ist davon auszugehen, dass sich das Abstrahlverhalten zu tieferen Frequenzen hin noch weiter einer Kugelform annähert. Bei den Messungen mit diesem Lautsprecher wurde der digitale Ausgang der RME Soundkarte wieder auf 0 dBFS gestellt und die nachfolgend abgebildete Pegelstellung am Verstärker gewählt.



Abb. 6.3: Gewählte Verstärkung am Parasound HCA-800 Verstärker

6.1.2 Messaufbau

Für die zweite Messreihe wurden kleine Änderungen am Messaufbau sowie Optimierungen der Positionsbezeichnungen durchgeführt. Der neue Aufbau mit den dazugehörigen Bezeichnungen sowie einer Referenz auf die Bezeichnungen aus Kap. 4.3 und 5.2 ist in Abb. 6.4 skizzenhaft (nicht maßstabsgetreu) dargestellt.

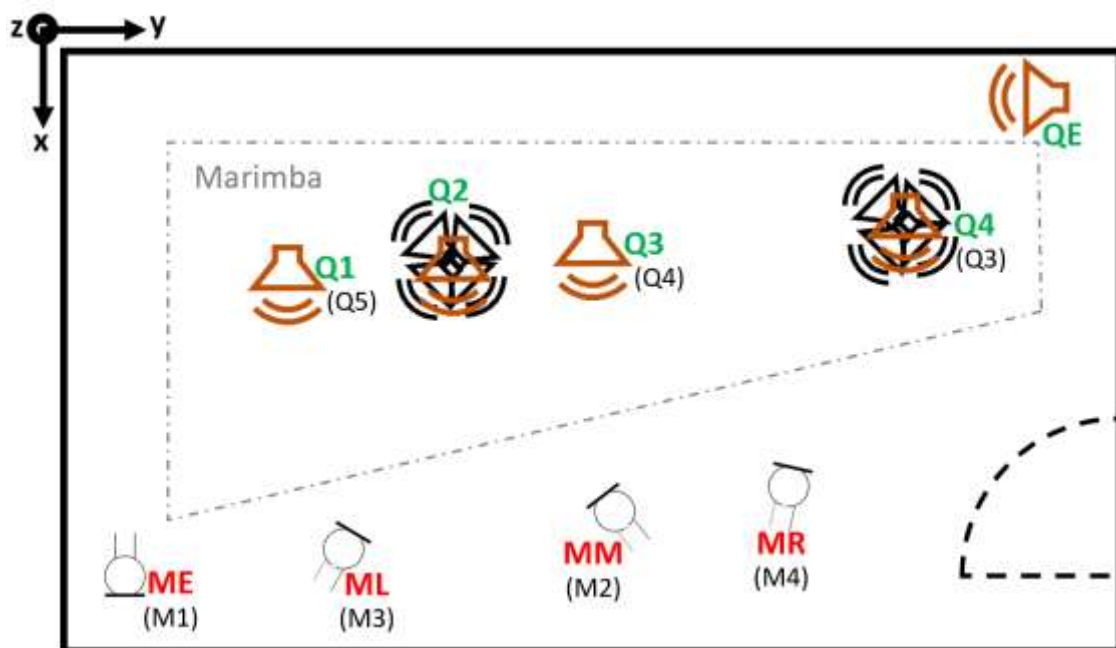


Abb. 6.4: Skizzenhafte Darstellung des Messaufbaus bei der zweiten Messreihe in der Übekabine (nicht maßstabsgetreu, Mikrofone und Lautsprecher auf unterschiedlichen Höhen)

Die Quellpositionen wurden nun entlang der y-Achse aufsteigend nummeriert und die Dodekaeder-Messpositionen wurden auf (**Q2**) und (**Q4**) gelegt, da nur noch bei Raumausstattungs-zuständen ohne Marimbaphon (**1**)c, (**2**), (**3**)' und (**4**) (vgl. Abschnitt 6.1.3) gemessen wurde. Außerdem konnte nun bei allen Messungen auf alle vier Mikrofonpositionen (**ME**), (**ML**), (**MM**) und (**MR**) zurückgegriffen werden. Weiters wurde die örtliche Auflösung der Quellpositionen im Bereich der tiefen Marimbaklangstäbe durch das Einfügen einer zusätzlichen Position (**Q2**) erhöht und durch das vorherige Messen der Marimbaklangstabpositionen in der Übekabine präzisiert. Bei Quellposition (**Q1**) befand sich die Tieftönermitte des Genelec 1030A Studiomonitors beim E-Klangstab, bei (**Q2**) beim c-Klangstab und bei (**Q3**) beim a-Klangstab. Für den Bereich C–c' ergibt sich somit eine Abdeckung in Quintabständen. Die daraus folgende Zuordnung ist in Abb. 6.5 grafisch veranschaulicht.

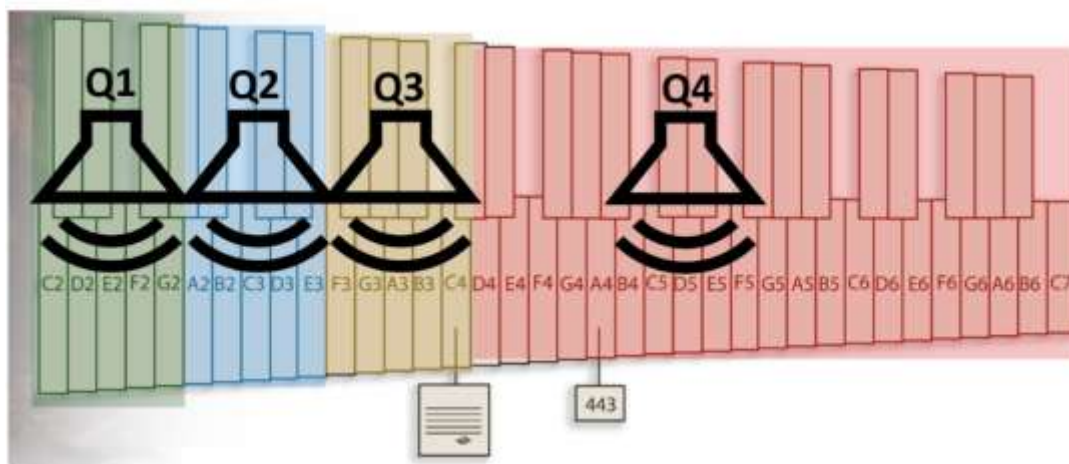


Abb. 6.5: Neue Quellpositionen mit Zuordnung zu den zu simulierenden Marimbaklangstäben

Zur Ermöglichung einer späteren Rekonstruktion des Messaufbaus sind die neuen Mikrofon- und Lautsprecherpositionskoordinaten in Tab. 6.1 eingetragen. Die dazugehörigen Bezeichnungen von Tab. 4.1 sind, falls vorhanden, erneut in Klammern angeführt.

Bezeichnung	x [m]	y [m]	z [m]	Bezeichnung	x [m]	y [m]	z [m]
ME (war M1)	1,45	0,35	1,95	Q1 (war Q5)	0,80	0,75	1,00
ML (war M3)	1,15	0,85	1,60	Q1' (neu)	0,80	0,75	0,90
MM (war M2)	1,05	1,55	1,60	Q2 (neu)	0,75	1,15	1,00
MR (war M4)	1,00	2,10	1,60	Q2' (neu)	0,75	1,15	0,90
				Q3 (war Q4)	0,70	1,50	1,00
				Q4 (war Q3)	0,60	2,25	1,00
				QE	0,15	2,70	0,30

Tab. 6.1: Mikrofon- und Lautsprecherpositionskoordinaten der zweiten Messreihe

Da nun ein geeignetes Lautsprecherstativ zur Verfügung stand, konnte die z-Koordinate bei manchen Messungen auf 90 cm reduziert werden und somit der Mittelpunkt der Lautsprechermembran besser mit der Position der Marimbaklangstäbe abgeglichen werden. Die entsprechenden Quellpositionen wurden mit einem Apostroph markiert. Auch diesmal wurde bei der Positionierung des Genelec Studiomonitors in der Ecke (QE) wieder darauf geachtet, dass die Positionsabweichungen aufgrund der Gegebenheiten durch die verschiedenen Raumausstattungs Zustände möglichst gering waren.

6.1.3 Messablauf

Beim Aufbau der verschiedenen Raumausstattungs Zustände wurde darauf geachtet, dass diese möglichst ohne akustisch relevante Abweichungen zu denen der ersten Messreihe wiederhergestellt werden konnten (vgl. Abschnitt 4.3.2). Um das Absorptionsverhalten des Teppichs in der Übekabine bestimmen zu können und den Umbauaufwand zu reduzieren, blieb diesmal allerdings der Teppich bei allen Messungen in der Übekabine. Der Raumausstattungs Zustand (3) inkl. Teppich wird daher als (3)' bezeichnet. Aufgrund der in den Abschnitten 5.2.1.2 und 5.2.4 erläuterten Erkenntnisse wurde auf eine Messung der Zustände (1)a bzw. (1)b verzichtet. Allerdings wurde ein zusätzlicher Raumausstattungs Zustand (4) umgesetzt, bei welchem große Mengen von weiteren porösen Materialien in die Übekabine eingebracht wurden. So waren zusätzlich zu den Absorbern von Zustand (1)c noch zwei zirka 20 cm dicke Matratzen sowie weitere zahlreiche Basotect-Quadersäulen und Zuschnitte davon an den Wänden und in den Ecken der Übekabine platziert. Die Basotect-Keilabsorber wurden ineinander verschachtelt, sodass sie eine möglichst zusammenhängende Fläche ergaben. Die nachfolgende Abbildung soll den so erhaltenen Raumausstattungs Zustand verbildlichen.



Abb. 6.6: Messsituation in der Übekabine zum Raumausstattungs Zustand (4)

Zudem wurde bei der zweiten Messreihe darauf geachtet, dass die Lufttemperatur im Inneren der Übekabine im Bereich von $22 \pm 1 \text{ °C}$ blieb. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug ca. 57 %. Wieder wurden während den Messungen beide Türen vollständig geschlossen und die benötigten Kabel durch die Studiokabeldurchführung ins Innere geleitet. Zudem wurde diesmal sowohl der Dodekaeder-Messlautsprecher als auch der Genelec Studiomonitor aus der Übekabine entfernt, wenn mit der jeweils anderen Schallquelle im Inneren der Übekabine das Anregungssignal wiedergegeben wurde.

Um die Frequenzen für eine möglichst genaue Einzelsinusanregung der einzelnen Moden der Übekabine zu ermitteln, wurde bei jedem Raumausstattungszustand zuerst eine „Eckemessung“ ($\triangleq$ Pfad von (QE) nach (ME)) mit dem Sweepsignal und Genelec Studiomonitor durchgeführt. Anschließend wurde die zugehörige Impulsantwort mittels FFT ausgewertet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die so erhaltenen Schalldruckpegelverläufe für die vier unterschiedlichen Raumausstattungszustände (1)c, (2), (3)' und (4).

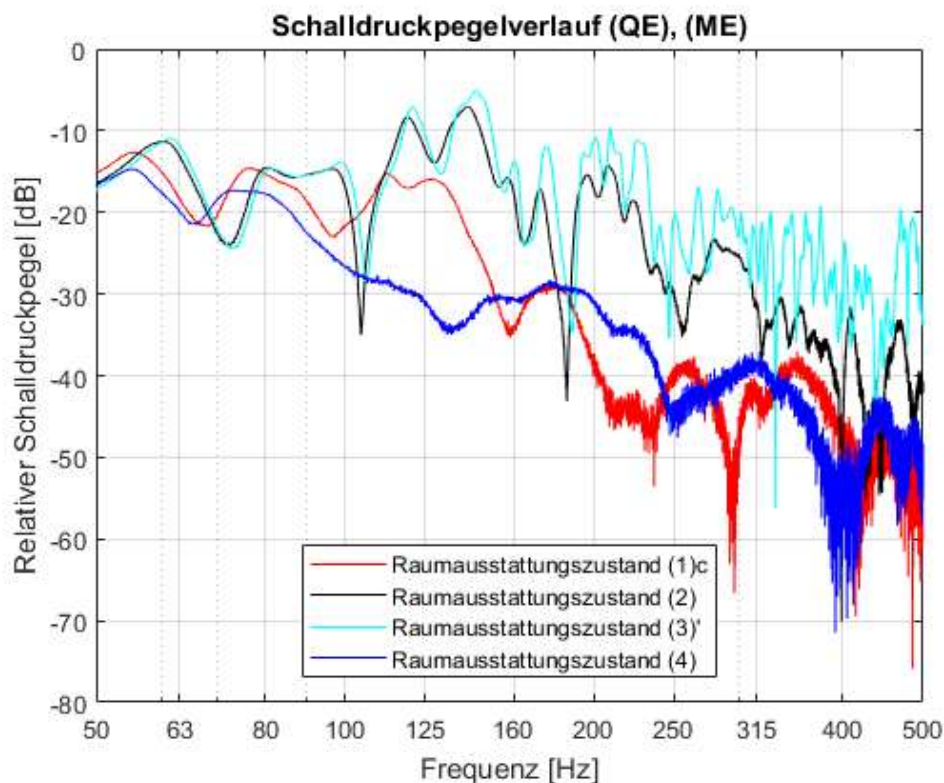


Abb. 6.7: Schalldruckpegelverläufe aus den „Eckmessungen“ zu den vier unterschiedlichen Raumausstattungszuständen (1)c, (2), (3)' und (4) zur messtechnischen Bestimmung der Modenfrequenzen

Aus Abb. 6.7 wurden die jeweiligen lokalen Pegelmaxima in den Schalldruckpegelverläufen abgelesen und zu den auf 0,5 Hz gerundeten zugehörigen Frequenzwerten Einzelsinusanregungssignale generiert. Hier sei allerdings anzumerken, dass sich bereits ab $\sim 100 \text{ Hz}$ die Pegelmaxima vermutlich eher durch Überlagerungen von mehreren eng beieinanderliegenden Moden als durch konkrete einzelne Moden ausprägten (vgl. Tab. 3.1). Um ein besseres Verständnis für Abklingvorgänge im Modalbereich zu erlangen, wurde auch jeweils ein Anregungssignal mit der Frequenz des lokalen Pegelminimums zwischen den ersten beiden –

noch isoliert auftretenden – Moden generiert (vgl. #4 in Tab. 6.2). Dabei sollte auch herausgefunden werden, ob es sich hierbei tatsächlich um ein Pegelminimum oder lediglich „Normalpegel“ – also ohne modalbedingter Verstärkung – handelt (vgl. Abb. 6.18). Zudem wurden zur näheren Untersuchung des Verhaltens einer einzelnen Mode noch zwei zusätzliche Anregungssignale mit $\pm 0,5$ Hz zur tiefsten gemessenen modenbedingten Schalldruckpegelüberhöhung erstellt (vgl. #1 und #3 in Tab. 6.2). Die obere Grenzfrequenz, bis zu der hin Einzelsinussignale generiert wurden, ergab sich durch die immer dichter auftretenden Pegelspitzen, die steigende Anzahl der daran beteiligten Moden sowie die zu erwartende sinkende Messunsicherheit in den Nachhallzeitauswertungen der mittels Sweep-Messungen erhaltenen und mit Oktavbandfilter 6. Ordnung gefilterten Impulsantworten (vgl. Abschnitt 6.2). Zudem wurde aufgrund der hohen Dämpfungen bei den Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** ein Ablesen von einzelnen Pegelspitzen aus den entsprechenden Schalldruckpegelverläufen in Abb. 6.7 zu höheren Frequenzen hin zusätzlich erschwert. Die so ermittelten Frequenzen der Anregungssignale mit den jeweils dazugehörigen Raumausstattungszuständen sind in Tab. 6.2 aufgelistet.

#	Frequenz [Hz]				Anmerkung
	(1)c	(2)	(3)‘	(4)	
1	55	59,5	61	54,5	Mode #1 – 0,5 Hz
2	55,5	60	61,5	55	Mode #1
3	56	60,5	62	55,5	Mode #1 + 0,5 Hz
4	67,5	72	73,5	65,5	Minimum zwischen Mode #1 und #2
5	76	80	81	72	Lokale Pegelmaxima
6	87	97	98,5	80	
7	112,5	119,5	121	-	
8	129	140,5	144	-	
9	-	157	160	-	
10	169	172,5	175,5	-	
11	181,5	195	201	176	
12	-	208	209	-	
13	-	223,5	225,5	-	

Tab. 6.2: Raumausstattungszustandsabhängige Einzelsinusfrequenzen zu den vier untersuchten Raumausstattungszuständen **(1)c**, **(2)**, **(3)‘** und **(4)**

Mit den in Tab. 6.2 aufgeführten Frequenzen wurden anschließend zu jedem Raumausstattungszustand **(1)c**, **(2)**, **(3)‘** und **(4)** Messungen mit dem Genelec Studiometer in der Ecke **(QE)** durchgeführt. Diese dienen zur Untersuchung des Abklingverhaltens im Modalbereich der Übekabine (vgl. Abschnitt 6.3.1, 6.3.2.2 und 6.3.3).

In weiterer Folge wurden mit dem Genelec Studiometer an den Quellpositionen **(Q1)**, **(Q2)** und **(Q3)** Einzelsinussmessungen mit den Grundtonfrequenzen der im jeweiligen Bereich relevanten Marimbaklangstäbe (vgl. Tab. 2.1) durchgeführt. Dies ermöglicht eine noch detailliertere Analyse der raumakustischen Einflüsse auf den späteren Spielbetrieb (vgl. Abschnitt 6.3.2.2, 6.3.3 und 6.3.4).

Um den Einfluss des Teppichs am Übekabinenboden sowie Varianzen zur ersten Messreihe aufgrund der Änderungen wie etwa der reduzierten Lufttemperatur, der geänderten Quellpositionen und zusätzlichen Mikrofonpositionen bei den Dodekaeder-Messungen bzw. etwaige Messfehler bestimmen zu können, wurden zudem erneut Sweep-Schalldruckpegelmessungen an den Positionen (Q1), (Q2), (Q3) und (Q4) mit dem Genelec Studiomonitor sowie Sweep-Nachhallzeitmessungen an den Positionen (Q2) und (Q4) mit dem Dodekaeder-Lautsprecher zu jedem Raumausstattungszustand (1)c, (2), (3)‘ und (4) durchgeführt. Zudem wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Aufstellungsorte von porösen Absorbern mit letztgenannten Nachhallzeitmessungen im Zustand (3)‘ durch das Einbringen von vier 2 m hohen Basotect-Quadersäulen mit 20 cm Grundflächenkantenlänge in verschiedensten Anordnungsvarianten untersucht.

6.2 Auswertung der Nachhallzeitmessungen

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Auswertung der Nachhallzeitverläufe zu den Raumausstattungs Zuständen (1)c, (2), (3) bzw. (3)' und (4) der ersten (falls vorhanden) und zweiten Messreihe im Vergleich. Die Filterung erfolgte erneut mit den Butterworth-Oktavbandfiltern 6. Ordnung. Wie am Beginn von Abschnitt 5.2.4 geschildert, erfolgte auch hier die Auswertung zu hohen Frequenzen hin lediglich bis zum 4 kHz-Oktavband. Zudem sind die aus dem Nachhallzeitverlauf der Übekabine im Zustand (3)' – also unter Berücksichtigung des Teppichs am Übekabinenboden – berechneten Nachhallzeiten für die Raumausstattungs Zustände (1)c und (2) eingetragen. Dabei wurden wieder die äquivalenten Absorptionsflächen der Absorber aus Tab. 5.2 herangezogen. Zum Raumausstattungs Zustand (4) wurde zudem nicht über die Ergebnisse der T_{20} - und T_{30} -Auswertungen gemittelt, da im 63 Hz-Oktavband eine große Abweichung zwischen diesen festgestellt werden konnte.

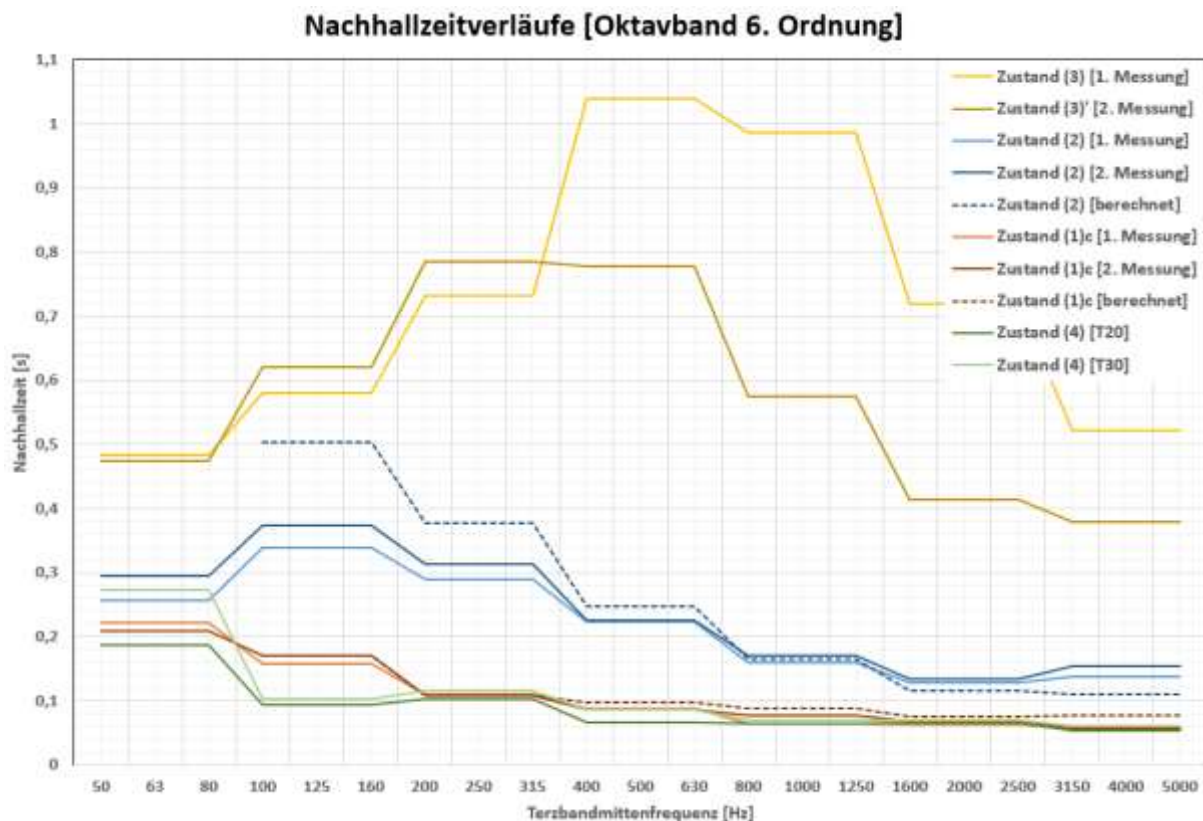


Abb. 6.8: Nachhallzeitenverläufe der ersten und zweiten Messreihe im Vergleich, des neuen Raumausstattungs Zustands (4) sowie berechnete Verläufe unter Berücksichtigung des Teppichs

In Abb. 6.8 ist ersichtlich, dass sich trotz der Änderungen der Messbedingungen bei den Raumausstattungs Zuständen (1)c und (2) keine großen Varianzen zwischen der ersten und zweiten Messreihe feststellen lassen. Beim Betrachten der Nachhallzeitverläufe zum Raumausstattungs Zustand (4) lässt sich erkennen, dass die Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich weiter reduziert werden konnte. Für eine detailliertere Analyse der Abklingvorgänge sowie zur besseren Nachvollziehbarkeit des Drifts zwischen der T_{20} - und T_{30} -Nachhallzeit im 63 Hz-Oktavband wird hier auf Abschnitt 6.3.1 und 6.3.2 (Eckmessungen) verwiesen (vgl.

besonders Abb. 6.14 sowie Abb. 6.17 und Abb. 6.18). Weiters sei hier noch anzumerken, dass das Erreichen einer unteren Grenze der noch messbaren Nachhallzeit aufgrund der nahezu exakt gleichen Verläufe von Zustand (1)c und (4) im hohen Frequenzbereich nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Aus dem Nachhallzeitverlauf der Messung zum Zustand (3)‘ wird deutlich, dass der Teppich ab ~500 Hz für eine nicht vernachlässigbare Verringerung der Nachhallzeit in der Übekabine sorgt. Dieser Umstand ist durchaus plausibel, da der Teppich als dünner poröser Absorber betrachtet werden kann. Unter Vernachlässigung der Messabweichungen zwischen der ersten und zweiten Messreihe können aus den gemessenen Kurven zum Zustand (3) bzw. (3)‘ mithilfe der Sabine’schen Nachhallformel⁴⁵ die nachfolgenden äquivalenten Absorptionsflächen des Teppichs bestimmt werden. Auf eine Auflistung der Werte unter ~500 Hz wird verzichtet, da die Verlängerung der gemessenen Nachhallzeiten sehr wahrscheinlich aufgrund anderer Änderungen der Messbedingungen zustande kam.

Absorbertyp	Äquivalente Absorptionsfläche [m²]			
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Teppich (~4,5 m²)	0,56	1,24	1,74	1,23

Tab. 6.3: Berechnete äquivalente Absorptionsfläche des Teppichs in der Übekabine

Die zu den in Tab. 6.3 angeführten äquivalenten Absorptionsflächen zugehörigen Absorptionskoeffizienten, welche unter Berücksichtigung der verlegten Teppichfläche berechnet wurden, sind in nachfolgender Tabelle angeführt.

Absorbertyp	Absorptionskoeffizient			
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Teppich	0,12	0,28	0,39	0,27

Tab. 6.4: Berechnete Absorptionskoeffizienten des Teppichs in der Übekabine

Beim Vergleich der ermittelten Absorptionskoeffizienten aus Tab. 6.4 mit den Werten aus gängigen Tabellen für eine Teppichstärke von ~1 cm kann eine relativ gute Übereinstimmung festgestellt werden.⁴⁶ Lediglich die scheinbare Verringerung der Absorption im 4000 Hz-Oktavband ist – sowie die nicht feststellbare Absorption unter dem 500 Hz-Oktavband – vermutlich auf die geänderten Messbedingungen und Messfehler zurückzuführen.

⁴⁵ Vgl. [RA S. 70]

⁴⁶ Vgl. http://www.bph.hbt.arch.ethz.ch/Filep/Schall/Schall_Grundl/Kennwerte/Schallabsorptionsgrad.html (23.09.2018) „Teppichboden bis etwa 5 mm Dicke“ bzw. „Teppichboden bis mehr als 5 mm Dicke“

Eine Wunschkonfiguration des Marimba-Spielers wäre ein Nachhallzeitverlauf, in dem jedes Oktavband eine Nachhallzeit von $< 0,1$ s aufweist. Die vom Raumausstattungszustand **(1)c** ausgehende zusätzlich benötigte äquivalente Absorptionsfläche dafür würde sich nach der Sabine'schen Nachhallformel auf ~ 9 m² für das 63 Hz und ~ 7 m² für das 125 Hz-Oktavband belaufen. Angesichts der geometrischen Verhältnisse in der Übekabine, den allgemein zu tiefen Frequenzen hin abfallenden Absorptionsverläufen von porösen Absorbern sowie den Messergebnissen zum Raumausstattungszustand **(4)** ist jedoch davon auszugehen, dass die dafür erforderliche Absorption (mit porösen Absorbern) zumindest im 63 Hz-Oktavband nicht praxistauglich umgesetzt werden können wird. Der Einsatz von auf Resonanzprinzipien beruhenden Absorbern wird hier aufgrund der noch unklaren Einflüsse im unmittelbaren Nahfeld der Absorber sowie deren eigener Abklingzeiten⁴⁷ ausgeschlossen.

Zur näheren Untersuchung der Auswirkungen des Aufstellungsortes von porösen Absorbern in der Übekabine wurden in die leere Übekabine mit Teppich – also Raumausstattungs-
zustand **(3)'** – vier 2 m hohe Basotect-Quadersäulen mit Grundflächenkantenlänge von 20 cm verschiedenartig eingebracht. Die resultierenden, sowohl über die Quellpositionen **(Q2)** und **(Q4)**, Mikrofonpositionen **(ME)**, **(ML)**, **(MM)** und **(MR)** als auch T₂₀- und T₃₀-Auswertungen gemittelten Nachhallzeitverläufe sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

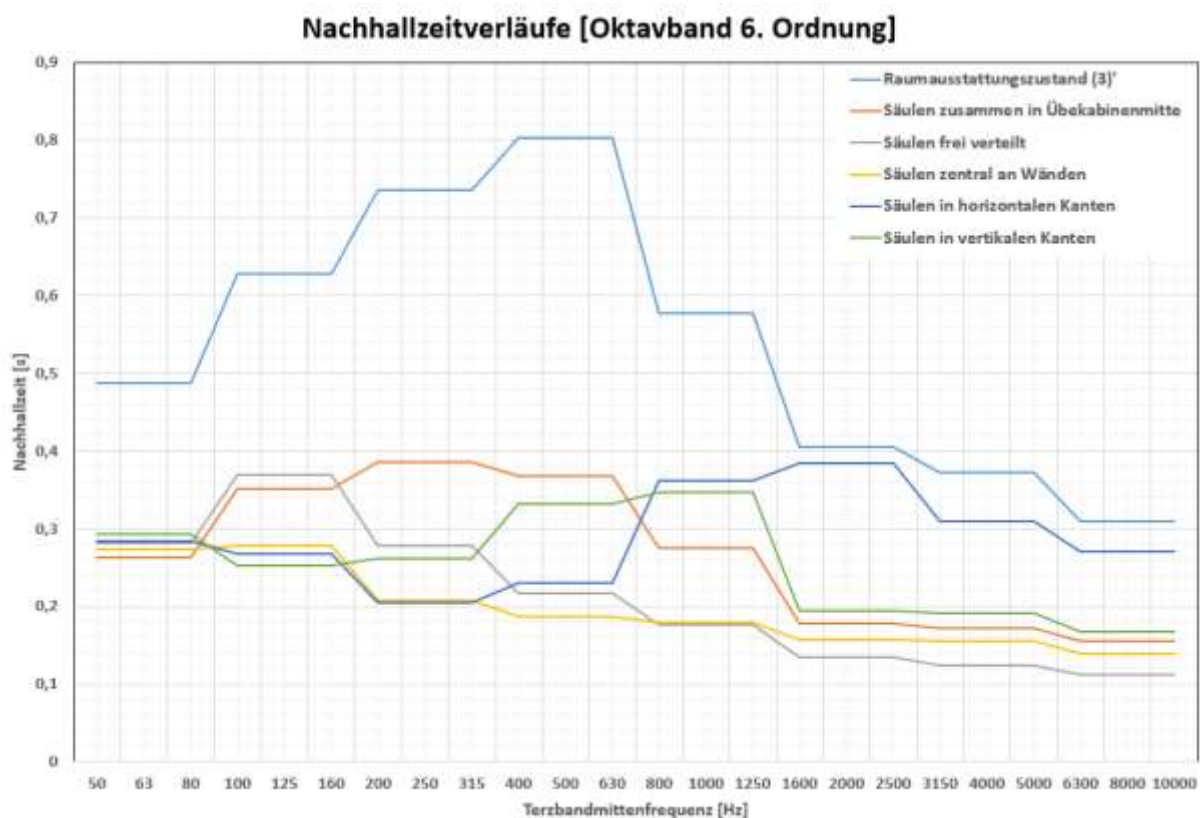


Abb. 6.9: Nachhallzeitverläufe ohne sowie mit jeweils vier Basotect-Säulen an verschiedenen Aufstellungsorten

⁴⁷ Vgl. [KUMAR S. 37]

Bei näherer Betrachtung von Abb. 6.9 fällt auf, dass sich weder der aus der Literatur bekannte Anordnungsfaktor für Schalldruckabsorber⁴⁸ – also zum Beispiel Helmholtzresonatoren – auf die porösen Absorber in der Übekabine übertragen noch eine andere, ähnlich einfache Berechnungsvorschrift für die unterschiedlichen Aufstellungsorte finden lässt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei porösen Absorbern hauptsächlich zwei verschiedene Mechanismen für das Zustandekommen der Absorption verantwortlich sind. Der Großteil der Absorptionswirkung beruht auf Reibung und somit einer Verzögerung der Luftmoleküle, wodurch sich also die Schallschnelle reduziert. Zusätzlich kommt es aufgrund von Wärmeleitungseffekten in porösen Absorbern allerdings auch zu einer Absorption des Schalldrucks.⁴⁹ Da sich an Wänden sowie in Kanten und Ecken der Schalldruck jeweils verdoppelt, vervier- bzw. verachtfacht, müsste dies die Absorption aufgrund der Wärmeleitungseffekte deutlich erhöhen und somit die Nachhallzeit vor allem im tiefen Frequenzbereich weiter reduzieren als bei freier Aufstellung im Raum. Möglicherweise ist dieser Effekt im 125 Hz-Oktavband auch tatsächlich zu erkennen, für eine allgemein gültige Aussage zeigen die Nachhallzeitverläufe allerdings zu große Unregelmäßigkeiten. Ob diese auch aufgrund des geringen Volumens sowie der nicht ideal schallharten Wände der Übekabine entstehen, müsste noch näher untersucht werden. Die untenstehende Abbildung soll die verschiedenen Positionierungen der Basotect-Quadersäulen veranschaulichen.



Abb. 6.10: Messsituationen in der Übekabine mit Basotect-Säulen zusammen in der Mitte [oben links], frei verteilt [oben mittig], zentral an Wänden [oben rechts], in horizontalen Kanten [unten links] und in vertikalen Kanten [unten rechts]

⁴⁸ Vgl. [FASOLD VERES S. 95]

⁴⁹ Vgl. [TA S. 1–24]

6.3 Auswertung der Einzelsinussmessungen

Wie in den bisherigen Kapiteln und Abschnitten bereits mehrfach erwähnt wurde, sollen anhand der Einzelsinussmessungen⁵⁰ die Nachhallzeitmessungen (vgl. Abschnitt 6.2) validiert, den drastischen Frequenzauflösungsreduktionen durch die Oktavbandfilterungen 6. Ordnung entgegengewirkt sowie die tatsächlichen Auswirkungen der eingebrachten Absorptionsmaterialien im Zeitverlauf untersucht werden. Zudem war es ein Ziel dieser Messungen, möglichst viel Wissen über die konkreten akustischen Marimba-Raum-Interaktionen sowie deren Änderungen durch eingebrachte Absorber zu erlangen.

6.3.1 Algorithmische Auswertung der Abklingzeiten

Zur algorithmischen Auswertung der Abklingzeiten der Einzelsinussmessungen wurde die in den vorherigen Kapiteln beschriebene und genutzte Auswertungsmethode von Spötl⁵¹ weiter modifiziert. Zuerst wurde die Filterung des Messsignals entfernt, da durch diese die größten Messfehler bei entsprechend geringen Nachhallzeiten zu erwarten sind (vgl. Abschnitt 5.2.3). Dies hat jedoch zur Folge, dass bei den gemessenen Abklingzeiten auch jegliche tiefere bzw. höhere Frequenzen, wie etwa Verzerrungen des Quelllautsprechers, miteinfließen. Aufgrund der Pegeldifferenzen zwischen dem eigentlichen Sinuston und den restlichen Frequenzen ist allerdings davon auszugehen, dass die eigentlich interessierende Frequenz auch tatsächlich den Großteil zum Abklingvorgang beiträgt. Zudem wurde auch auf die bei auf Impulsantworten basierenden Auswertungsmethoden notwendige Schröder-Rückwärtsintegration⁵² verzichtet.

Da die Sinussignale für eine Dauer von 6 Sekunden abgespielt wurden, ist weiters davon auszugehen, dass das Schallfeld innerhalb der Übekabine immer einen quasi eingeschwungenen Zustand erreichte.

Um aus dem gemessenen Schalldruckabklingvorgang den entsprechenden Energieabfall – für welchen die Nachhallzeit definiert ist – zu erhalten, musste das Messsignal lediglich quadriert werden. Damit der Energieabklingvorgang jedoch durch eine Ausgleichsgerade automatisiert angenähert werden konnte, mussten die Energieabklingvorgänge mittels Moving-Average-Filterung geglättet werden. Obwohl dies bezüglich der Effekte im Zeitbereich als die günstigste Art einer Filterung gilt⁵³, kann eine Beeinflussung der Abklingzeiten dadurch nicht bereits im Vorhinein sicher ausgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 6.3.2.1).

⁵⁰ Vgl. [OELMANN ZHA]

⁵¹ Vgl. [SPÖTL1]

⁵² Vgl. [SCHROEDER S. 409–410]

⁵³ Vgl. [SMITH S. 277–279]

Als weiteres Problem bei der automatisierten Auswertung der Einzelsinusabklingzeiten stellte sich der stark schwankende Signal-Rausch-Abstand zwischen den verschiedenen Mikrofonpositionen (**ME**), (**ML**), (**MM**) und (**MR**) heraus. Insbesondere an Orten, an denen sich das Mikrofon in einem Modenminimum befand, konnten teilweise lediglich Abklingvorgänge im Pegelbereich von ~ 10 dB erreicht werden (vgl. Abb. B1.4 Abklingkurve (**MM**) (**4**)). Aus diesem Grund erfolgte die Auswertung lediglich für die „Eckmessungen“ – also dem Pfad von (**QE**) nach (**ME**) – bei Anregung mit den aus den entsprechenden Schalldruckpegelverläufen (vgl. Abb. 6.7) bestimmten und in Tab. 6.2 angeführten Frequenzen. Aufgrund der unterschiedlichen Signal-Rausch-Abstände musste zudem teilweise eine manuelle Adaptierung des herangezogenen Pegelbereichs erfolgen, um durch den Übergang in den Grundrauschpegel keine künstliche Verlängerung der jeweiligen Abklingzeit hervorzurufen – die erhaltenen Ergebnisse unterliegen daher einer gewissen Streuung (vgl. Abschnitt 6.3.2.1). Für detailliertere und genauere Ergebnisse sei hier ausdrücklich auf die manuellen Analysen in Abschnitt 6.3.2.2 verwiesen. Zudem war es durch die starke Dämpfung der Übekabine im Raumausstattungszustand (**4**) bei der Messung mit 176 Hz (vgl. #11 in Tab. 6.2) auch mit Adaptierungen des Auswertungsbereichs nicht mehr möglich, ein aussagekräftiges Ergebnis algorithmisch zu erzielen.

In den nachfolgenden Abbildungen (vgl. Abb. 6.11, Abb. 6.12, Abb. 6.13 und Abb. 6.14) sind die so erhaltenen Einzelsinusabklingzeiten für jeden Raumausstattungszustand (**3**), (**2**), (**1c**) und (**4**) mit den entsprechenden Nachhallzeiten bei Sweep-Eckmessung und den in Abschnitt 6.2 erhaltenen Messergebnissen der Dodekaeder-Nachhallzeitmessungen gegenübergestellt. Hier sei noch anzumerken, dass mit zunehmender Dämpfung in der Übekabine das Problem des zu geringen Signal-Rausch-Abstands auch bei den Sweep-Messungen im Bereich der höheren Frequenzen auftrat, weshalb der dargestellte Frequenzbereich entsprechend skaliert wurde.

Eine automatisierte Auswertung der Marimbatonfrequenzen wird hier aus den zuvor genannten Gründen des zumeist sehr geringen Signal-Rausch-Abstands sowie aufgrund der enormen örtlichen Abhängigkeit – und somit fehlenden Vergleichbarkeit – der Nachhall- bzw. Abklingzeiten nicht für sinnvoll erachtet – die Streuung durch die ständige Änderung des Auswertungspegelbereichs wäre viel zu groß. Eine detaillierte Analyse jedes einzelnen Abklingvorgangs ist hier stattdessen zu empfehlen (vgl. Abschnitt 6.3.2.2 sowie Anhang B1).

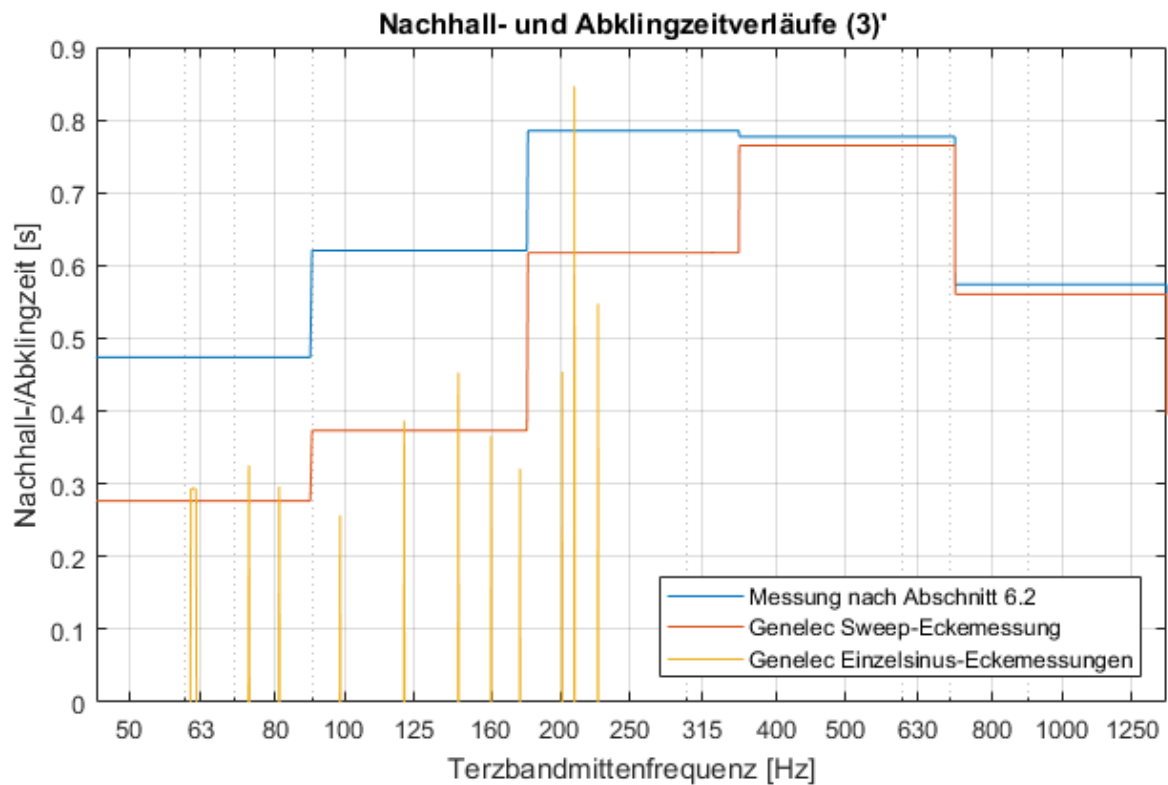


Abb. 6.11: Nachhall- und Einzelsinusabklingzeitverläufe bei „Eckmessungen“ mit dem Genelec Studiomonitor zum Raumausstattungszustand (3)* mit Hinterlegung des Nachhallzeitverlaufs aus Abschnitt 6.2

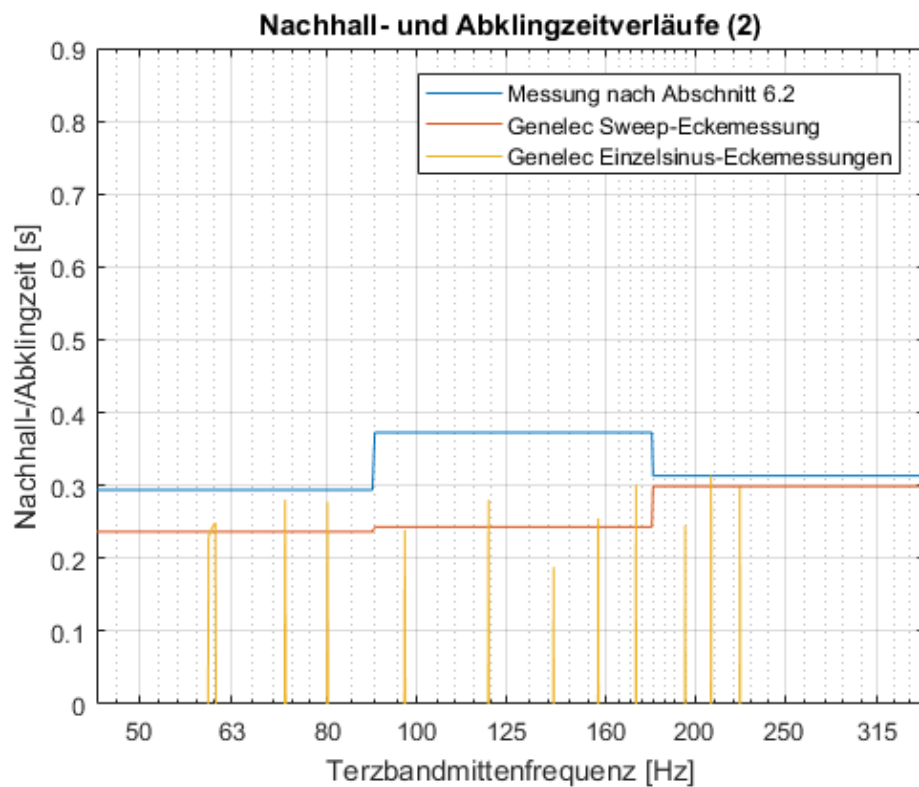


Abb. 6.12: Nachhall- und Einzelsinusabklingzeitverläufe bei „Eckmessungen“ mit dem Genelec Studiomonitor zum Raumausstattungszustand (2) mit Hinterlegung des Nachhallzeitverlaufs aus Abschnitt 6.2

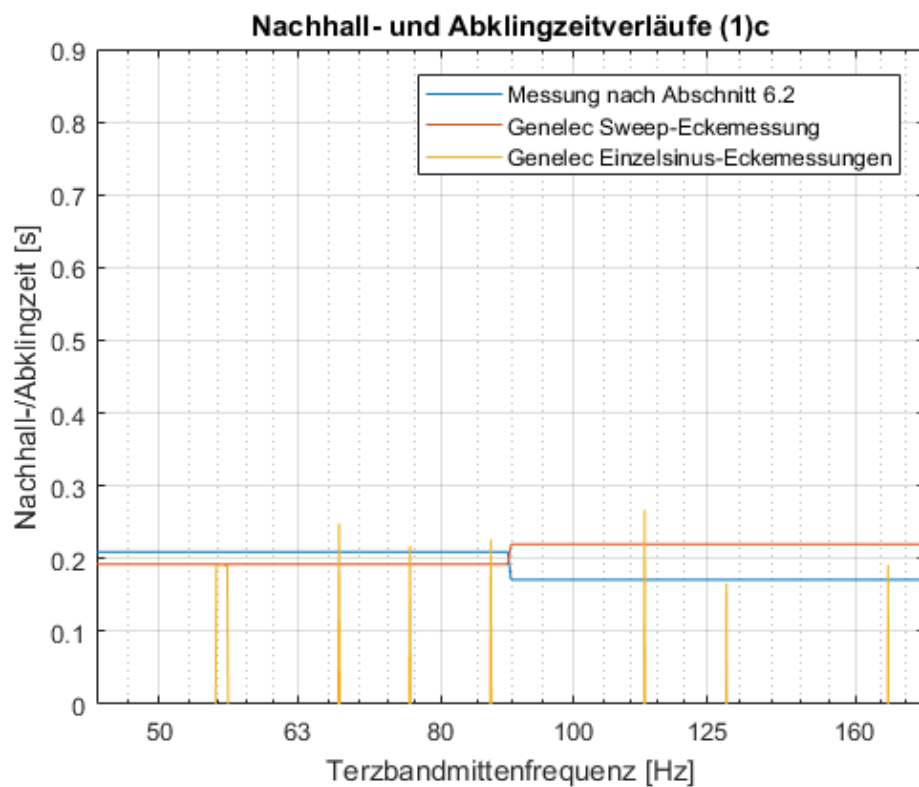


Abb. 6.13: Nachhall- und Einzelsinusabklingzeitverläufe bei „Eckmessungen“ mit dem Genelec Studiomonitor zum Raumausstattungszustand (1)c mit Hinterlegung des Nachhallzeitverlaufs aus Abschnitt 6.2

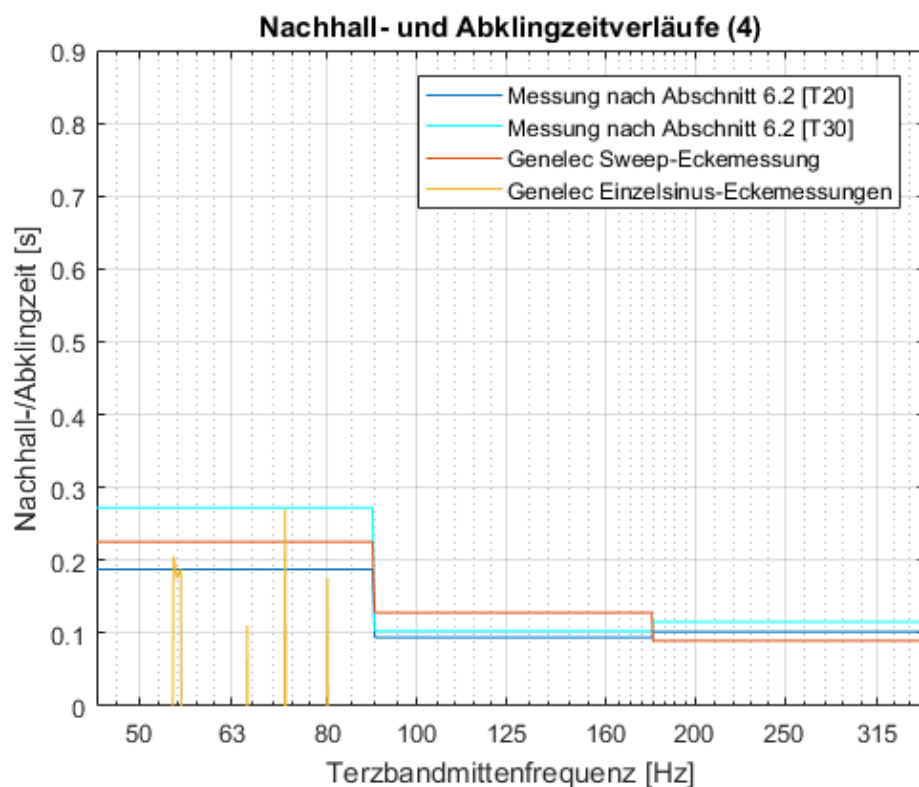


Abb. 6.14: Nachhall- und Einzelsinusabklingzeitverläufe bei „Eckmessungen“ mit dem Genelec Studiomonitor zum Raumausstattungszustand (4) mit Hinterlegung des Nachhallzeitverlaufs aus Abschnitt 6.2

In den Abbildungen Abb. 6.11, Abb. 6.12, Abb. 6.13 und Abb. 6.14 ist zu erkennen, dass sich die Verläufe der Einzelsinusabklingzeiten weitestgehend mit den Nachhallzeitverläufen aus den entsprechenden Sweep-Eckmessungen decken. Eine Beeinflussung durch die Oktavbandfilter 6. Ordnung kann somit endgültig ausgeschlossen werden. Zudem wird deutlich, dass die Einzelsinusabklingzeiten sowohl teils höher als auch niedriger als die zugehörige Oktavband-Nachhallzeit sind. Die Hypothese, dass sich die aus einer Sweep-Messung – oder zumindest Sweep-Eckmessung – berechnete Nachhallzeit grob aus dem Mittel der Einzelsinusabklingzeiten der im entsprechenden Oktavband vorhandenen Pegelmaxima – sofern diese ungefähr dieselbe Größenordnung aufweisen – zusammensetzt, scheint zu stimmen.

Beim näheren Betrachten der zuvor dargestellten Abbildungen fällt weiters auf, dass besonders in Abb. 6.11 – also Raumausstattungszustand **(3)'** – im tiefen Frequenzbereich eine relativ große Abweichung zwischen den Eckmessungen – sowohl dem Sweep-Nachhallzeit- als auch Einzelsinusabklingzeitverlauf – und den Dodekaeder-Messungen festzustellen ist. Die tiefen Frequenzen klingen bei den Eckmessungen noch deutlich schneller als bei den Dodekaeder-Nachhallzeitmessungen ab. Dieser Drift ist im höheren Frequenzbereich – also ab dem 500 Hz-Oktavband – quasi nicht mehr vorhanden. In Abschnitt 3.2.1.2 wurde erläutert, dass erst ab dem 315 Hz-Terzband – also respektive dem 500 Hz-Oktavband – die Bedingung der ausreichenden Diffusität, welche für die Gültigkeit einer normativ durchgeführten Nachhallzeitmessung eingehalten werden muss, erfüllt ist.

Für den Frequenzbereich unter dieser Grenze schwanken die gemessenen Nachhallzeiten stark je nach Wahl der Mikrofon- und Quellpositionen, da nur wenige hochgütige – und somit isoliert auftretende – Moden den Abklingvorgang dominieren. Wenn der Quelllautsprecher von dessen Aufstellungsort aus die jeweilige Mode gut anregen kann, wird an den Mikrofonen, welche in einem Modenmaximum – in Raumecken weist jede Mode ein Druckmaximum auf und kann optimal angeregt werden – positioniert sind, eine relativ kurze Nachhallzeit gemessen. Der Grund dafür ist, dass an Modenmaxima große Schalldruckpegel während der Anregung herrschen, welche allerdings nach dem Abschalten von letzterer aufgrund eines Energieaustauschs mit jenen Orten im Raum, an denen Modenminima vorhanden waren, rasch abklingen – es kommt also zu einem regelrechten Einbruch des Schalldrucks im Modenmaximum. Bei Einzelsinusmessungen in Modenminima würden sehr lange Nachhallzeiten gemessen werden, da es nach dem Abschalten der Anregung vorerst sogar zu einem Pegelanstieg aufgrund der aus Modenmaxima zufließenden Energie kommt (vgl. Abb. 6.20 Abklingkurve **(MM) (1)c)**.⁵⁴ Bei Sweep-Messungen wird aufgrund des geringen Schalldruckpegels an diesen Orten die Nachhallzeit der entsprechenden Moden je nach Größe des Auswertungspegelbereichs sowie dem Vorhandensein von möglichen anderen modalbedingten Druckmaxima entweder nicht registriert oder ebenfalls extrem groß – die zugehörige Abklingkurve weist einen deutlichen „Knick“ in ihrem Verlauf auf.

⁵⁴ Vgl. [GUTMANN S. 55 und S. 113–127]

Mit zunehmender Dämpfung (vgl. Abb. 6.12, Abb. 6.13 und Abb. 6.14) verringert sich die Güte der jeweiligen Moden – deren Einflüsse werden also sowohl im Zeit- als auch Amplitudenbereich geringer (vgl. Abb. 6.7 und Abschnitt 6.4). Dieser Umstand kann an der aufgrund der enormen Verkürzung der mittleren Nachhallzeit resultierenden Herabsetzung der Schröderfrequenz⁵⁵, welche ebenfalls als Maß zur Abschätzung, bis zu welcher Frequenz mit Einflüssen durch isoliert auftretende Moden zu rechnen ist, erkannt werden. Dies wäre eine plausible Erklärung für die Zunahme der Übereinstimmung zwischen den beiden Sweep-Nachhallzeitmessergebnissen mit der Stärke der Dämpfung.

In Abb. 6.12 fällt auf, dass bereits alle gemessenen Einzelsinusabklingzeiten sehr ähnliche Werte aufweisen. Auffällig ist hier beim Verlauf der Dodekaeder-Nachhallzeitmessung jedoch – anders als bei der Analyse von Abb. 5.17 vermutet wurde – nicht die Reduktion im 63 Hz-Oktavband sondern der Anstieg der gemessenen Nachhallzeit im 125 Hz-Oktavband.

Zudem ist interessant, dass – wie in Abb. 6.14 zu erkennen ist – der durch den bei der Auswertung von Abb. 6.8 in Abschnitt 6.2 festgestellten Drift zwischen T_{20} - und T_{30} -Auswertung aufgespannte Bereich relativ genau die gemessenen Abklingzeiten der Pegelüberhöhungen aus den Eckmessungen abdeckt – die scheinbar deutlich schneller abklingende Anregungsfrequenz #4 bei 65,5 Hz wurde aus einem lokalen Pegelminimum bestimmt.

6.3.2 Manuelle Analyse der An- und Abklingvorgänge

Aufgrund der in Abschnitt 6.3.1 angeführten Problematiken, wird hier eine manuelle Analyse der einzelnen Abklingkurven vorgenommen. Zudem erfolgt auch eine Betrachtung der zugehörigen Anklingvorgänge. Es sei noch anzumerken, dass in diesem Abschnitt lediglich auf jene Messergebnisse näher eingegangen wird, die die relevantesten auftretenden Besonderheiten verdeutlichen. Um einen detaillierten Einblick über die An- und Abklingvorgänge zu erhalten, sei hier auf die Abbildungen in Anhang A1 (Eckmessungen) sowie B1 (Marimbatonmessungen) verwiesen.

6.3.2.1 Einflüsse des Moving-Average-Filters und der Wahl des Auswertungspegelbereichs

Damit geklärt werden kann, ob die in der algorithmischen Auswertung (vgl. Abschnitt 6.3.1) notwendige Moving-Average-Filterung bereits eine relevante Änderung der Dauer des Abklingvorgangs zur Folge hat und wie groß der Einfluss durch die Wahl des zur Auswertung herangezogenen Pegelbereichs ist, sind in den nachfolgenden Abbildungen sowohl der ungefilterte Energiepegelabfall sowie der entsprechende Pegelabfall nach Filterung mit dem im Algorithmus implementierten Moving-Average-Filter bei einem Auswertungsbereich von 20 dB für die Eckmessungen bei den Frequenzen #2 im Raumausstattungszustand (4) sowie #10 im Raumausstattungszustand (1)c dargestellt.

⁵⁵ Vgl. [RA S. 48]

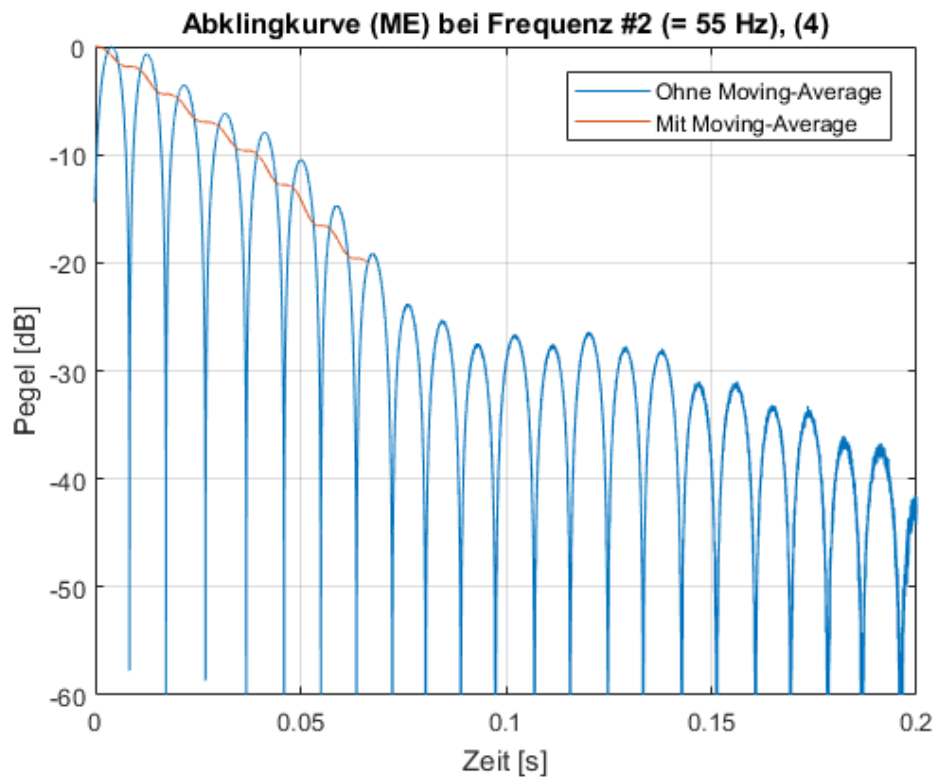


Abb. 6.15: Abklingkurven der Eckmessung mit und ohne Moving-Average-Filterung bei Anregung mit 55 Hz im Raumausstattungszustand (4)

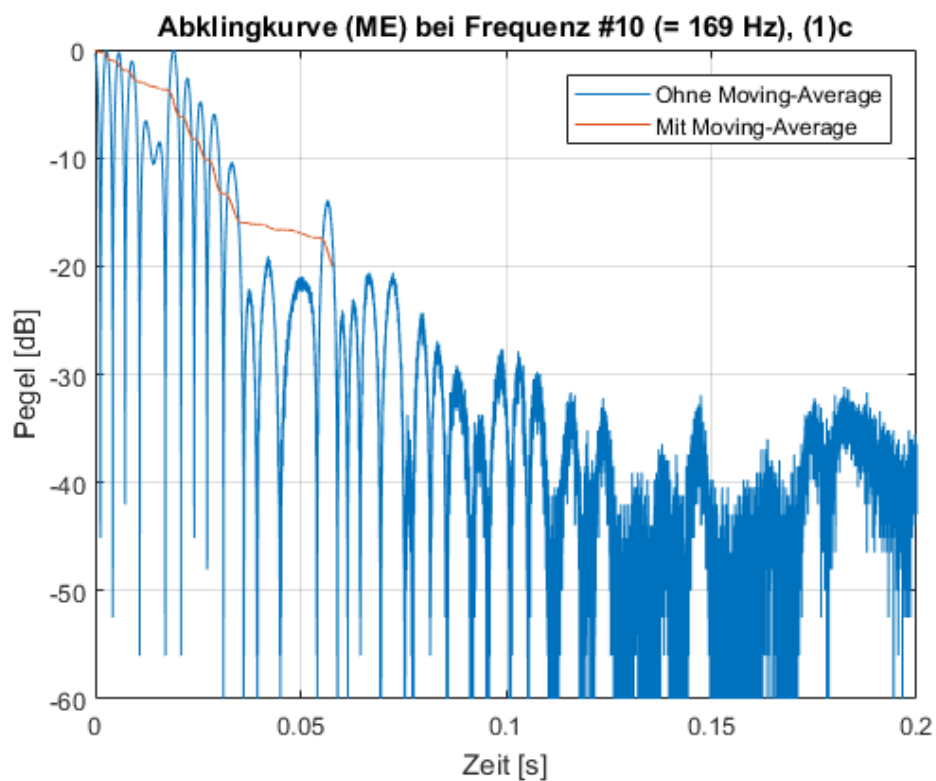


Abb. 6.16: Abklingkurven der Eckmessung mit und ohne Moving-Average-Filterung bei Anregung mit 169 Hz im Raumausstattungszustand (1)c

In Abb. 6.15 wird deutlich, dass die Moving-Average-Filterung bei der algorithmischen Auswertung der Abklingzeiten (vgl. Abschnitt 6.3.1) noch keinesfalls eine Verzögerung des eigentlichen Abklingvorgangs verursacht.

Abb. 6.16 zeigt, dass – wie bereits in Abschnitt 6.3.1 vermutet – die Wahl des zur algorithmischen Auswertung herangezogenen Pegelbereichs einen relativ großen Einfluss auf die für den jeweiligen Abklingvorgang berechnete Abklingzeit haben kann. Dieser ist jedoch nicht nur – wie anfangs vermutet – auf eine mögliche Miteinbeziehung der Abflachung der Abklingkurve im Übergang zum Grundrauschpegel, sondern auch auf die Möglichkeit, dass ein- oder sogar mehrfach auftretende Knicke im Abklingverlauf entstehen, zurückzuführen. Besonders interessant ist dabei der Umstand, dass sich bei dieser Art der Messungen überhaupt solche Erscheinungen ausbilden. Es wird vermutet, dass diese durch eintreffende Reflexionen sowie dadurch, dass zwar – mit Ausnahme von Frequenz #1, #3 und #4 – die Frequenzen der Pegelmaxima aus Abb. 6.7 herangezogen wurden, diese aber – wie sich bereits bei der Beschreibung von Abb. 5.19 herausstellte – nicht nur durch einzelne sondern auch durch Überlagerungen von mehreren, sich gegenseitig beeinflussenden Moden (vgl. Tab. 3.1) ausbilden, entstehen. Die algorithmische Auswertung in Abschnitt 6.3.1 unterliegt also bei Frequenzen, bei denen Unregelmäßigkeiten im Abklingverlauf feststellbar sind, einer relativ großen Messunsicherheit. Ob die Bestimmung der Dauer bis zum Erreichen eines 60 dB Energiepegelabfalls durch lineare Extrapolation bei diesen Frequenzen überhaupt sinnvoll ist, sei zu hinterfragen. Hier sei erneut auf die im Anhang A1 dargestellten Abklingkurven zur Detailanalyse sowie den nachfolgenden Abschnitt 6.3.2.2 verwiesen.

6.3.2.2 An- und Abklingpegelverläufe

Aufgrund der im vorherigen Abschnitt 6.3.2.1 geschilderten Problematik der Wahl des Auswertungsbereichs bei der algorithmischen Auswertung (vgl. Abschnitt 6.3.1), erfolgt hier eine Darstellung von ausgewählten An- bzw. Abklingverläufen von sowohl Ecke- als auch Marimbatonmessungen. Da zudem in Abschnitt 6.3.2.1 gezeigt werden konnte, dass die Moving-Average-Filterung noch keine relevante künstliche Verzögerung des Abklingvorgangs verursacht, wurde auch bei den nachfolgenden Abbildungen eine Moving-Average-Filterung vorgenommen. Dabei wurde allerdings das Zeitfenster von der (im von Spötl implementierten Setup) variablen Größe im Bereich von einigen 1000 Samples auf eine fixe Größe von 437 Samples bei den Eckmessungen bzw. 819 Samples bei den Marimbatonmessungen reduziert. So konnte die Feinstruktur der Pegelabklingkurven möglichst erhalten und nur das durch die Wellenform resultierende Auf- und Abschwingen weitestgehend unterbunden werden. Die äquivalenten Abbildungen zu allen durchgeführten Einzelsinusmessungen befinden sich in Anhang A1 (Eckmessungen) bzw. B1 (Marimbatonmessungen).

Eckmessungen

Nachfolgend sind ausgewählte Abbildungen zu den Einzelsinuseckmessungen dargestellt. Die jeweiligen tatsächlichen Anregungsfrequenzen sind in Tab. 6.2 angeführt.

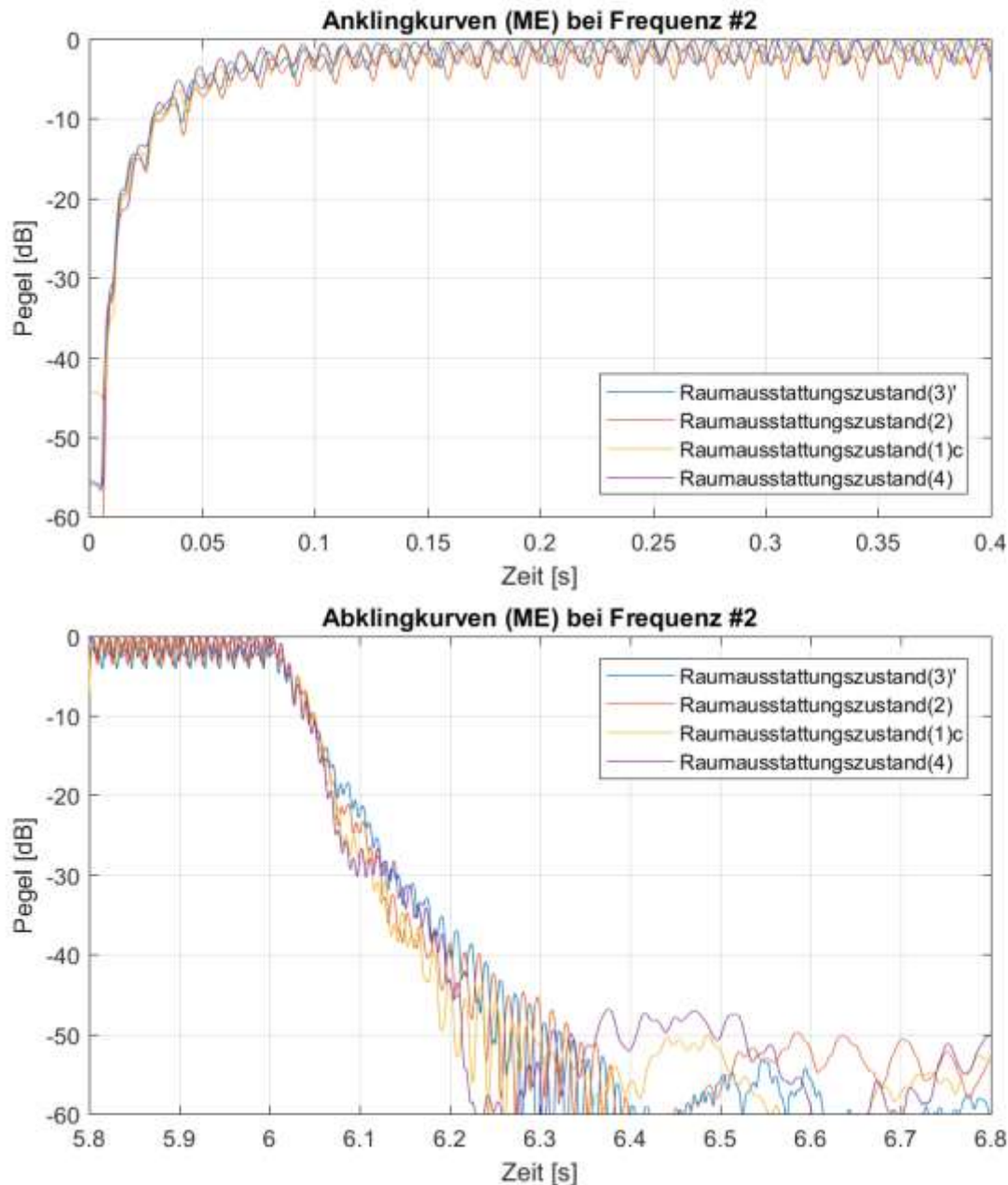


Abb. 6.17: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #2 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

Im Anklingverlauf von Abb. 6.17 ist zu erkennen, dass es zu einem, für Modenmaxima charakteristischen langsamen Anstieg der Schallenergie an der Messposition kommt. Beim Vergleich der vier Raumausstattungs Zustände wird zudem deutlich, dass sowohl die An- als auch die Abklingkurven sehr ähnlich verlaufen. Die Abklingkurven des Raumausstattungs Zustands (4) weisen zwar eine geringfügig größere Steigung auf, dass diese um ein Drittel größer ist,

als die des Raumausstattungs Zustands (3)' kann allerdings – anders als die algorithmische Auswertung in Abschnitt 6.3.1 suggerierte – nicht behauptet werden.

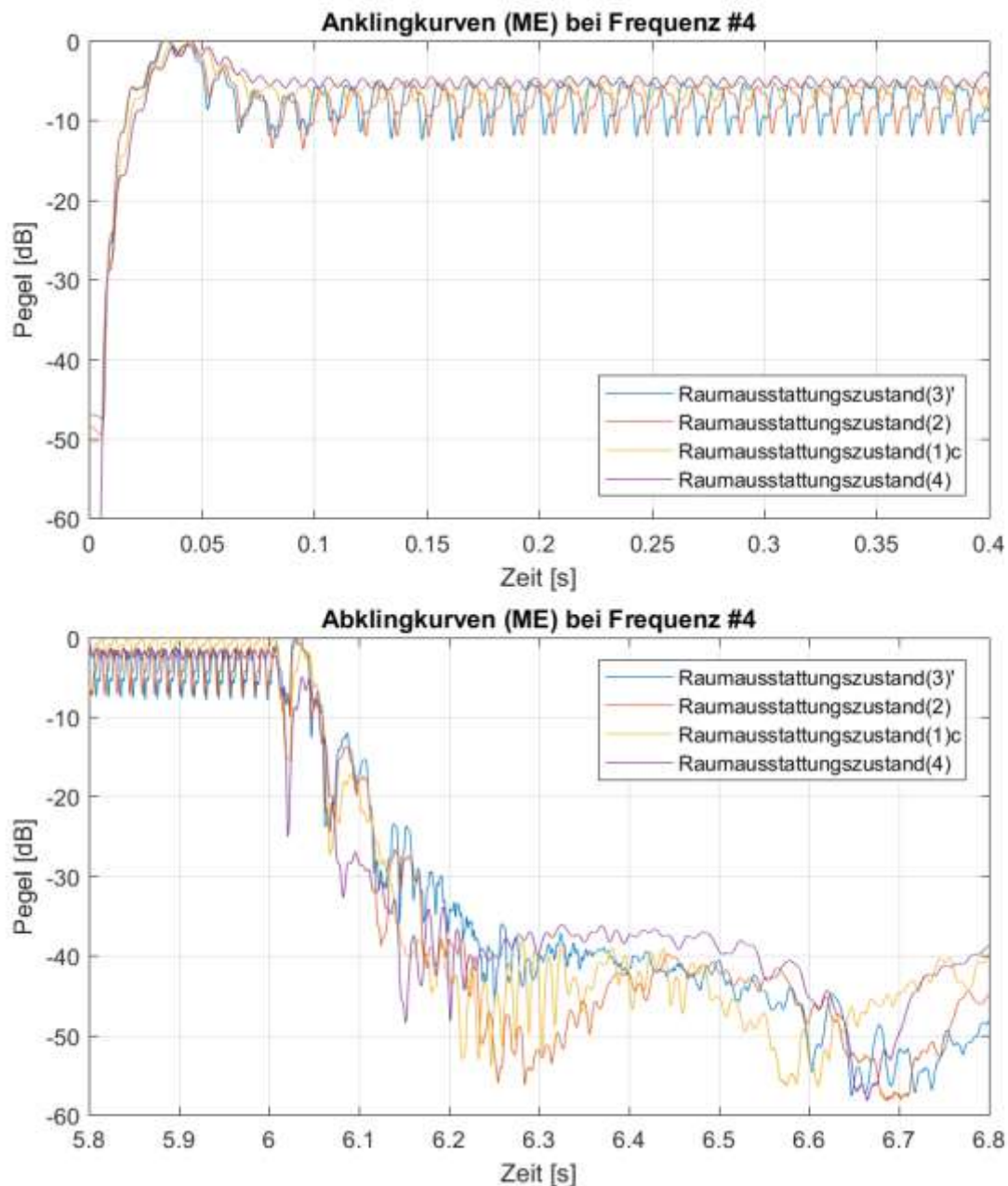


Abb. 6.18: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #4 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

In Abb. 6.18 lässt sich am Überspringen der Anklingkurven erkennen, dass es sich bei der nicht modalen Frequenz #4 tatsächlich um ein lokales Druckminimum handelt, obwohl sich die zugehörigen Quell- und Mikrofonaufstellungsorte in zwei gegenüberliegenden Ecken befanden. Das genaue Zustandekommen dieses Pegelminimums kann allerdings nicht eindeutig erklärt werden – eine über mehrere Begrenzungsflächen zustande kommende destruktiv interferierende Reflexion wird vermutet. Ebenso ist in selbiger Abbildung zu erkennen, dass der zugehörige Abklingverlauf große Unregelmäßigkeiten wie etwa das für Pegelminima charak-

teristische erneute Anschwellen der Schallenergie nach Abschalten der Anregung aufweist. Daher ist auch der in Abschnitt 6.3.1 algorithmisch bestimmte Faktor drei zwischen den Abklingzeiten des Raumausstattungs Zustands (3)' und (4) in dieser Größe nicht zu erkennen.

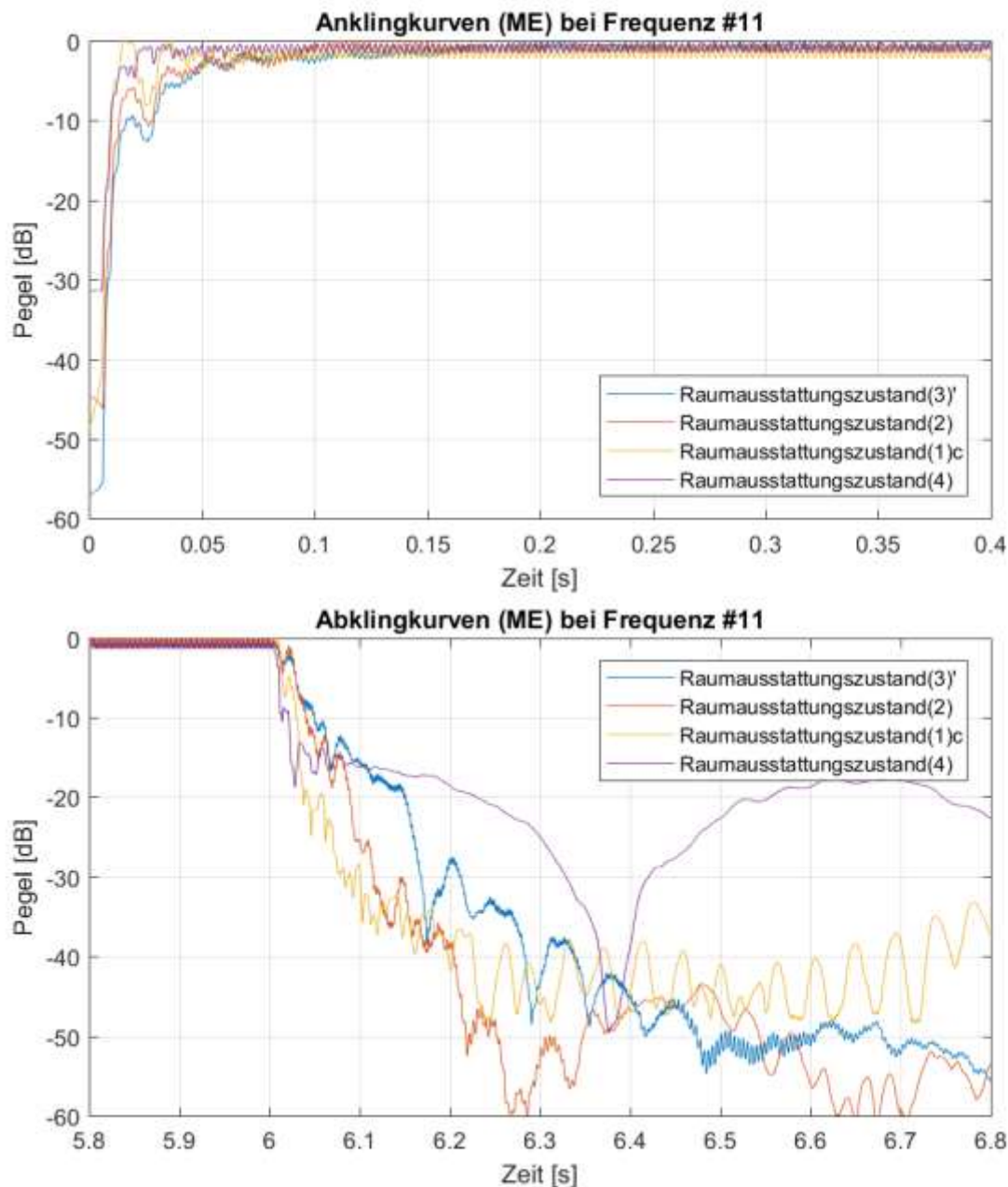


Abb. 6.19: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #11 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

Abb. 6.19 verdeutlicht, dass erst im höheren Frequenzbereich wirklich markante Unterschiede in den Steilheiten der An- bzw. Abklingkurven festzustellen sind – die jeweilige Steigung nimmt direkt proportional mit der Menge an vorhandener Absorption zu.

Beim Vergleich von Abb. 6.17 mit Abb. 6.19 fällt auf, dass – wie zu erwarten war – die Dauer der Anklingvorgänge direkt proportional zur Dauer der Ausklingvorgänge ist.

Marimbatonmessungen

Nachfolgend sind ausgewählte Messergebnisse der Marimbatonmessungen angeführt.

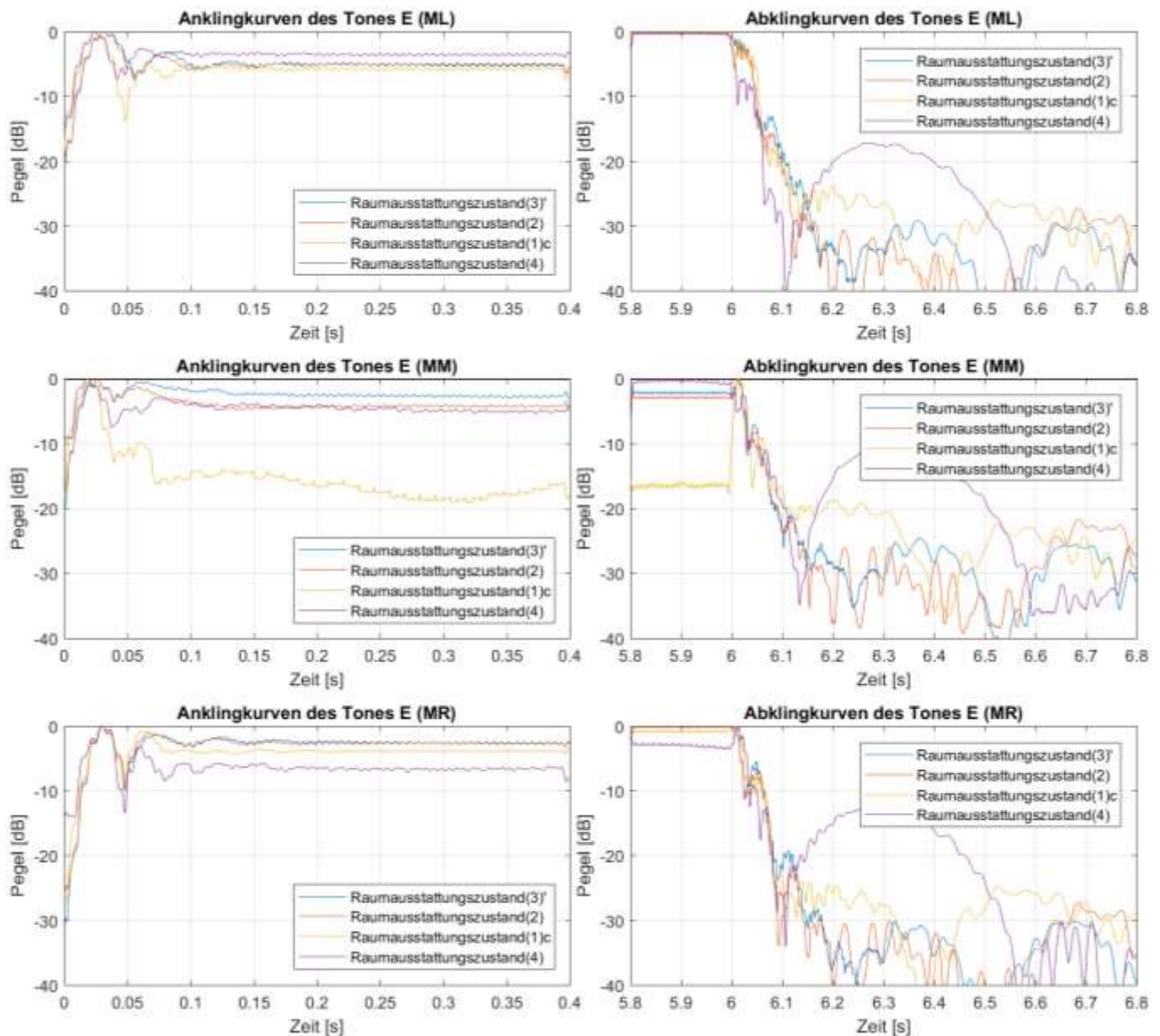


Abb. 6.20: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones E ($\cong 83$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

Beim Betrachten von Abb. 6.20 fällt das extreme Pegelminimum an der mittleren Spielerposition (MM) zum Raumausstattungs Zustand (1)c auf. Die entsprechende Anklingkurve weist ein deutliches Überschwingen von beinahe 20 dB auf. In der zugehörigen Abklingkurve ist ebenso erneut das zugehörige charakteristische Anschwellen der Schallenergie nach Abschalten der Anregung zu erkennen. Für den späteren Spielbetrieb bedeutet dies, dass das Anschlagereignis je nach Steilheit der marimbaeigenen Attack-Vorgänge der jeweiligen Teiltöne (vgl. Abb. 2.5) durch ein mögliches Überschwingen der entsprechenden Anklingkurven unter-

schiedlich beeinflusst wird – sowohl eine Überbetonung des Pegelmaximums als auch eine Wellung des Einschwingvorgangs oder des quasi Sustainzustands sind denkbar. Anschließend ist von einer Reduktion des Sustain- bzw. Release-Pegels auszugehen. Das gemessene Anschwellen der Schallenergie nach dem abrupten Abschalten der Schallquelle wird aufgrund der im Gegensatz dazu sehr langsam und weich ausklingenden Marimbaklänge höchstens zu einem noch flacher verlaufenden Ausklingvorgang führen. Zudem ist interessant, dass sich erneut die Steigungen der Abklingkurven in diesem tiefen Frequenzbereich bei allen Raumausstattungszuständen – anders als durch die algorithmischen Nachhallzeitberechnungen in Abschnitt 6.2 zu vermuten gewesen wäre – stark ähneln.

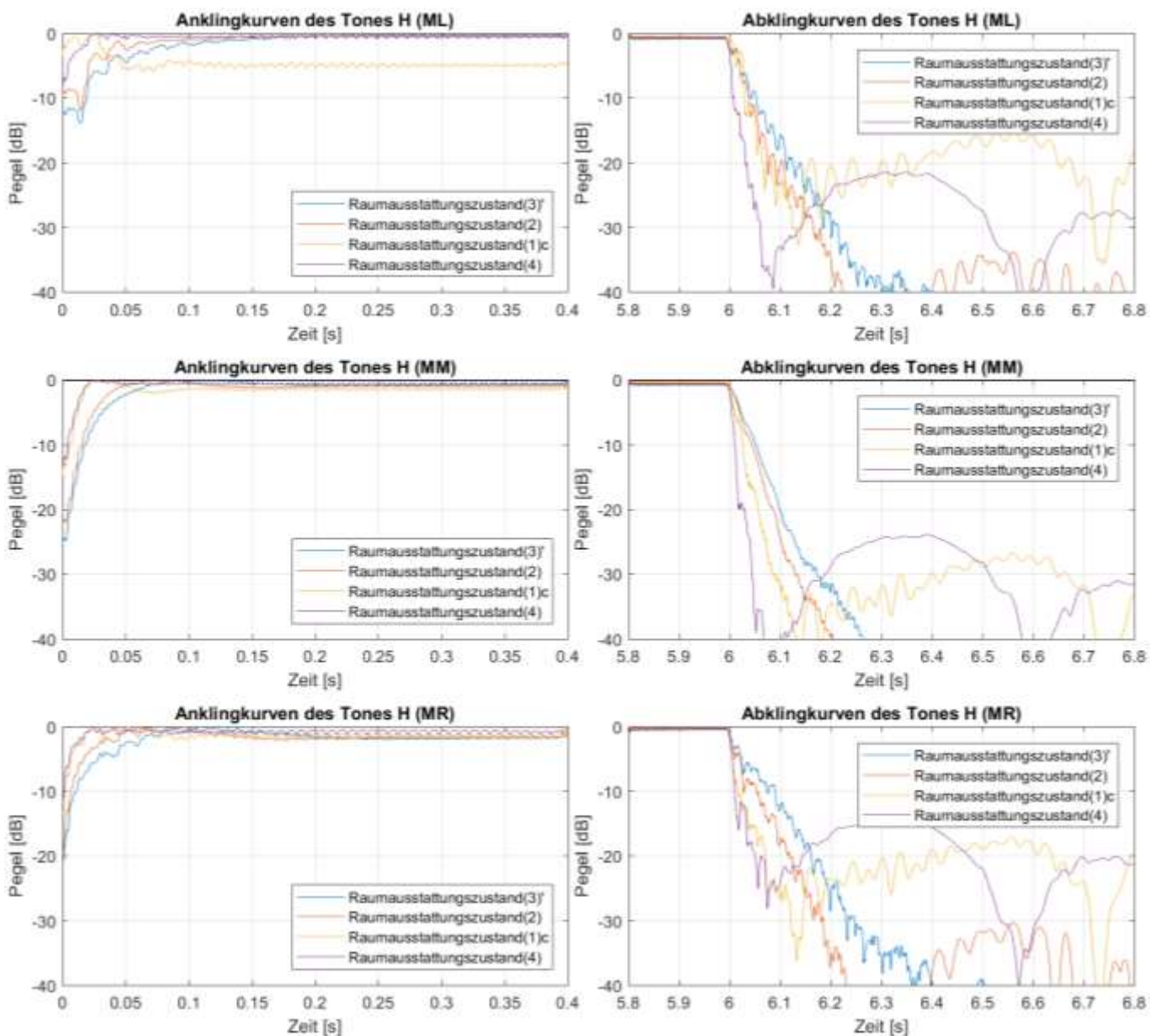


Abb. 6.21: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones H ($\cong 124$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

Abb. 6.21 zeigt, dass sich ähnlich wie bei den An- und Abklingkurven der Eckmessungen erst im Bereich von etwas höheren Frequenzen die zu erwartenden Proportionalitäten zwischen den eingebrachten Absorptionsmaterialmengen und den Steigungen der zugehörigen An- und Abklingkurven einstellen.

6.3.3 Untersuchung der Messsignalwellenformen

Eine weitere interessante Analyseform bietet sich bei Einzelsinussmessungen durch die Möglichkeit der Betrachtung der gemessenen Signalwellenformen. In den nachfolgenden Abbildungen sind diese für ausgewählte Ergebnisse der Ecke- und Marimbatonmessungen im eingeschwungenen Zustand sowie während des Abklingvorgangs dargestellt. Dabei ist die y-Achse logarithmisch skaliert, um so die große Signaldynamik in den Abklingvorgängen bzw. zwischen den unterschiedlichen Raumausstattungszuständen grafisch einzuschränken. Dafür war es notwendig, den Absolutbetrag der Messsignale zu bilden – es werden also sowohl positive als auch negative Halbwellen der Signale als Pegelmaxima dargestellt. Hier sei besonders wichtig anzumerken, dass es dadurch bei einer möglichen Überlagerung der Messsignale mit einer sehr tiefen Frequenz – zum Beispiel Rumpelgeräusche – oder einem Gleichanteil – zum Beispiel durch Abweichungen der Elektronik – zu einem Wechsel von kurz wirkenden Halbwellen mit geringer Amplitude und lang wirkenden Halbwellen mit großer Amplitude kommt (vgl. Abb. 6.24 Abklingvorgang (**MR**) (**4**)). Sonst erfolgten keine weiteren Signalbearbeitungen. Wie in Abschnitt 6.3.2.2 werden auch hier lediglich ein paar ausgewählte Messergebnisse dargestellt, die dazu äquivalenten Abbildungen aller durchgeführten Einzelsinussmessungen sind im Anhang A2 (Eckmessungen) und B2 (Marimbatonmessungen) angeführt.

Eckmessungen

Nachfolgend sind zwei ausgewählte Abbildungen zu den Einzelsinuseckmessungen dargestellt. Die jeweiligen tatsächlichen Anregungsfrequenzen sind in Tab. 6.2 angeführt.

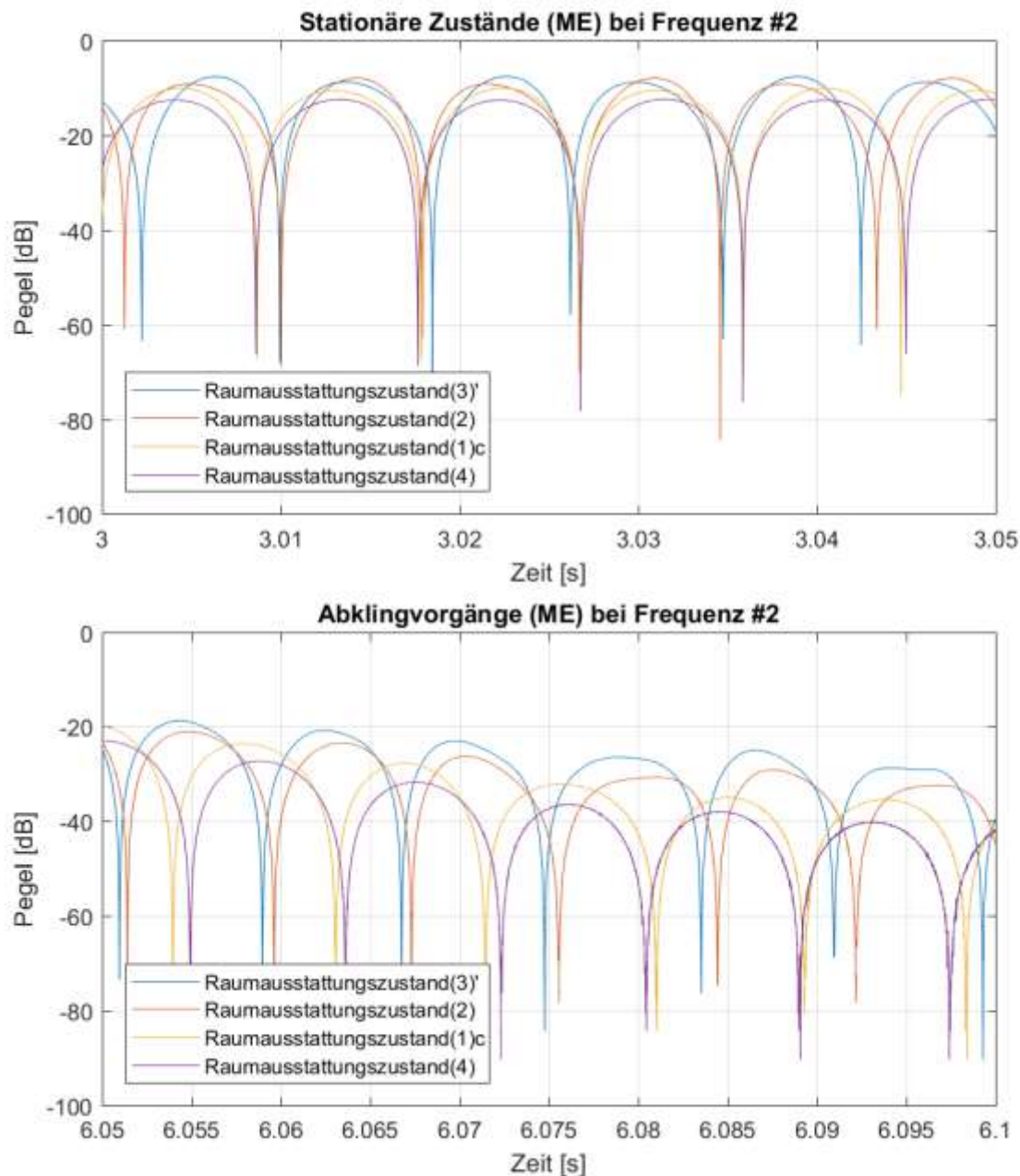


Abb. 6.22: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #2 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

Abb. 6.22 zeigt, dass bei Anregung einer modalen Frequenz – hier also #2 – insbesondere bei den stark gedämpften Raumausstattungs Zuständen (1)c und (4) beinahe keine Verzerrungen und bei den weniger gedämpften Zuständen (3)' und (2) nur verhältnismäßig geringe Verzerrungen der Wellenformen sowohl im stationären Zustand als auch dem Abklingvorgang – hier möglicherweise aufgrund der zu mittleren Frequenzen hin ansteigenden Nachhallzeiten (vgl. Abb. 6.8) etwas prägnanter – festzustellen sind. In den zugehörigen Abklingvorgängen lassen sich zudem bei allen Raumausstattungs Zuständen lediglich äußerst geringfügige Frequenzmodulationen erkennen – der Abstand zwischen zwei Nulldurchgängen (hier Pegelminima) ist nicht mehr exakt äquidistant. Dass sich dies lediglich durch eine Überlagerung mit einer tiefen Störfrequenz mit geringem Pegel ausprägte, kann hier allerdings nicht vollständig ausgeschlossen werden.

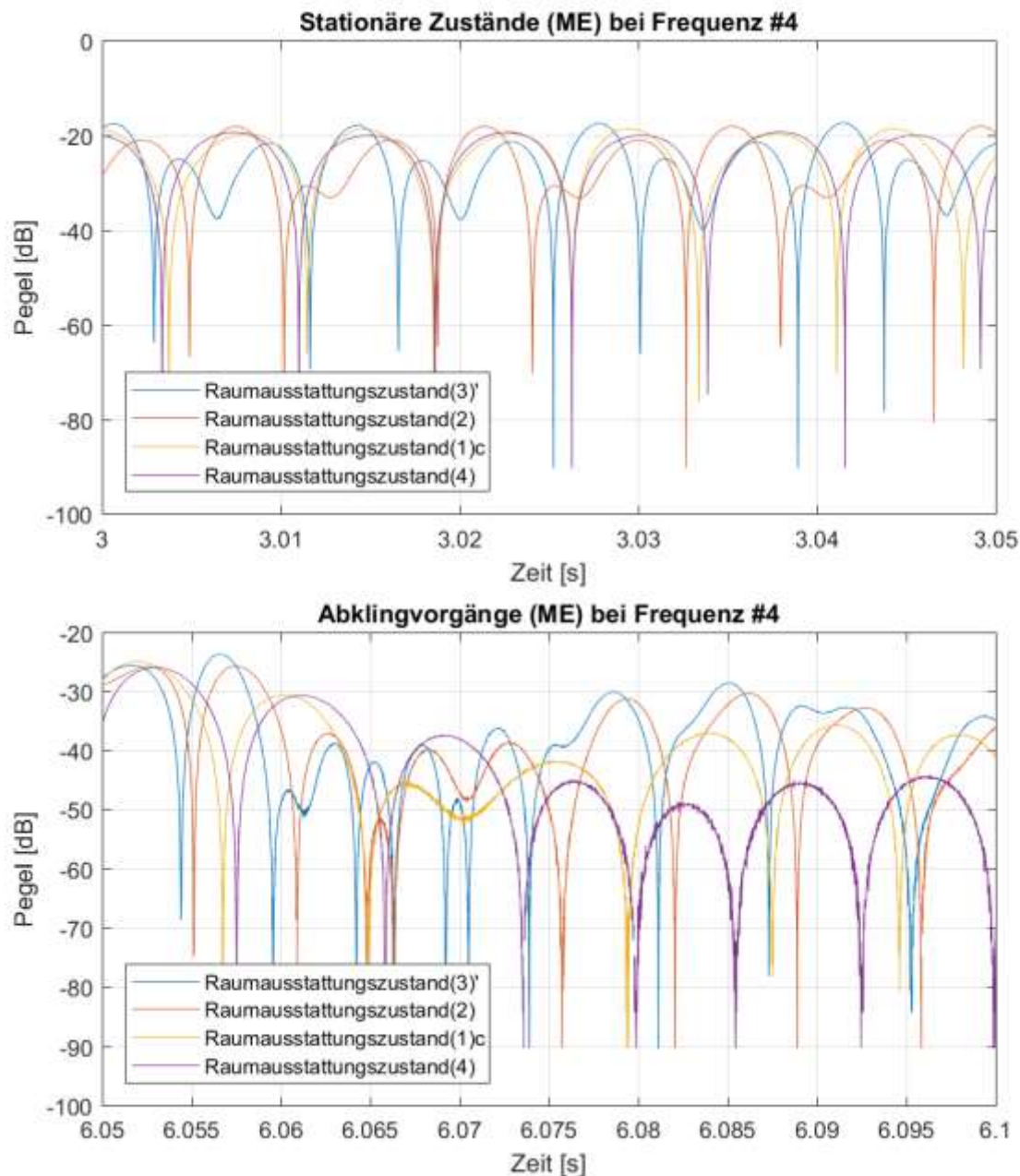


Abb. 6.23: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #4 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

Beim Betrachten von Abb. 6.23 fällt auf, dass es hingegen bei Anregung einer nicht modalen Frequenz – hier also #4 – bei den wenig gedämpften Zuständen sogar im stationären Zustand zu massiven Veränderungen der Wellenformen kommt – im Ausklingvorgang werden diese noch extremer. Eine mögliche Erklärung für die Verzerrungen im stationären Zustand wird unter Abb. 6.24 geschildert. Während beim äußerst stark gedämpften Raumausstattungs-zustand (4) im stationären Zustand quasi keine Verzerrungen erkannt werden können, treten im Ausklingvorgang zumindest deutlich ausgeprägte Frequenzmodulationen auf – der Abstand zwischen zwei Nulldurchgängen (hier Pegelminima) ist nicht mehr äquidistant. Da aperiodische Zeitvariationen zwischen den Nulldurchgängen festgestellt werden können, ist sehr unwahrscheinlich, dass sich dieser Umstand aufgrund einer Überlagerung mit einer tiefen Störfrequenz ausprägte.

Marimbatonmessungen

Nachfolgend sind ausgewählte Messergebnisse der Marimbatonmessungen angeführt.

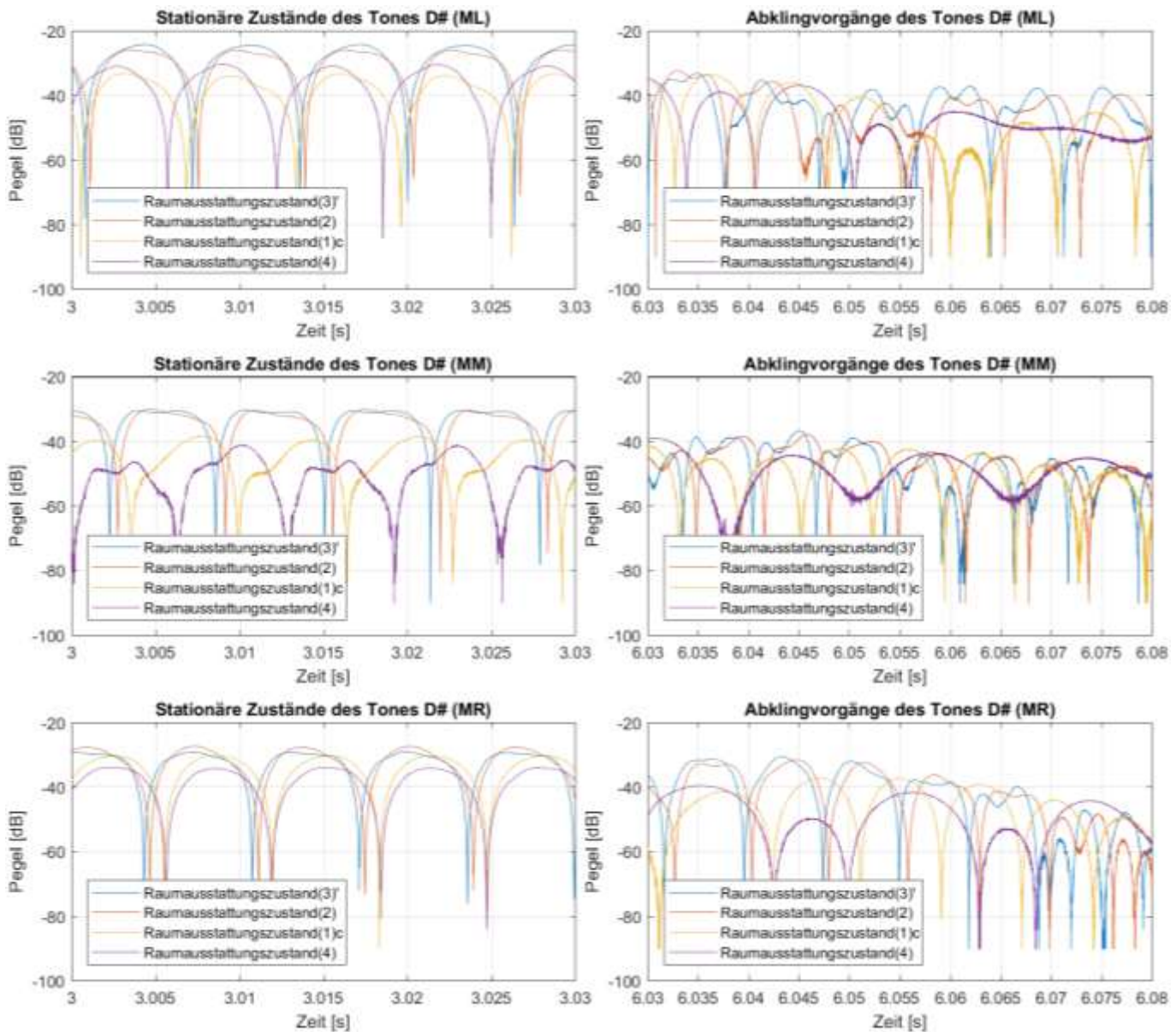


Abb. 6.24: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones D# ($\cong 78$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

In Abb. 6.24 wird deutlich, dass es je nach Messposition und Raumausstattungs Zustand zu massiven Verzerrungen der Wellenformen sowohl im stationären Zustand als auch den Abklingvorgängen kommt. Diese sind quasi bei allen tieffrequenten Marimbatönen bis in etwa zum Ton f ($\cong 176$ Hz) in unterschiedlich starker Ausprägung zu erkennen (vgl. Anhang B2). Dabei muss beachtet werden, dass die durch nichtlineare Verzerrungen des Quelllautsprechers erzeugten Obertöne im Spektrum des abgestrahlten Schallereignisses einen Abstand von ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz aufweisen. Die Pegel einbrüche (destruktive In-

terferenz) eines durch eine Erstreflexion hervorgerufenen Kammfilters (vgl. Abschnitt 3.2.1.1) treten hingegen im Abstand von ungeradzahigen Vielfachen der tiefsten betroffenen Frequenz auf – im Bereich der geradzahigen Vielfachen selbiger Frequenz kommt es sogar zu einer Verstärkung von bis zu 6 dB (konstruktive Interferenz). Zudem kann die Ausprägung der Pegel einbrüche – und Pegelverstärkungen – zueinander durch die Absorptionseigenschaften der Oberfläche am Erstreflexionspunkt – wie etwa einer Zunahme der Absorption bei steigender Frequenz – variieren. Somit wird deutlich, dass, wenn die Anregungsfrequenz der Frequenz eines durch eine Erstreflexion hervorgerufenen Pegel einbruchs entspricht, die Grundfrequenz – sowie ungeradzahige Vielfache davon – stark gedämpft werden, die geradzahigen Harmonischen des Quelllautsprechers werden jedoch um bis zu 6 dB verstärkt. Weiters treten aufgrund des reduzierten Gesamtpegels auch Hintergrundgeräusche deutlicher zum Vorschein. Es ist also davon auszugehen, dass diese verzerrten Messsignalwellenformen aufgrund der Zusammenwirkung von Lautsprecherverzerrungen, durch Erstreflexionen hervorgerufenen Kammfiltern sowie Hintergrundgeräuschen zustande kommen.

6.3.4 Schalldruckpegel im eingeschwungenen Zustand

Um die Schalldruckpegelreduktion durch die eingebrachten Absorber zu untersuchen, erfolgte eine Mittelung der mithilfe der jeweiligen Moving-Average-Filter geglätteten Schalldruckpegelverläufe der Absolutbeträge der Ecke- und Marimbatonmesssignale von Sekunde drei bis Sekunde vier. Bei letzteren wurde zudem eine arithmetische Mittelung über die drei Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**) vorgenommen. Die so erhaltenen Ergebnisse sind in den beiden nachfolgenden Tabellen angeführt.

#	Relativer Schalldruckpegel [dB]			
	(3)'	(2)	(1)c	(4)
1	82	81	80	78
2	82	81	80	78
3	82	81	80	78
4	69	69	71	71
5	78	78	78	75
6	78	78	75	75
7	84	84	77	-
8	86	85	76	-
9	77	76	-	-
10	79	75	62	-
11	81	76	63	63
12	82	77	-	-
13	81	72	-	-

Tab. 6.5: Relative Schalldruckpegel der Eckmessungen

In Tab. 6.5 ist die Dämpfung der einzelnen Pegelüberhöhungen erkennbar. Auf eine arithmetische Mittelung der Messergebnisse über die gemessenen Frequenzen (wie in Tab. 6.6) wurde hier bewusst verzichtet, da bei den stärker gedämpften Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** im höheren Frequenzbereich überhaupt keine Pegelüberhöhungen mehr festzustellen waren und somit auch keine Messungen mehr durchgeführt wurden (vgl. Abb. 6.7). Eine Mittelung würde hier somit kein aussagekräftiges Ergebnis liefern.

Ton	Relativer Schalldruckpegel [dB]			
	(3)‘	(2)	(1)c	(4)
C	67	67	63	63
C#	65	64	62	61
D	62	62	61	56
D#	63	62	55	54
E	58	58	49	54
F	55	54	51	53
F#	52	52	52	50
G	52	51	53	52
G#	52	52	53	53
A	54	56	58	56
A#	62	64	58	56
H	65	63	55	58
c	59	58	53	59
c#	56	56	55	57
d	50	51	55	55
d#	54	55	56	53
e	60	61	54	54
f	53	58	44	50
f#	51	56	46	51
g	58	54	58	54
g#	75	69	60	55
a	60	60	62	55
a#	69	69	62	55
h	62	55	56	53
c‘	61	61	55	55
c#‘	54	58	54	58
arith. Mittel	59	59	55	55

Tab. 6.6: Relative Schalldruckpegel der örtlich gemittelten Marimbatonmessungen

Aus Tab. 6.6 geht hervor, dass im Bereich der beiden unteren Oktaven im Mittel eine Pegelreduktion von etwa 4 dB bei den stark gedämpften Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** gegenüber den eher schwach gedämpften Zuständen **(3)‘** und **(2)** erzielt werden konnte.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Streuung der gemessenen Pegelwerte über die Frequenzen sowie Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**) je Raumausstattungszustand **(3)**‘, **(2)**, **(1)c** und **(4)** verdeutlicht. Dabei stellen die rote horizontale Linie den Medianwert, die beiden blauen horizontalen Begrenzungen das 25. bzw. 75. Perzentil und die schwarzen horizontalen Linien den Wertebereich aller Daten ohne Einbezug von möglichen Ausreißern dar. Letztere werden durch rote „+“-Symbole visualisiert.

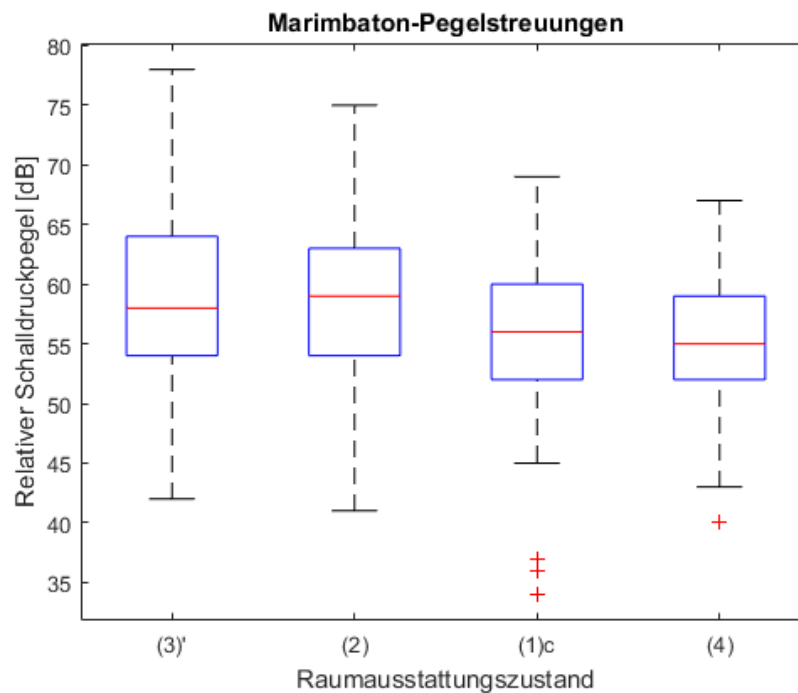


Abb. 6.25: Pegelstreuungen der nicht örtlich gemittelten Marimbatonmessungen (78 Pegelwerte je Raumausstattungszustand)

Abb. 6.25 zeigt, dass es neben der Verringerung des mittleren Schalldruckpegels mit zunehmender Absorption auch zu einer Reduktion der Streuung der Marimbatonpegel über den Ort und deren Grundfrequenz kommt. Eine Ausnahme stellen lediglich die vereinzelt, vermutlich aufgrund von destruktiv interferierenden Erstreflexionen, entstandenen Ausreißer mit deutlich geringerem Pegel dar.

6.3.5 Erkenntnisse

Durch die Auswertung der Einzelsinussmessungen konnte gezeigt werden, dass eine algorithmische Bestimmung der jeweiligen Abklingzeiten zum Teil fehlerbehaftet ist. Vor allem wenn bei Frequenzen, bei denen sich Überlagerungen weniger einzelner Moden ausprägen, oder in einem Druckminimum gemessen wird, resultiert daraus eine große Welligkeit in den Abklingkurven, welche zu Messfehlern führt – je nach Wahl des Auswertebereichs entstehen teils gravierende Unterschiede in den berechneten Abklingzeiten. Dennoch wurde deutlich, dass die arithmetischen Mittel der jeweiligen in Druckmaxima gemessenen Einzelsinusabklingzeiten grob mit den zugehörigen Oktavbandnachhallzeiten in allen Raumausstattungs-zuständen korrelieren. Weiters wurde ersichtlich, dass sich die Varianz zwischen den Dodekaeder-Nachhallzeitmessungen und den Sweep-Eckmessungen respektive den Einzelsinuseckmessungen mit zunehmender Dämpfung in der Übekabine reduzierte.

Bei der manuellen Analyse der An- und Abklingkurven wurde deutlich, dass der Verlauf dieser bei den tiefsten modalen Anregungsfrequenzen zwischen allen Raumausstattungs-zuständen sehr ähnlich ist. Erst bei etwas höheren Frequenzen – etwa ab #7 (vgl. Abb. A1.7) – konnte eine deutliche Differenzierung zwischen den Steilheiten der An- und Abklingkurven der unterschiedlichen Raumausstattungs-zustände erfolgen. Ebenso konnte gezeigt werden, dass es an Orten von Pegelminima zu einem Überspringen der Anklingkurven bzw. durch das abrupte Abschalten des Anregungssignals zu einem plötzlichen Aufspringen der Abklingkurven kommt. Zudem wurde festgestellt, dass die Steilheiten der Anklingkurven mit jenen der Abklingkurven korrelieren – durch die eingebrachte Dämpfung und der daraus resultierenden Reduktion der Abklingzeit wird also auch das Anklingereignis direkter.

Durch die Darstellung der Messsignalwellenformen konnte veranschaulicht werden, dass es vor allem im Bereich von lokalen Pegelminima zu einer deutlichen Hervorhebung von Verzerrungen kommen kann. Außerdem stellte sich heraus, dass diese in den Abklingvorgängen verstärkt hervor- sowie unregelmäßige Abstände zwischen den Nulldurchgängen auftreten.

Die Auswertung der im stationären Zustand gemessenen Pegel mit den zugehörigen Streuungen verdeutlichte, dass die eingebrachten Absorber den Summenpegel etwas und die modalbedingten Varianzen zwischen den einzelnen tiefen Marimbatönen deutlich reduzieren konnten. An manchen Positionen wurden allerdings weiterhin starke Pegelrückfälle aufgrund von destruktiven Erstreflexionen festgestellt. Letztere werden in Abschnitt 6.5 näher untersucht.

6.4 Auswertung der Schalldruckpegelverläufe

An den Quellpositionen (Q1), (Q2), (Q3) und (Q4) wurden Sweep-Messungen mit dem Genelec Studiomonitor zu jedem Raumausstattungszustand (1)c, (2), (3)' und (4) durchgeführt. Die an der Hauptspielerposition (MM) gemessenen und nach dem Verfahren von Abschnitt 5.2.5 berechneten kontinuierlichen Schalldruckpegelverläufe sind in den nachfolgenden Abbildungen (vgl. Abb. 6.26, Abb. 6.27, Abb. 6.28 und Abb. 6.29) jeweils für die vier verschiedenen Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) grafisch dargestellt. Dabei wurden all jene Frequenzbereiche ausgegraut, welche sich außerhalb der Grundtonfrequenzen der für die jeweilige Quellposition relevanten Marimbaklangstäbe befinden (vgl. Abb. 6.5). Zudem wurde anhand der in Abb. 6.5 dargestellten Frequenzbereiche für jeden vorhin genannten Raumausstattungszustand aus den einzelnen Messergebnissen der verschiedenen Quellpositionen ein zusammengesetzter Schalldruckpegelverlauf generiert (vgl. Abb. 6.30). Da wieder bewusst auf eine Normalisierung der Impulsantworten verzichtet wurde, sind die dargestellten relativen Schalldruckpegelverläufe auch untereinander vergleichbar.

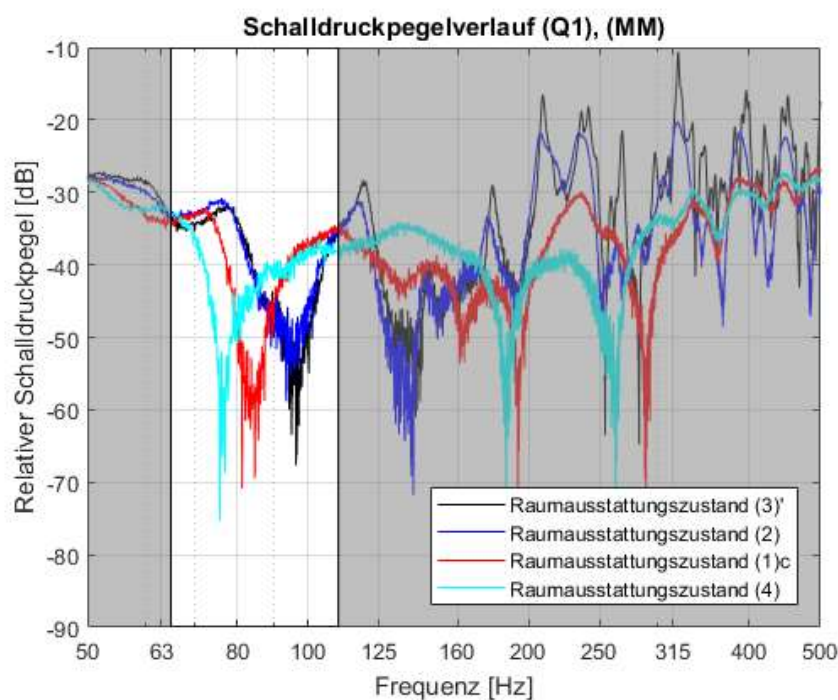


Abb. 6.26: Relative Schalldruckpegelverläufe für den tiefsten Marimbatonbereich C-G# (Q1) zu den vier verschiedenen Raumausstattungszuständen (3)', (2), (1)c und (4) an der Hauptspielerposition (MM)

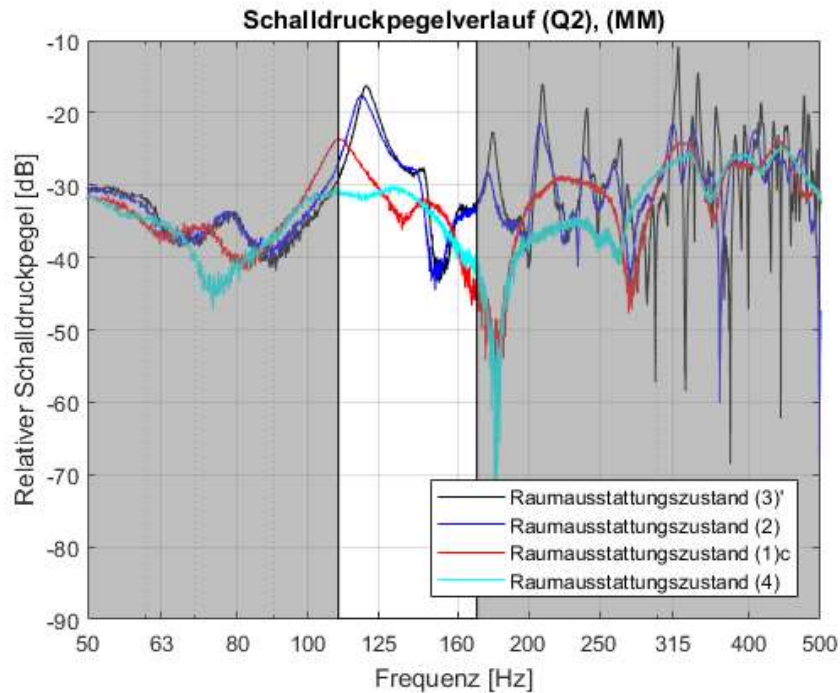


Abb. 6.27: Relative Schalldruckpegelverläufe für den mitteltiefen Marimbatonbereich A-e (**Q2**) zu den vier verschiedenen Raumausstattungs Zuständen (**3)**', (**2**), (**1**)c und (**4**) an der Hauptspielerposition (**MM**)

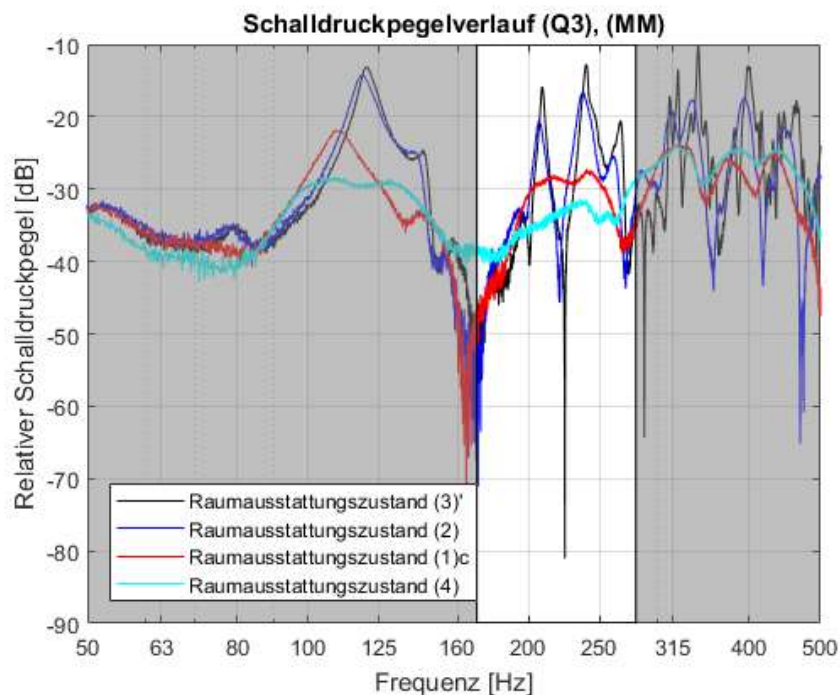


Abb. 6.28: Relative Schalldruckpegelverläufe für den tiefmittleren Marimbatonbereich f-c# (**Q3**) zu den vier verschiedenen Raumausstattungs Zuständen (**3)**', (**2**), (**1**)c und (**4**) an der Hauptspielerposition (**MM**)

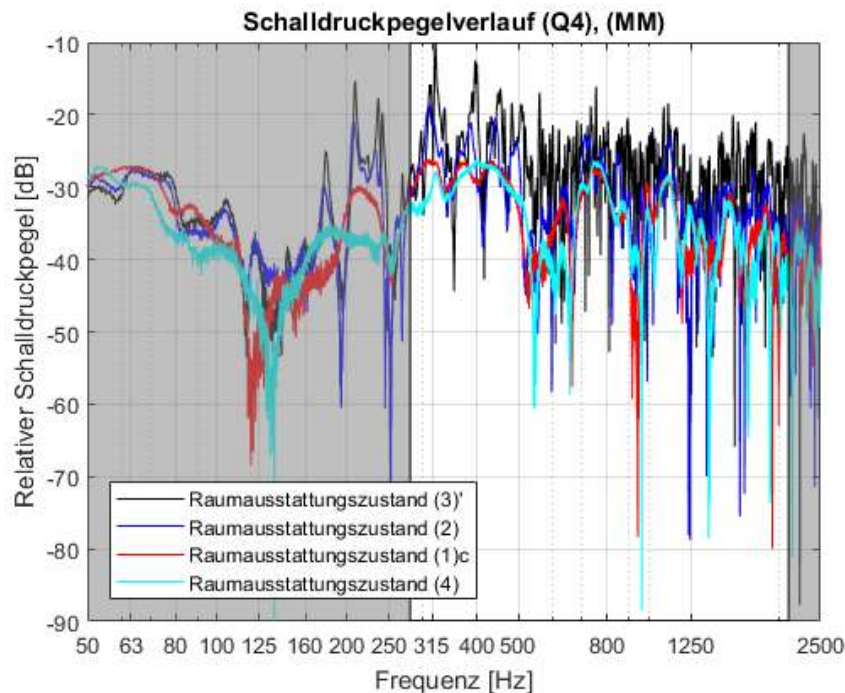


Abb. 6.29: Relative Schalldruckpegelverläufe für den mittleren und hohen Marimbatonbereich d'-c'''' (Q4) zu den vier verschiedenen Raumausstattungsständen (3)', (2), (1)c und (4) an der Hauptspielerposition (MM)

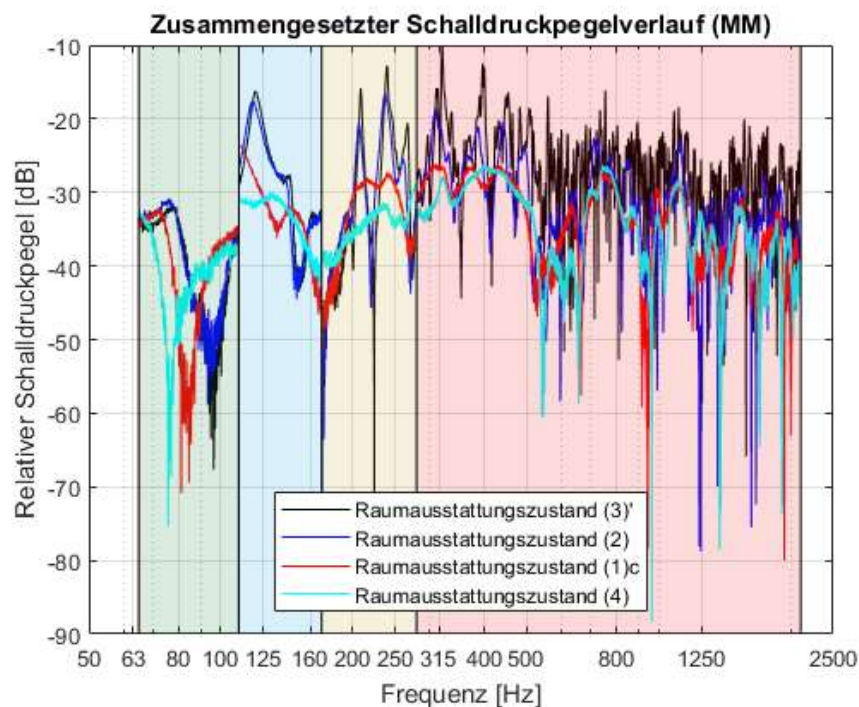


Abb. 6.30: Aus den für den jeweiligen Frequenzbereich relevanten Quellpositionen zusammengesetzte relative Schalldruckpegelverläufe zu den vier verschiedenen Raumausstattungsständen (3)', (2), (1)c und (4) an der Hauptspielerposition (MM)

Beim näheren Betrachten von Abb. 6.26 bis Abb. 6.30 wird deutlich, dass im tiefen bis mittleren Frequenzbereich hauptsächlich die durch Moden hervorgerufenen Pegelüberhöhungen mit zunehmender Dämpfung – vor allem im Zustand (1)c bzw. noch prägnanter im Zustand

(4) – in ihrer Ausprägung abgeschwächt wurden. So konnten mithilfe der extremen Dämpfungsmaßnahmen im Raumausstattungszustand (4) die charakteristischen hochgütigen Pegelspitzen von 100 Hz aufwärts quasi vollständig eliminiert werden. Die größten Reduktionen von grob 20 dB wurden hierbei im Frequenzbereich von ca. 200 Hz bis 400 Hz erreicht (vgl. Abb. 6.30).

Da allerdings auch in diesem Zustand nicht alle Begrenzungsflächen mit extrem dicken Absorptionsmaterialien ausgestattet waren, konnten weiterhin einzelne destruktive Interferenzen aufgrund von Erstreflexionen starke steilflankige Pegeleinbrüche verursachen. In Abb. 6.27 ist bei ~180 Hz – also im grau hinterlegten Randbereich – erkennbar, dass durch das Dämpfen der Moden sogar das Hervortreten eines solchen Pegeleinbruchs massiv gefördert wurde. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass zwar die Ausprägung der Pegeleinbrüche nicht abgeschwächt, jedoch deren Anzahl über den gesamten Frequenzbereich hinweg stark reduziert werden konnte, was wiederum zu einer Glättung des Schalldruckpegelverlaufs – ähnlich wie in Abb. 5.24 – führte (vgl. Abb. 6.26 bis Abb. 6.30).

In nachfolgender Abbildung ist der nach selbigem Vorgehen wie für Abb. 6.30 generierte zusammengesetzte Schalldruckpegelverlauf zum Raumausstattungszustand (4) an den drei den Bewegungsbereich des Marimba-Spielers abdeckenden Mikrofonpositionen (MM), (ML) und (MR) dargestellt.

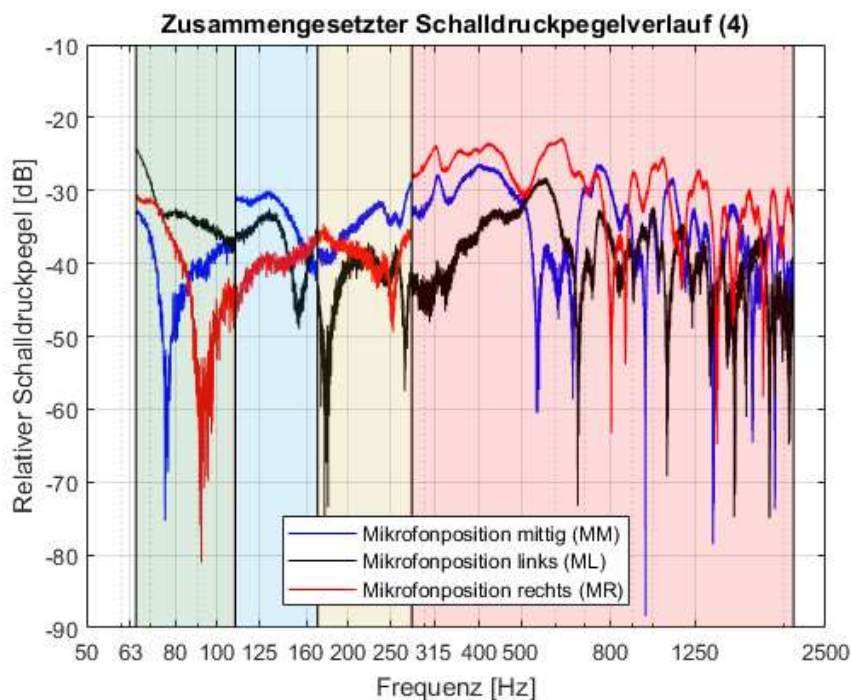


Abb. 6.31: Aus den für den jeweiligen Frequenzbereich relevanten Quellpositionen zusammengesetzte relative Schalldruckpegelverläufe an der mittigen (MM), linken (ML) und rechten (MR) Mikrofonposition im Raumausstattungszustand (4)

In Abb. 6.31 wird deutlich, dass die Abflachung der Pegelspitzen (vgl. Abb. 5.20, Abb. 5.21 und Abb. 5.22) unabhängig von der Mikrofonposition im gesamten relevanten Messbereich festgestellt werden kann und die genaue Frequenz der Pegeleinbrüche ortsabhängig ist.

6.5 Nähere Untersuchungen zur Ausprägung von destruktiven Erstreflexionen

Wie in Abschnitt 6.4 verdeutlicht, kommt es auch im Raumausstattungszustand **(4)** weiterhin zu einzelnen massiven Pegel einbrüchen aufgrund von Erstreflexionen. Daher wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, um deren Zustandekommen genauer nachvollziehen und deren Auswirkungen möglichst reduzieren zu können. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf den Pegel einbruch im Bereich von – je nach Raumausstattungszustand – ca. 70 Hz bis 100 Hz an der Hauptspielerposition (**MM**) gelegt, da dieser im Tieftonbereich äußerst präsent ist (vgl. Abb. 6.26 und Abb. 6.30). Alle nachfolgenden Messungen wurden in der Übekabine mit Raumausstattungszustand **(4)** durchgeführt. Dabei kam sowohl der Genelec Studiomonitor als auch der in Abschnitt 6.1 vorgestellte Spötl-Lautsprecher des SPSC zum Einsatz. Hier sei noch anzumerken, dass die in diesem Abschnitt vorgestellten Messungen eher experimentell durchgeführt und somit besonders häufig Änderungen am Messaufbau vorgenommen wurden.

6.5.1 Einfluss des Quelllautsprechertyps

Da es sich beim Genelec Studiomonitor um ein aktives 2-Wege-System mit Bassreflexgehäuse – also streng genommen einer „Blackbox“ mit mehreren Quellen, die sich wiederum gegenseitig beeinflussen – handelt, wurden nun auch Schalldruckpegelverläufe mit dem Spötl-Lautsprecher des SPSC (vgl. Abschnitt 6.1.1) durchgeführt. Der Frequenzgang dieses Lautsprechers ist im tiefen Frequenzbereich – auf welchen sich die hier angeführten Messungen ausschließlich beziehen – bis auf die noch wirkende Hochpasscharakteristik ausreichend linear (vgl. Abb. 6.1). Die nachfolgende Abbildung zeigt die gemessenen Schalldruckpegelverläufe bei Anregung mit dem Genelec Studiomonitor, dem Spötl-Lautsprecher sowie dem Dodekaeder-Lautsprecher von Quellposition 1 (**Q1**) an der Hauptspielerposition (**MM**).

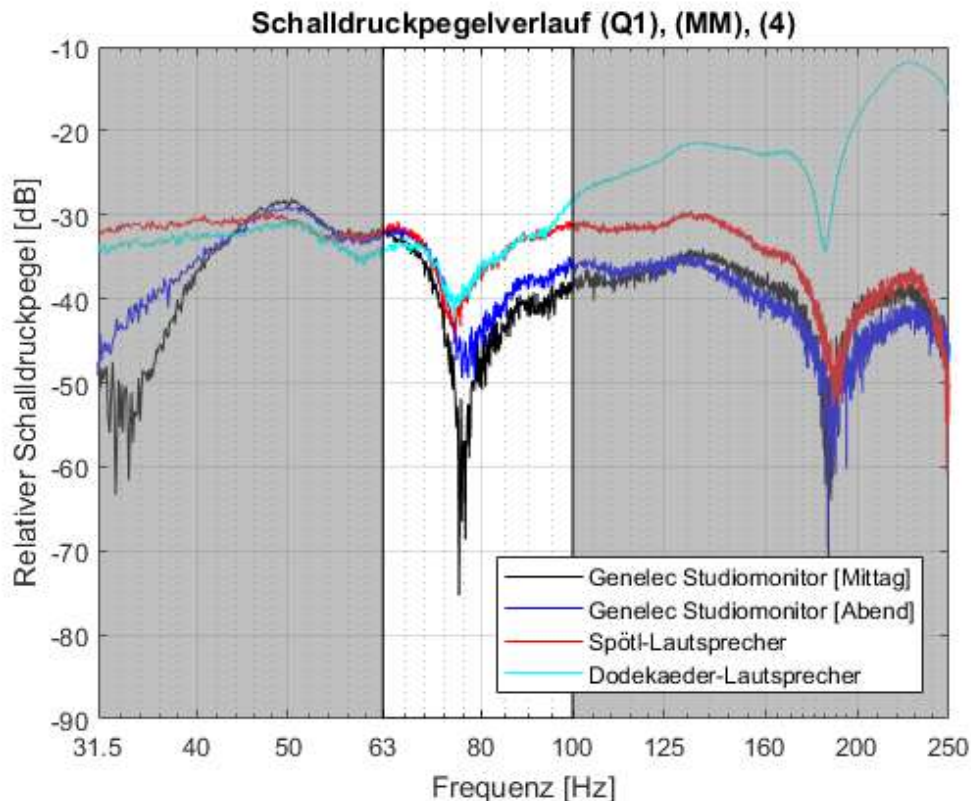


Abb. 6.32: Relative Schalldruckpegelverläufe zum Raumausstattungszustand (4) an der Hauptspielerposition (MM) bei Anregung von Quellposition 1 (Q1) mit dem Genelec Studiomonitor, dem Spötl-Lautsprecher und dem Dodekaeder-Lautsprecher

In Abb. 6.32 wird bereits deutlich, dass der Pegel einbruch bei ~80 Hz relativ stark in seiner Ausprägung variiert. Die stärkste Abweichung ist zwischen den beiden Messungen zu erkennen, die mit demselben Lautsprechertyp (nämlich dem Genelec Studiomonitor) jedoch zu zwei unterschiedlichen Tageszeiten – und somit auch nach einer Neupositionierung der Schallquelle – durchgeführt wurden. Es liegt also nahe, dass die Ausprägung des Pegel einbruchs sowohl vom Quelllautsprechertyp als auch der exakten Quellposition bzw. -ausrichtung abhängig ist. Ebenso interessant ist, dass die bereits ab ~100 Hz eintretende Hochpassfilterwirkung des Spötl-Lautsprechers (vgl. Abb. 6.1) bei den Messungen in dieser Umgebung quasi nicht festgestellt werden kann – die ab ~50 Hz eintretende des Genelec Studiomonitors (vgl. Abb. 4.1) jedoch schon. Eine eindeutige Erklärung dafür kann zurzeit nicht gegeben werden. Im Frequenzbereich von ~50 Hz bis zum ersten Pegel einbruch bei ~80 Hz weisen alle drei Lautsprechertypen sehr ähnliche Schalldruckpegelverläufe auf.

6.5.2 Einfluss von geringfügigen Positionsänderungen des Quelllautsprechers

Als nächstes wurde untersucht, wie stark dieser erste Pegeleinbruch bei ~ 80 Hz von der exakten Positionierung des Quelllautsprechers abhängig ist. Dazu wurden Messungen mit um jeweils 10 cm von der eigentlichen Quellposition 1 (**Q1**) verschobenen Aufstellungsorten der Quelllautsprecher durchgeführt. Hier sei anzumerken, dass sowohl mit dem Genelec Studiomonitor als auch dem Spötl-Lautsprecher gemessen wurde. Die so erhaltenen relativen Schalldruckpegelverläufe sind in nachfolgender Abbildung grafisch dargestellt.

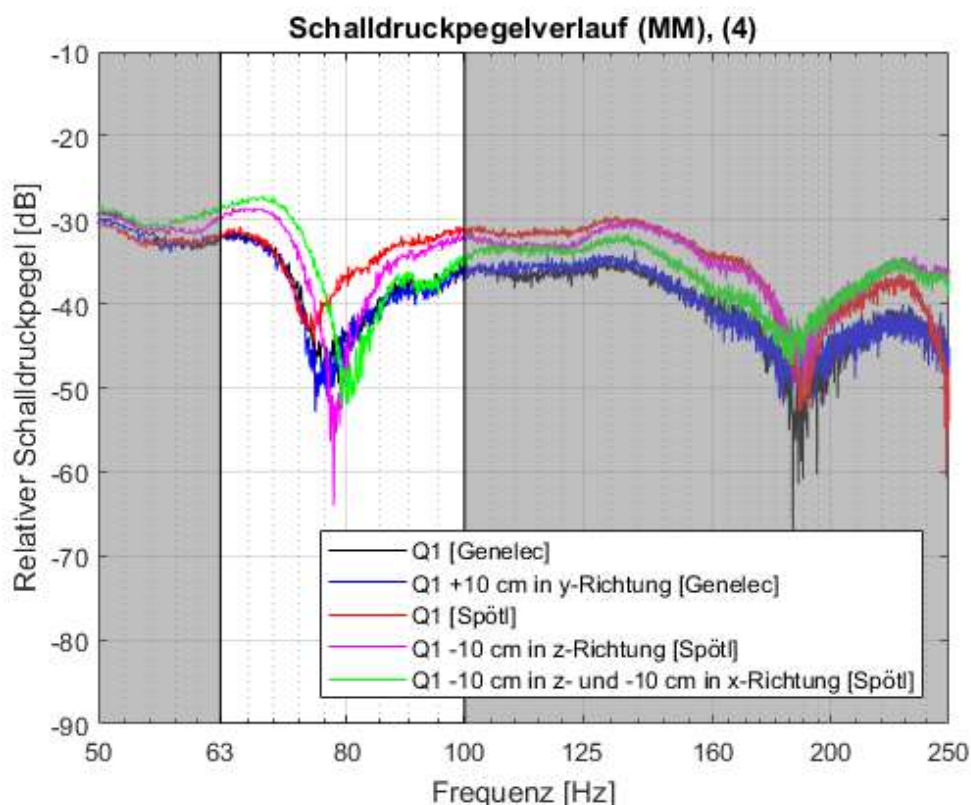


Abb. 6.33: Relative Schalldruckpegelverläufe an der Hauptspielerposition (**MM**) zum Raumausstattungszustand (**4**) bei Anregung von Quellposition 1 (**Q1**) sowie geringen Abweichungen davon

Beim Betrachten von Abb. 6.33 fällt auf, dass außer durch die geringfügige Verschiebung des Genelec Studiomonitors entlang der y-Achse die Ausprägung des Pegeleinbruchs bei ~ 80 Hz mit Änderungen der Quellposition beeinflusst wird. Besonders auffällig ist die Pegeländerung beim Verschieben des Spötl-Lautsprechers entlang der z-Achse.

6.5.3 Einfluss der Ausrichtung der Quelllautsprechermembran

Weiters wurden die Auswirkungen auf die Ausprägung des ersten Pegelabfalls bei ~ 80 Hz durch veränderte Ausrichtungen der Quelllautsprechermembran untersucht. Dazu wurde zum einen der Genelec Studiomonitor in 90° -Schritten um die z-Achse gedreht sowie abschließend experimentell mit Membran in Richtung Übekabinendecke gehalten. Zum anderen wurde der Spötl-Lautsprecher in 45° -Schritten im oberen Halbkreis um die y-Achse gedreht und abschließend experimentell mit Membran in Richtung Übekabinenboden gehalten. Die letztgenannten Messungen konnten an der Quellposition 1' (**Q1'**) – also dem Aufstellungsort mit zur Quellposition 1 (**Q1**) um 10 cm verringerter z-Koordinate (vgl. Tab. 6.1) – durchgeführt werden. Es wurde bei allen Ausrichtungen darauf geachtet, dass sich der Membranmittelpunkt möglichst genau an den passenden Koordinaten befindet. Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die so erhaltenen Schalldruckpegelverläufe.

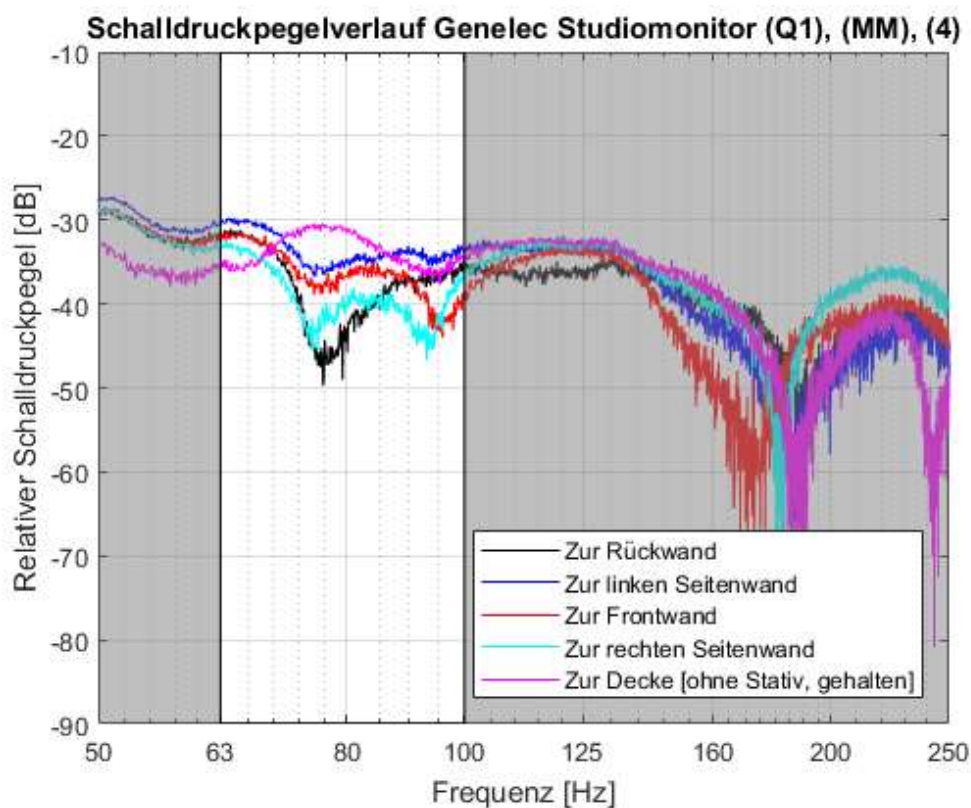


Abb. 6.34: Relative Schalldruckpegelverläufe bei unterschiedlicher Ausrichtung der Genelec Studiomonitormembran

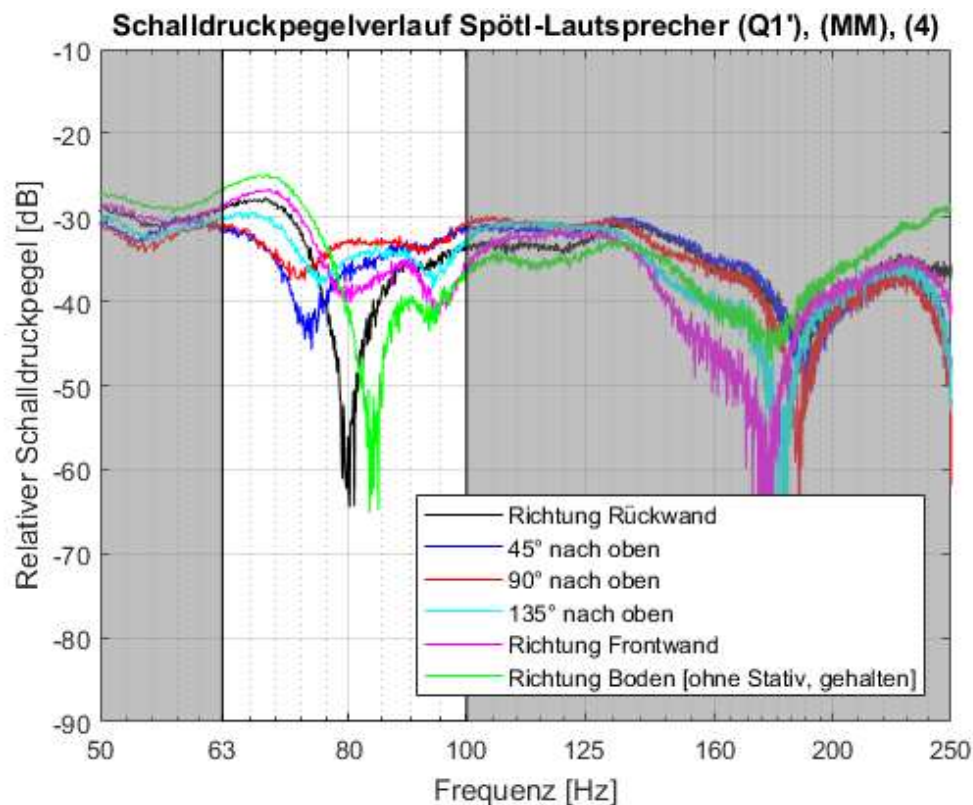


Abb. 6.35: Relative Schalldruckpegelverläufe bei unterschiedlicher Ausrichtung der Spötl-Lautsprechermembran

Sowohl in Abb. 6.34 als auch Abb. 6.35 ist auffällig, dass die Ausprägungen des Pegel einbruchs bei ~80 Hz scheinbar eine große Abhängigkeit von der Ausrichtung der Quelllautsprechermembran aufweisen, obwohl davon auszugehen ist, dass die verwendeten Lautsprecher in diesem Frequenzbereich eine nahezu kugelförmige Freifeldabstrahlcharakteristik aufweisen (vgl. Abb. 4.1 bzw. Abb. 6.2). Bei Ausrichtung der Membran im Viertelkreis zwischen Decke und Frontwand ist der Pegel einbruch äußerst schwach ausgeprägt – bei Ausrichtung zum Boden oder der Rückwand besonders stark. Vor allem in Abb. 6.35 treten diese Variationen äußerst deutlich zum Vorschein.

Abschließend wurde experimentell auch der subjektive Höreindruck in Nähe der Hauptspielerposition (**MM**) bei Änderungen der Membranausrichtung überprüft. Dazu wurde bei Wiedergabe eines kontinuierlichen 80 Hz-Sinustons die Membranausrichtung gedreht. Die in Abb. 6.35 dargestellten teils starken Variationen der Ausprägung des Pegel einbruchs konnten auch auditiv deutlich wahrgenommen werden.

6.5.4 Dämpfung der destruktiv interferierenden Erstreflexionen

Abschließend wurde versucht, mithilfe von aus der Strahlentheorie stammenden geometrischen Berechnungen ebener Reflexionen⁵⁶ den dem jeweiligen Pegeleinbruch entsprechenden Erstreflexionspunkt zu lokalisieren, um diesen anschließend mit Basotect-Absorbern punktuell auszustatten. Der Pegeleinbruch bei ~80 Hz (vgl. Abb. 6.26) konnte so über die rechte Seitenwand nachvollzogen werden – der Pegeleinbruch bei ~180 Hz (vgl. grauer Randbereich von Abb. 6.27) über die Übekabinendecke. In weiterer Folge wurden jeweils Messungen ohne sowie mit Basotect-Absorbern am jeweiligen Erstreflexionspunkt durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, dass bei den Messungen zwischen diesen beiden Zuständen weder der Quelllautsprecher noch das Messmikrofon bewegt werden musste.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die so erhaltenen Schalldruckpegelverläufe sowohl ohne als auch mit 30 cm dicken Basotect-Absorbern am entsprechenden Erstreflexionspunkt bei Anregung mit dem zur Rückwand ausgerichteten Spötl-Lautsprecher von dem für den Pegeleinbruch bei ~80 Hz relevanten um 10 cm in der z-Koordinate verringerten Aufstellungsort (**Q1'**) aus. Zudem wurde der Schalldruckpegelverlauf bei Membranausrichtung zur Übekabinendecke ohne Basotect-Absorber am Erstreflexionspunkt strichliert hinterlegt.

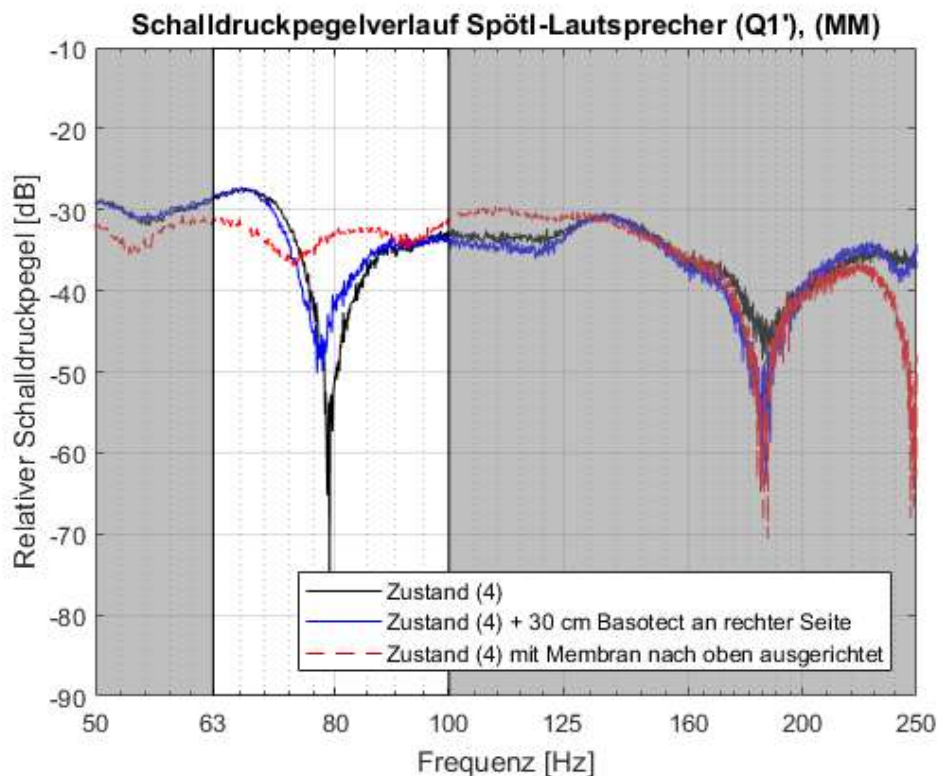


Abb. 6.36: Relative Schalldruckpegelverläufe ohne und mit 30 cm dickem Basotect-Absorber am Erstreflexionspunkt der rechten Übekabinenseite bei Anregung mit dem Spötl-Lautsprecher an Quellposition 1' (**Q1'**) in Richtung der Rückwand sowie der Decke

⁵⁶ Vgl. [RA S. 85]

In Abb. 6.36 wird deutlich, dass mit am Erstreflexionspunkt positionierten porösen Absorbern eine deutliche Reduktion des Pegel einbruchs bei ~ 80 Hz erzielt werden kann. Allerdings ist am strichlierten Schalldruckpegelverlauf – also bei nach oben ausgerichteter Quelllautsprechermembran ohne Absorber am Erstreflexionspunkt – eine wesentlich stärkere Verringerung der Ausprägung dieses Pegel einbruchs feststellbar (vgl. Abb. 6.35).

Die beiden nächsten Grafiken zeigen die Schalldruckpegelverläufe bei Anregung mit dem Spötl-Lautsprecher von der um 10 cm in der z-Koordinate verringerten Quellposition 2' ($Q2'$), um die Durchführbarkeit einer Reduktion des Pegel einbruchs bei ~ 180 Hz zu untersuchen. Dabei wurde diesmal die Membran zur Übekabinendecke ausgerichtet.

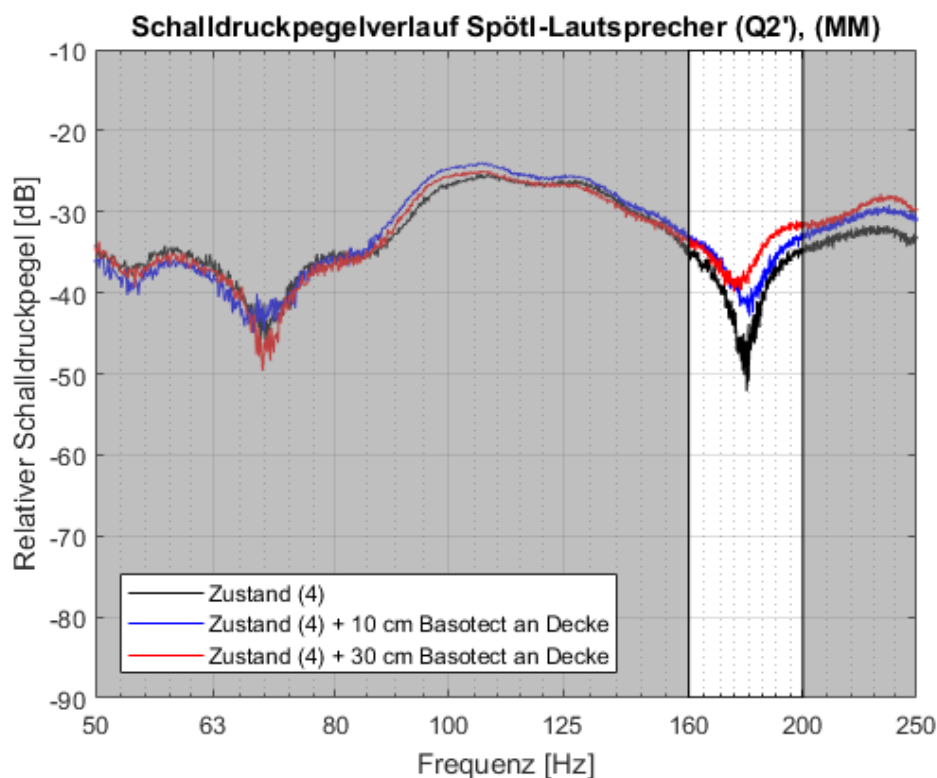


Abb. 6.37: Relative Schalldruckpegelverläufe ohne und mit 10 cm sowie 30 cm dickem Basotect-Absorber am Erstreflexionspunkt der Übekabinendecke bei Anregung mit dem nach oben ausgerichteten Spötl-Lautsprecher an Quellposition 2' ($Q2'$)

Beim Betrachten von Abb. 6.37 fällt auf, dass die Anbringung der Basotect-Absorber am entsprechenden Erstreflexionspunkt ebenfalls eine Reduktion der Ausprägung des Pegel einbruchs bei ~ 180 Hz bewirkte. Es ist davon auszugehen, dass sich die Größe der Reduktion bis zur vollständigen Absorption der Reflexion mit Erhöhung der eingesetzten Absorptionsmaterialdicke verstärkt. Zudem kann angenommen werden, dass eine Vergrößerung der mit Absorber ausgestatteten Fläche in Nähe des Erstreflexionspunkts zusätzlich zu einer (begrenzten) Erhöhung der Absorption führen würde, da im tiefen Frequenzbereich von auftretenden Beugungseffekten um den Absorber auszugehen ist.

6.5.5 Erkenntnisse und möglicher Erklärungsansatz

Durch die in Abschnitt 6.5.4 dargestellten Messungen wurde gezeigt, dass die steilflankigen Pegel einbrüche bei ~ 80 Hz (vgl. Abb. 6.26) bzw. ~ 180 Hz (vgl. Abb. 6.27) durch destruktive Erstreflexionen verursacht werden. Wie in den Abschnitten 6.5.1 bis 6.5.3 veranschaulicht wurde, unterliegen die Ausprägungen der durch diese Erstreflexionen bedingten Pegel einbrüche allerdings großen Schwankungen. Je nach Lautsprecher typ, exakter Messposition und Ausrichtung der Membran wurden deutlich stärkere Variationen in der Ausprägung des Pegel einbruchs bei ~ 80 Hz festgestellt, als zuvor vermutet wurde. Insbesondere das Drehen der Lautsprecher membran in Richtung Übekabinendecke sorgte für drastische Reduktionen des genannten Pegel einbruchs (vgl. Abb. 6.34 und Abb. 6.35).

Als möglicher Erklärungsansatz für diese Pegelschwankungen soll folgendes zweiteiliges Rechenbeispiel dienen. Dabei stellt p_{dir} den Direktschalldruck eines abgestrahlten Sinustons, r den Reflexionsfaktor der Oberfläche, über welche es zu einer destruktiv interferierenden Erstreflexion – also einer um 180° phasenverschobenen Addition ($\triangleq$ einer Subtraktion) – kommt, p_{des} den Schalldruck dieses destruktiv interferierenden Signals sowie p_{sum} den Summenschalldruck aus Direkt signal und destruktiv interferierender Reflexion am Mikrofonort dar. L_{dir} , L_{des} und L_{sum} symbolisieren den jeweils zugehörigen Schalldruckpegel sowie L_{diff} den Differenzschalldruckpegel zwischen Direkt- und Summenschalldruckpegel.

Rechenbeispiel (Teil 1)

$$\begin{aligned}
 p_{dir} &= 1 \text{ [Pa]} & r &= 0,99 & p_{des} &= r \cdot p_{dir} = 0,99 \text{ [Pa]} \\
 p_{sum} &= p_{dir} - p_{des} = 0,01 \text{ [Pa]} \\
 L_{dir} &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{dir}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \cong 93,98 \text{ [dB]} & L_{des} &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{des}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \cong 93,89 \text{ [dB]} \\
 L_{sum} &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{sum}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \cong 53,98 \text{ [dB]} \\
 L_{diff} &= L_{dir} - L_{sum} = \underline{\underline{40 \text{ [dB]}}}
 \end{aligned}$$

Im ersten Teil des Rechenbeispiels wurde von einer stark reflektierenden Oberfläche ($r = 0,99$) ausgegangen, da sich der Punkt, an welchem die bei ~ 80 Hz am Mikrofonort (**MM**) destruktiv interferierende Welle reflektiert wird, im Bereich des Übekabinenfensters bzw. dem nicht gedämpften Bereich der Übekabinentür – also quasi schallharten Oberflächen – befindet. Der so auftretende Differenzschalldruckpegel L_{diff} – also Pegel einbruch – beträgt 40 dB. Die in den vorherigen Abschnitten gemessenen stärksten Pegel einbrüche liegen in etwa in dieser Größenordnung (vgl. Abb. 6.35 und Abb. 6.36).

Im ersten Teil des Rechenbeispiels wurde sowohl in Richtung Erstreflexionspunkt als auch in Richtung Mikrofon derselbe Schalldruckpegel abgestrahlt. Durch Drehen der Quelllautsprecher (vgl. Abschnitt 6.5.3) kommt es zu einer Änderung der Beziehung zwischen dem Abstrahlwinkel in Richtung Erstreflexionspunkt und jenem in Richtung Mikrofonort. Wie in Abb. 6.2 zu erkennen ist, besitzt der Spötl-Lautsprecher bei 250 Hz in seiner Abstrahlcharakteristik Pegelabweichungen von bis zu -3 dB in Bezug zur Hauptabstrahlachse. Im zweiten Teil des Rechenbeispiels soll nun davon ausgegangen werden, dass diese bei 80 Hz zumindest

noch im Bereich von grob -1 dB liegen und die Mikrofonposition durch das Drehen des Quelllautsprechers nun nicht mehr im Abstrahlungsschatten, sondern nahe der Hauptabstrahlachse liegt – also einen um 1 dB lauterem Direktschalldruckpegel als zuvor empfängt – während sich der Erstreflexionspunkt (weiterhin) in einem Richtungsbereich des geringsten abgestrahlten Pegels befindet.

Rechenbeispiel (Teil 2)

$$\begin{aligned}
 L_{dir,neu} &= 93.98 + 1 = 94,98 \text{ [dB]} & p_{dir,neu} &= 10^{\frac{L_{dir,neu}}{20}} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cong 1,12 \text{ [Pa]} \\
 p_{sum,neu} &= p_{dir,neu} - p_{des} = 0,13 \text{ [Pa]} \\
 L_{sum,neu} &= 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{sum,neu}}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \cong 76.26 \text{ [dB]} \\
 L_{diff,neu} &= L_{dir,neu} - L_{sum,neu} \cong \underline{18,72 \text{ [dB]}}
 \end{aligned}$$

Im zweiten Teil des Rechenbeispiels wird deutlich, dass eine Änderung des Direktschalldruckpegels von lediglich 1 dB bei gleichbleibendem Reflexionsschalldruckpegel eine Anhebung des aufgrund einer destruktiven Interferenz hervorgerufenen Pegel einbruchs von über 20 dB zur Folge hat. Da in der Übekabine davon auszugehen ist, dass es auch im Raumaustattungszustand (4) im Bereich von ~80 Hz noch zu zusätzlichen Reflexionen über andere Begrenzungsflächen sowie über Zweit- und Mehrfachreflexionspunkte kommt, ist die große gemessene Empfindlichkeit auf Pegelabweichungen bei tiefen Pegel einbrüchen durchaus plausibel. Dass sich die physikalische Abstrahlcharakteristik der Lautsprecher durch Einflüsse der verhältnismäßig nahen und nicht ideal schallharten Begrenzungsflächen zusätzlich noch ändert, konnte in weiteren experimentell durchgeführten Messungen nicht eindeutig gezeigt, allerdings auch nicht eindeutig widerlegt werden.

Um nun die Größe der tatsächlich auftretenden Pegel einbrüche an der Hauptspielerposition (MM) quantifizieren zu können, wäre es notwendig, die exakte Abstrahlcharakteristik der jeweiligen Marimbaklangstab/-Resonator-Kombination nachzubilden sowie deren akustisches Zentrum zu kennen. Zudem ist davon auszugehen, dass der Marimba-Spieler während des Spielens seinen Kopf durchgehend bewegen und somit ebenso die Ausprägung der wahrgenommenen Pegel einbrüche ändern wird.

Die in Abschnitt 6.5.4 gewonnene Erkenntnis der Dämpfungsmöglichkeiten dieser Erstreflexionen wird künftig jedoch sicherlich genutzt. Dabei ist es aus vorhin genannten Gründen sowie dem aufgrund der großen Wellenlängen auftretenden Beugungsverhalten notwendig, diese Dämpfungsmaßnahmen entsprechend großflächig anzubringen.

6.6 Subjektiver Eindruck

Als subjektiver Höreindruck zur zweiten Messreihe lässt sich sagen, dass auditiv zwischen den beiden stark gedämpften Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** kein relevanter Unterschied festgestellt werden konnte. Durch die Optik der mit Absorber aufgefüllten Übekabine stellte sich allerdings im Raumausstattungszustand **(4)** bereits ein beengendes Gefühl in selbiger ein.

Da die pitchbendartigen Klangereignisse nun bei allen Raumausstattungszuständen quasi nicht mehr bemerkbar waren, kann davon ausgegangen werden, dass diese tatsächlich auf die hohe Lufttemperatur und den damit verbundenen Abweichungen zwischen den Klangstab- und Resonatorfrequenzen zurückzuführen sind.

Der Klang der kleinen Oktave des Marimbaphons fiel allerdings weiterhin aufgrund von verzerrten Klangereignissen unangenehm auf. Es kann vermutet werden, dass diese aus einer Kombination von Eigenschaften des Instruments und raumakustischen Pegelbrüchen, welche lediglich die Grundfrequenzen der betroffenen Töne dämpfen, zustande kommen. Zudem führen sehr kurze Nachhallzeiten – wie sie insbesondere bei den gedämpften Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** gemessen wurden – im Allgemeinen dazu, dass Feinheiten der Schallquelle – also dem Marimbaphon – wesentlich deutlicher wahrgenommen werden können, da der Direktschallanteil beim Hörereignis wesentlich überwiegt.

Die erzielten Dämpfungen des Gesamtschalldruckpegels bei den Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** reichen nach Aussagen des Marimba-Spielers aus, um in der Übekabine ohne Gehörschutz üben zu können.

6.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde deutlich, dass der, wie bei der Auswertung der ersten Messreihe in Kapitel 5.2 klar wurde, insbesondere bei tiefen Frequenzen notwendigen Reduktion der Frequenzauflösung zur Bestimmung von Nachhallzeiten aus Impulsantworten durch Einzelsinusmessungen entgegengewirkt werden kann. Dabei konnte gezeigt werden, dass zur Bestimmung der Abklingzeiten aus diesen Messungen jedoch oft eine manuelle Analyse der jeweiligen Abklingkurven notwendig ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten – die bloße Nennung einer mithilfe einer Ausgleichsgeraden bestimmten Zeit bis zum theoretischen Erreichen eines Pegelabfalls von -60 dB ist hier besonders bei Messungen, bei denen wenige einzelne Moden angeregt oder Mikrofone bzw. Quellen in Pegelminima positioniert wurden, nicht mehr ausreichend.

Weiters wurde ersichtlich, dass mit zunehmender Dämpfung der Übekabine vor allem die modal bedingten Unregelmäßigkeiten in den Schalldruckpegelverläufen gemindert und letztere somit geglättet werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass in der Übekabine auch bei den stark gedämpften Raumausstattungszuständen **(1)c** und **(4)** durch die nicht vollständige Auskleidung mit dicken Absorptionsmaterialien – welche aus Platzgründen nicht durchführbar ist – im tiefen Frequenzbereich weiterhin vereinzelt teils enorme isolierte Pegeleinbrüche aufgrund von Erstreflexionen auftreten. Bei den Einzelsinusmessungen konnte gezeigt werden, dass diese nicht nur zu einer drastischen Reduktion des Pegels im (quasi) stationären Zustand führen, sondern auch für Unregelmäßigkeiten der An- und Abklingkurven sowie – insbesondere bei Instrumenten, welche auch geradzahlige Harmonische abstrahlen, wie etwa dem Marimbaphon (vgl. Abschnitt 2.2) – eine deutliche Veränderung der Klangfarbe sorgen. Die messtechnische Erfassung der genauen Ausprägung dieser Pegeleinbrüche im späteren Spielbetrieb erwies sich jedoch als schwierig, da eine große Abhängigkeit sowohl von der Position des akustischen Zentrums als auch von der Abstrahlcharakteristik der Schallquelle nachgewiesen werden konnte.

Im nachfolgenden Kapitel soll anhand der in dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse eine Konklusion aufgestellt sowie ein Ausblick auf mögliche weiterführende Themen gewährt werden.

7 Konklusion und Ausblick

Abschließend lässt sich festhalten, dass im Zuge dieser Arbeit gewisse Grenzen der gängigen Nachhallzeitmessungen aufgezeigt werden konnten. Bei entsprechend kurzen Abklingvorgängen kommt es aufgrund des Zusammenhangs von Zeit- und Frequenzbereich zu einer Limitierung der Frequenzauflösung oder der kürzesten noch messbaren Nachhallzeit. Dabei zeigte sich, dass die spektrale Zusammensetzung der auszuwertenden Messsignale wesentlich an der exakten Größe dieser Limitierung beteiligt ist. Zudem konnte gezeigt werden, dass sich die aufgrund der Filterung entstehenden Messungenauigkeiten nicht immer in den zugehörigen Abklingkurven anhand von Welligkeiten oder ähnlichen Unregelmäßigkeiten optisch erkennen lassen – die genaue Kenntnis der Filterabklingzeiten ist bei Messungen sehr kurzer bzw. tieffrequenter Nachhallzeiten zwingend erforderlich.

Durch Einzelsinusmessungen konnte eine mögliche Abhilfe für oben genannte Limitierung gefunden werden. Dabei stellte sich heraus, dass dafür sowohl der Quelllautsprecher – dieser sollte verzerrungsfrei möglichst große Schalldruckpegel linear über den gesamten Hörbereich abstrahlen können – als auch die Messumgebung – diese sollte möglichst frei von Hintergrundgeräuschen sein – hohe Anforderungen erfüllen müssen. Zudem erwies sich der Messaufwand als wesentlich erhöht.

Bei den Auswertungen von selbigen wurde deutlich, dass besonders bei Überlagerungen weniger einzelner Moden sowie an Messpositionen, welche sich in lokalen Pegelminima befinden, die gängige Methode der (algorithmischen) Annäherung des Abklingvorgangs durch eine Abklinggerade und die anschließende Bestimmung einer Abklingzeit bis zum Erreichen eines -60 dB Pegelabfalls nur wenig Aussagekraft besitzt – die Darstellung der einzelnen Abklingkurven der interessierenden Frequenzen wird stattdessen für genaue Analysen, wie sie zum Beispiel zum Entwerfen und Messen von schmalbandig wirksamen Resonanzabsorbern erforderlich sind, empfohlen.

Weiters konnte mithilfe der Einzelsinusmessung eine Darstellung der zeitlichen Verläufe der Messsignale erfolgen. Dabei konnte der Zusammenhang zwischen An- und Abklingzeiten verdeutlicht werden. Zudem konnte veranschaulicht werden, dass durch stark ausgeprägte Pegel einbrüche mögliche Verzerrungen der Schallquelle hervorgehoben und Störgeräusche deutlicher wahrgenommen werden und somit neben der Pegelreduktion auch eine spektrale Veränderung verursacht wird.

Durch das genaue Betrachten von Schalldruckpegelverläufen wurde gezeigt, dass mithilfe von porösen Materialien in der Übekabine eine gute Dämpfung von modal bedingten Unregelmäßigkeiten sowie Kammfiltern im höheren Frequenzbereich erreicht werden konnte. Einzelne stark ausgeprägte Pegel einbrüche ließen sich im tiefen Frequenzbereich jedoch nicht wesentlich reduzieren. Dabei stellte sich heraus, dass die exakte Ausprägung dieser Pegel einbrüche sowohl von der Quell- und Mikrofonposition als auch der Abstrahlcharakteristik bzw. Ausrichtung der Schallquelle abhängig ist. Eine quantifizierbare Messung dieser Einbrüche wäre also nur möglich, wenn die Anregung des Marimbaphons detailgetreu nachgebildet werden könnte. In zum Beispiel bereits eingerichteten Studioabhörräumen wäre eine solche Messung mit exakt den Lautsprechern, welche im späteren Betrieb als Abhörlautsprecher verwendet werden sollen und sich bereits an ihrem Aufstellungsort befinden, an den Abhörpositionen jedoch dringend zu empfehlen.

Ausblick

Um mehr Details über die Akustik des Marimbaphons zu erlangen sowie aussagekräftigere Schalldruckpegelverläufe messen zu können, wäre eine räumliche Vermessung der Abstrahlung der Marimbaklänge interessant.

Ebenso lehrreich wäre eine nähere Untersuchung des Zustandekommens des Pegel einbruchs zwischen den ersten axialen Moden bei raumdiagonalen Eckmessungen (vgl. Abb. 6.7 bzw. Abb. 6.18). Bei einer experimentellen Simulation mit der freien Software REW zeigte sich, dass die Frequenz und Ausprägung dieses Pegel einbruchs abhängig von der statischen Luftdruckdichtheit der Übekabine ist.

Damit nähere Aussagen über mögliche spektrale Veränderungen während des Abklingvorgangs getroffen werden können, wäre es notwendig, dass Einzelsinussmessungen in einem Hallraum, also mit wesentlich längeren Abklingzeiten durchgeführt werden. So würden ausreichend viele Abtastpunkte zur Verfügung stehen, um eine entsprechend hoch aufgelöste FFT-Analyse zu ermöglichen. In der Übekabine konnte weder geklärt werden, wodurch es zu den festgestellten Frequenzmodulationen in den Abklingvorgängen kam noch ob bei Anregung mit einer gegenüber einer einzelnen isolierten hochgütigen Mode leicht verstimmt Frequenz diese Mode während des Abklingvorgangs eine „Korrektur“ auf die exakte Modenfrequenz erzwingt. Zudem wäre es von Vorteil, wenn für diese Messungen eine Schallquelle zur Verfügung stehen würde, welche vorhin genannte Anforderungen an Verzerrungsfreiheit, Linearität und Schalldruckpegel erfüllt.

Weiters wäre noch eindeutig zu klären, ob die für die Bestimmung von Nachhallzeiten aus Impulsantworten notwendige Schrödderrückwärtsintegration⁵⁷ tatsächlich lediglich eine Glättung des Signals vornimmt – also durch eine beliebige Moving-Average-Filterung ersetzt werden könnte.

⁵⁷ Vgl. [SCHROEDER]

Anhang A1 – An- und Abklingkurven (Eckmessungen)

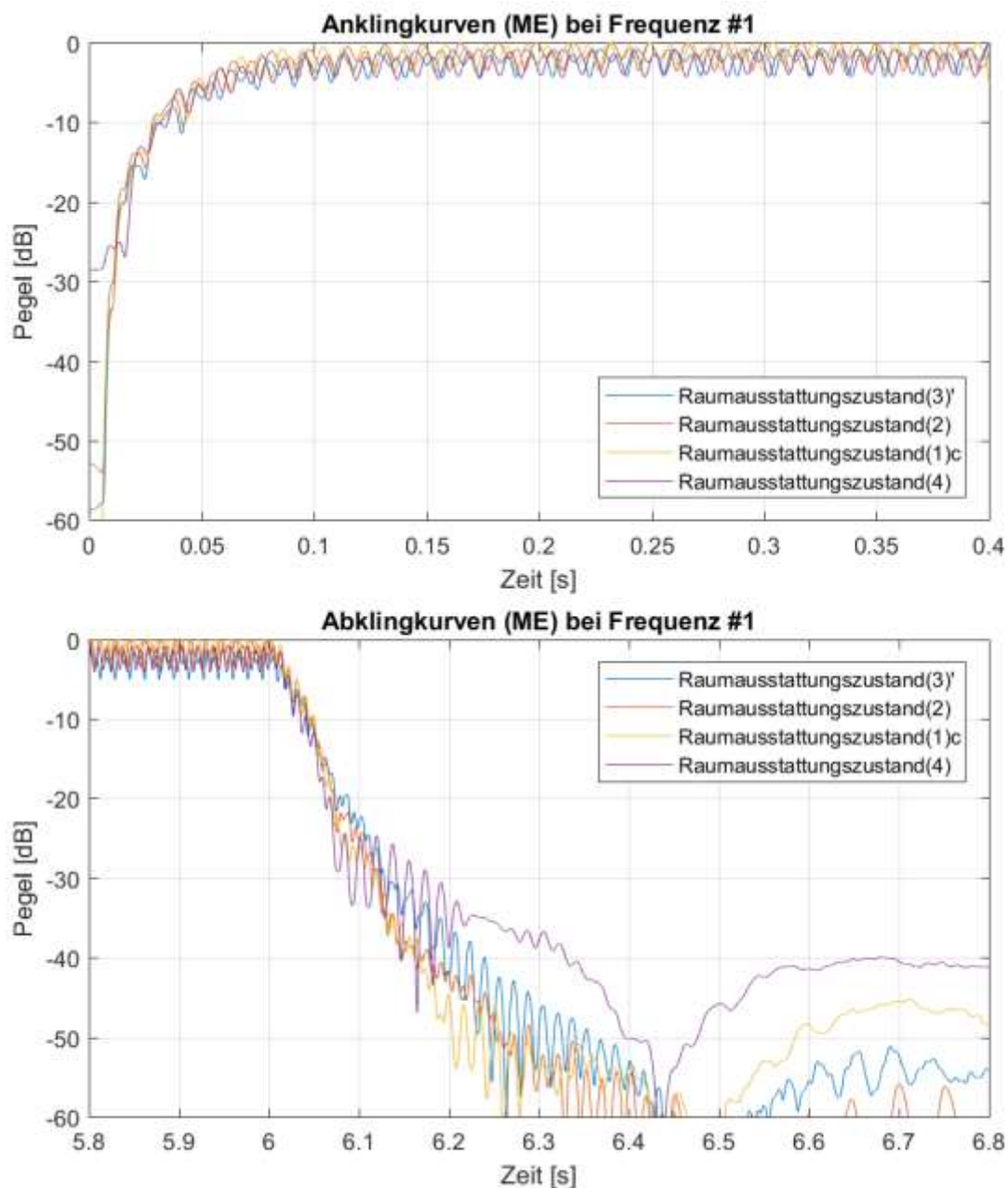


Abb. A1.1: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #1 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

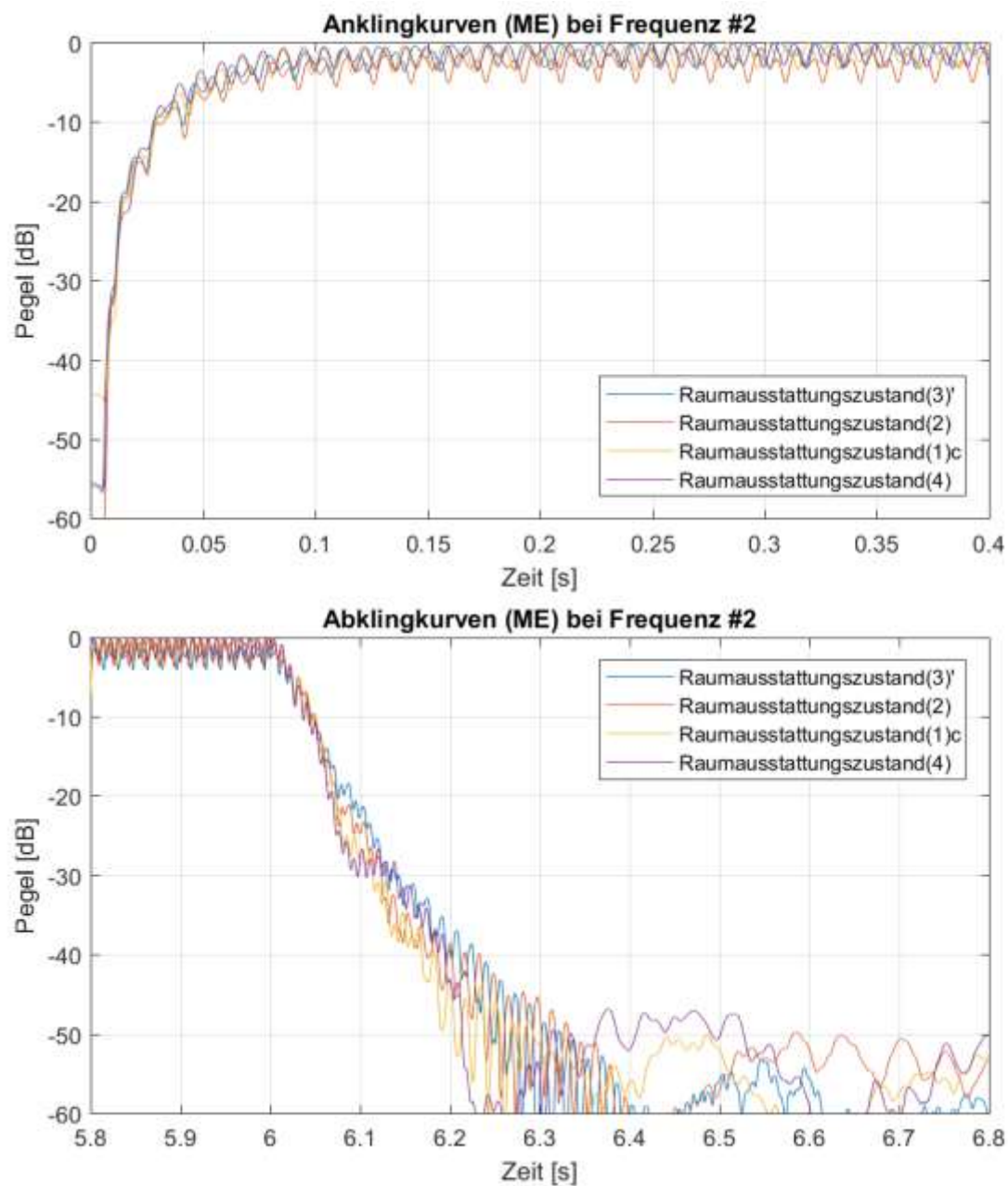


Abb. A1.2: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #2 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

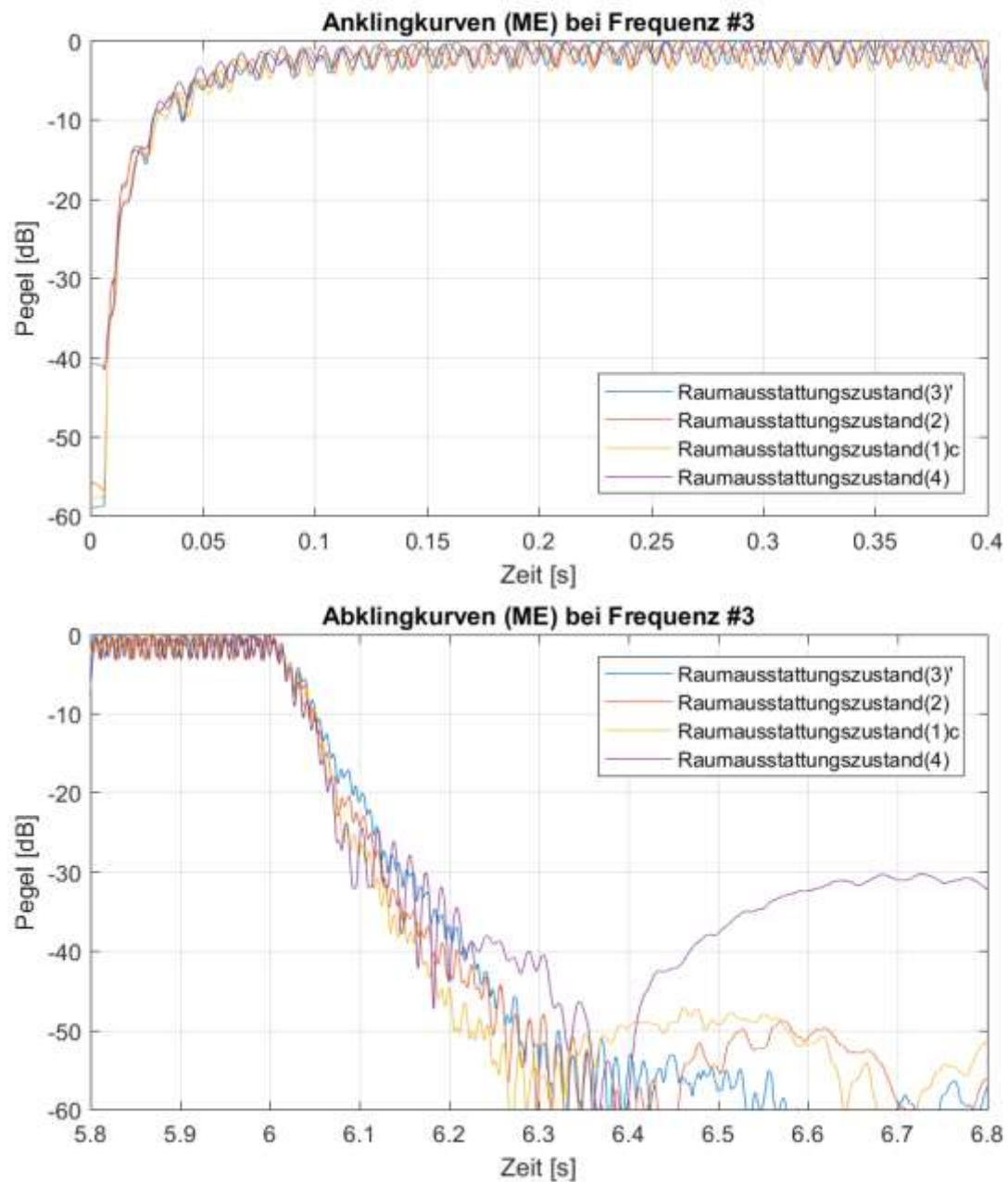


Abb. A1.3: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #3 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

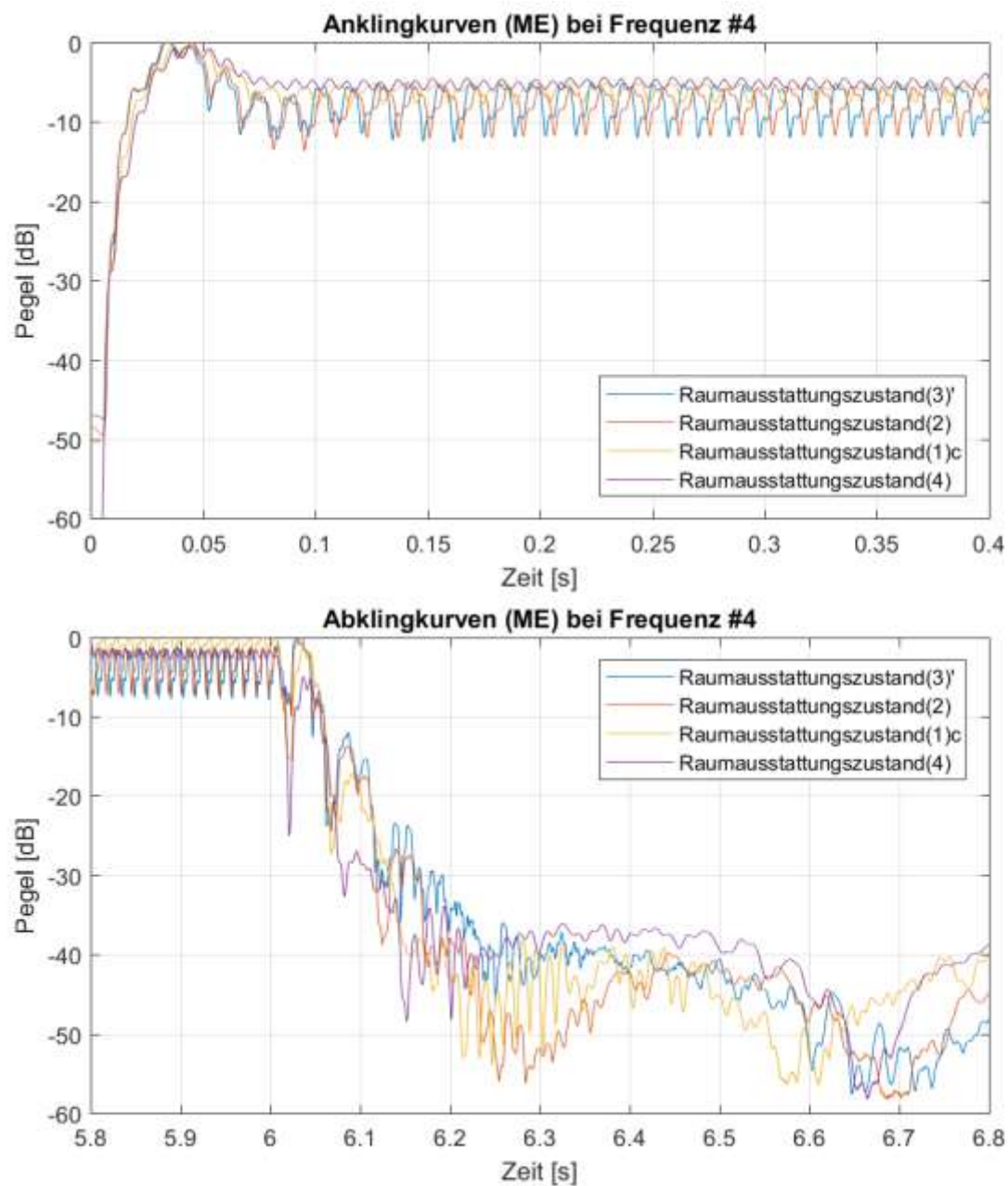


Abb. A1.4: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #4 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

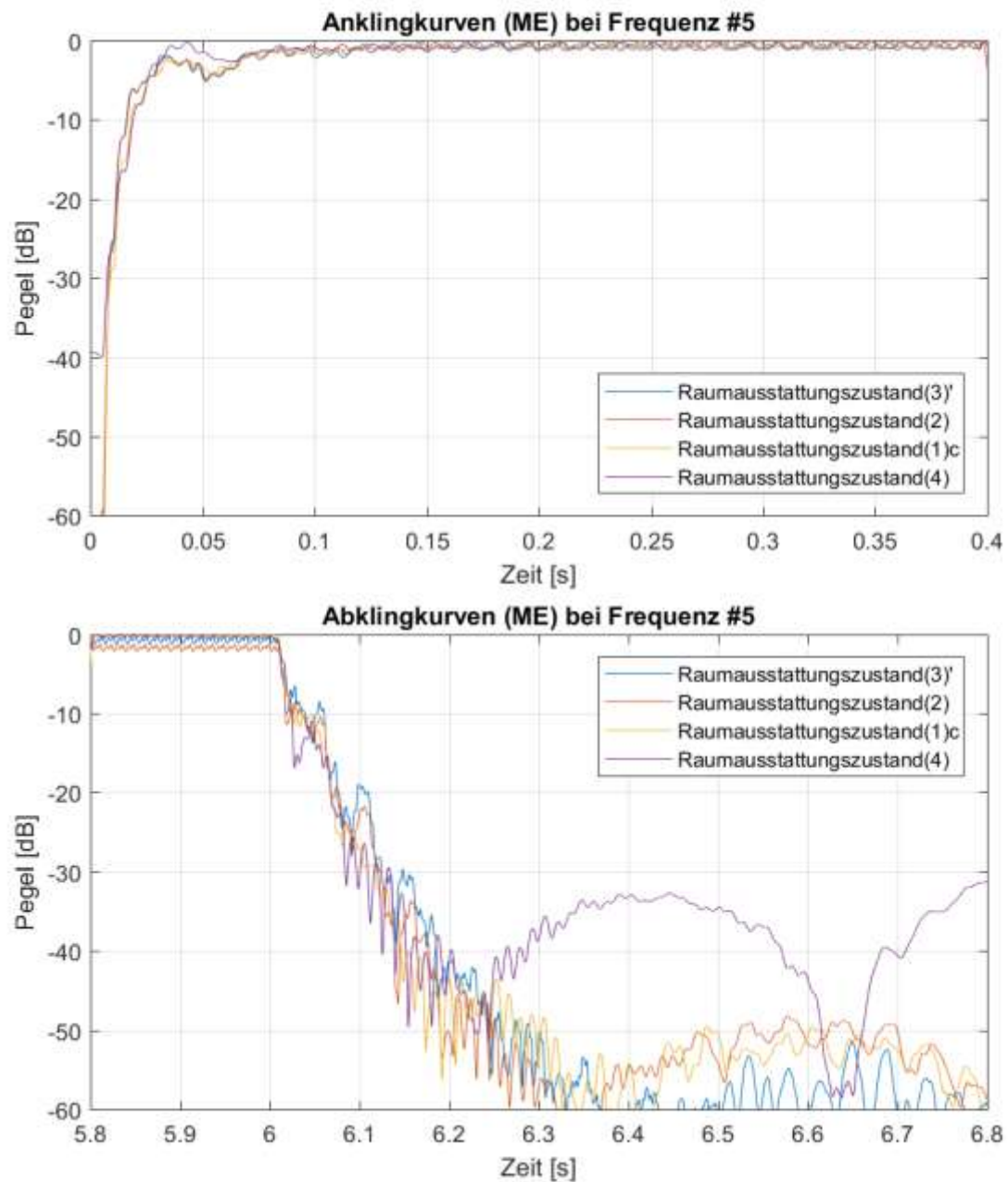


Abb. A1.5: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #5 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

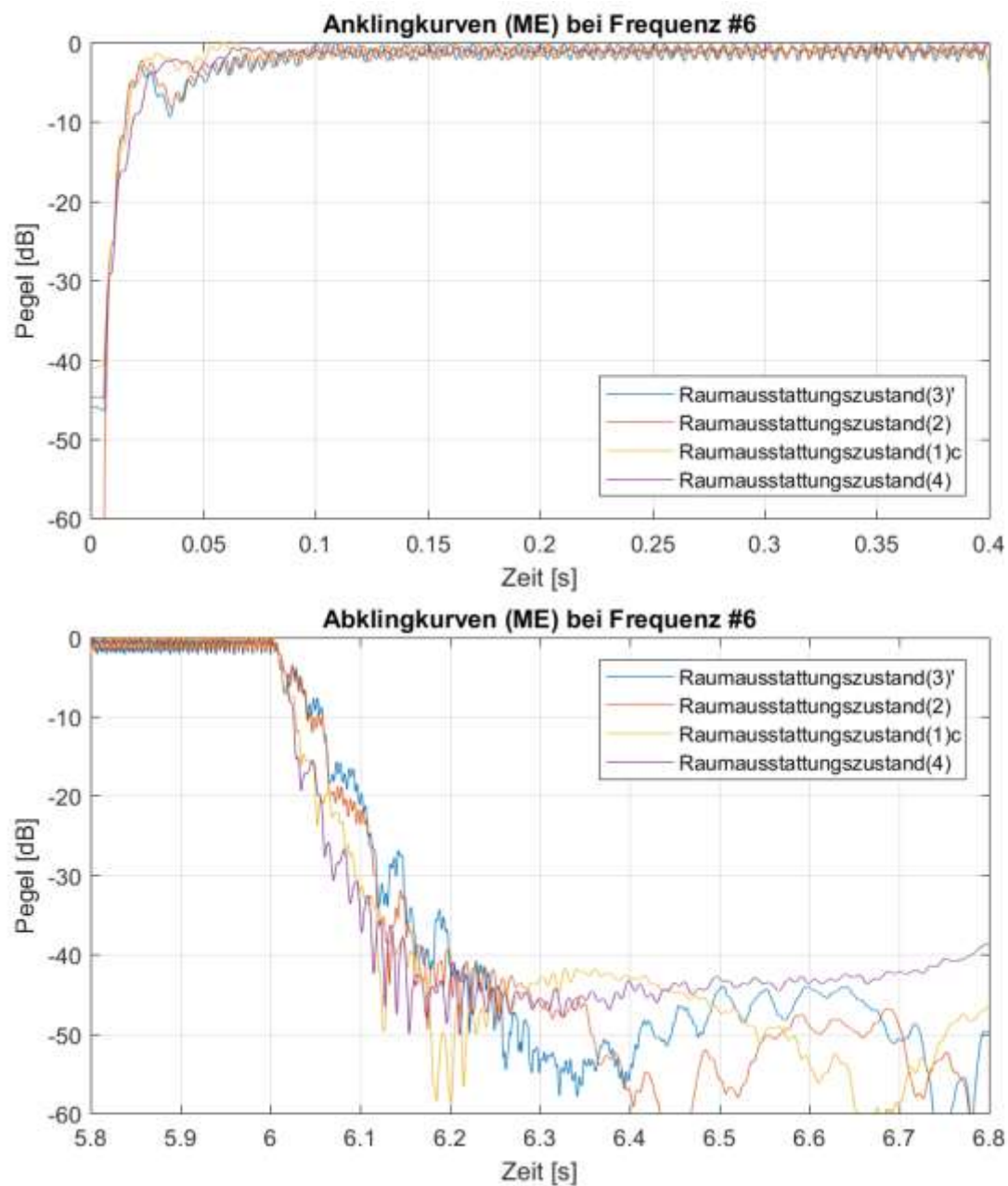


Abb. A1.6: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #6 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

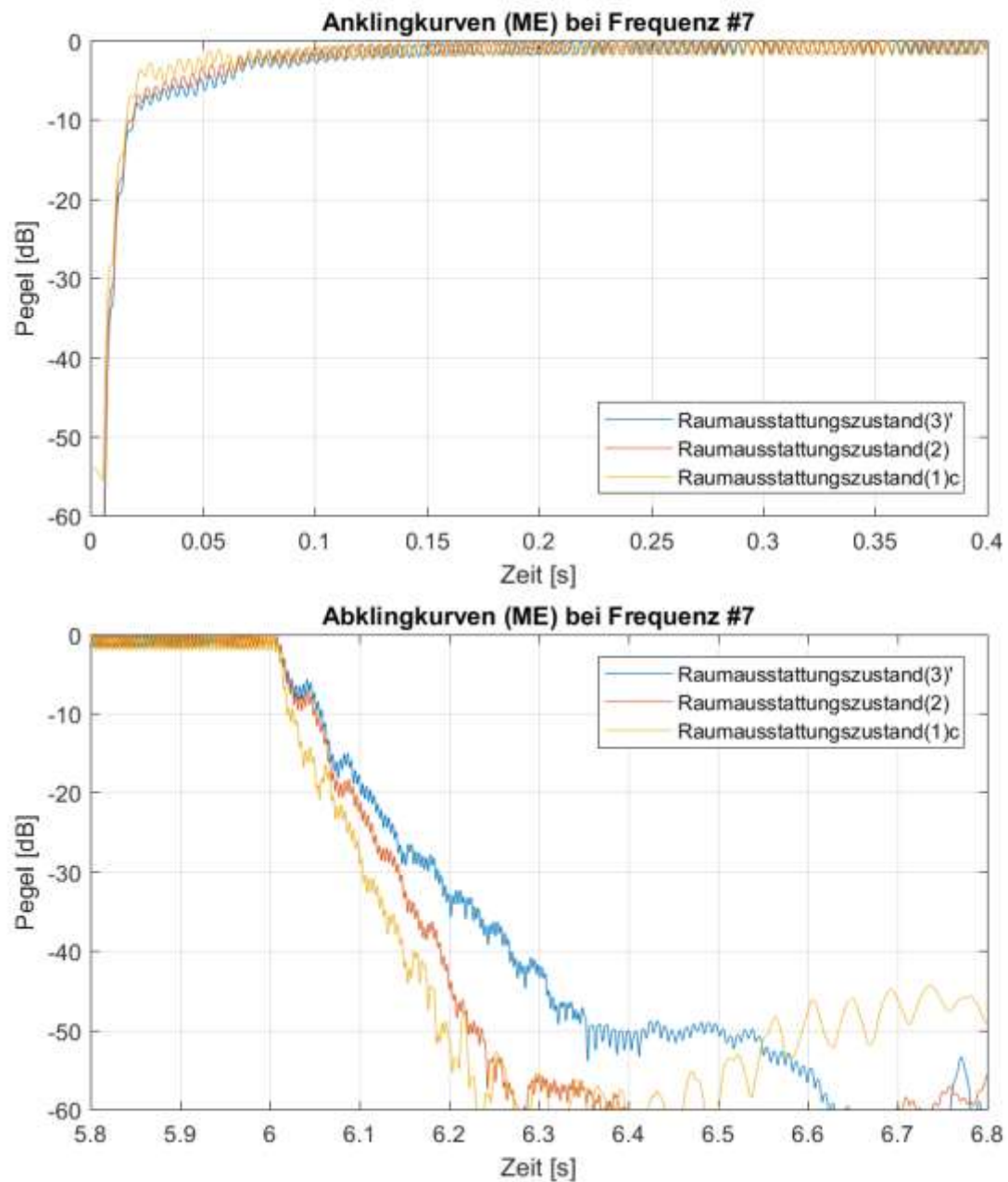


Abb. A1.7: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #7 für die drei Raumausstattungs Zustände (3)', (2) und (1)c

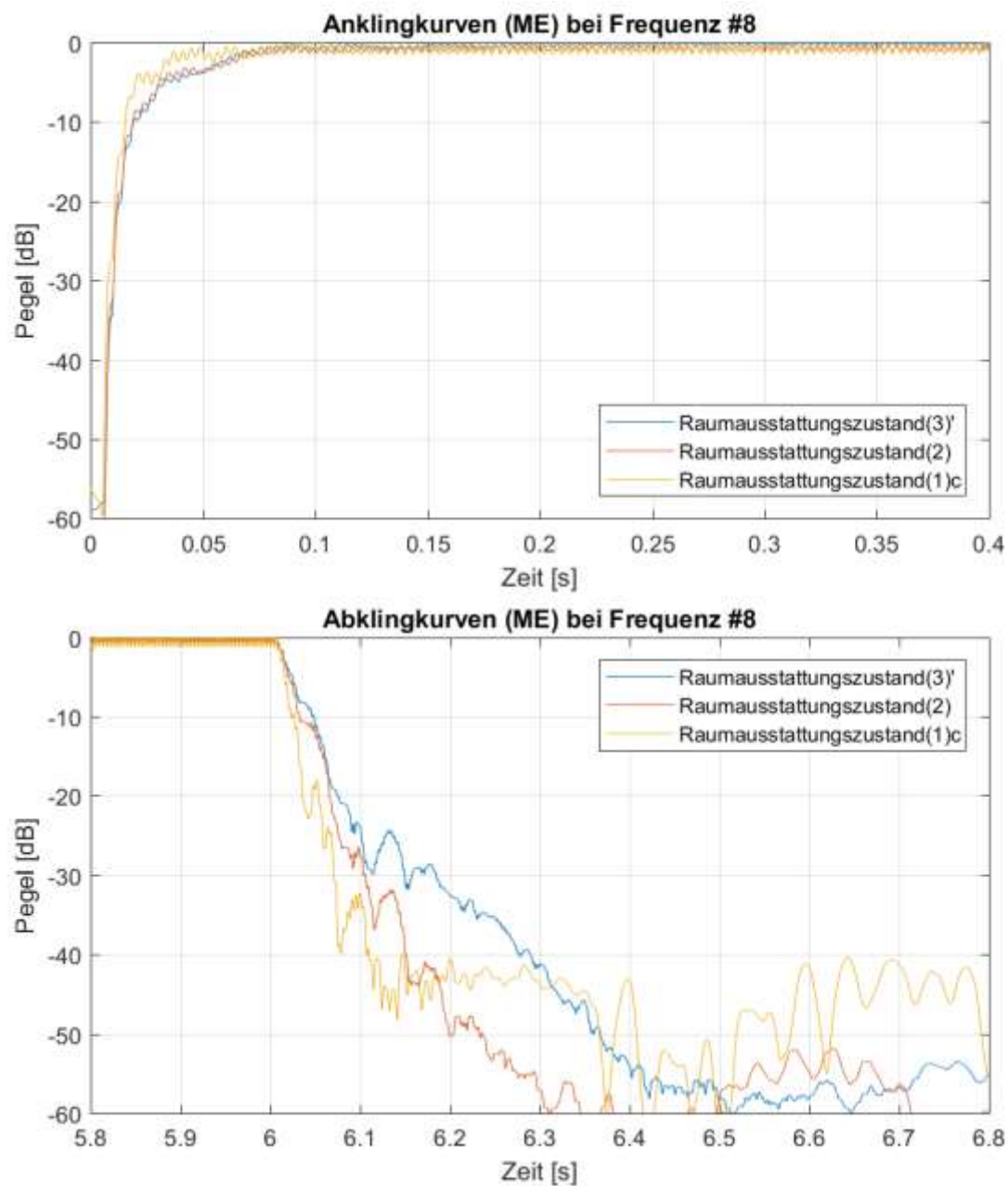


Abb. A1.8: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #8 für die drei Raumausstattungs Zustände (3)', (2) und (1)c

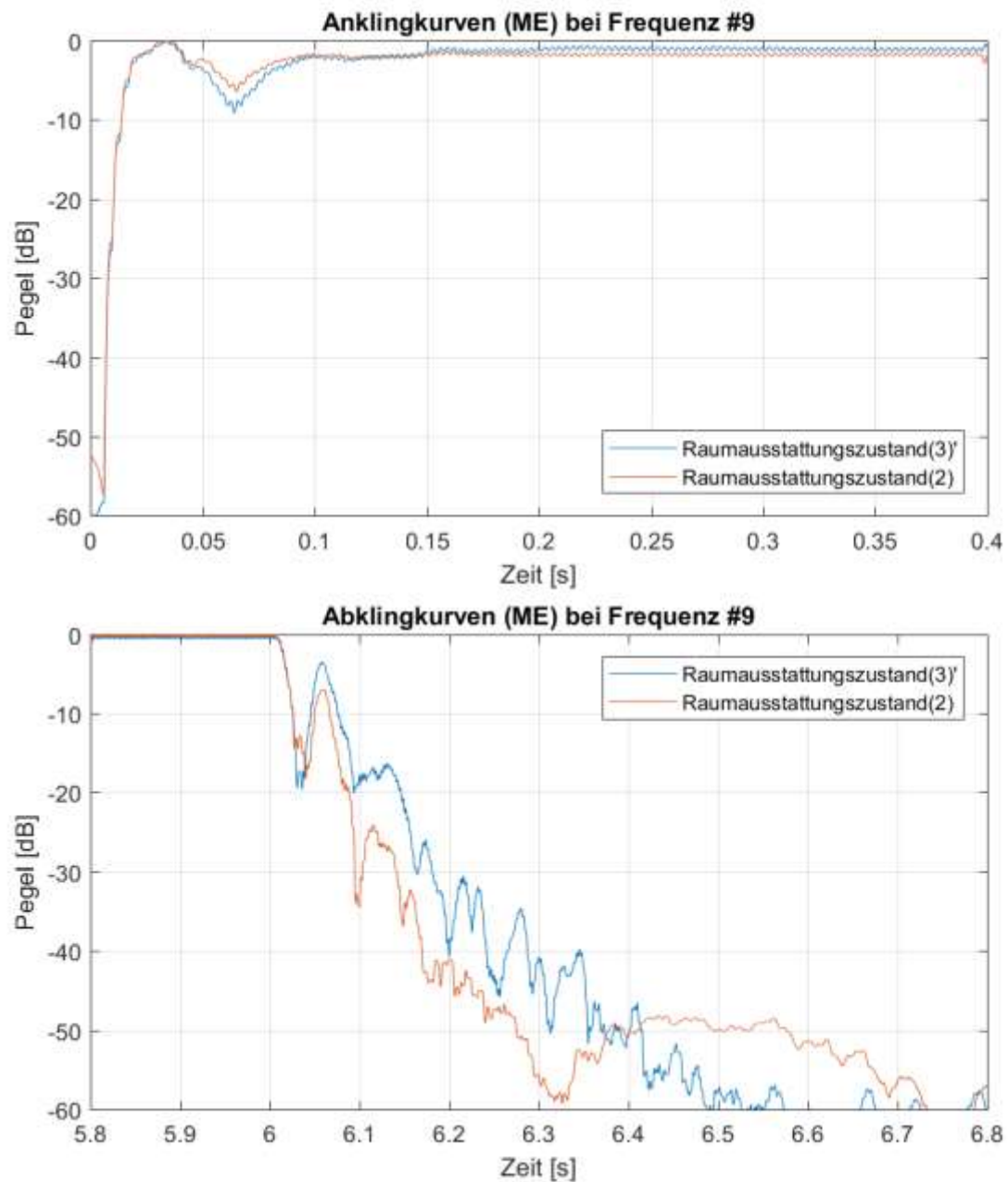


Abb. A1.9: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #9 für die zwei Raumausstattungs Zustände (3)' und (2)

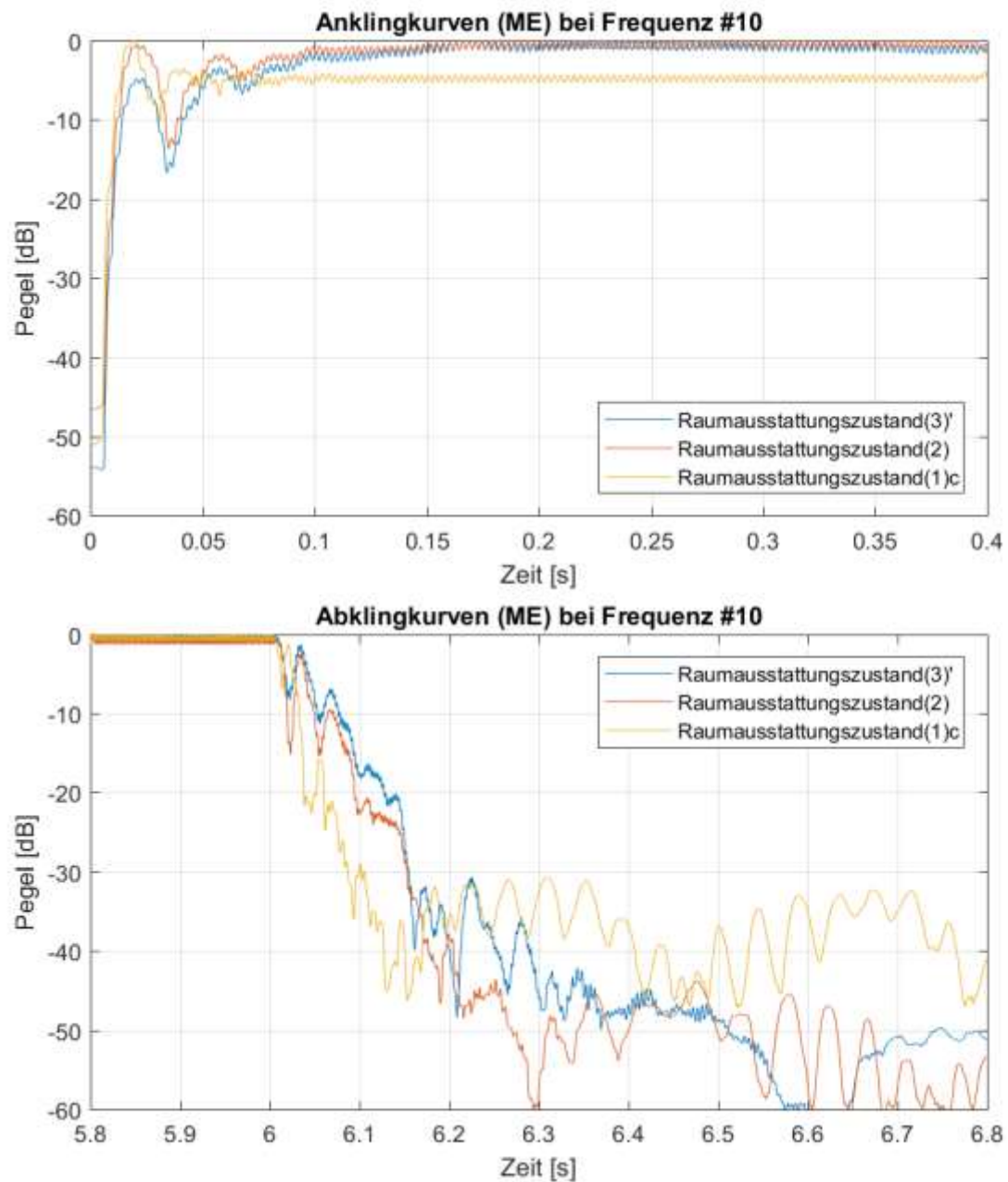


Abb. A1.10: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #10 für die drei Raumausstattungs Zustände (3)', (2) und (1)c

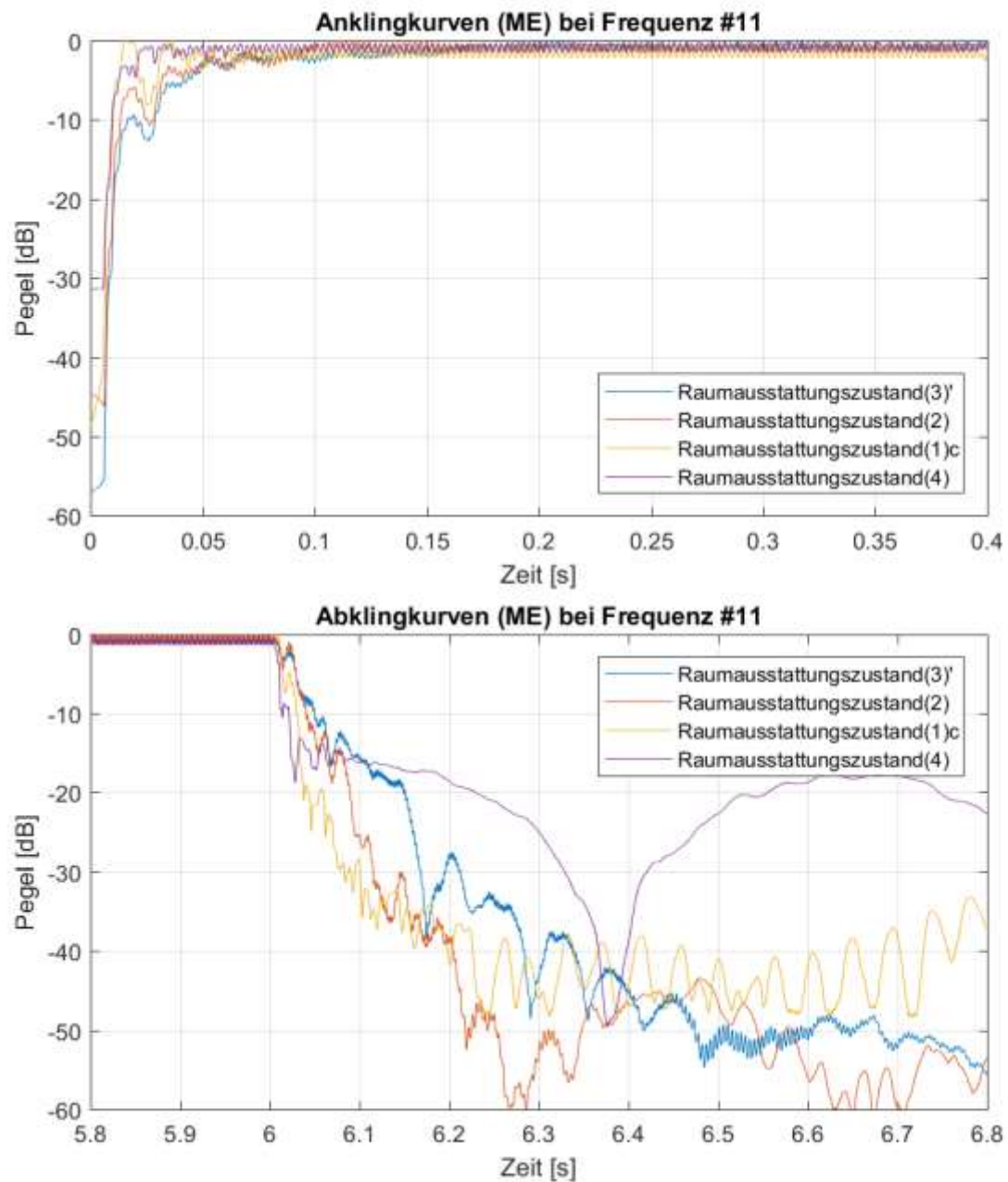


Abb. A1.11: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #11 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

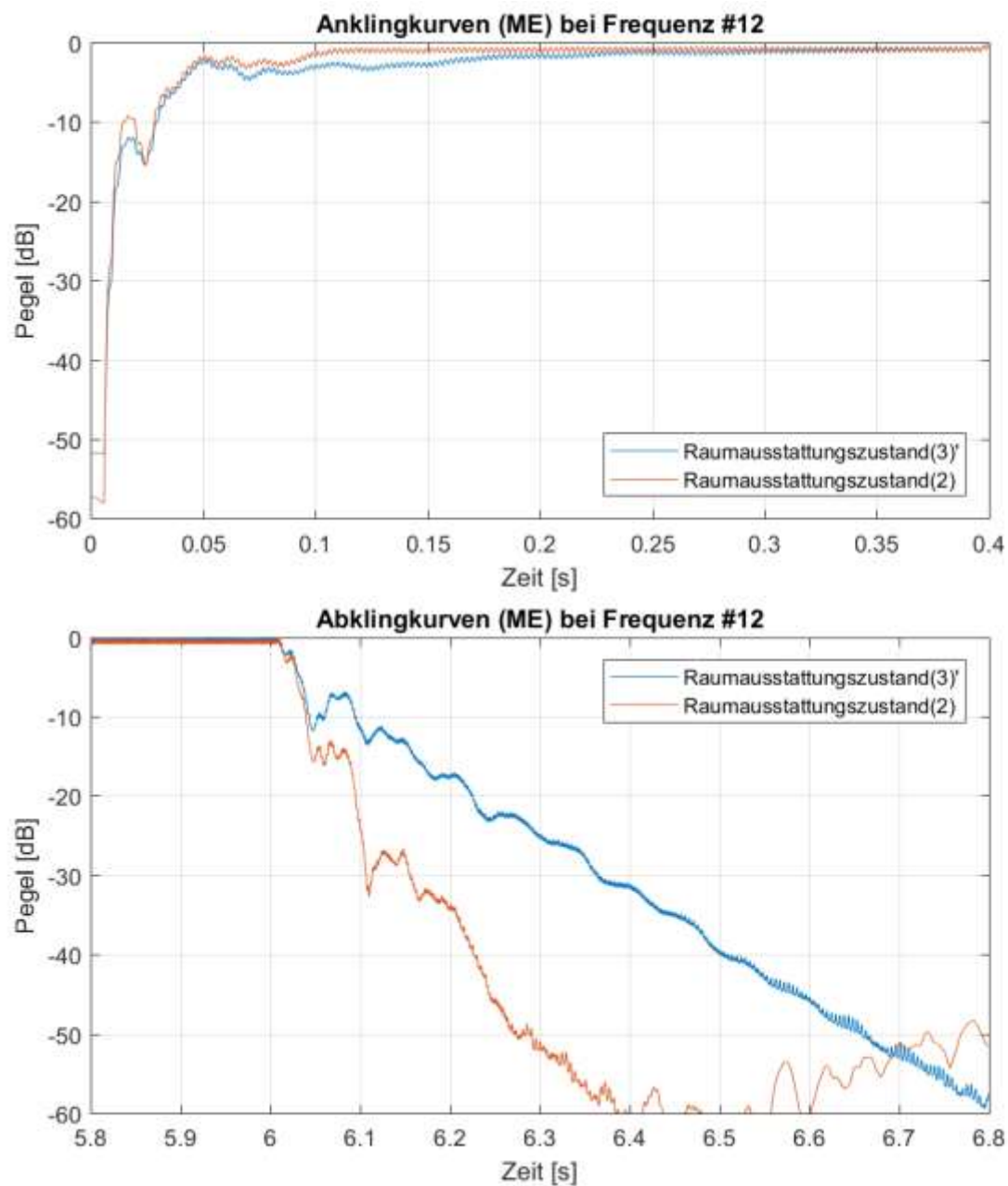


Abb. A1.12: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #12 für die zwei Raumausstattungs Zustände (3)' und (2)

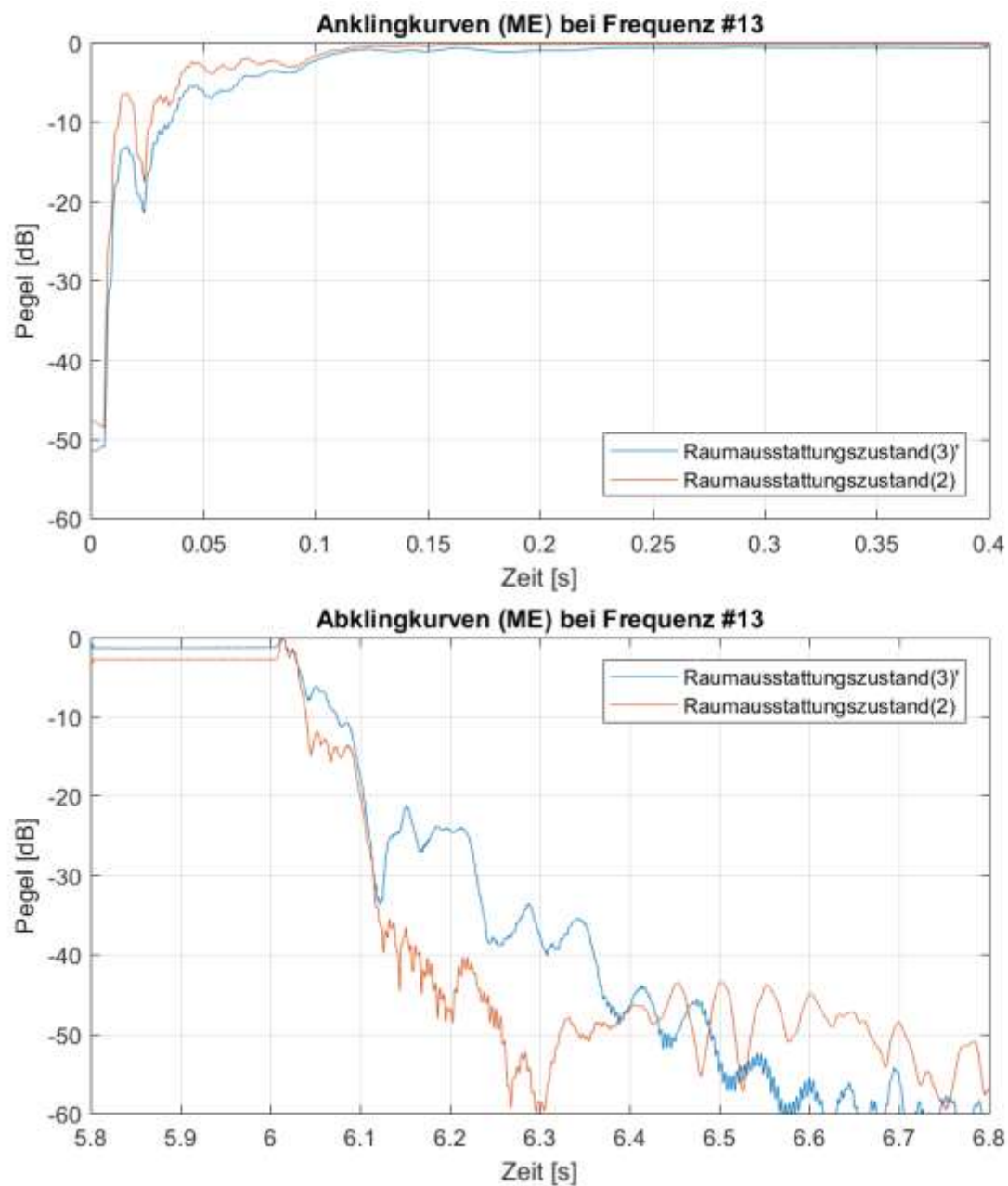


Abb. A1.13: An- und Abklingkurven der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #13 für die zwei Raumausstattungs Zustände (3)' und (2)

Anhang A2 – Messsignalwellenformen (Eckmessungen)

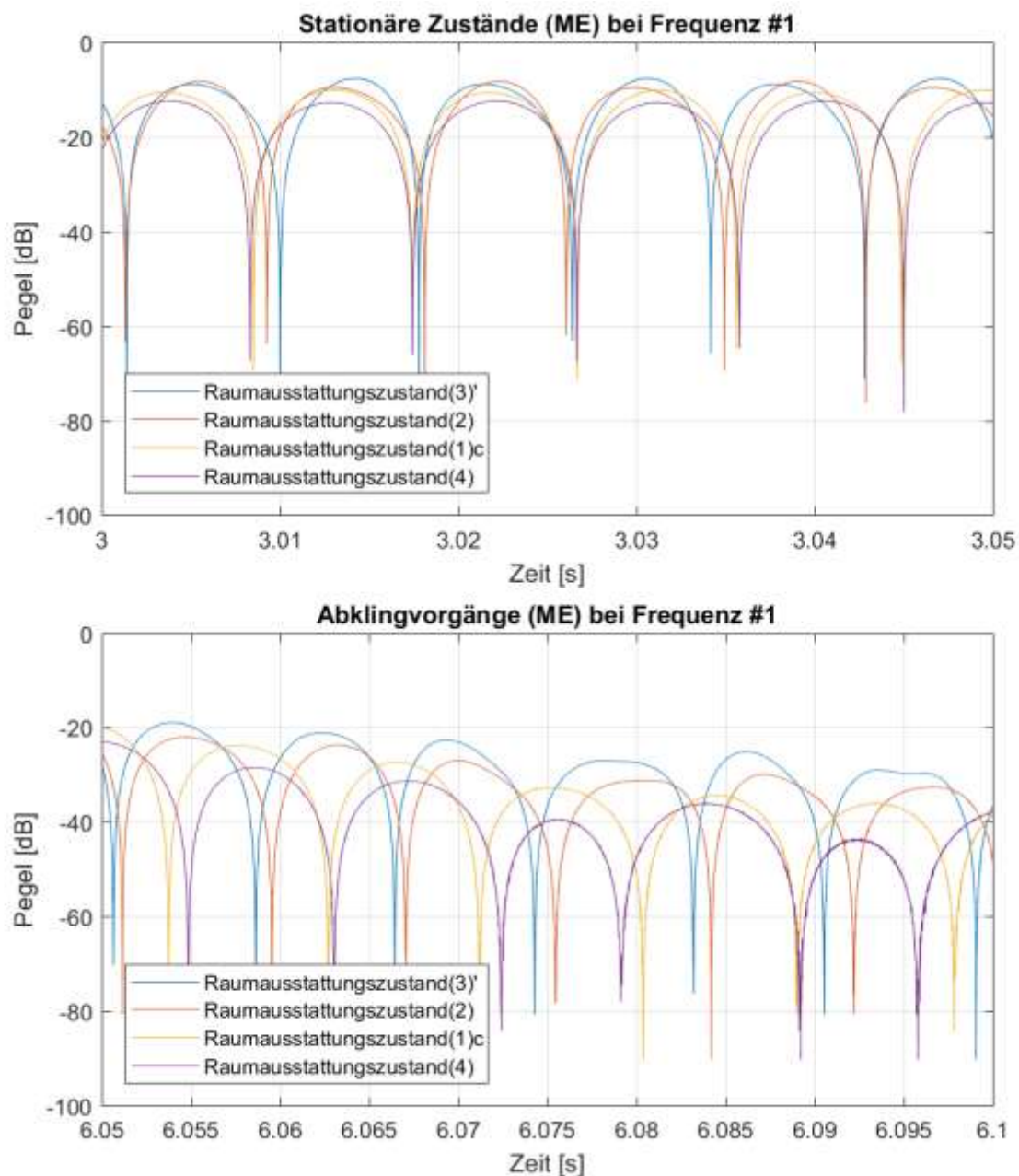


Abb. A2.1: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #1 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

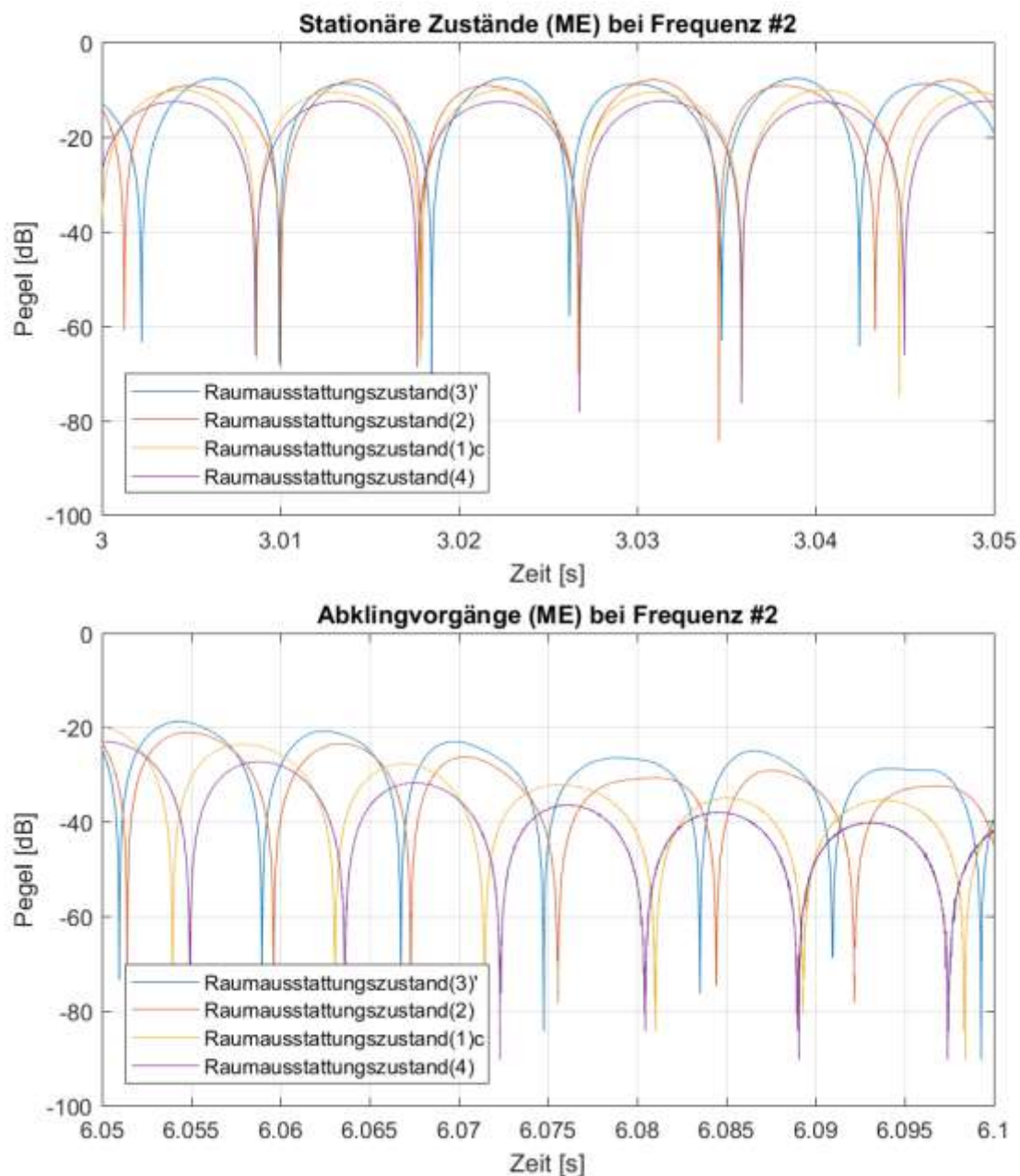


Abb. A2.2: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #2 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

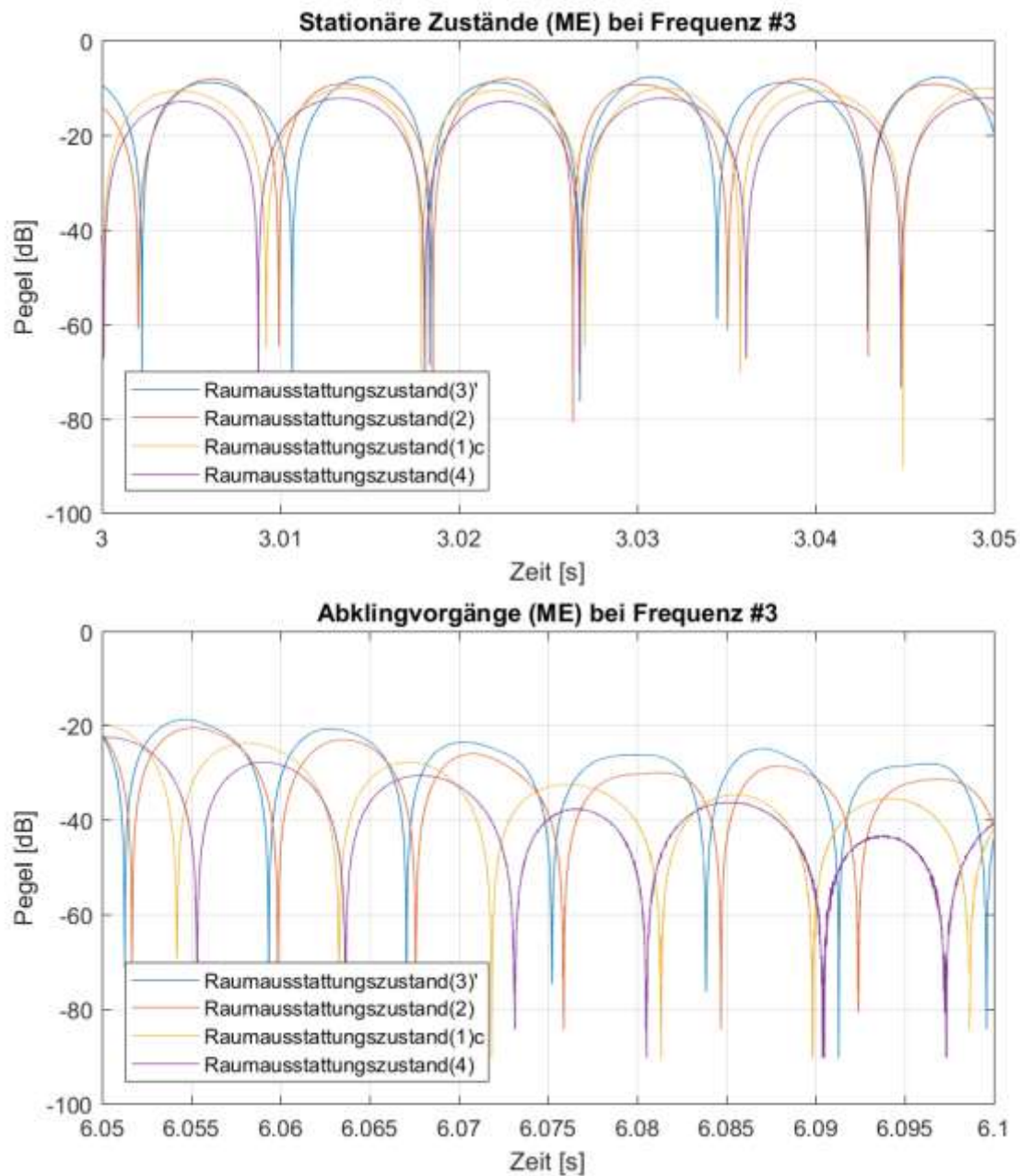


Abb. A2.3: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #3 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

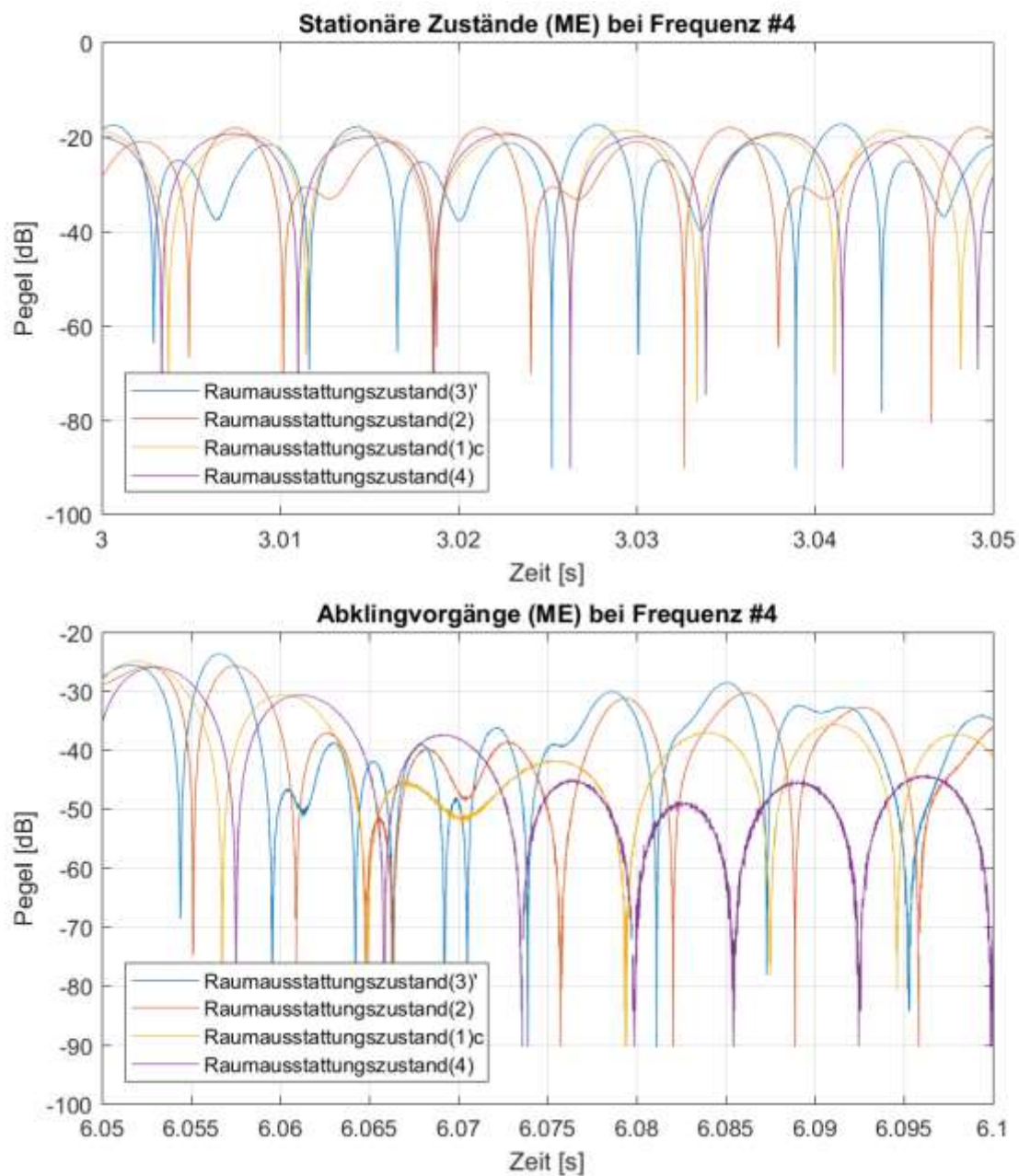


Abb. A2.4: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #4 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

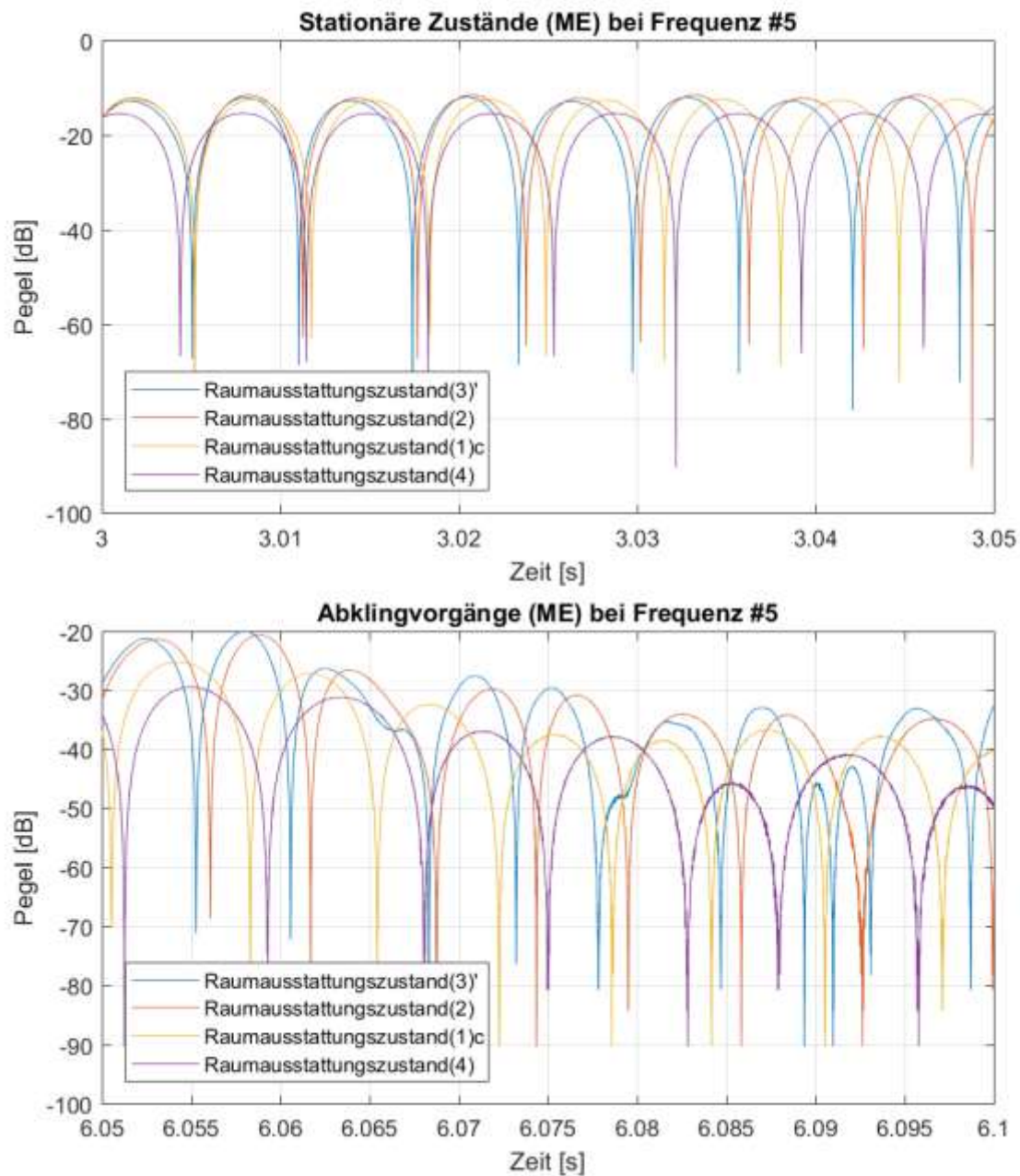


Abb. A2.5: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #5 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

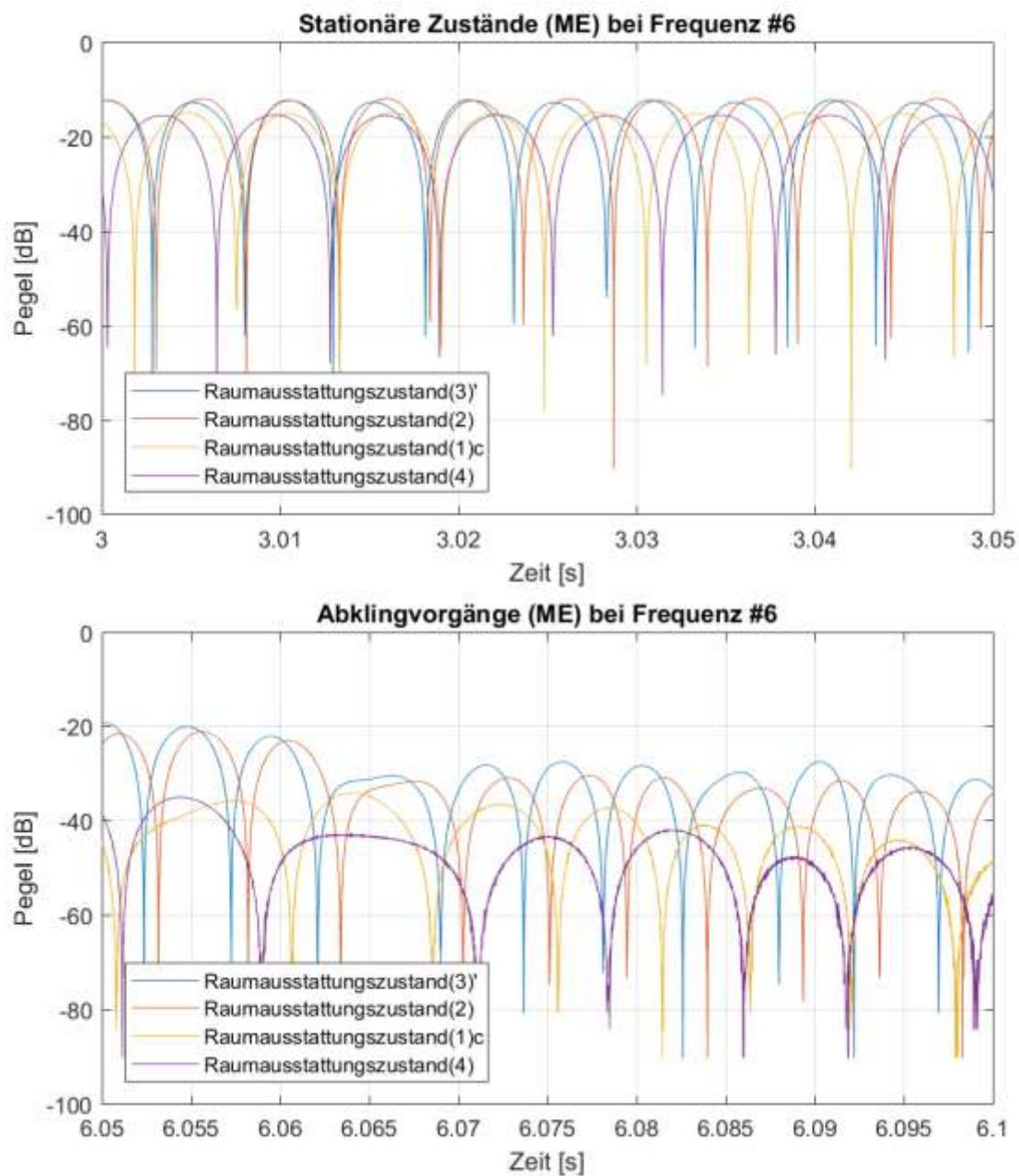


Abb. A2.6: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #6 für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4)

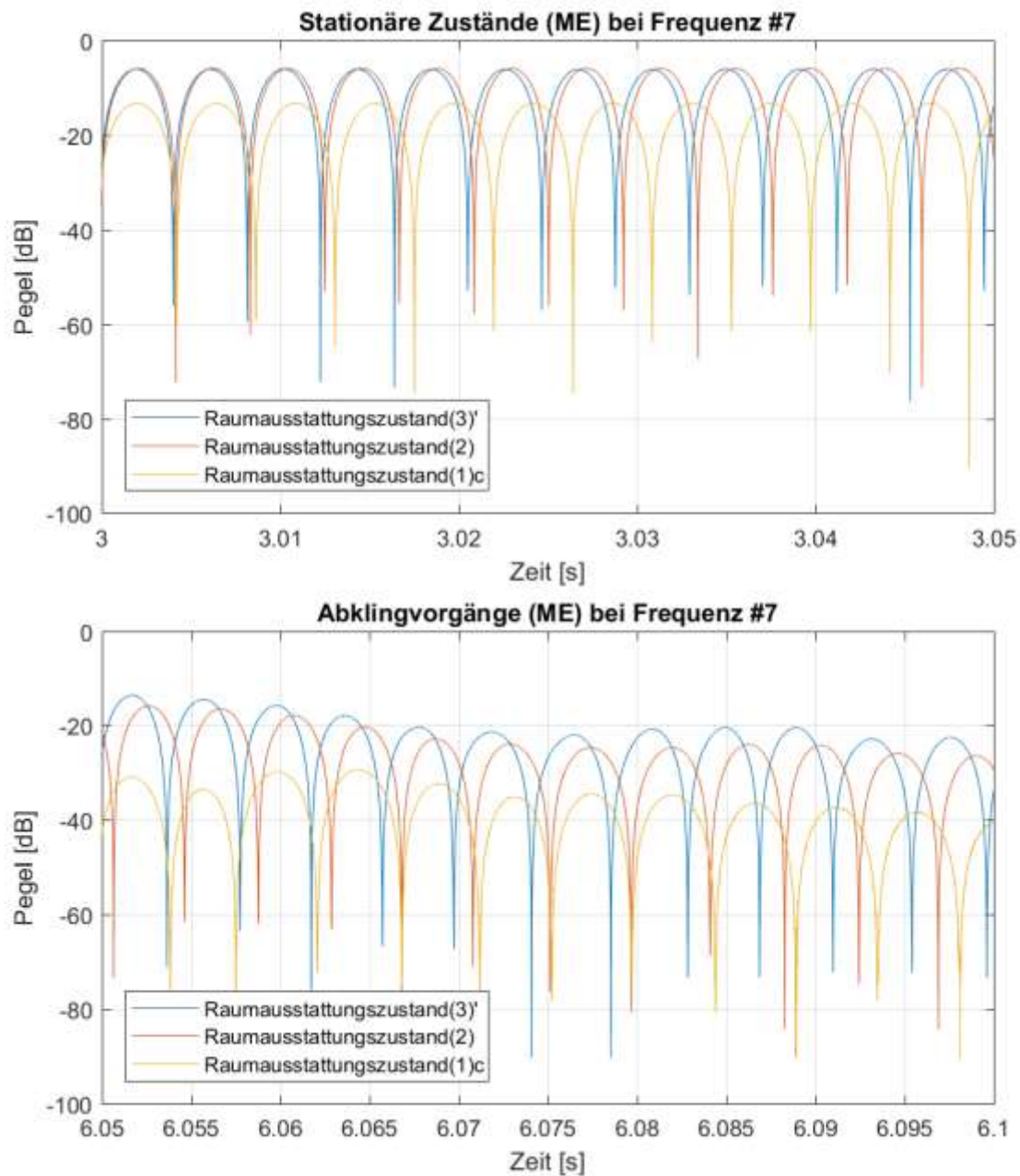


Abb. A2.7: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #7 für die drei Raumausstattungs Zustände (3)', (2) und (1)c

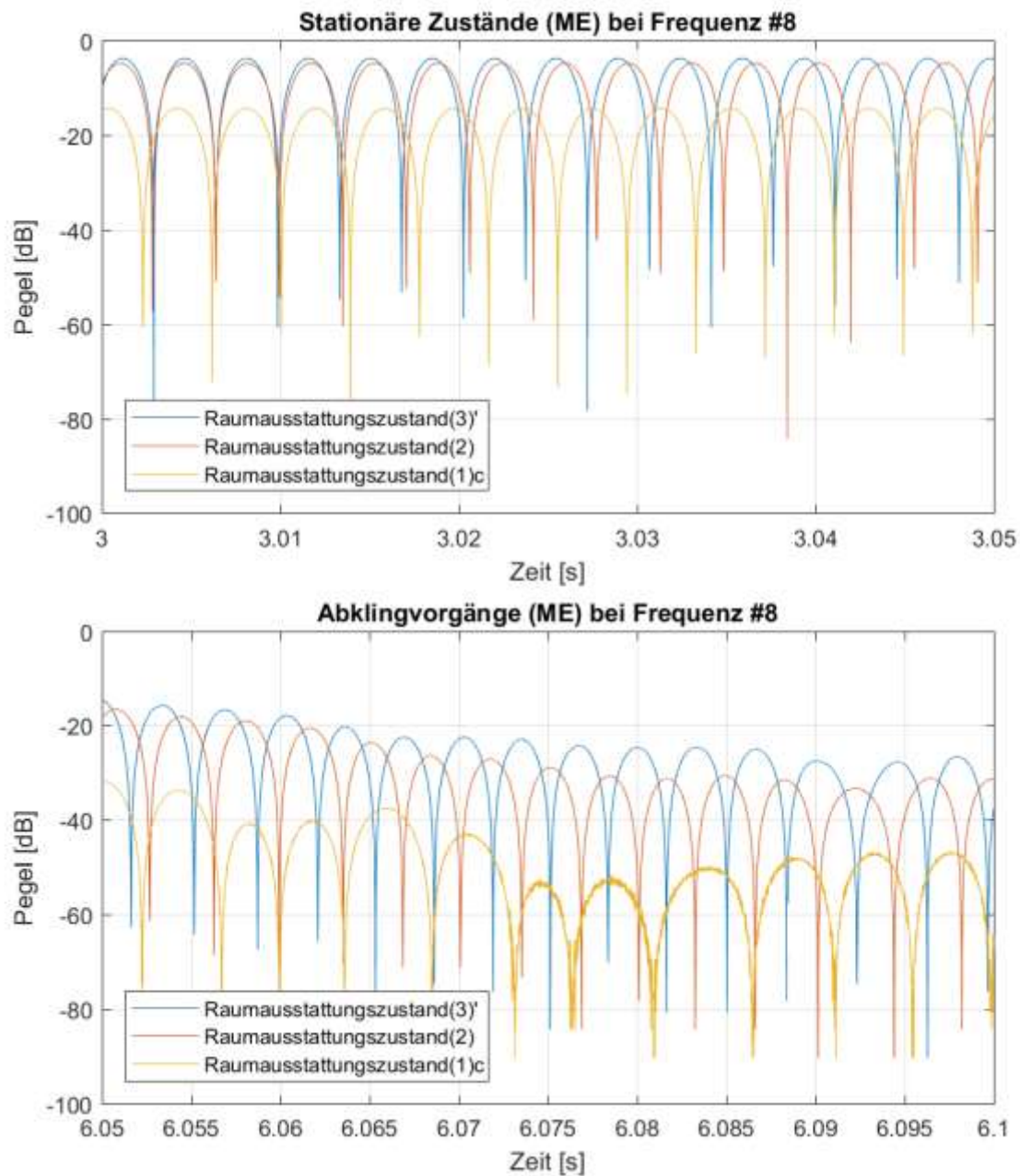


Abb. A2.8: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #8 für die drei Raumausstattungsstände (3)', (2) und (1)c

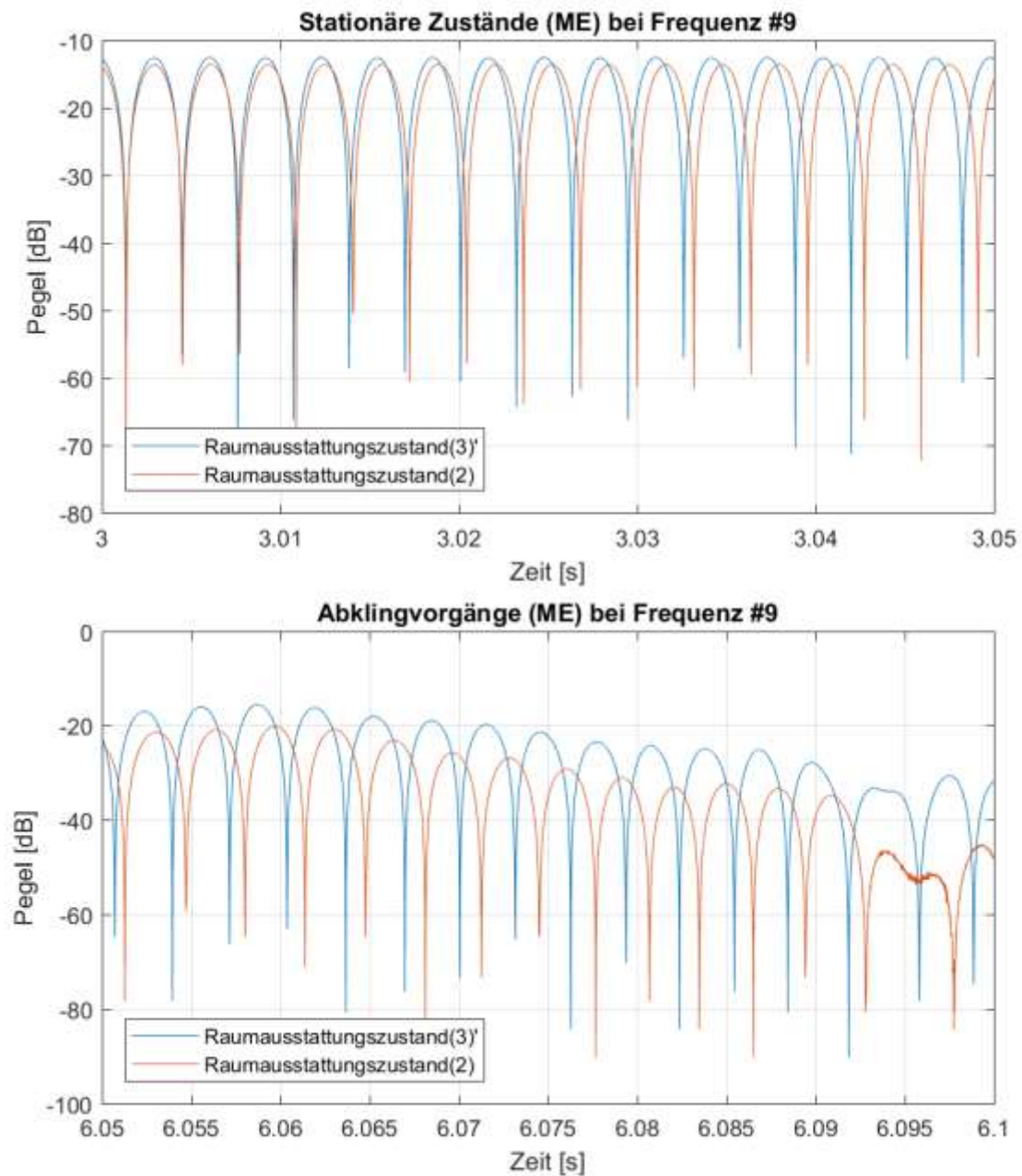


Abb. A2.9: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #9 für die zwei Raumausstattungszustände (3)' und (2)

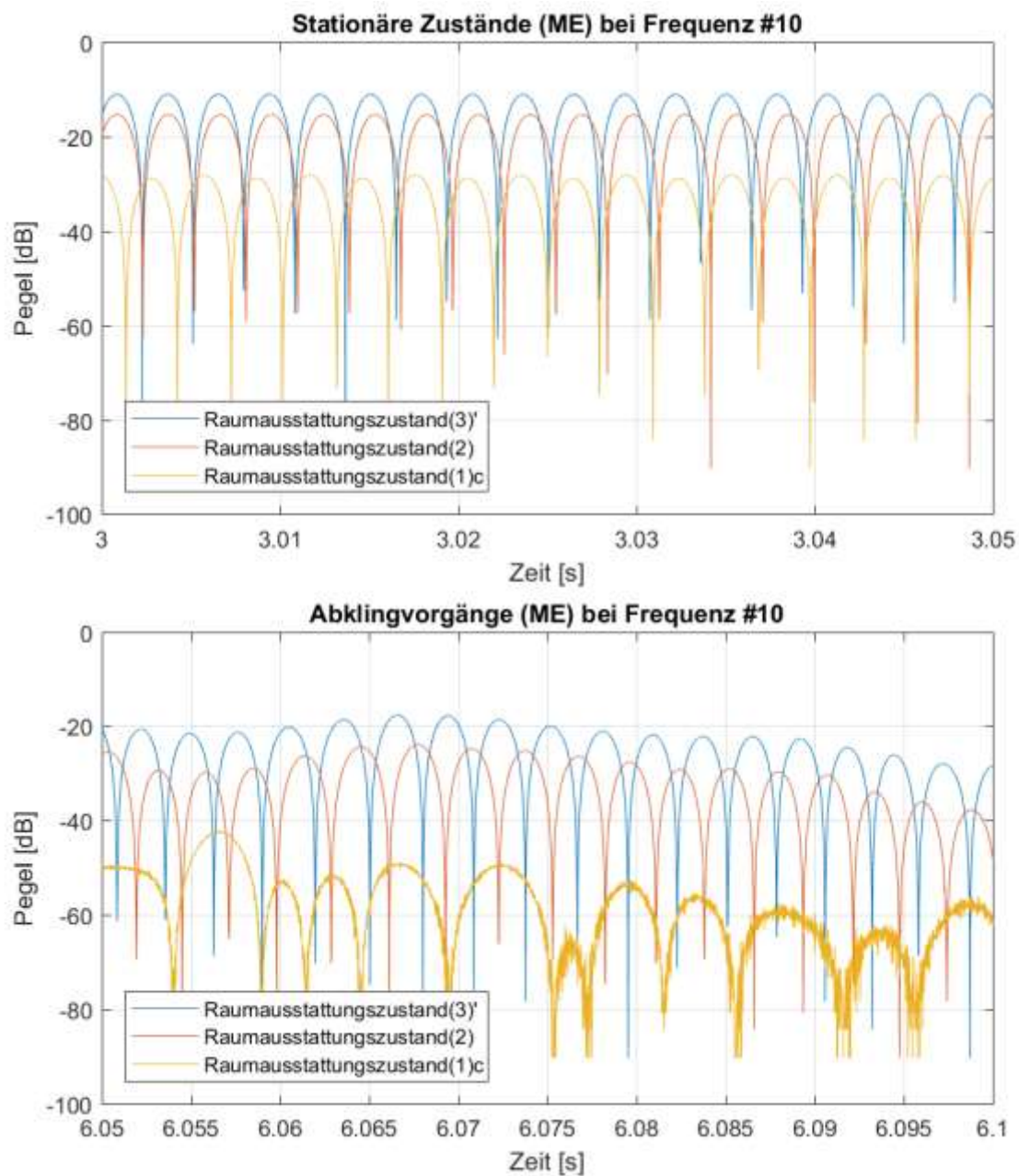


Abb. A2.10: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #10 für die drei Raumausstattungs Zustände (3)', (2) und (1)c

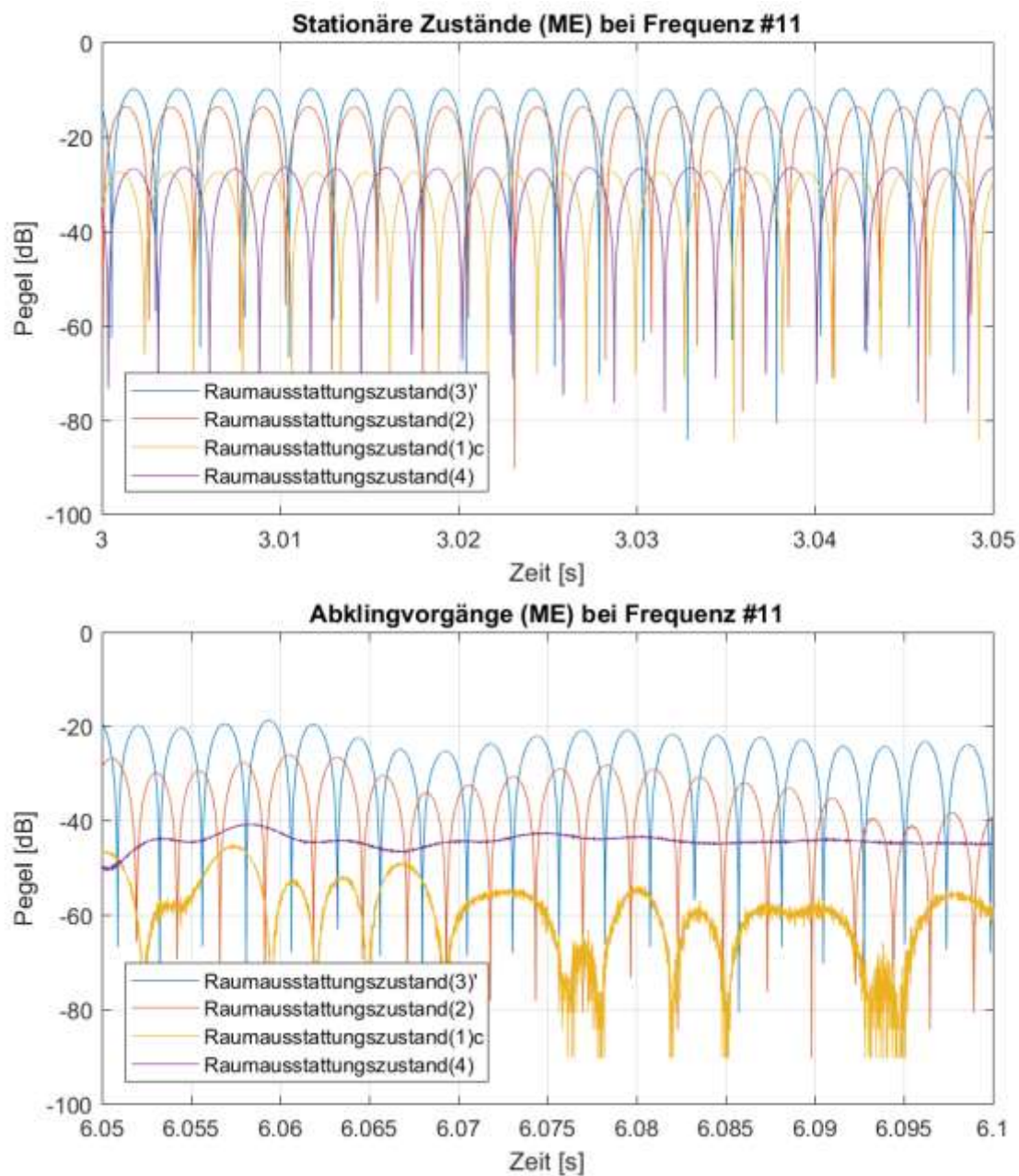


Abb. A2.11: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #11 für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4)

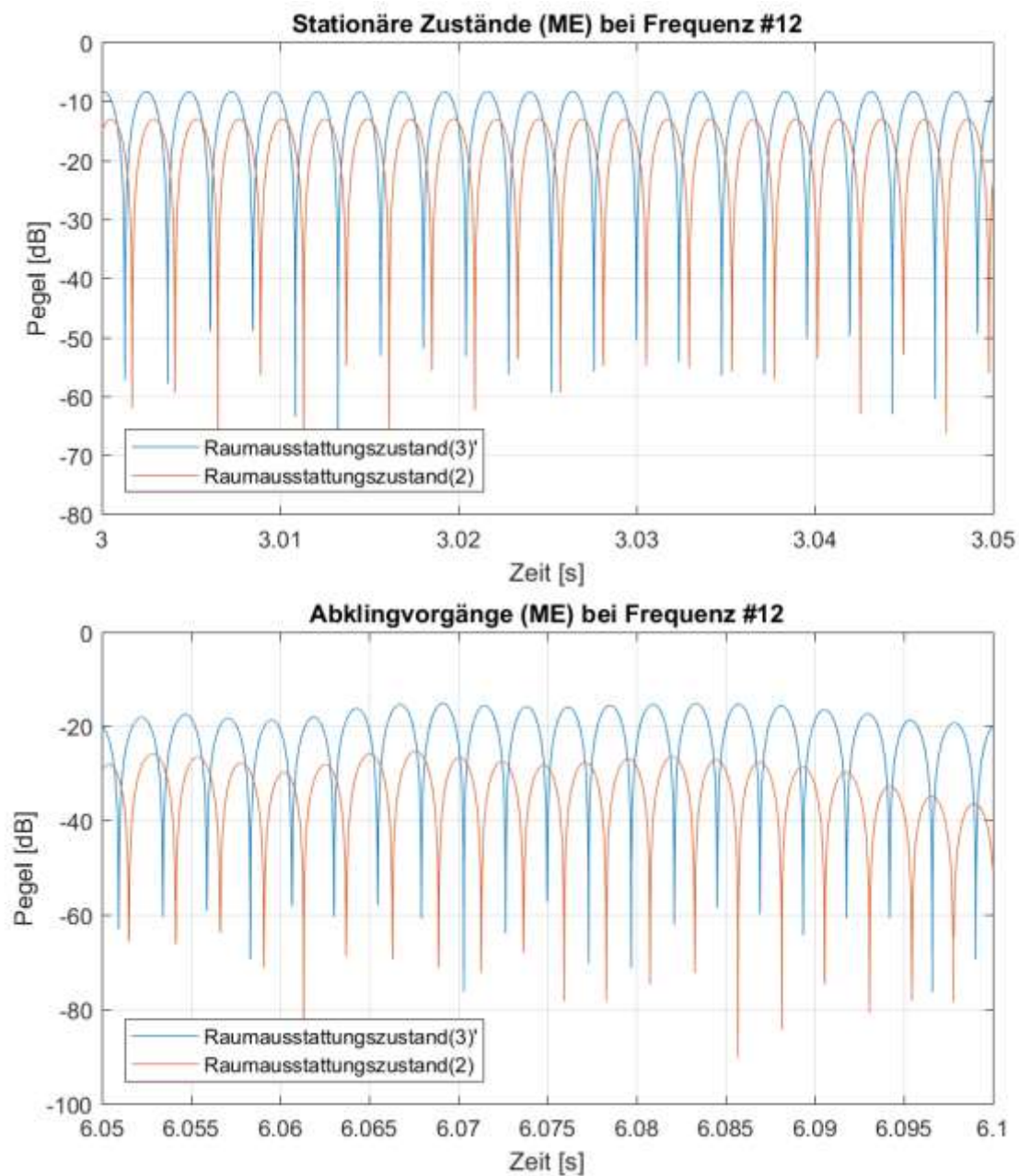


Abb. A2.12: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #12 für die zwei Raumausstattungs Zustände (3)' und (2)

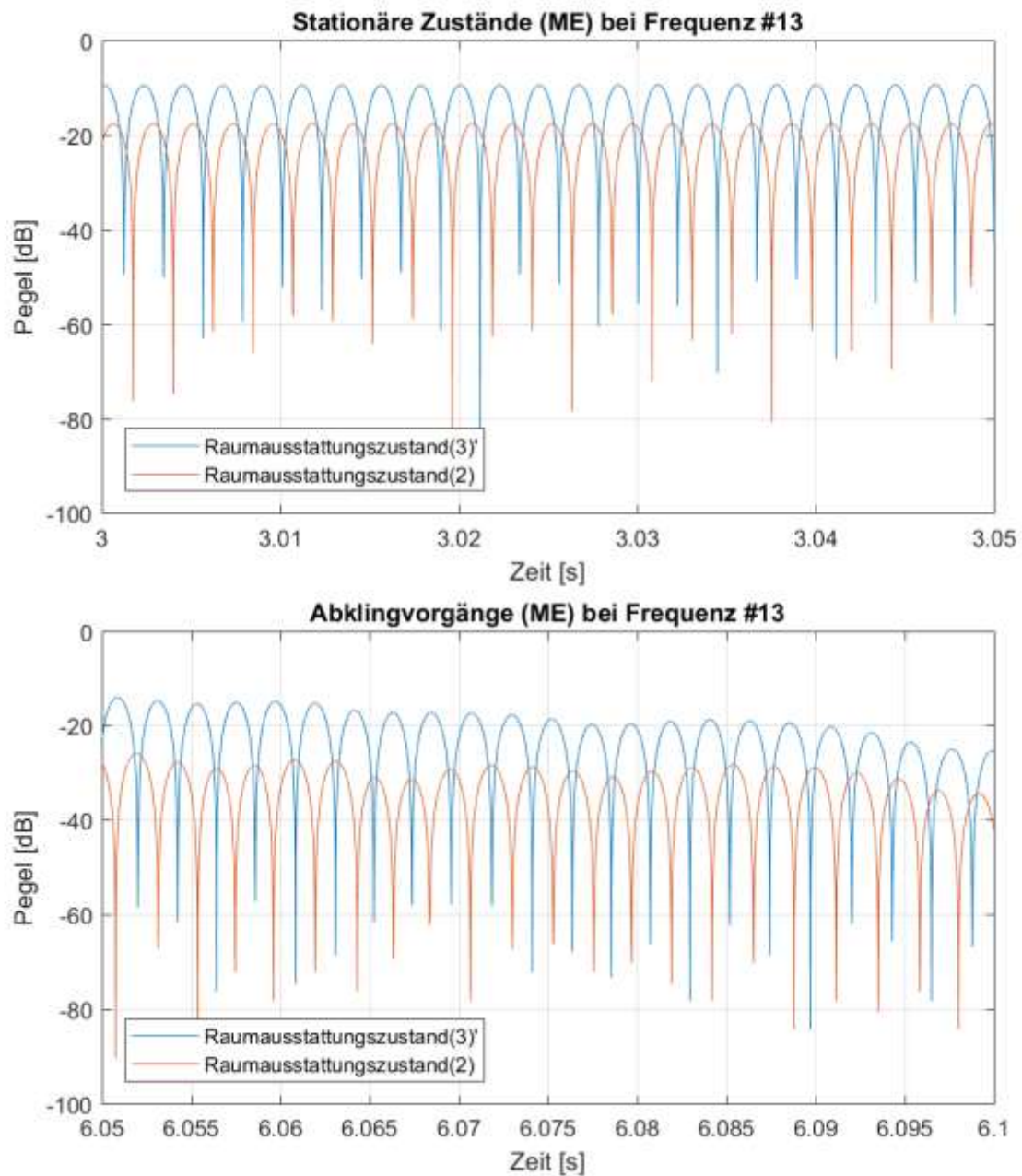


Abb. A2.13: Messsignalwellenformen der Eckmessungen bei Anregung mit Frequenz #13 für die zwei Raumausstattungszustände (3)' und (2)

Anhang B1 – An- und Abklingkurven (Marimbatonmessungen)

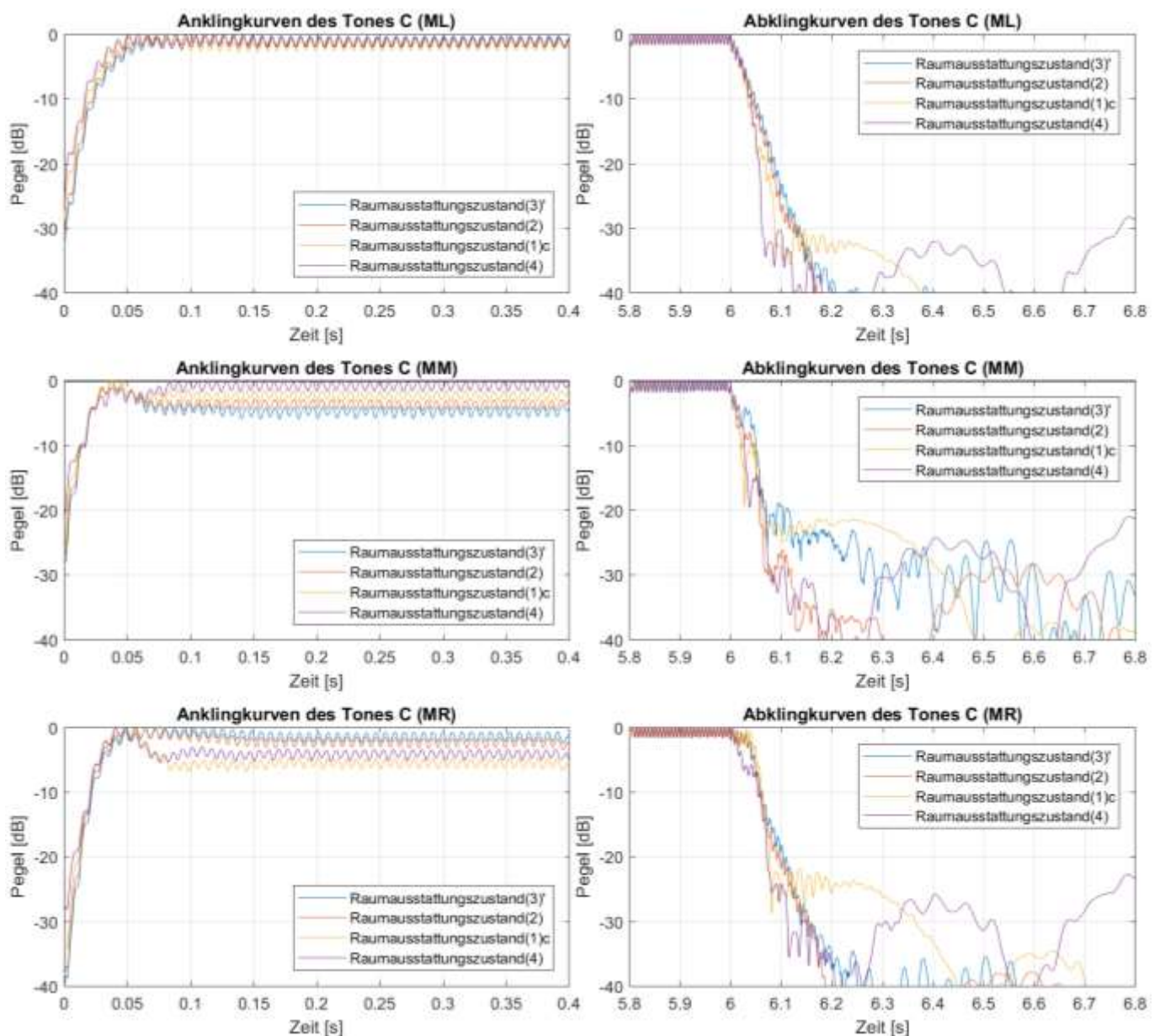


Abb. B1.1: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones C ($\cong 66$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

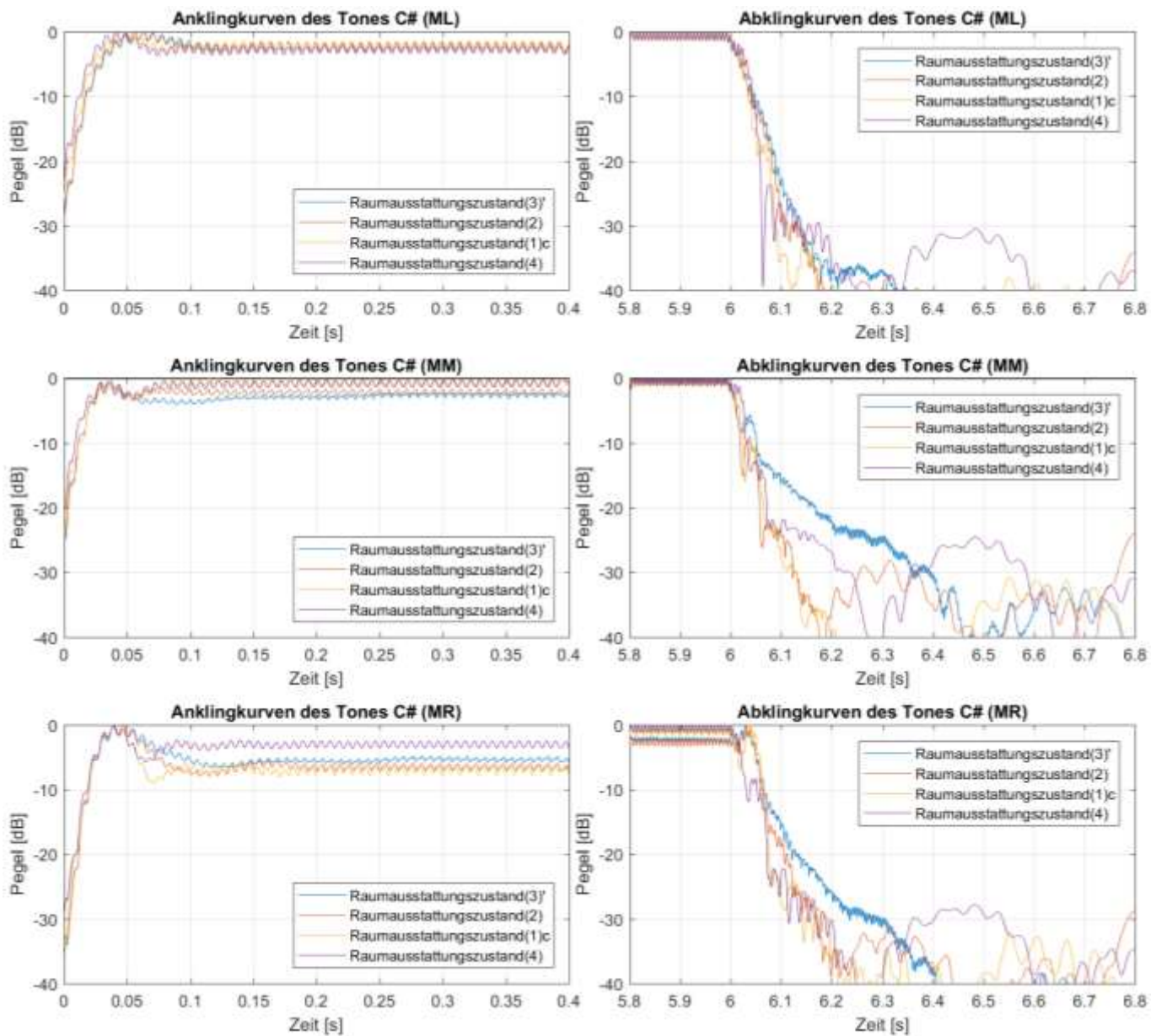


Abb. B1.2: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones C# ($\cong 70$ Hz) für alle vier Raumausstattungsstände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

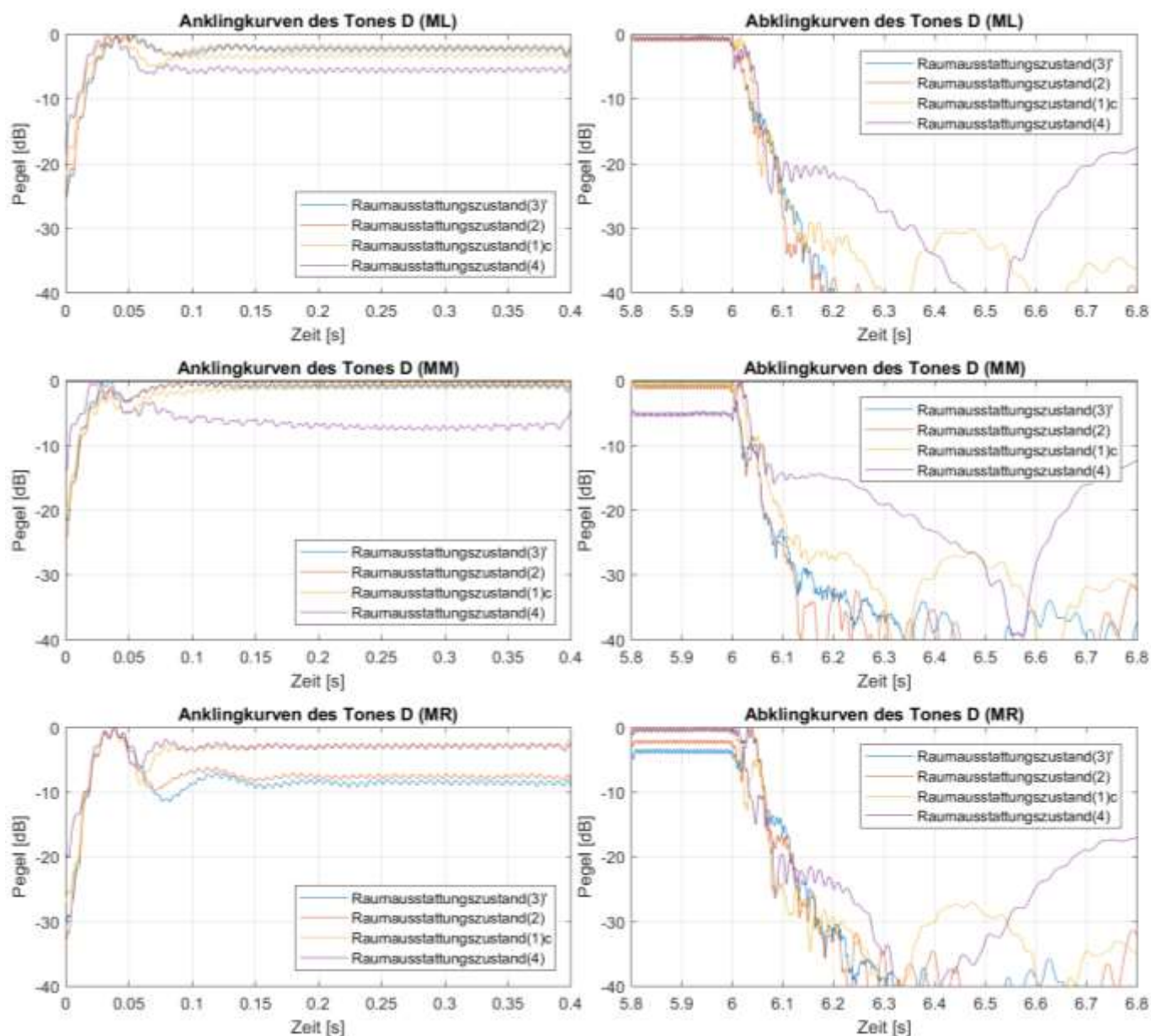


Abb. B1.3: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones D ($\cong 74$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

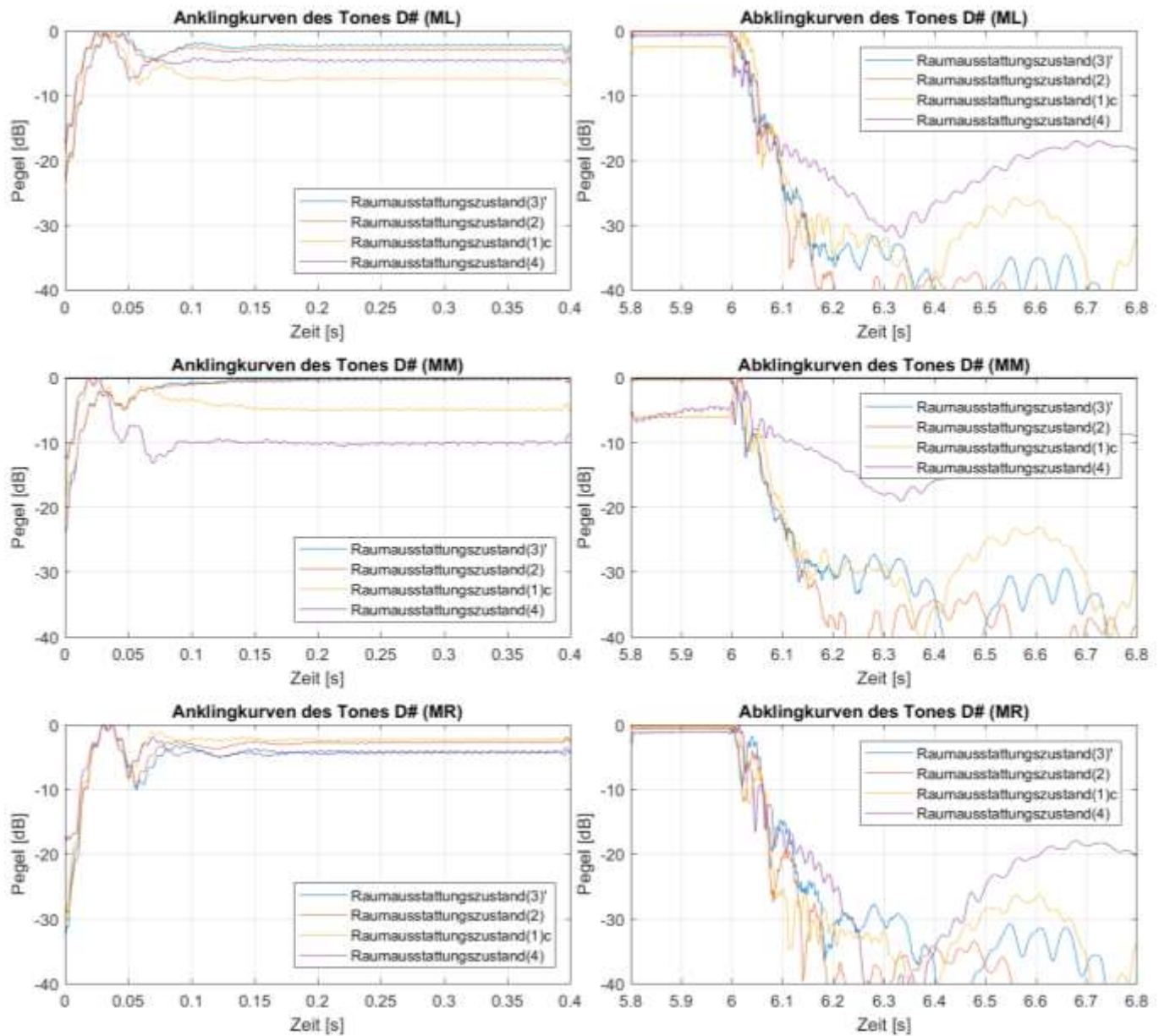


Abb. B1.4: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones D# ($\cong 78$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

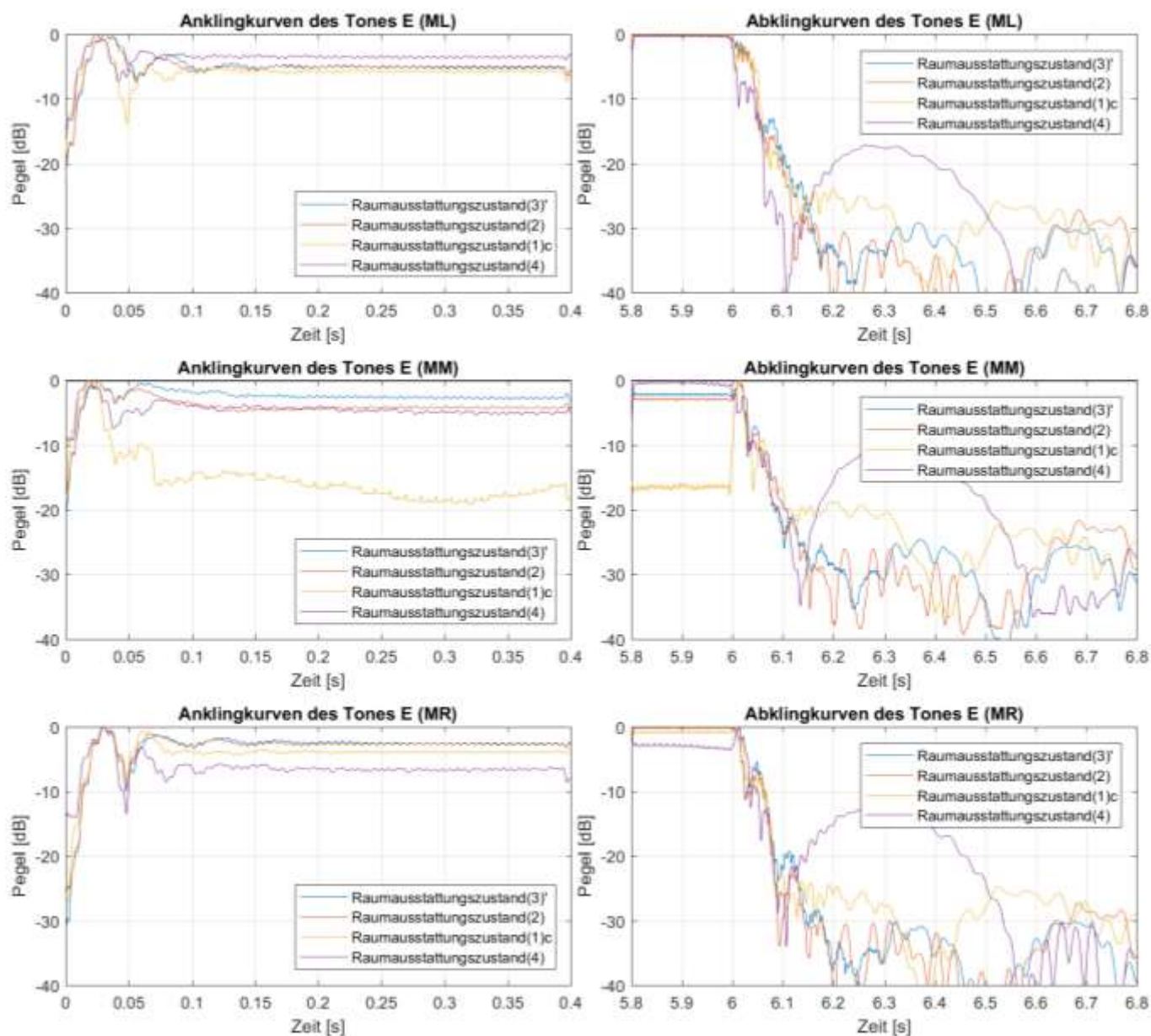


Abb. B1.5: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones E ($\cong 83$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**(3)'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

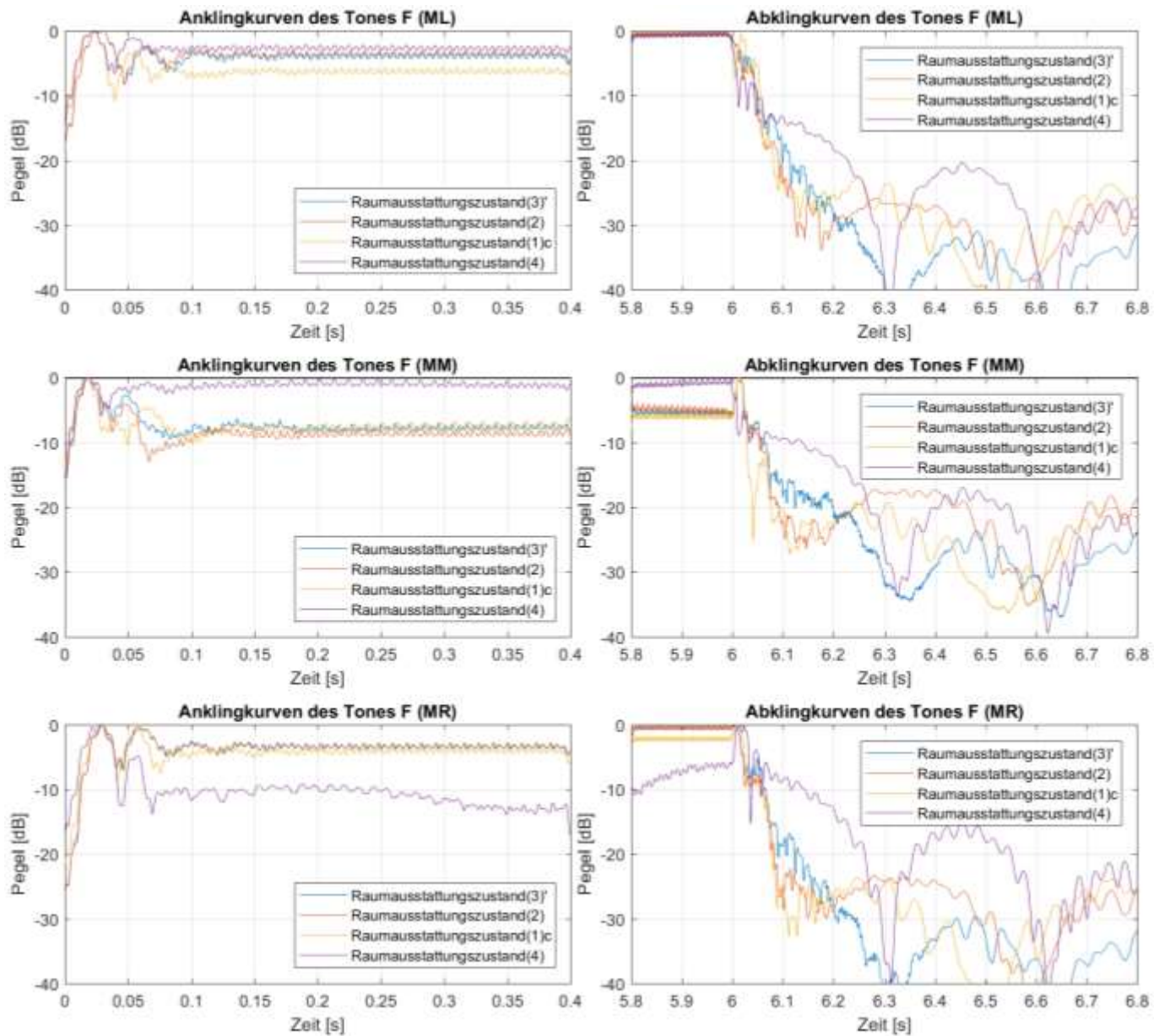


Abb. B1.6: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones F ($\triangleq 88$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3**)', (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

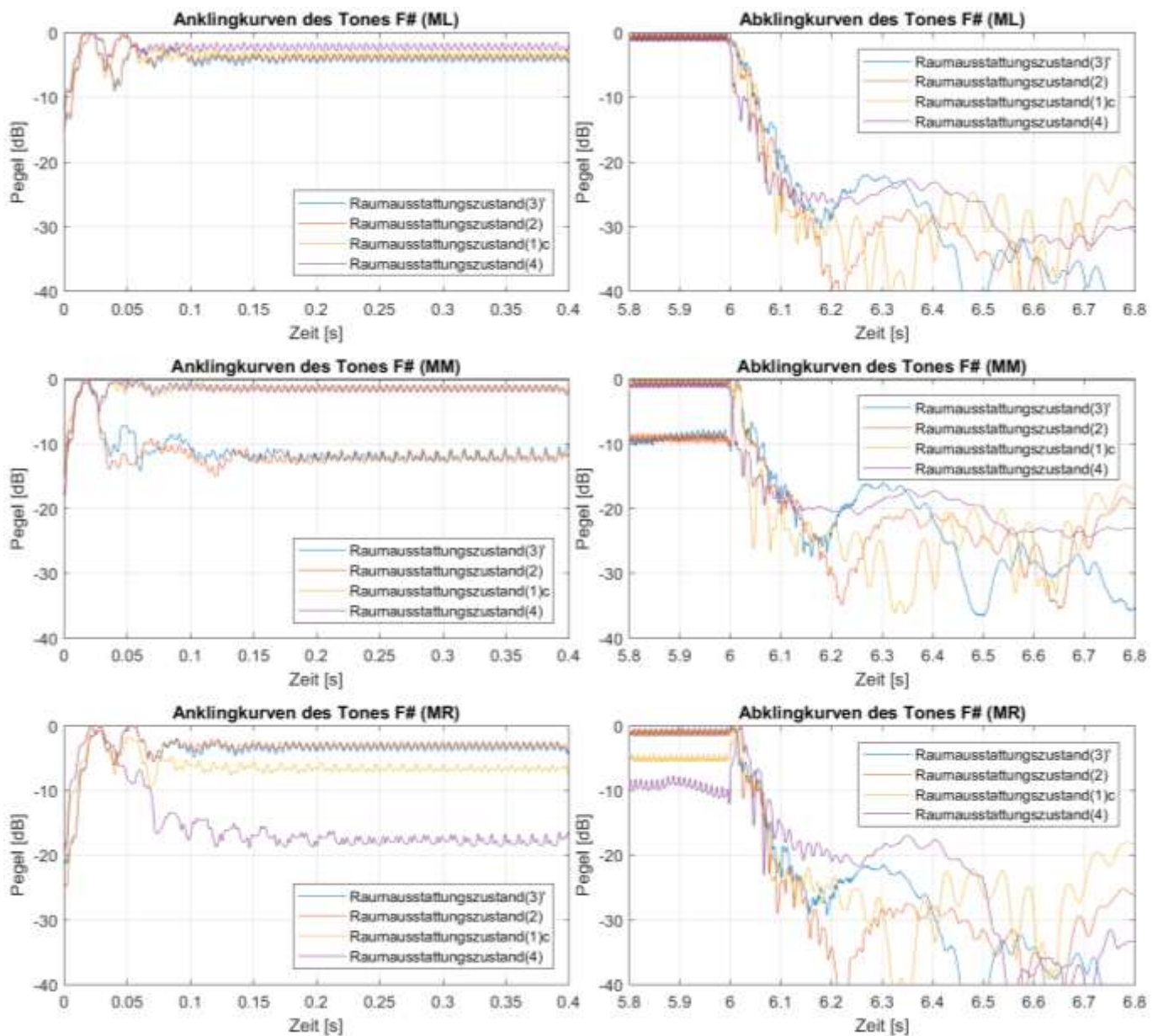


Abb. B1.7: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones F# ($\cong 93$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

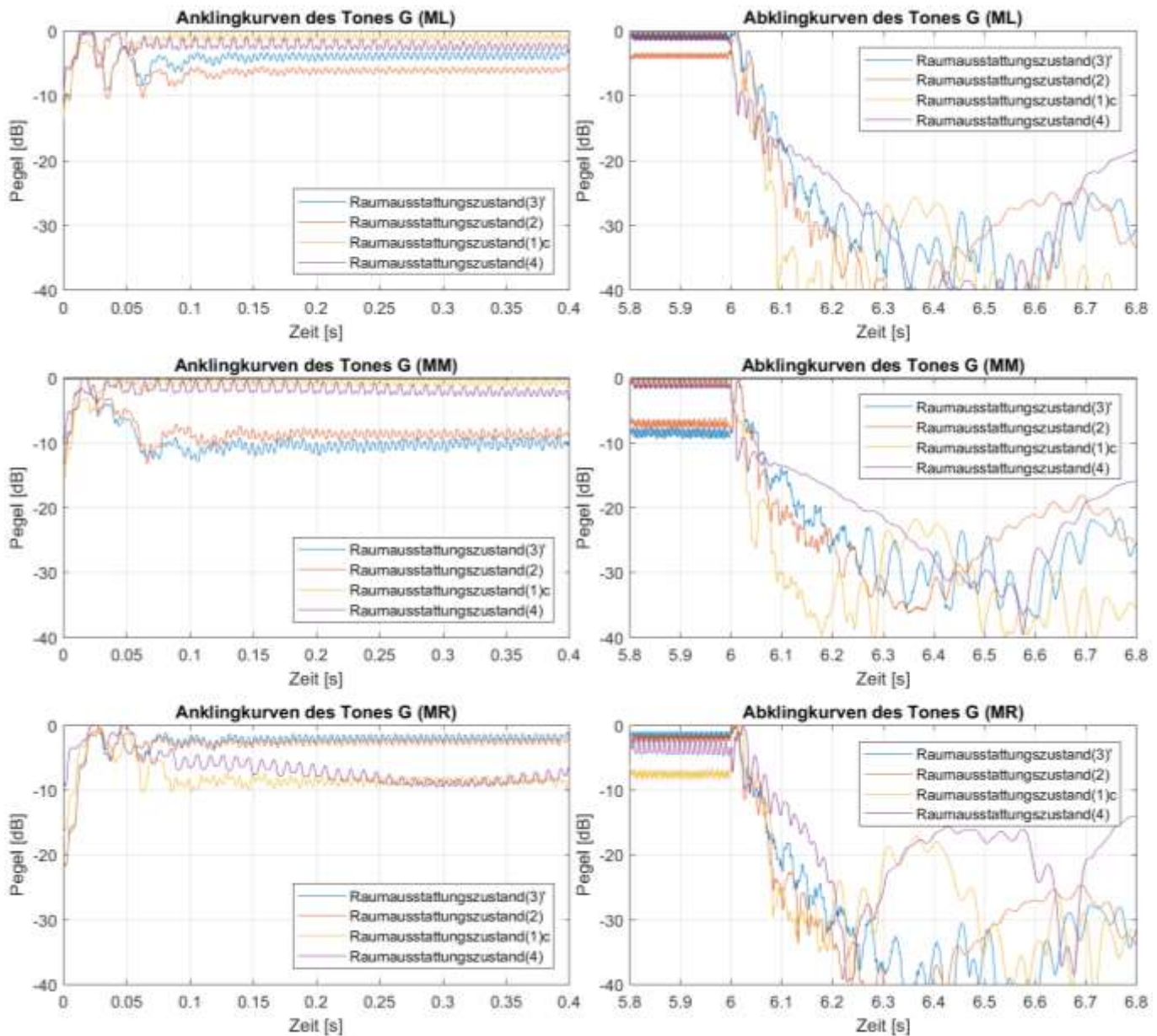


Abb. B1.8: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones G ($\cong 99$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**(3)'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**(ML)**, **(MM)** und **(MR)**)

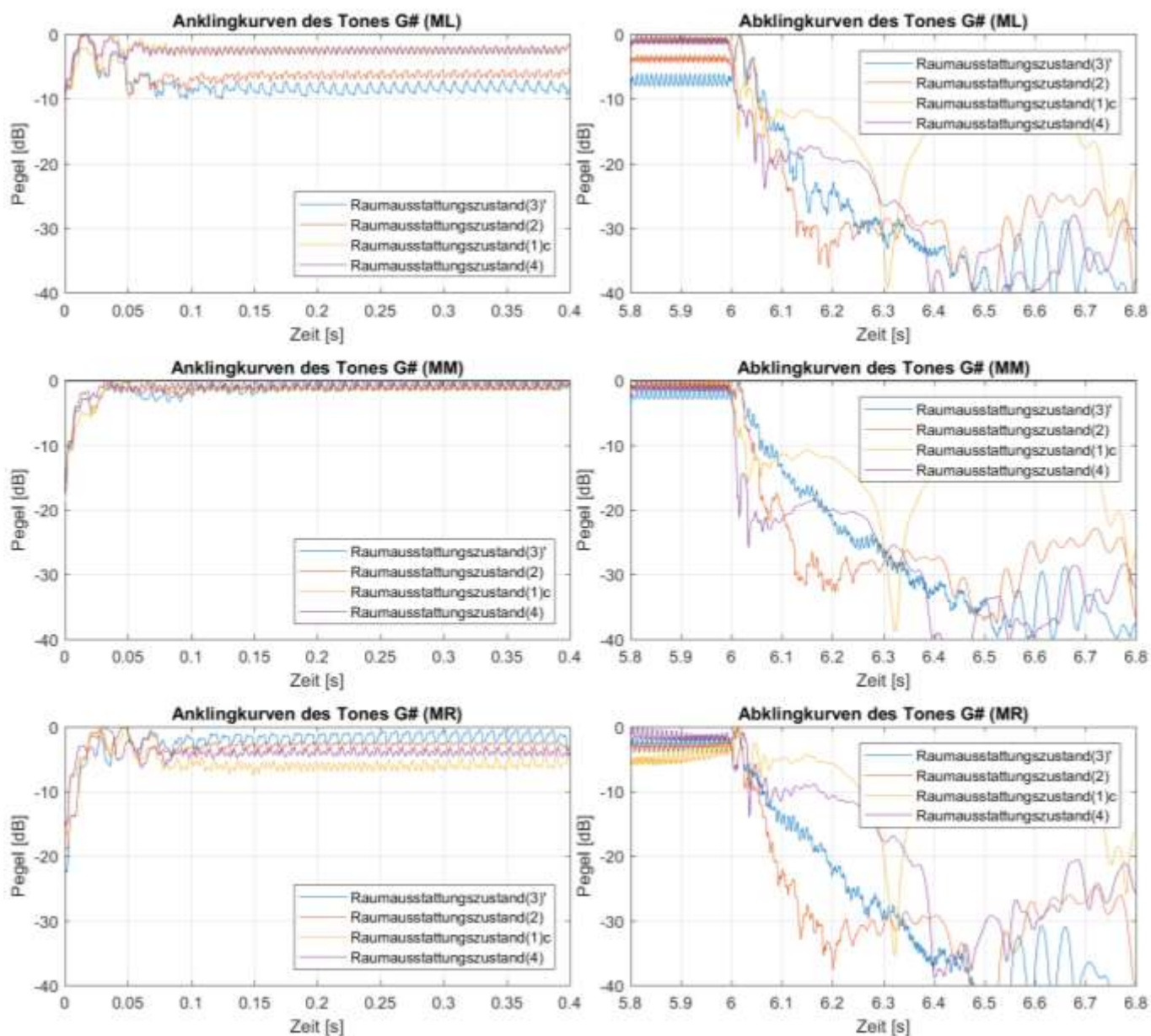


Abb. B1.9: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones G# ($\cong 105$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

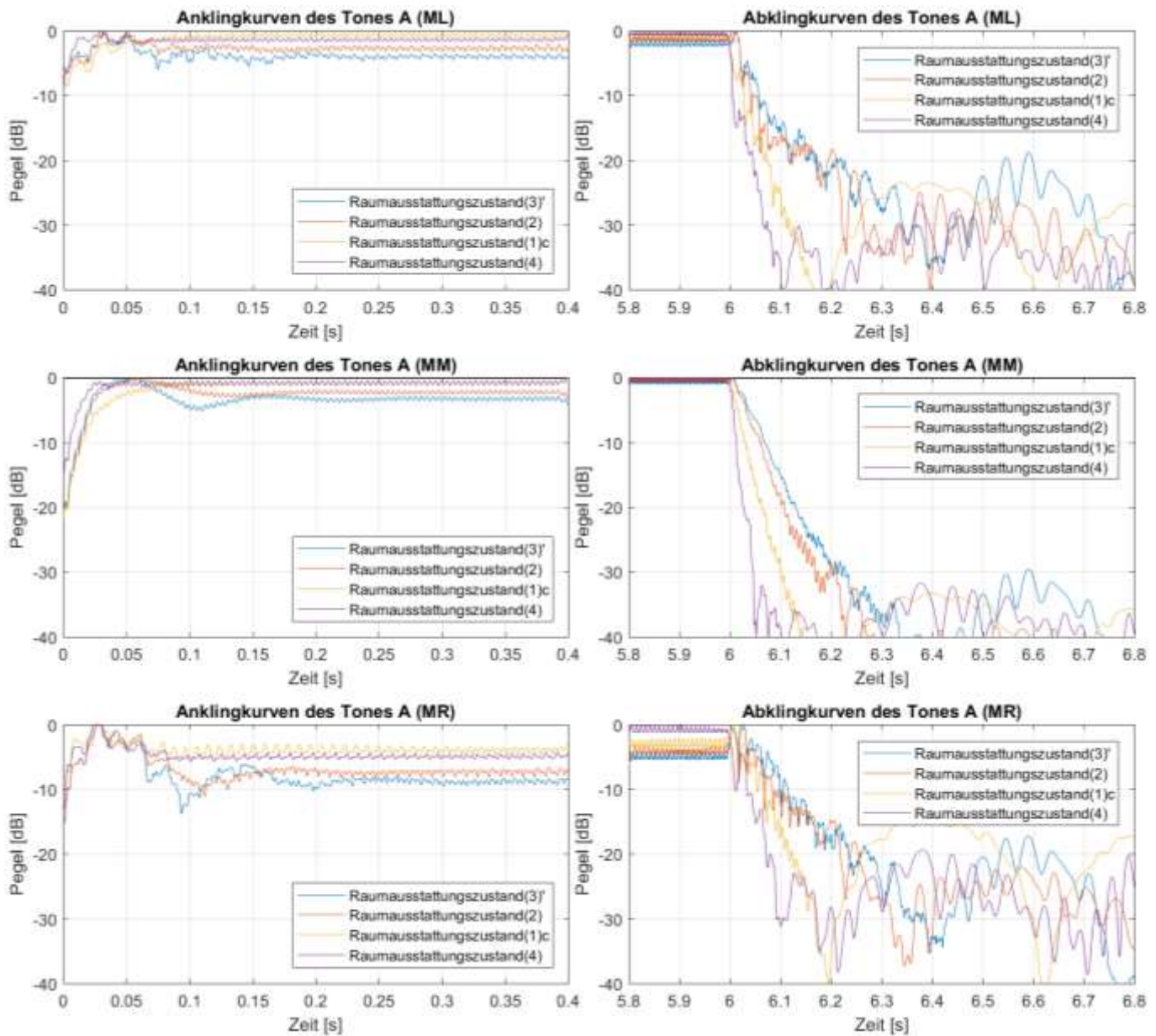


Abb. B1.10: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q2**) mit der Grundfrequenz des Tones A ($\cong 111$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (**3'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

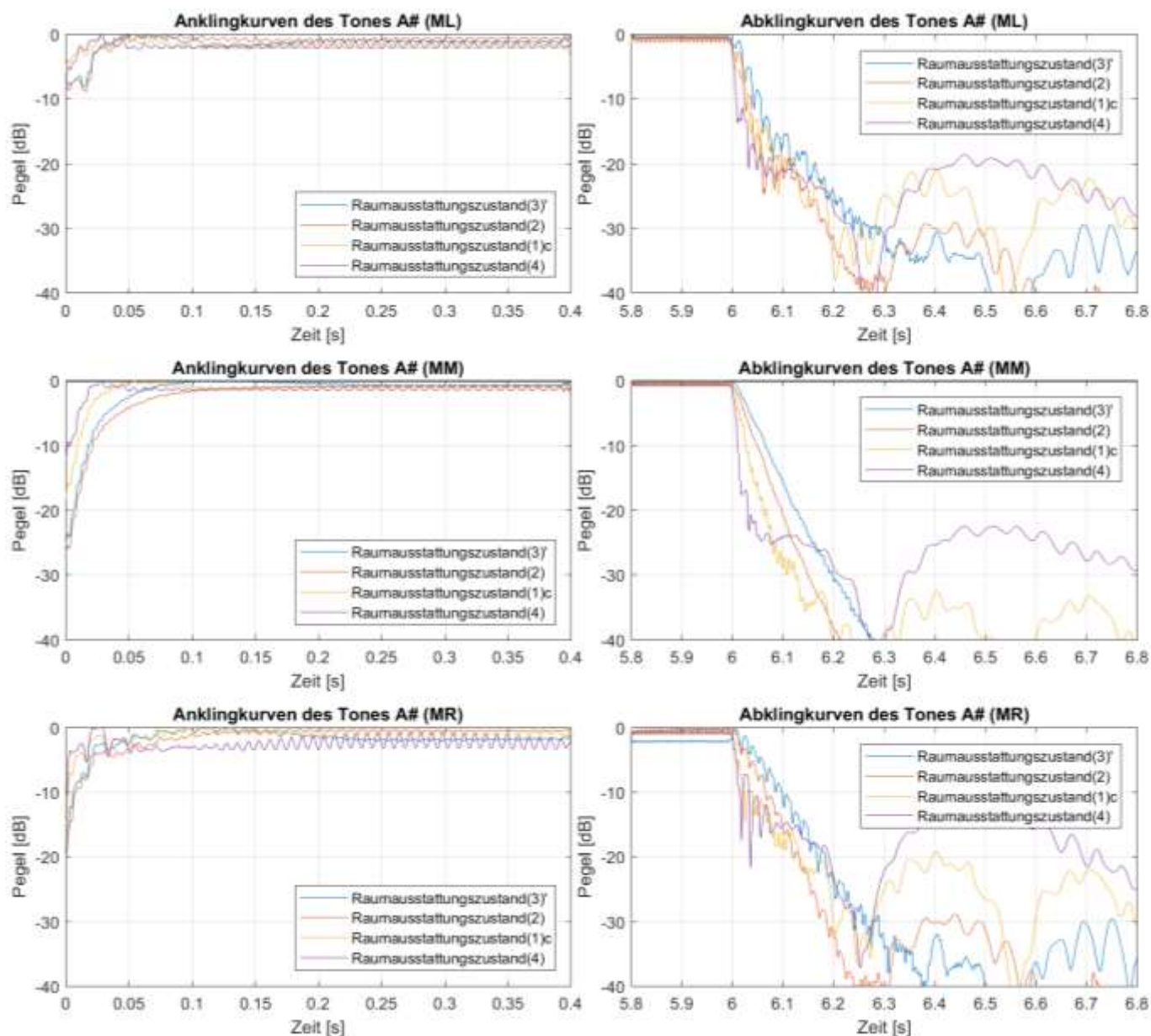


Abb. B1.11: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones A# ($\cong 117$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

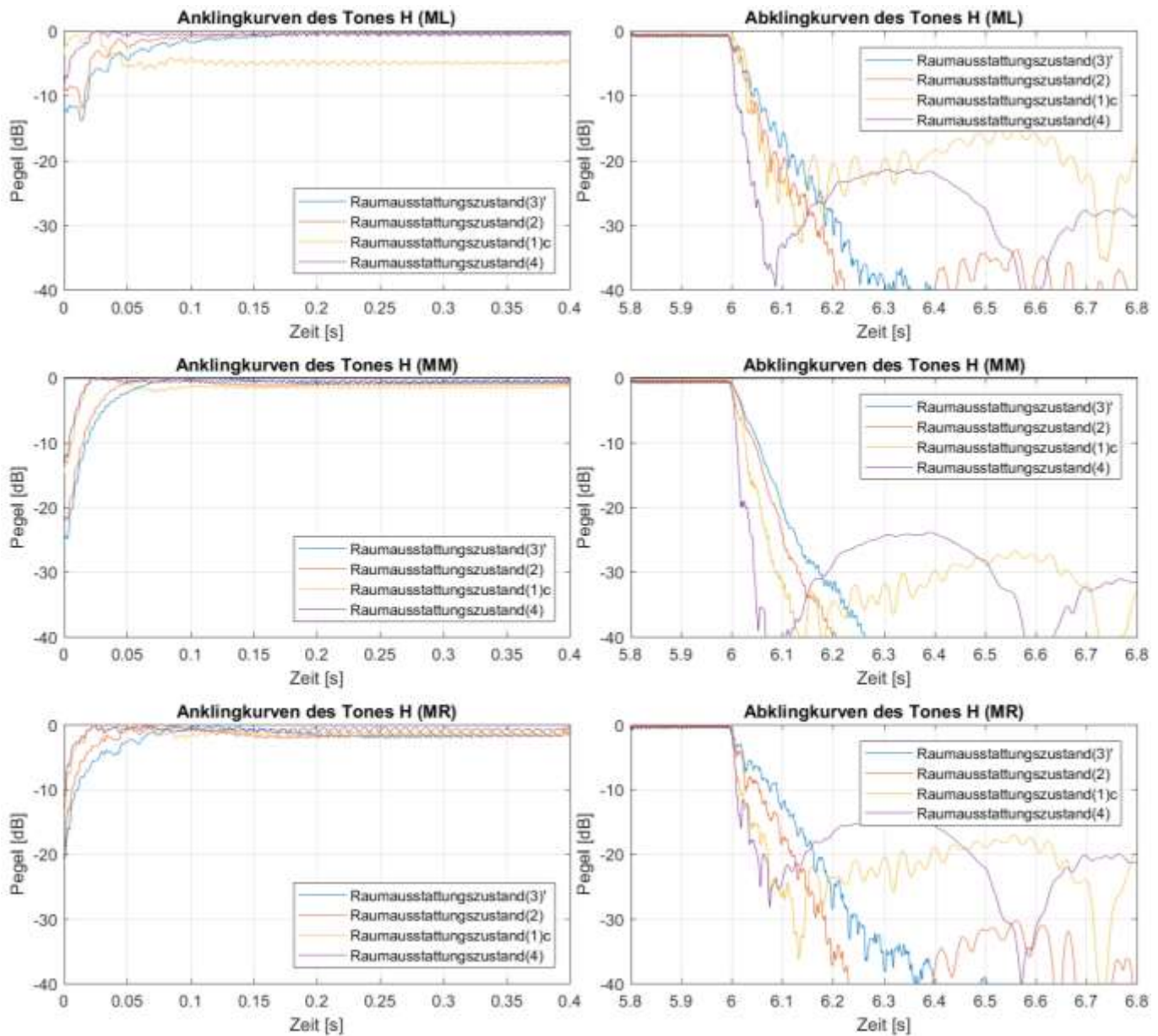


Abb. B1.12: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones H ($\cong 124$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

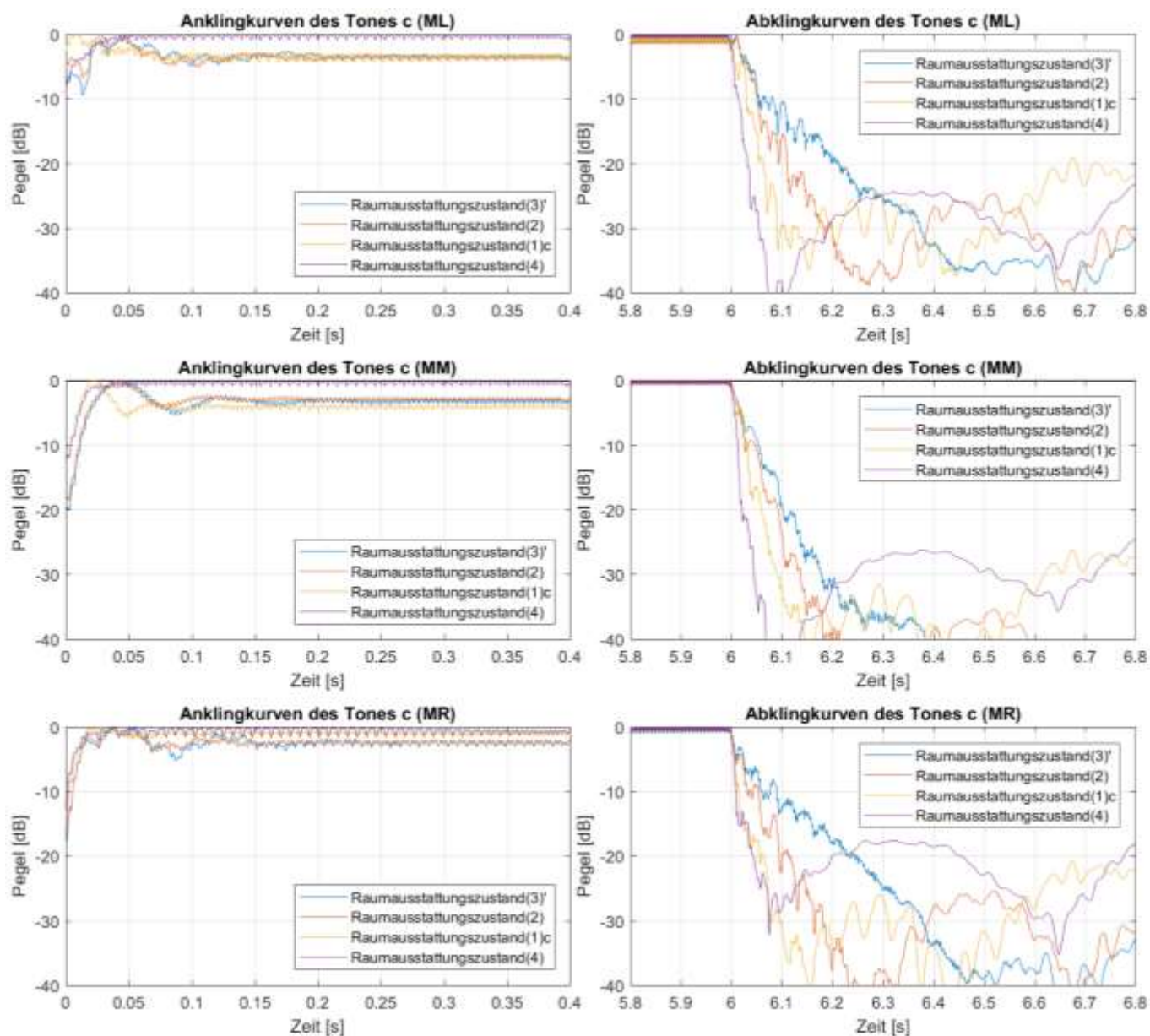


Abb. B1.13: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q2**) mit der Grundfrequenz des Tones c ($\cong 132$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**), (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

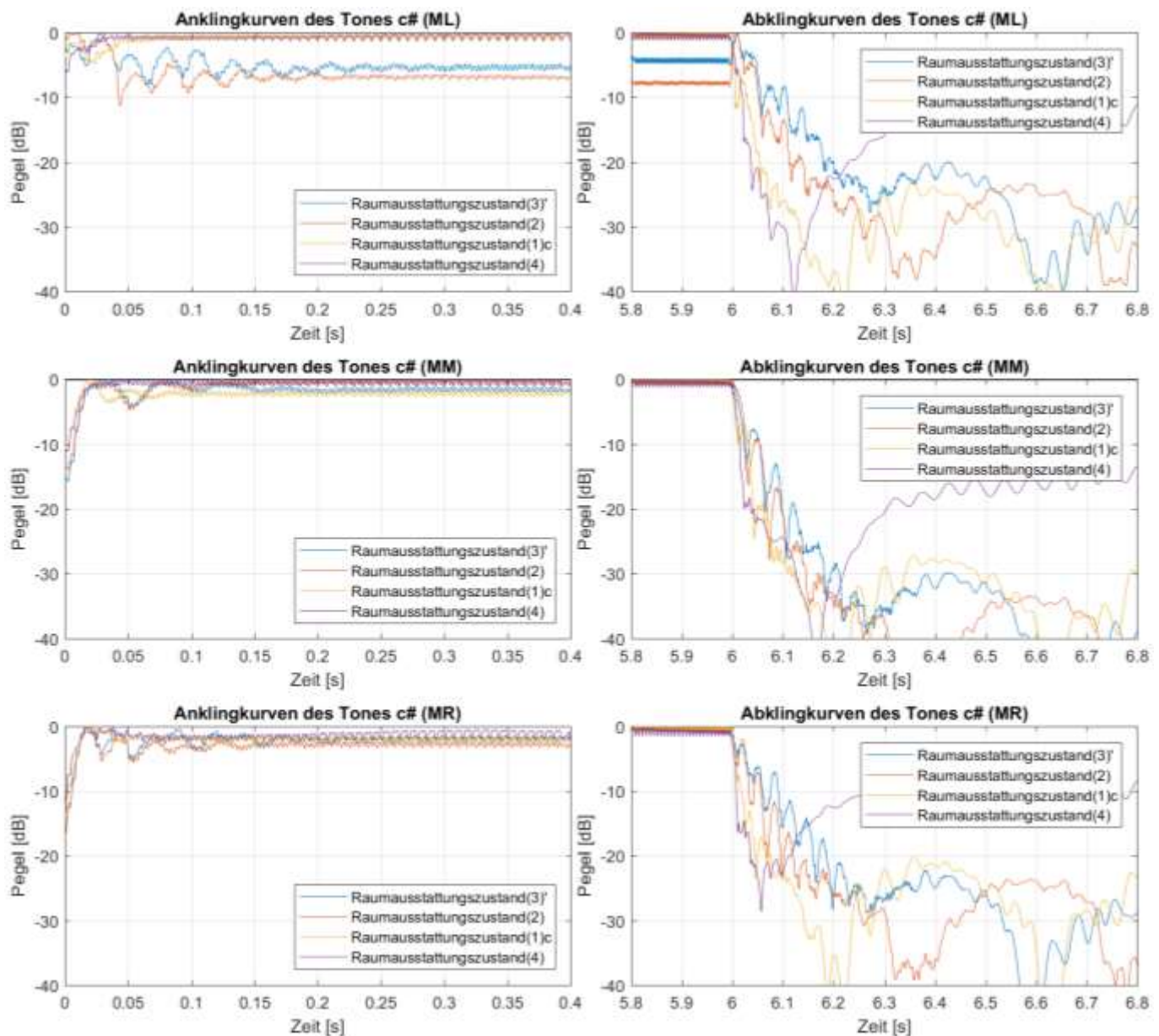


Abb. B1.14: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones c# ($\triangleq 140$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

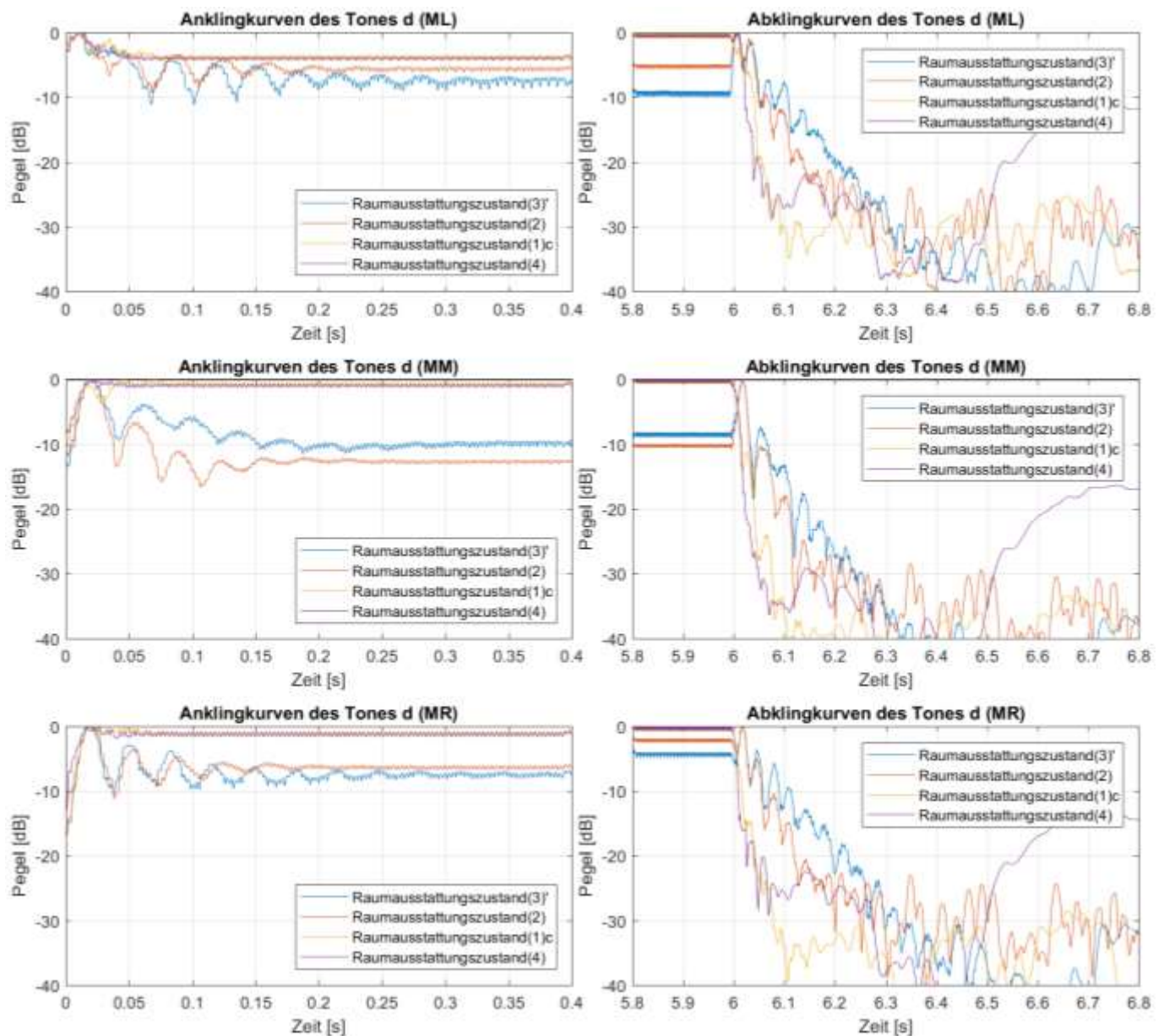


Abb. B1.15: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones d ($\cong 148$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

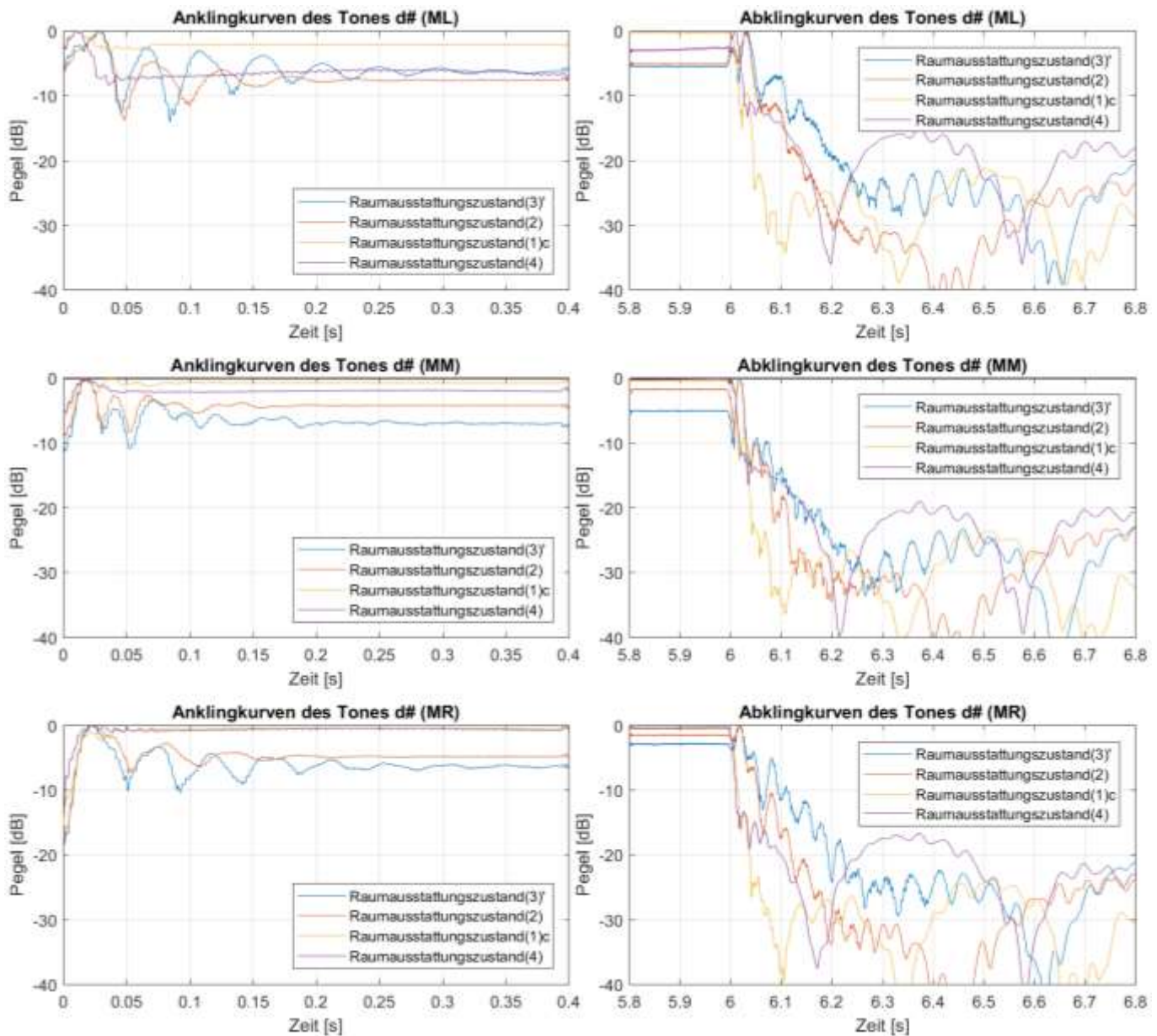


Abb. B1.16: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones d# ($\triangleq 157$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

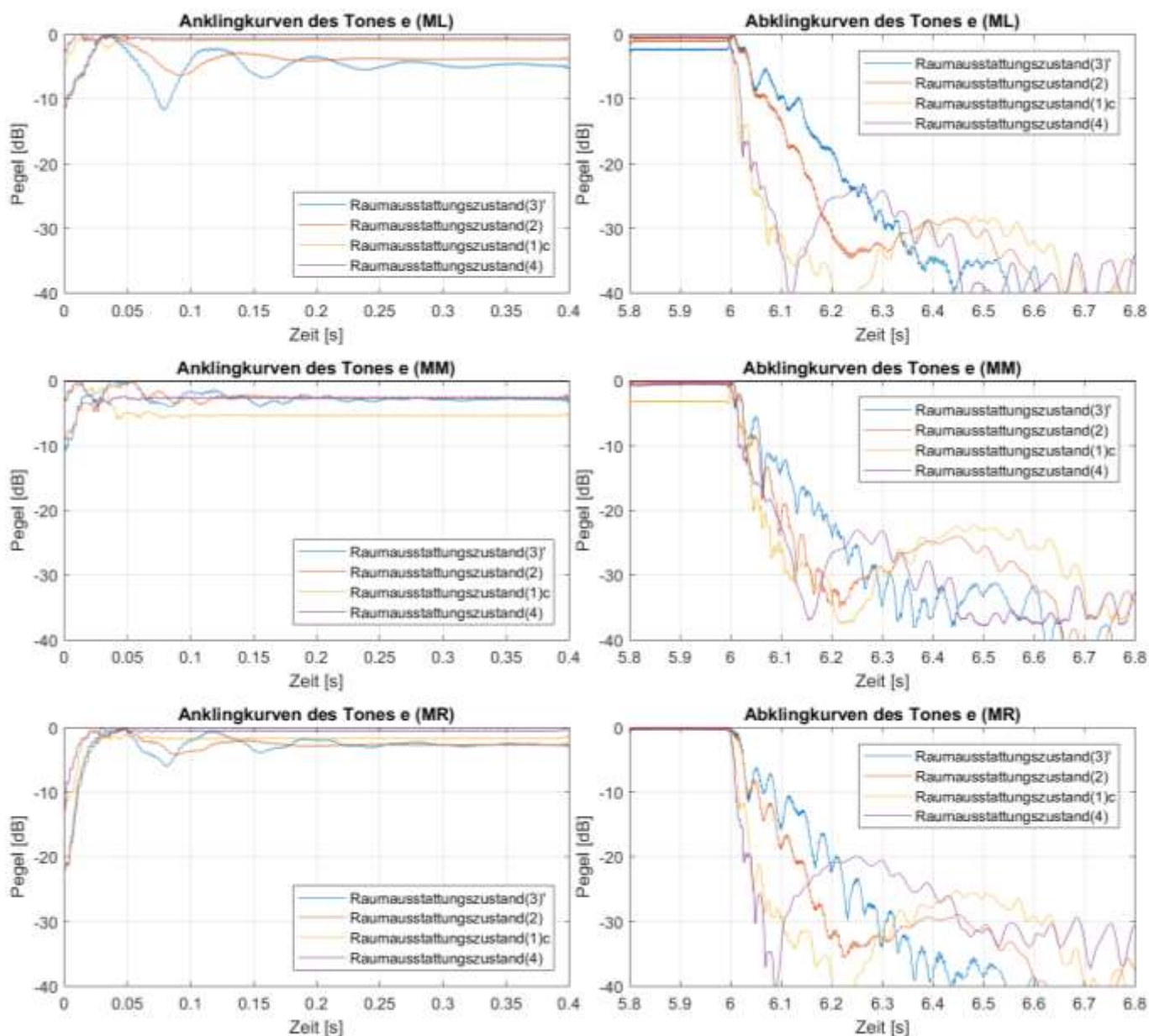


Abb. B1.17: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q2**) mit der Grundfrequenz des Tones e ($\cong 166$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**), (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

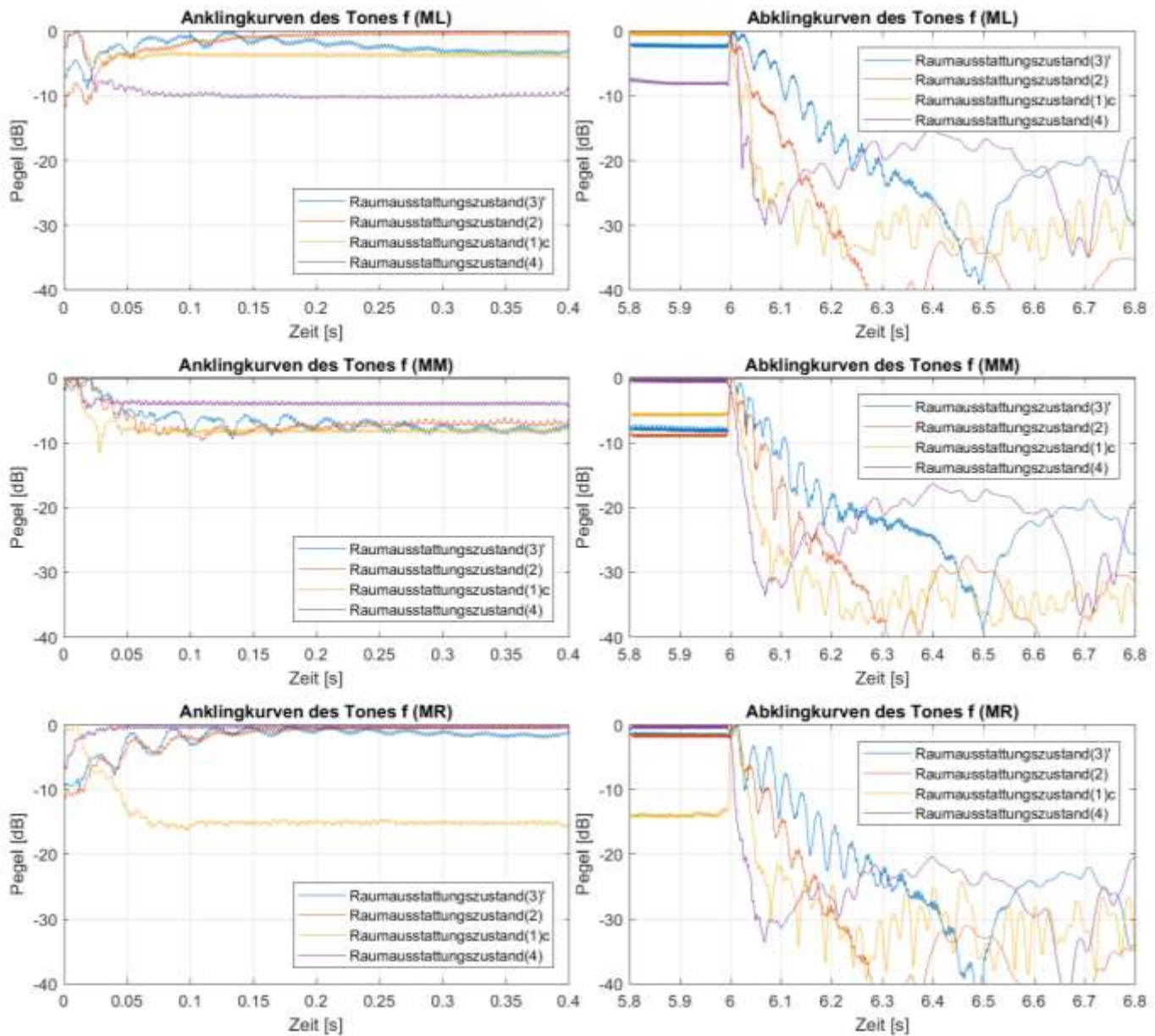


Abb. B1.18: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones f ($\cong 176$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

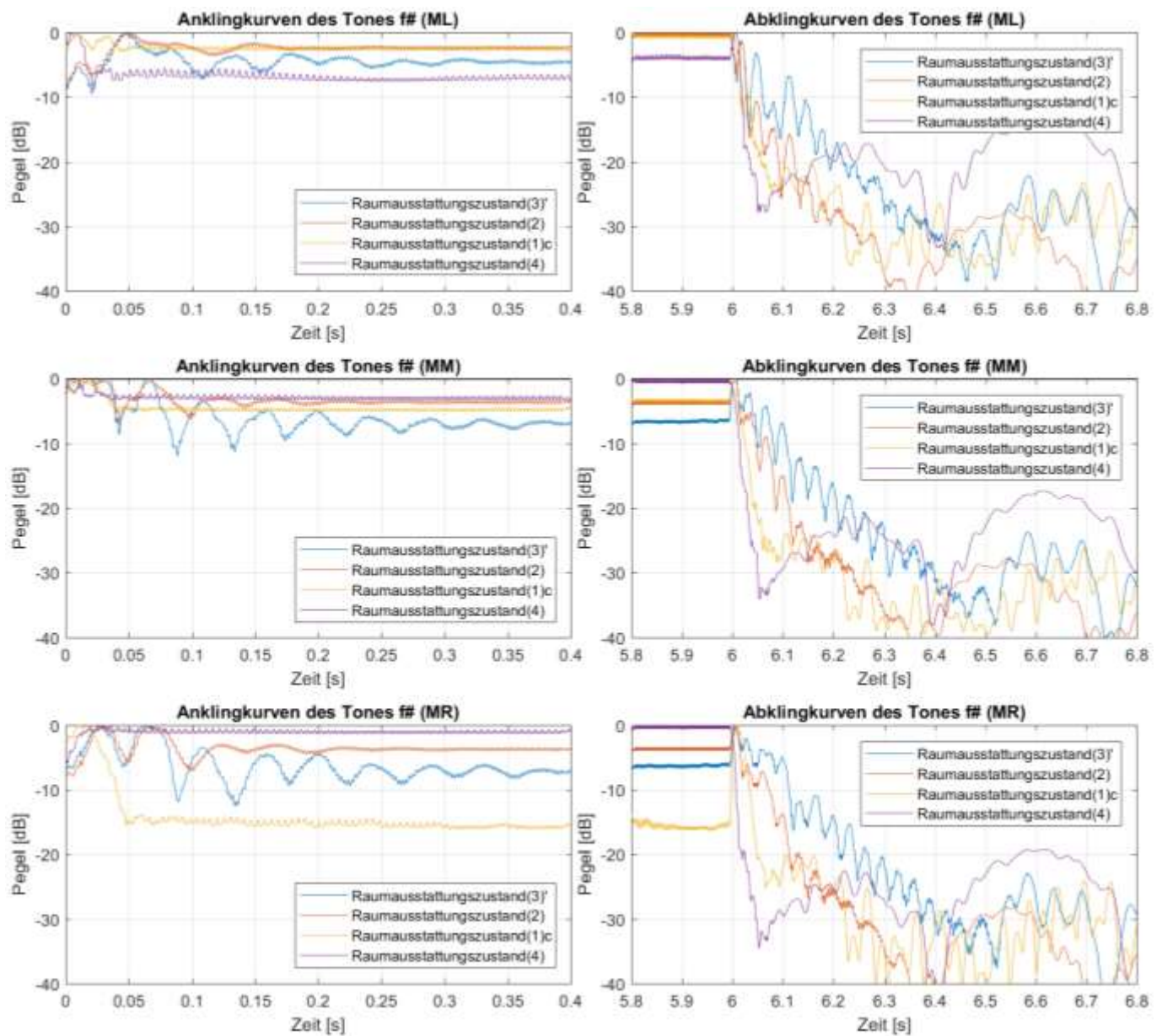


Abb. B1.19: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones f# ($\cong 186$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (**3'**, **2**), **(1)c** und **4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

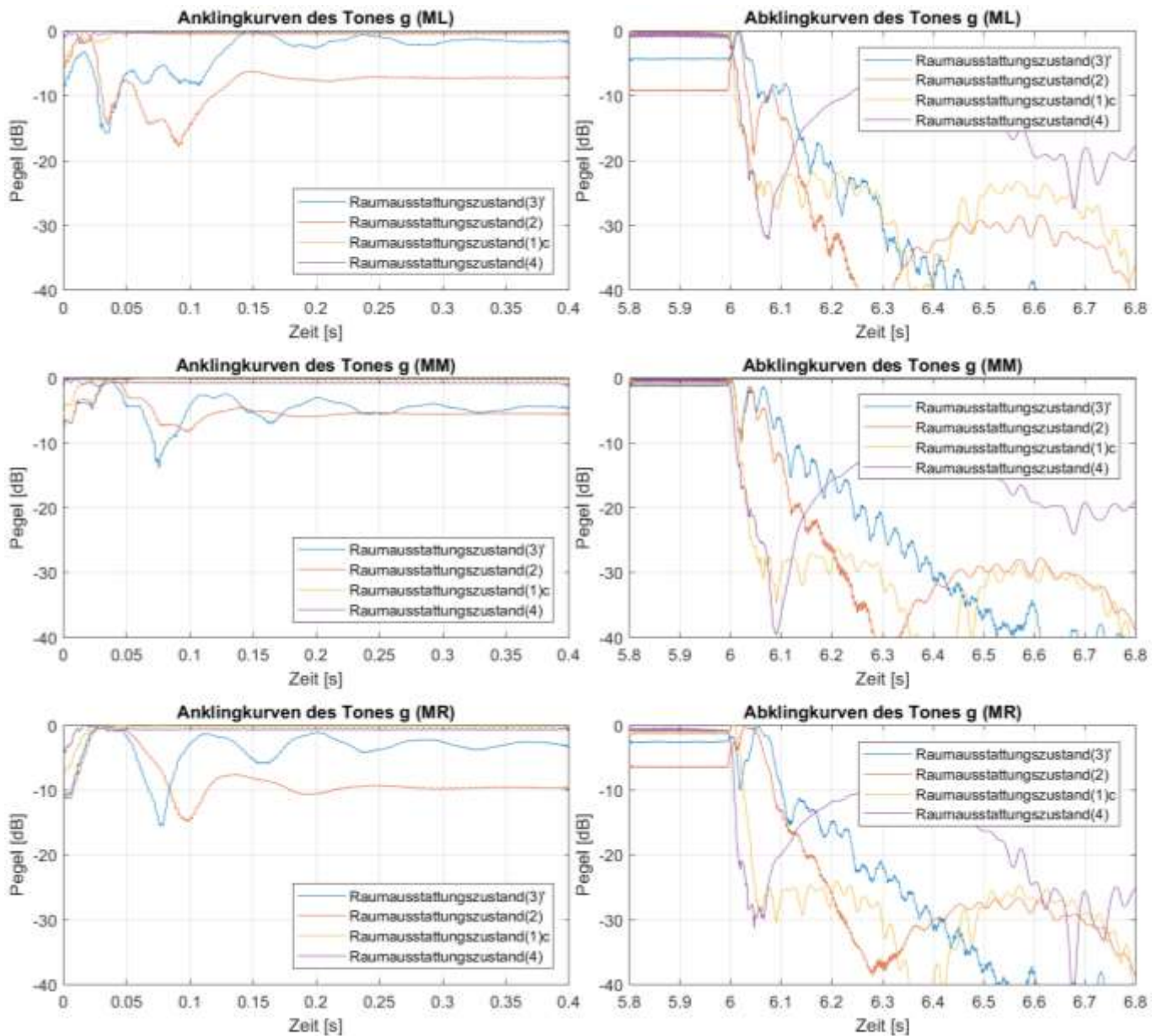


Abb. B1.20: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones g ($\cong 197$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (**3'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

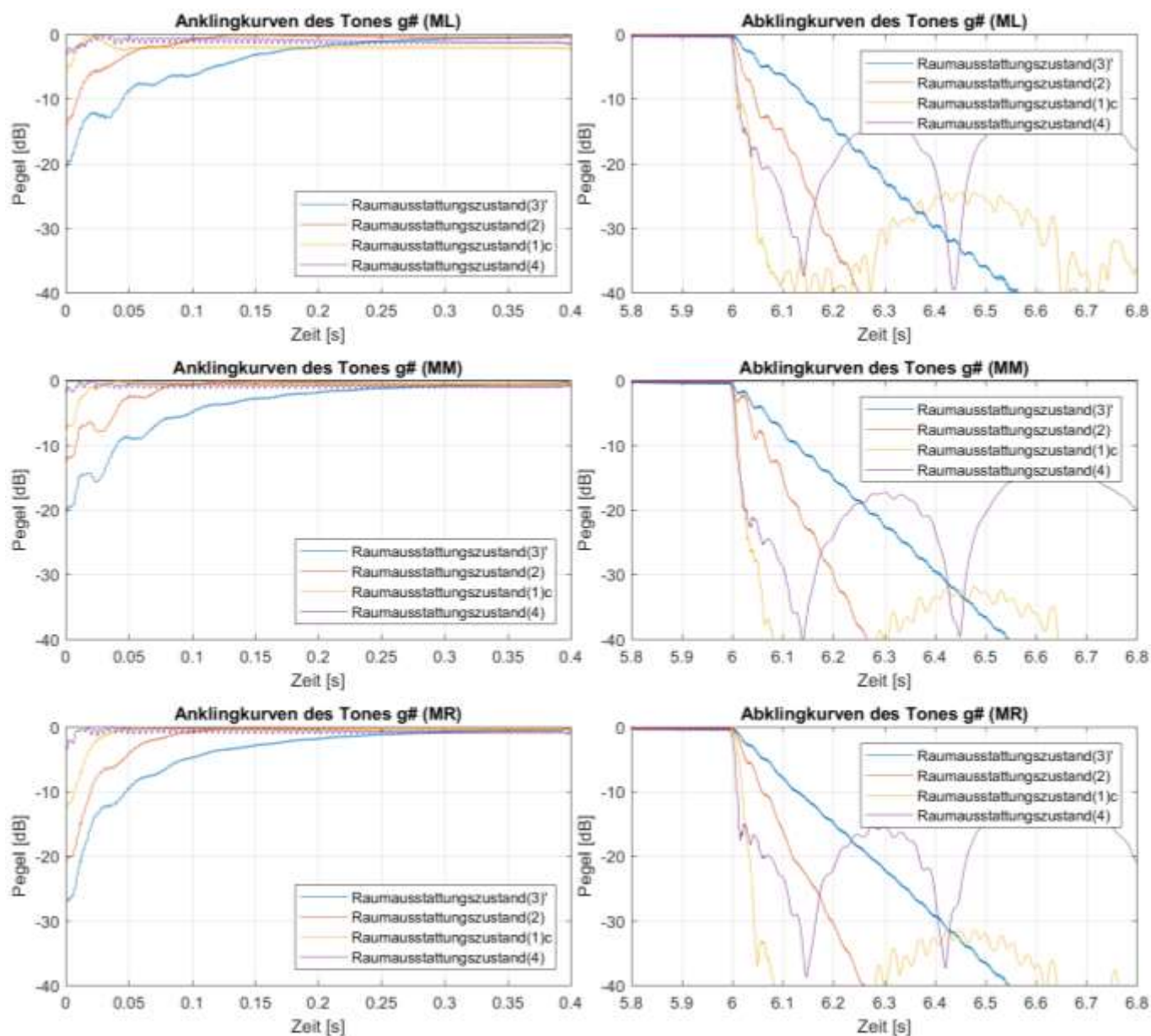


Abb. B1.21: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones g# ($\cong 209$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**), (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

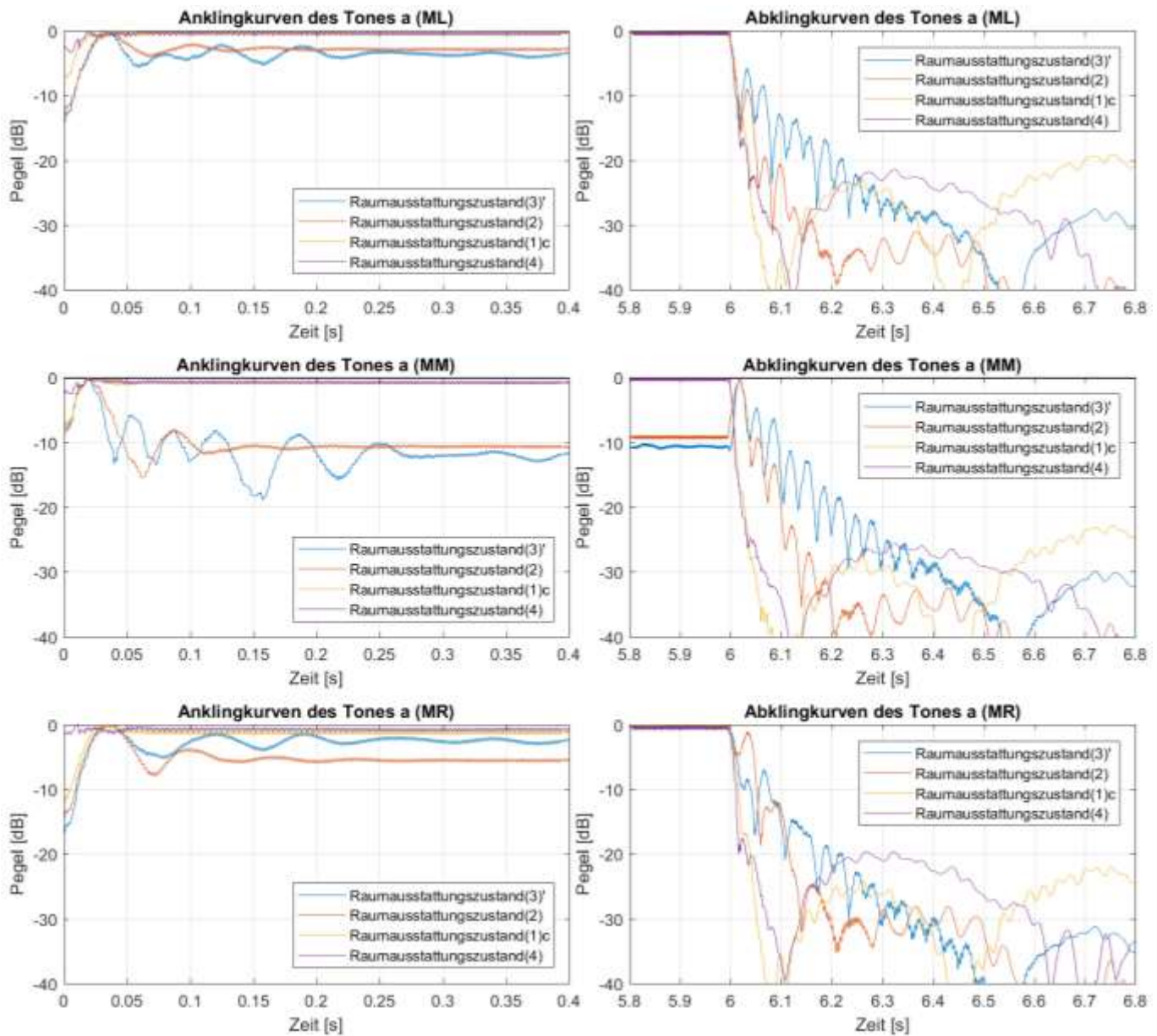


Abb. B1.22: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones a ($\cong 222$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

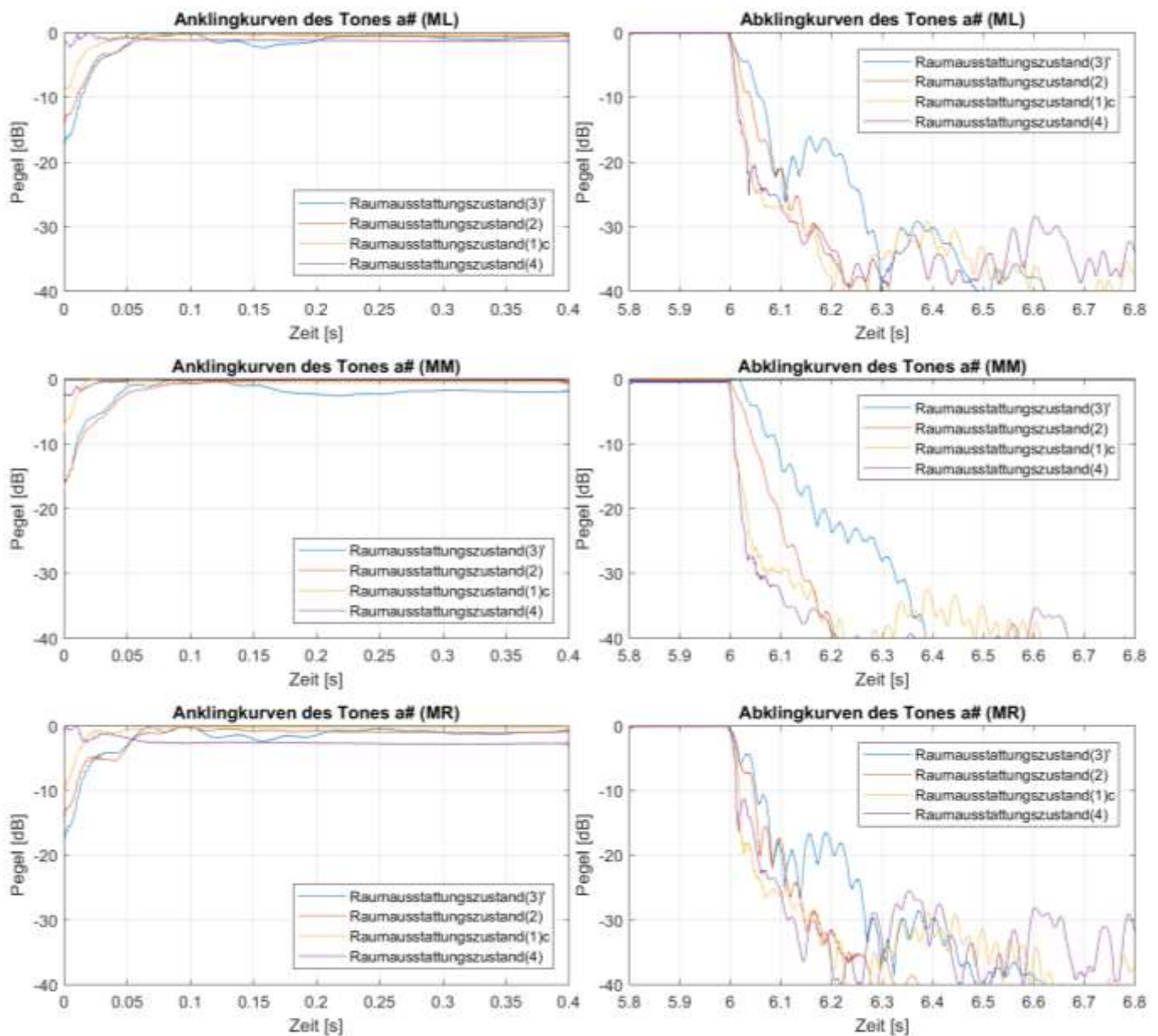


Abb. B1.23: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones a# ($\cong 235$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3**), (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

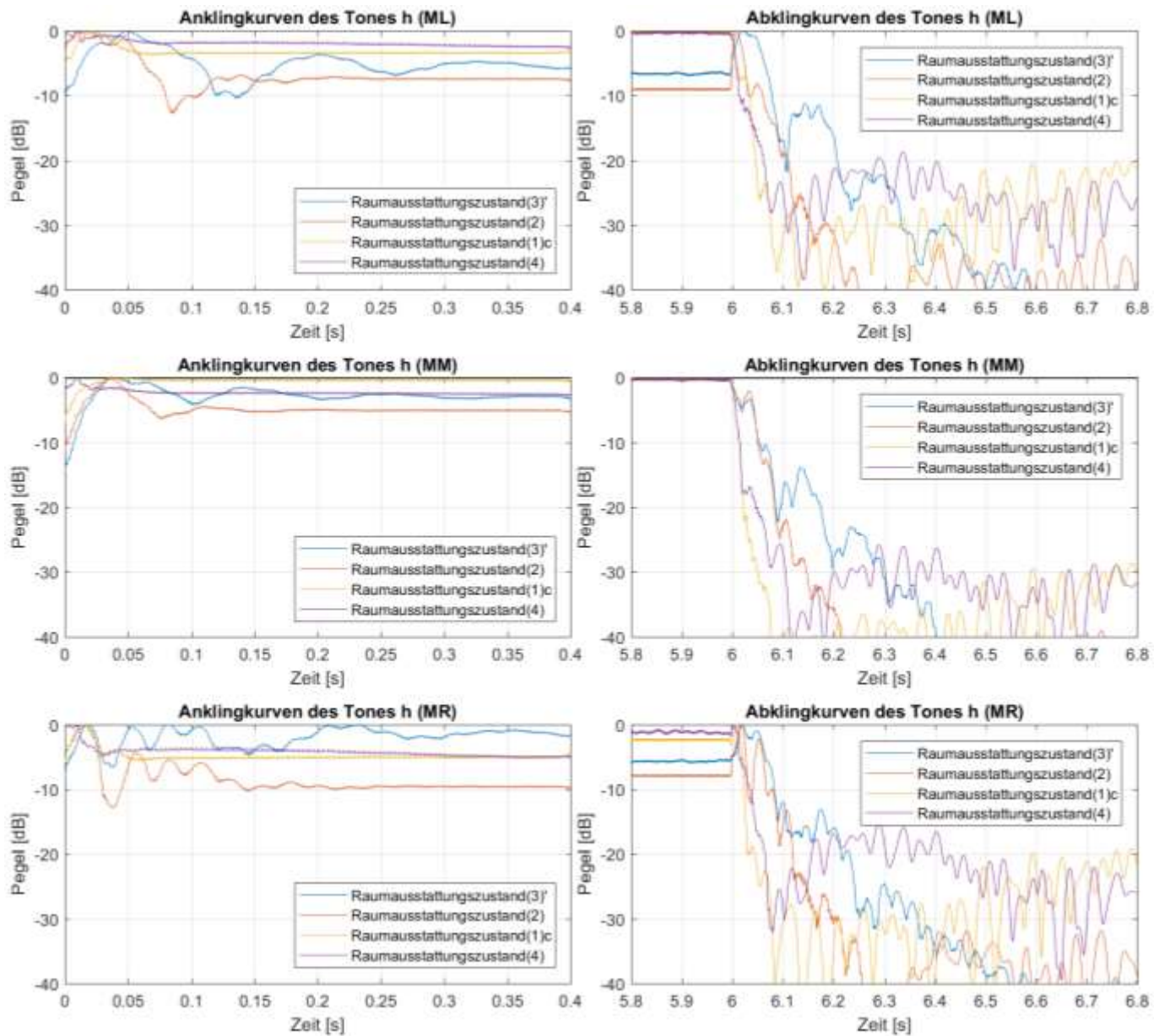


Abb. B1.24: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones h ($\cong 249$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**, **(2)**, **(1)c** und **(4)** sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

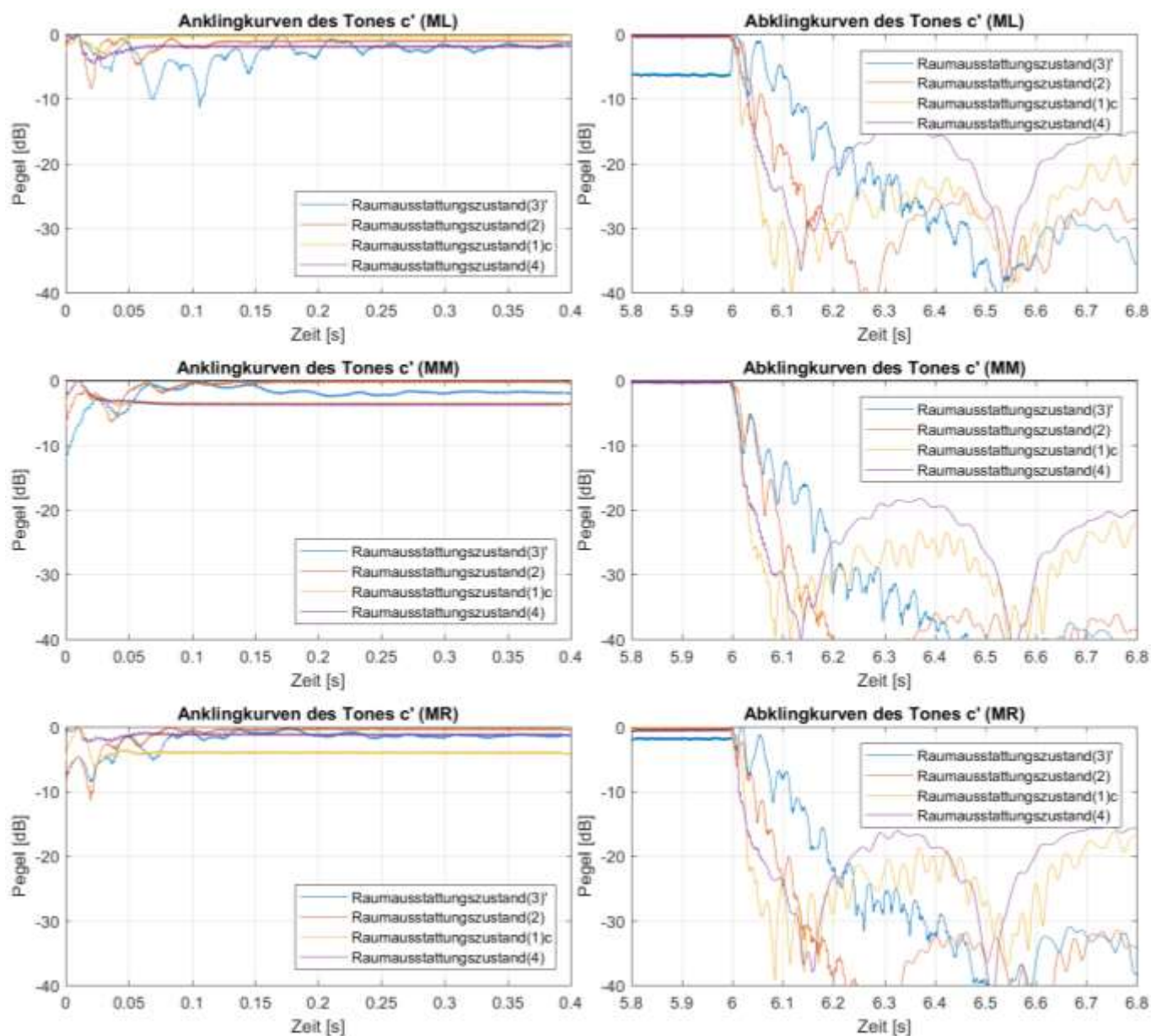


Abb. B1.25: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones c' ($\cong 263$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**), (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

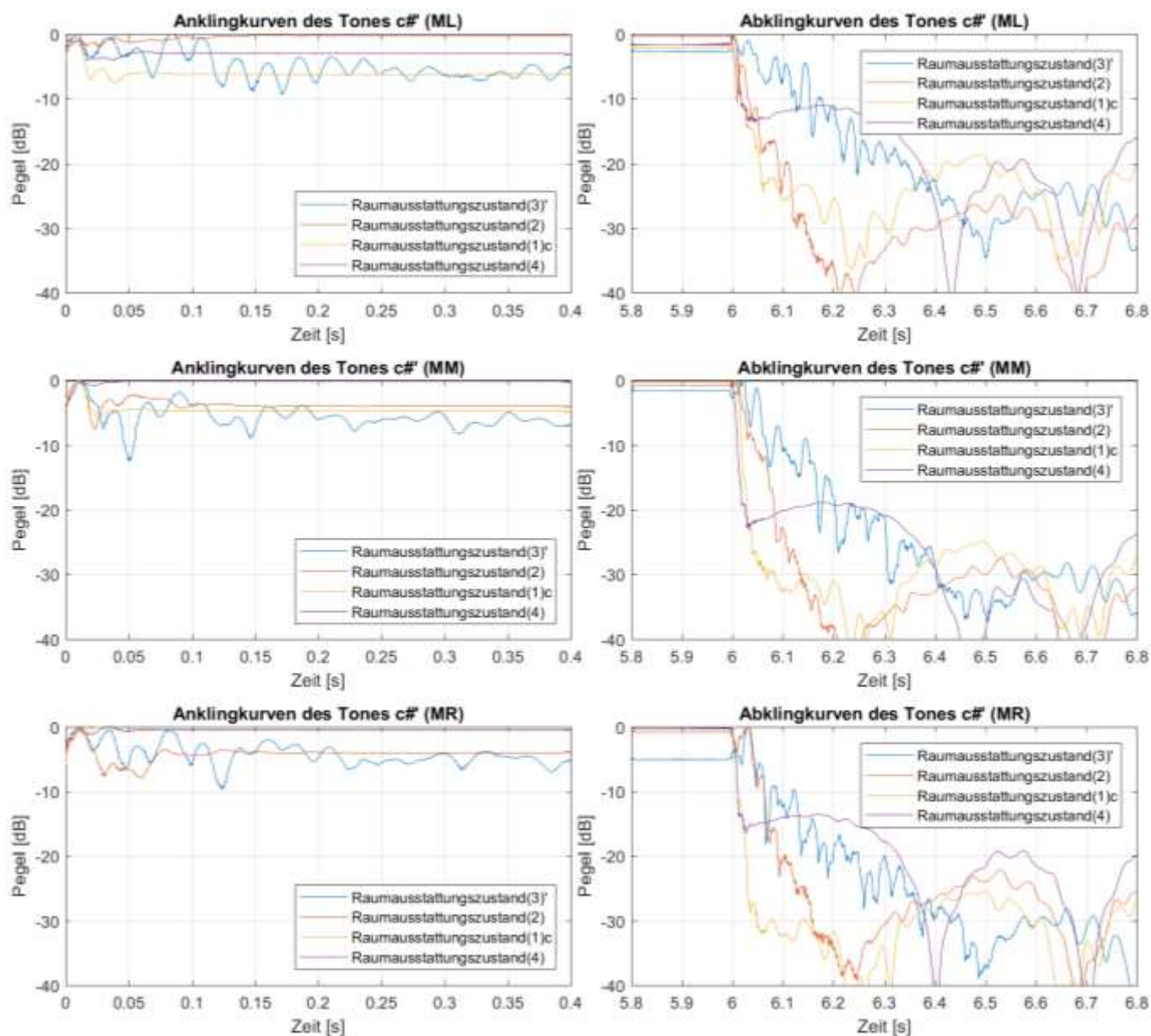


Abb. B1.26: An- und Abklingkurven der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q3**) mit der Grundfrequenz des Tones $c\#$ ($\cong 279$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**), (**2**), (**1c**) und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

Anhang B2 – Messsignalwellenformen (Marimbatonmessungen)

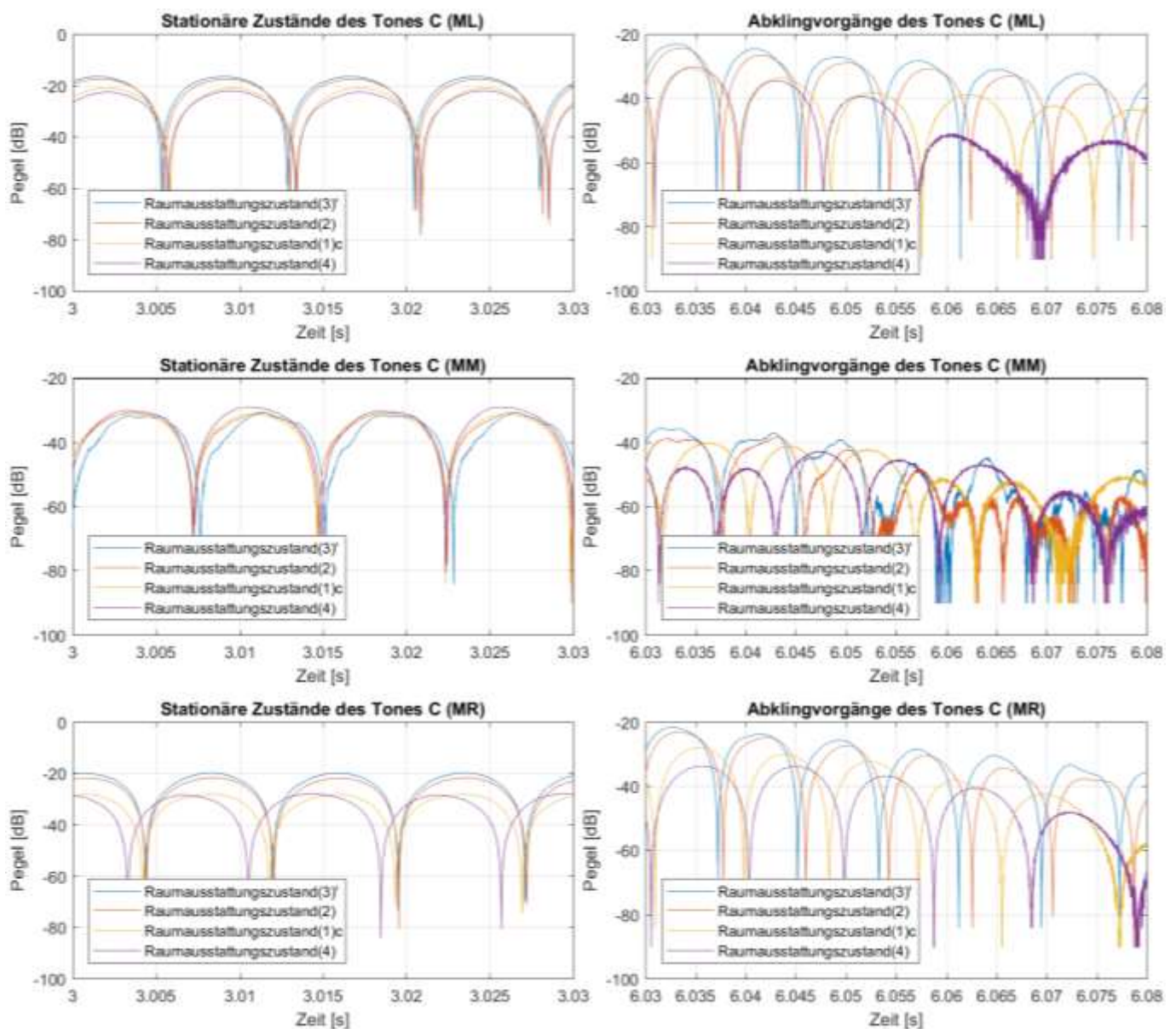


Abb. B2.1: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones C (≈ 66 Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

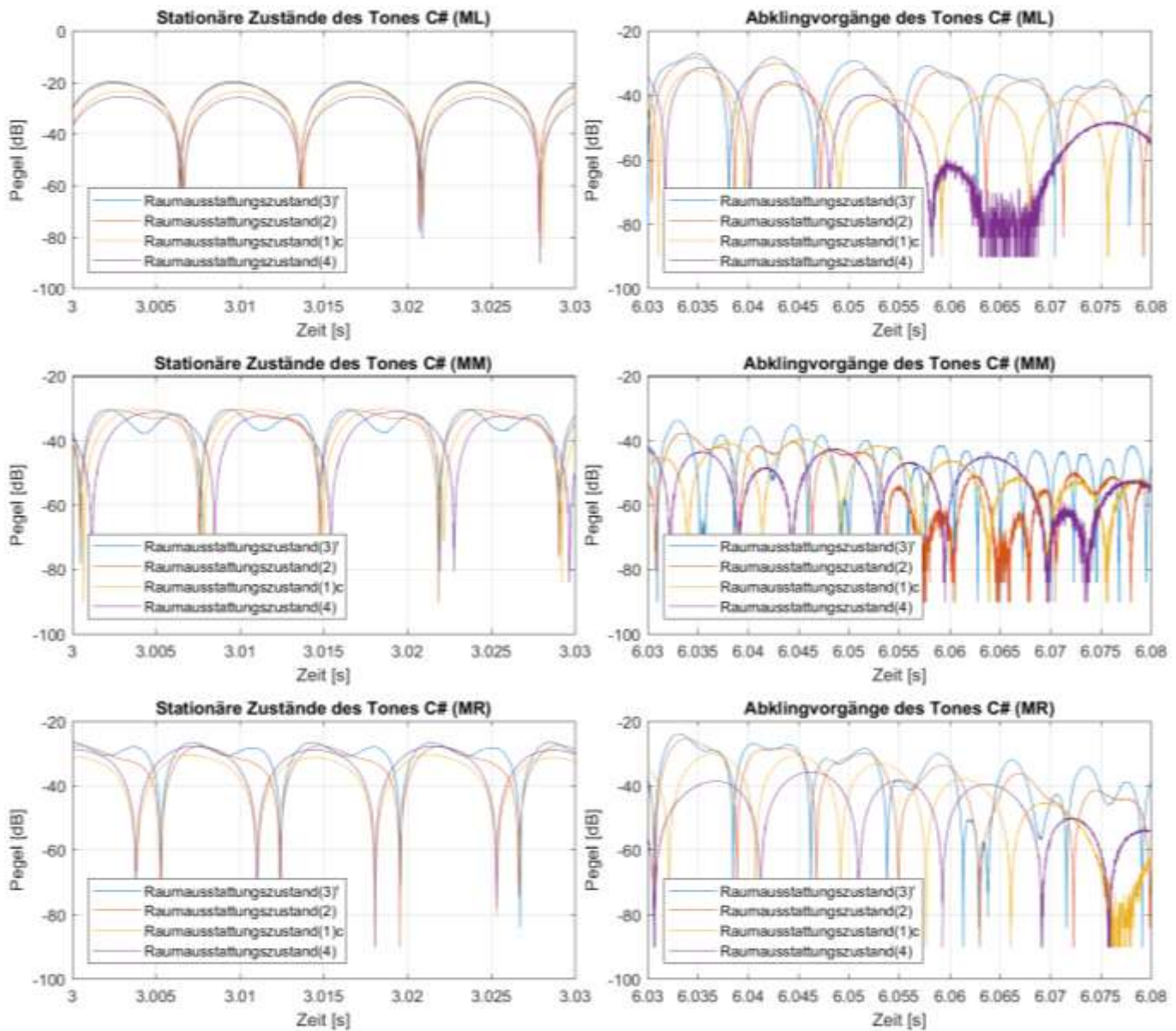


Abb. B2.2: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones C# ($\cong 70$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

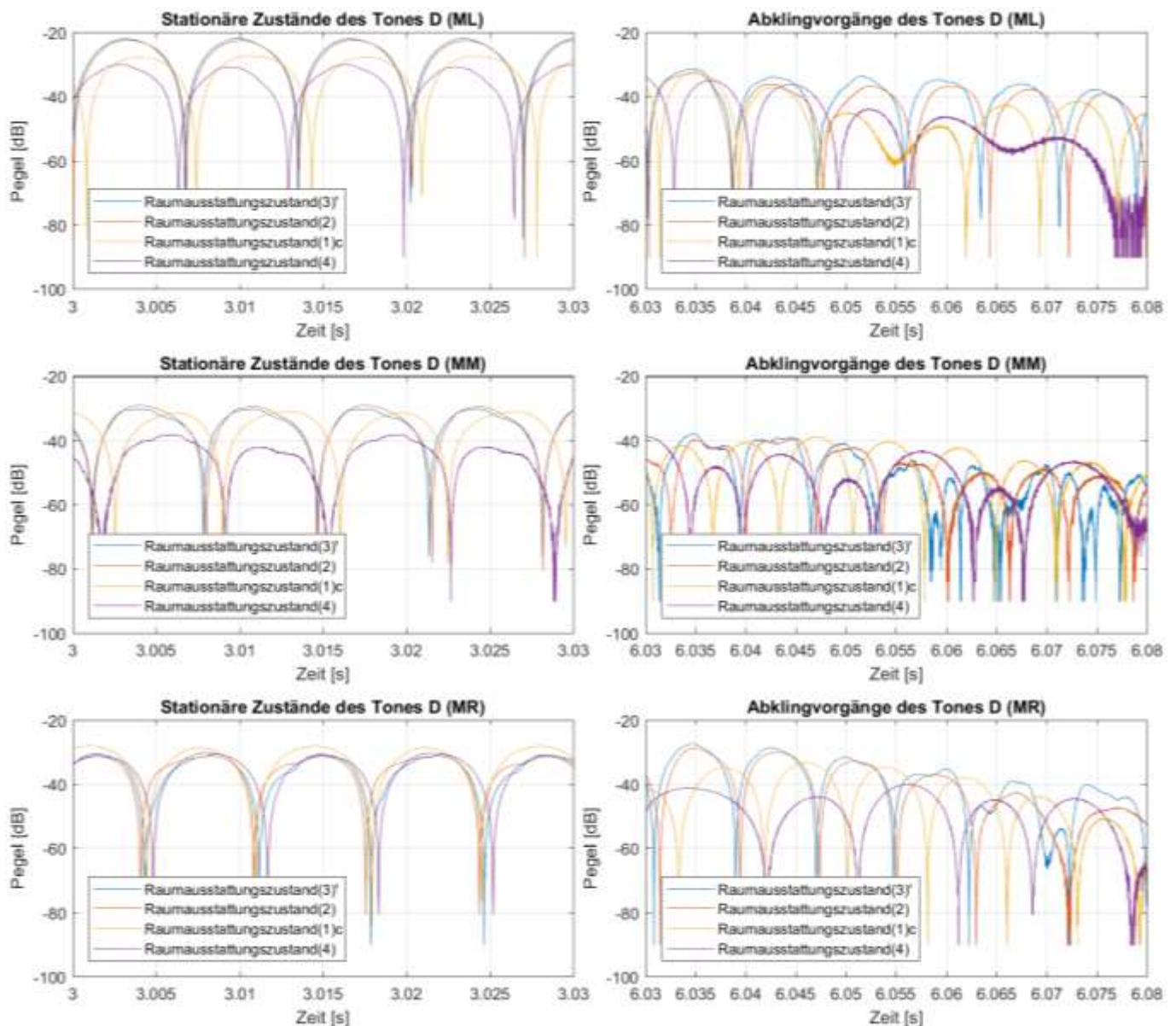


Abb. B2.3: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones D ($\hat{=}$ 74 Hz) für alle vier Raumausstattungsstände (**3**)^j, (**2**), (**1**)^c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

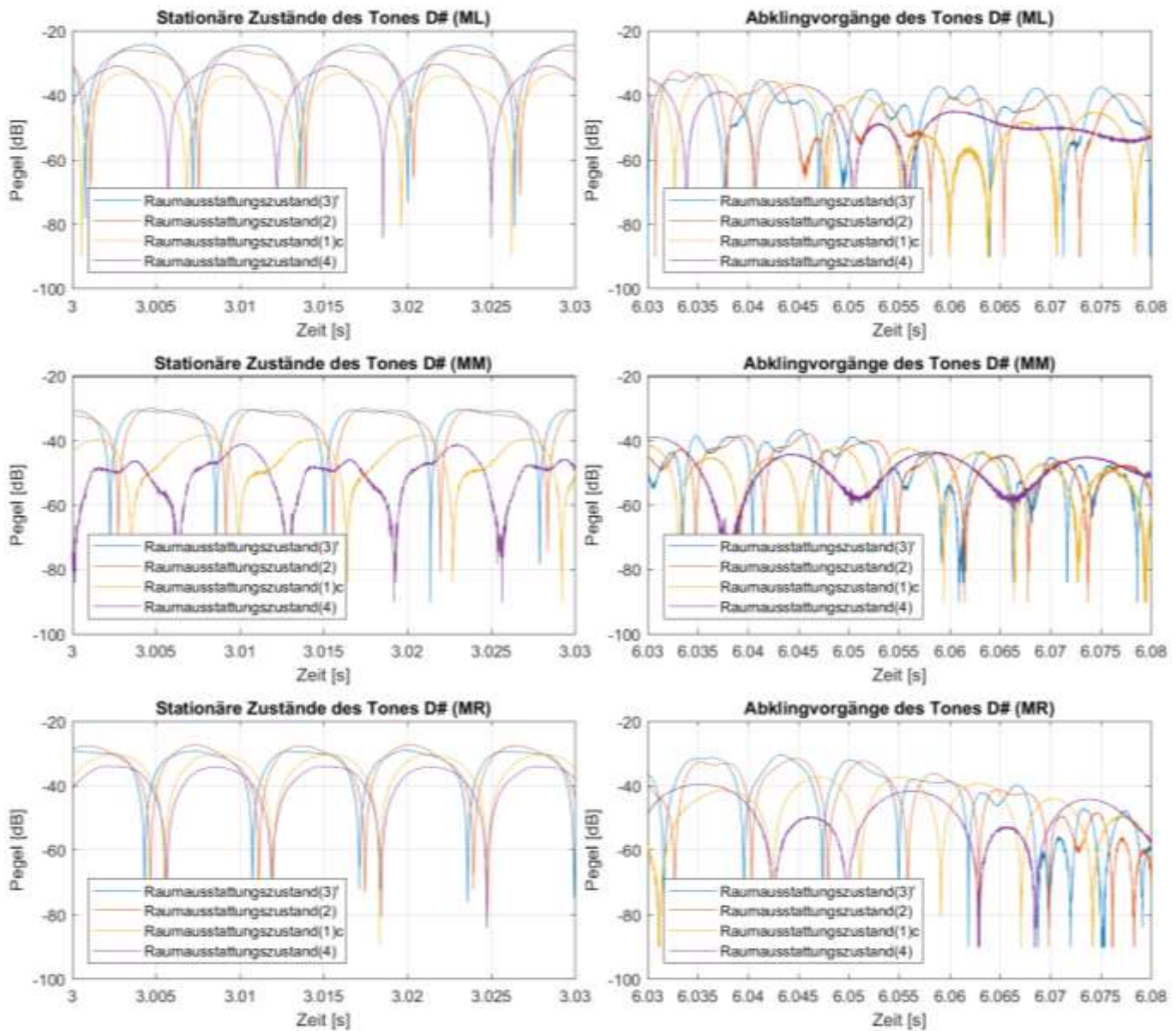


Abb. B2.4: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones D# ($\cong 78$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^{*}, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

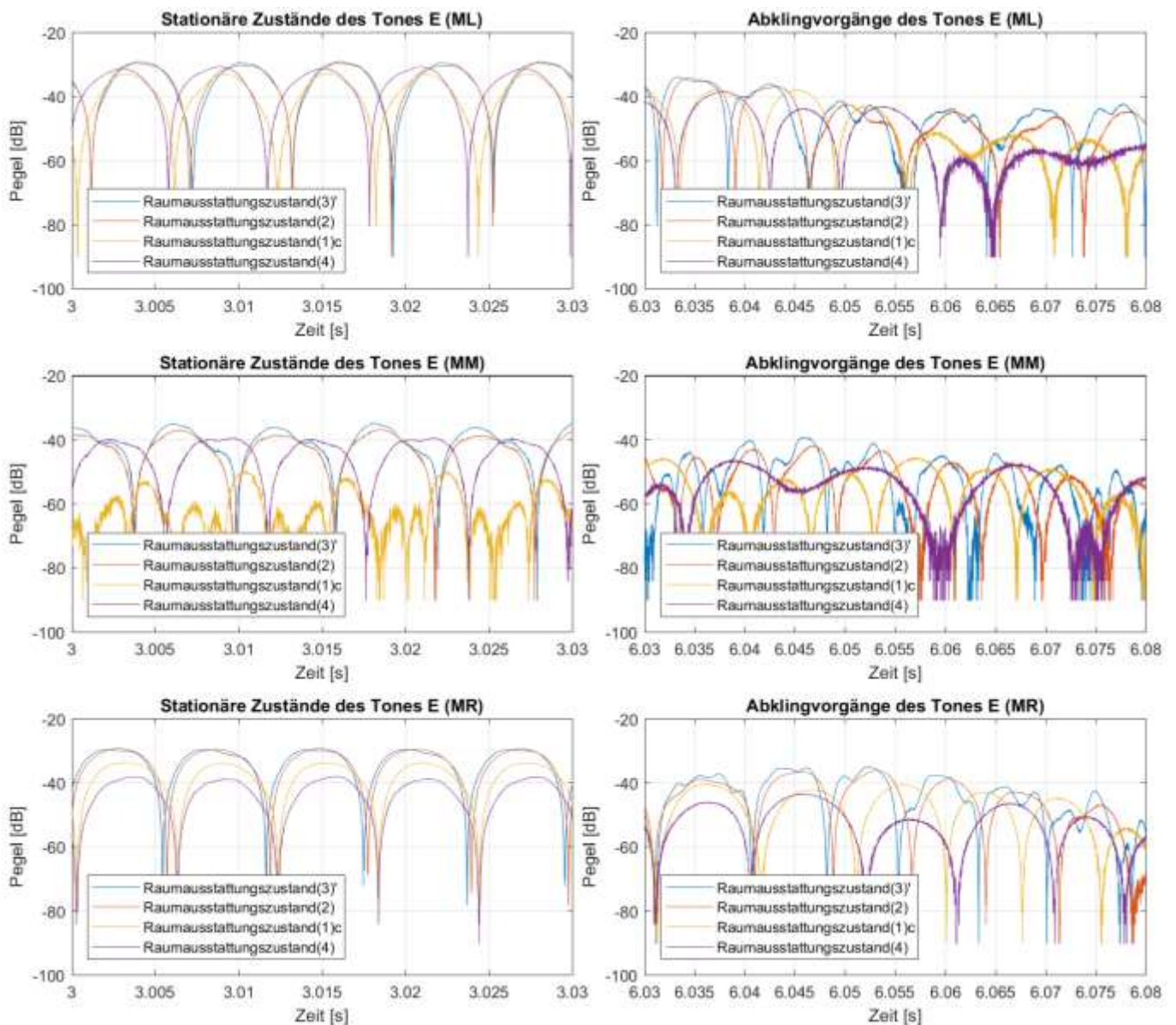


Abb. B2.5: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones E ($\cong 83$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (**3'**), (**2**), (**1c**) und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

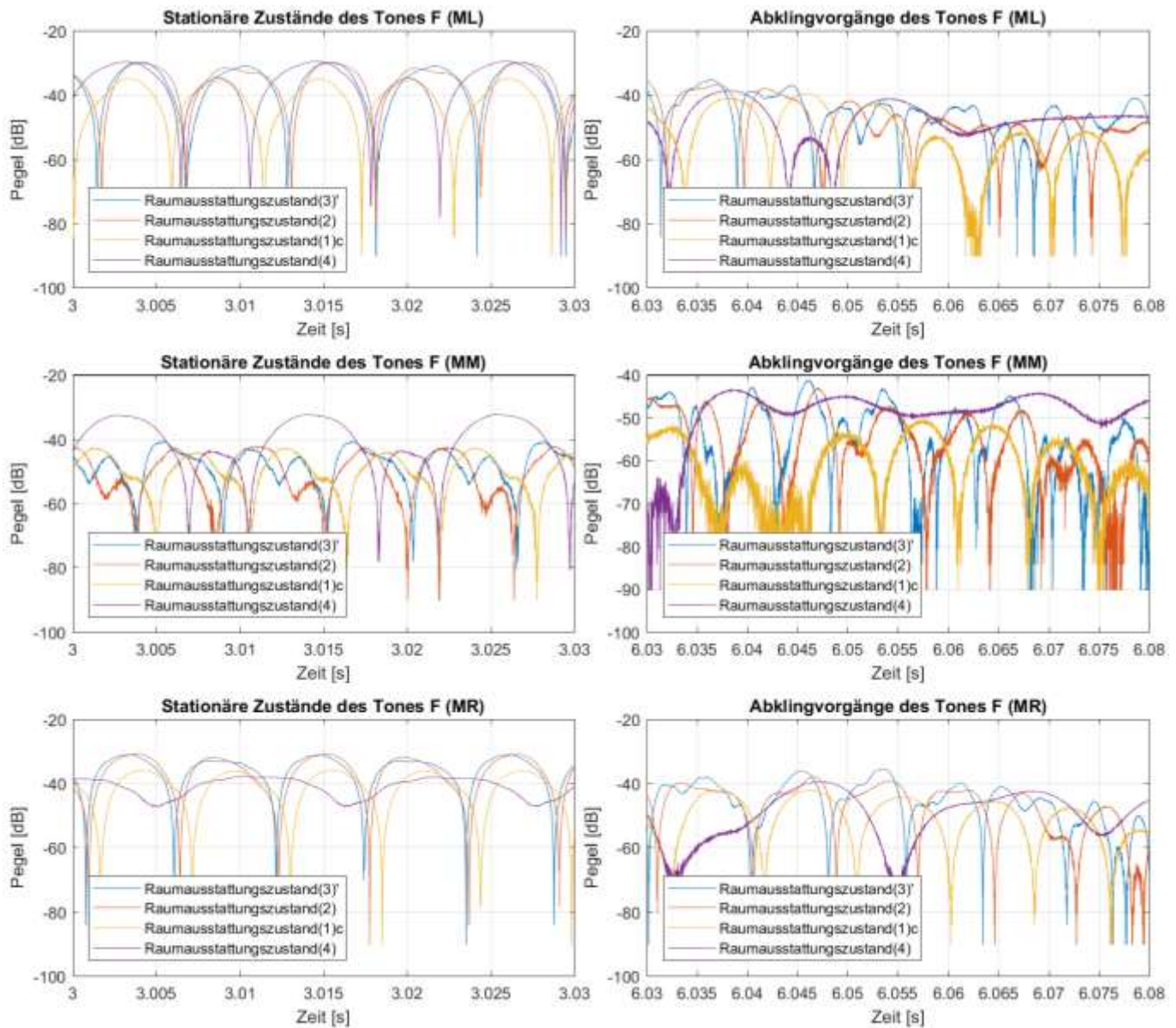


Abb. B2.6: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones F ($\cong 88$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

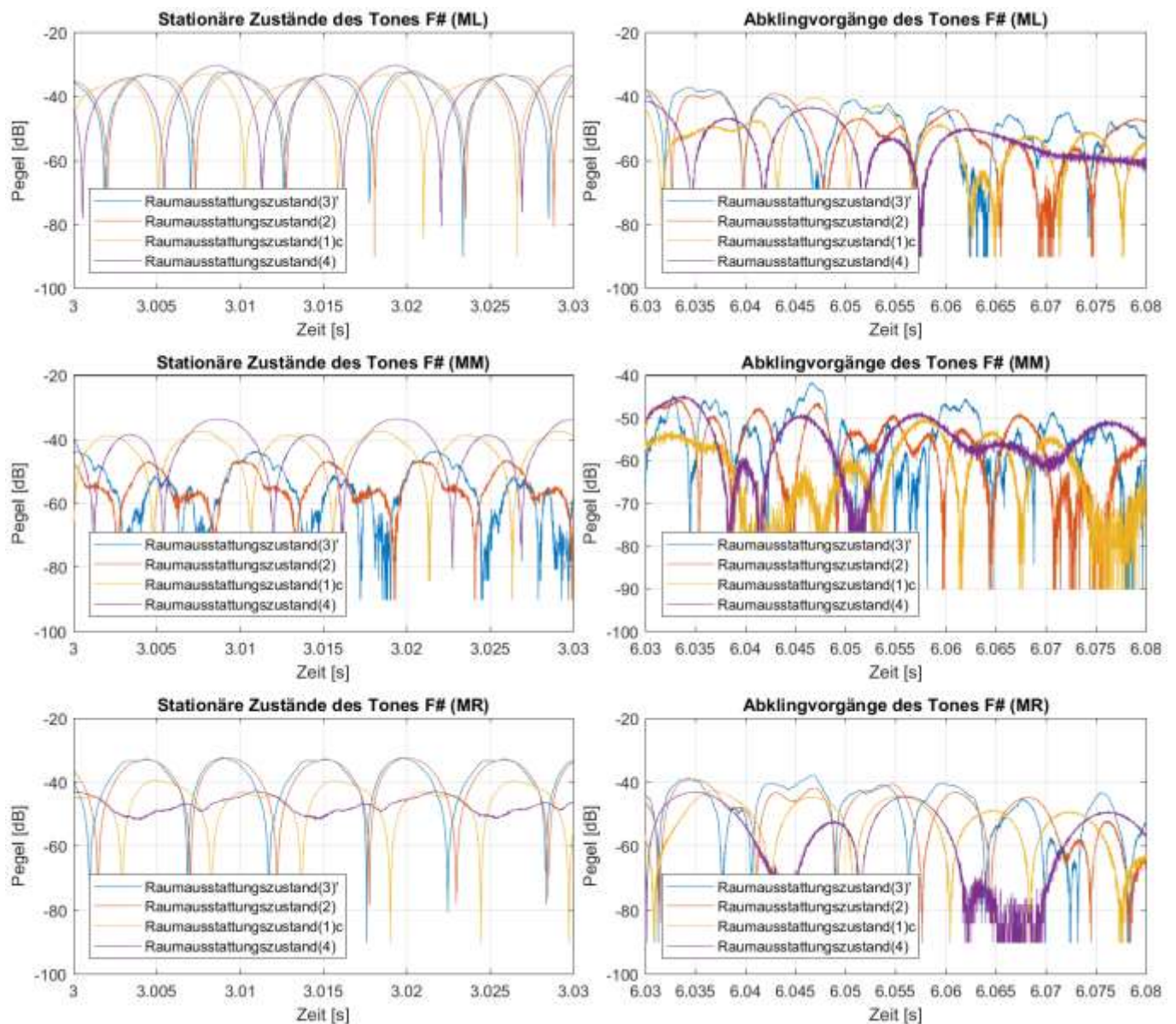


Abb. B2.7: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones F# ($\cong 93$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

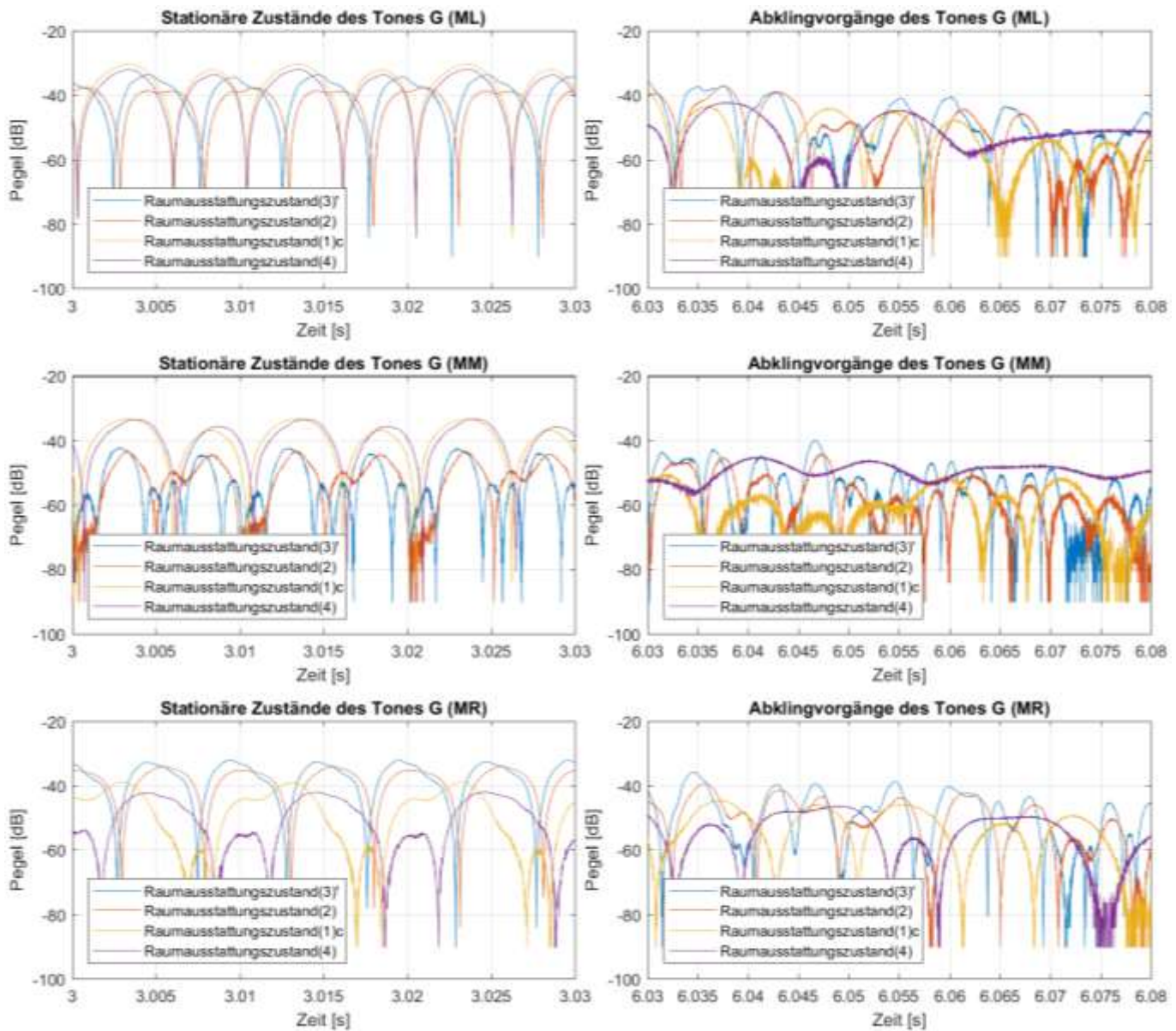


Abb. B2.8: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q1) mit der Grundfrequenz des Tones G ($\cong 99$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3), (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

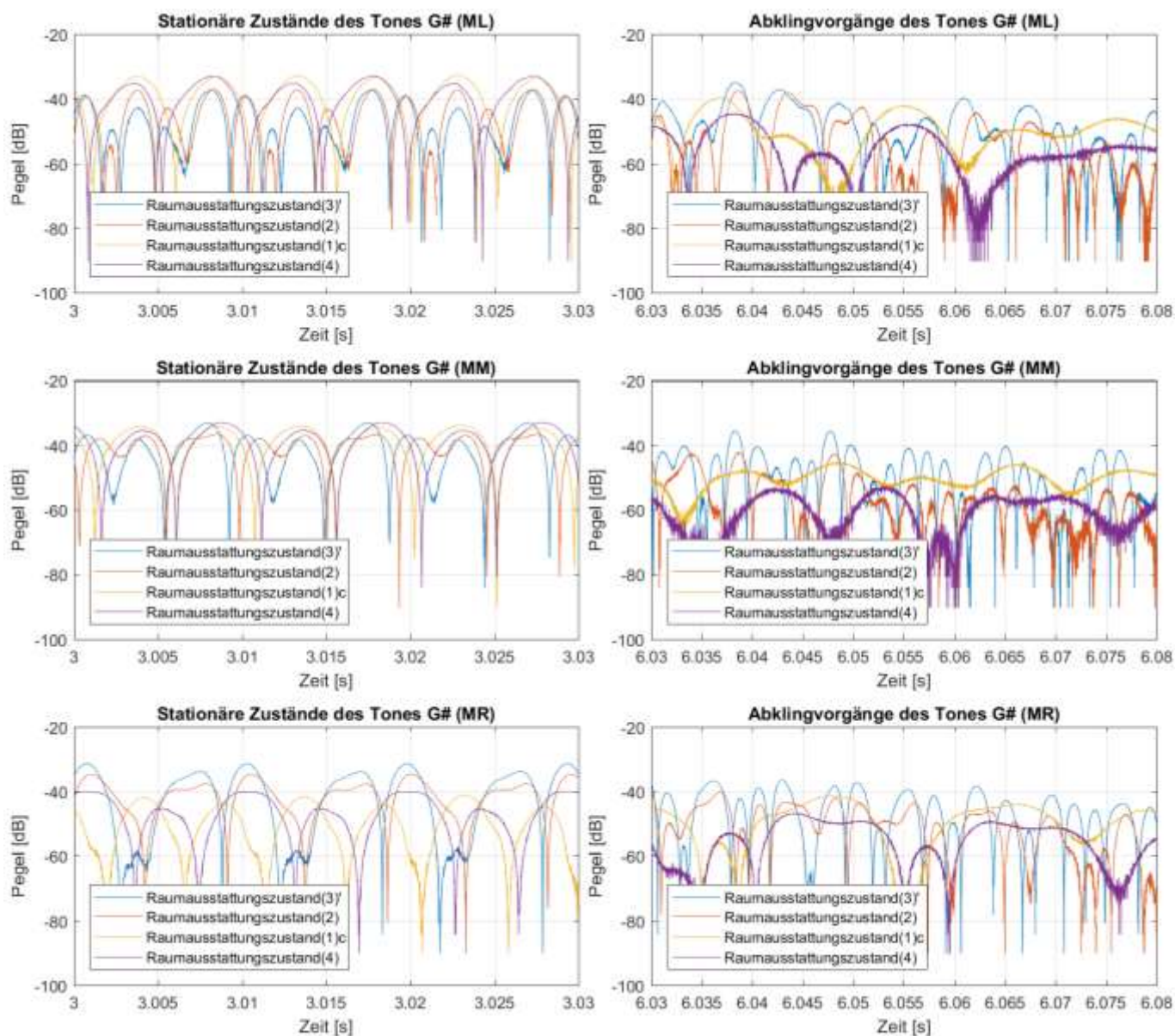


Abb. B2.9: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (**Q1**) mit der Grundfrequenz des Tones G# ($\cong 105$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (**3**), (**2**), (**1**)c und (**4**) sowie die Mikrofonpositionen (**ML**), (**MM**) und (**MR**)

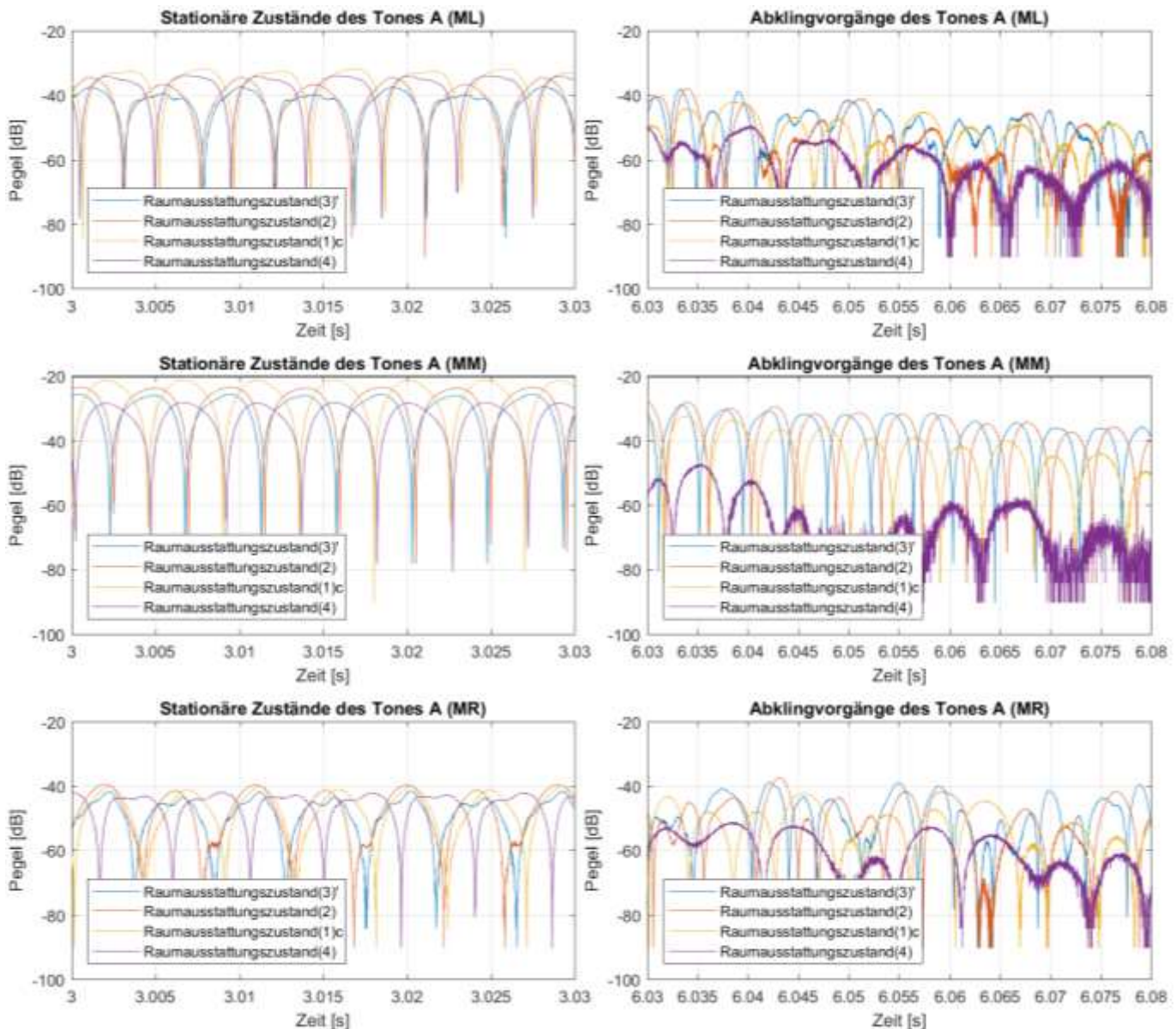


Abb. B2.10: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones A ($\cong 111$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)^c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

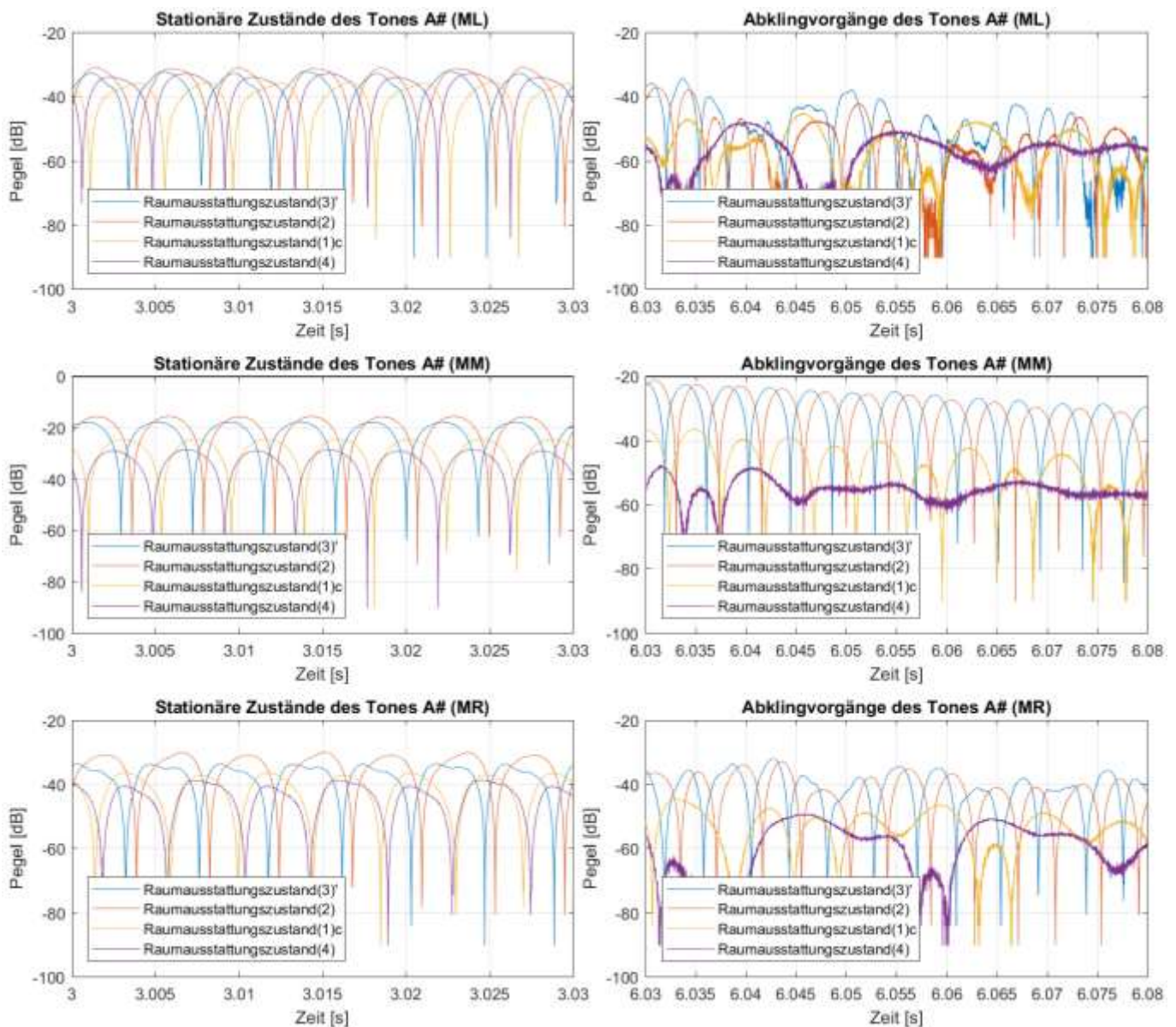


Abb. B2.11: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones A# ($\cong 117$ Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

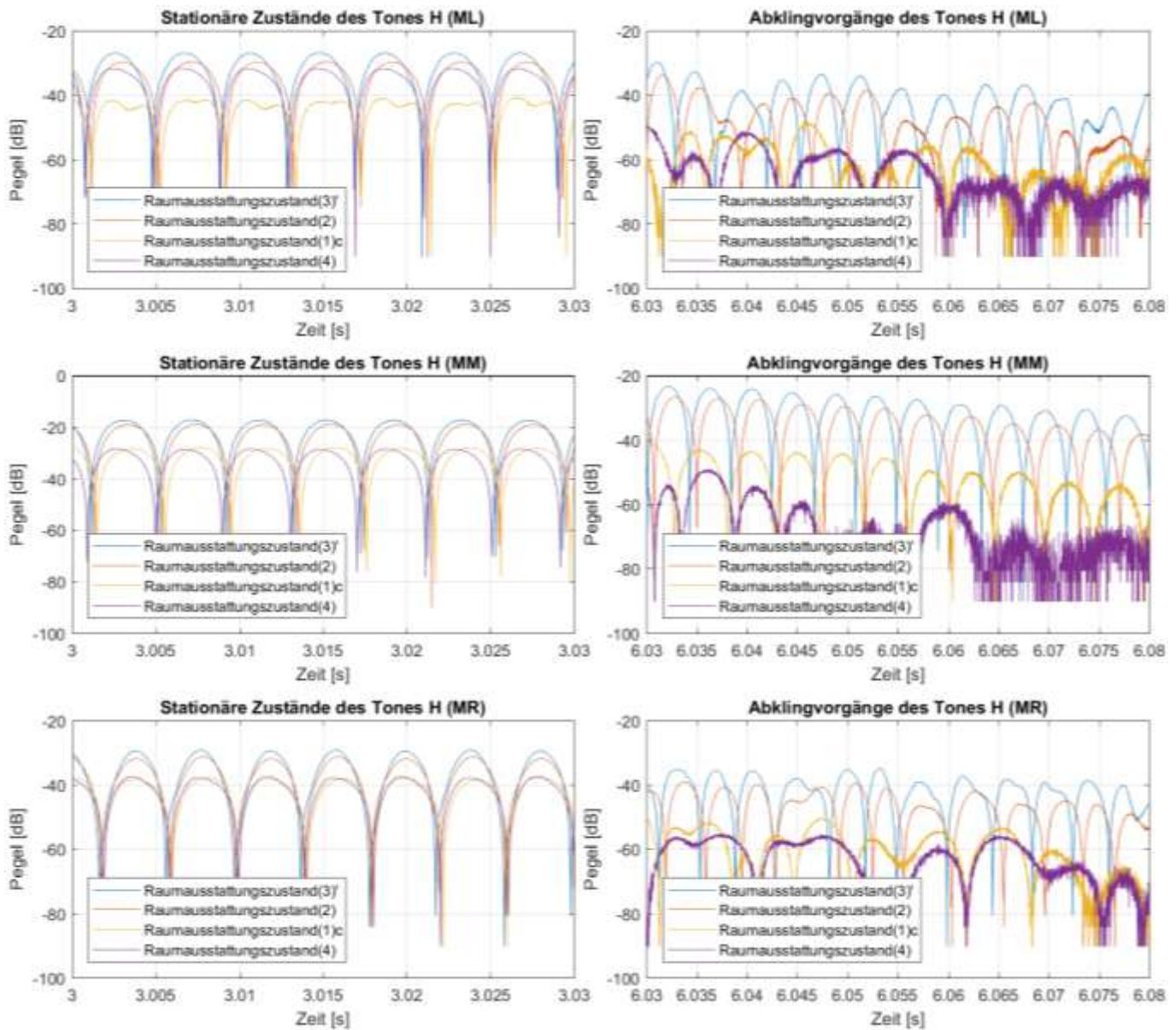


Abb. B2.12: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones H ($\cong 124$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

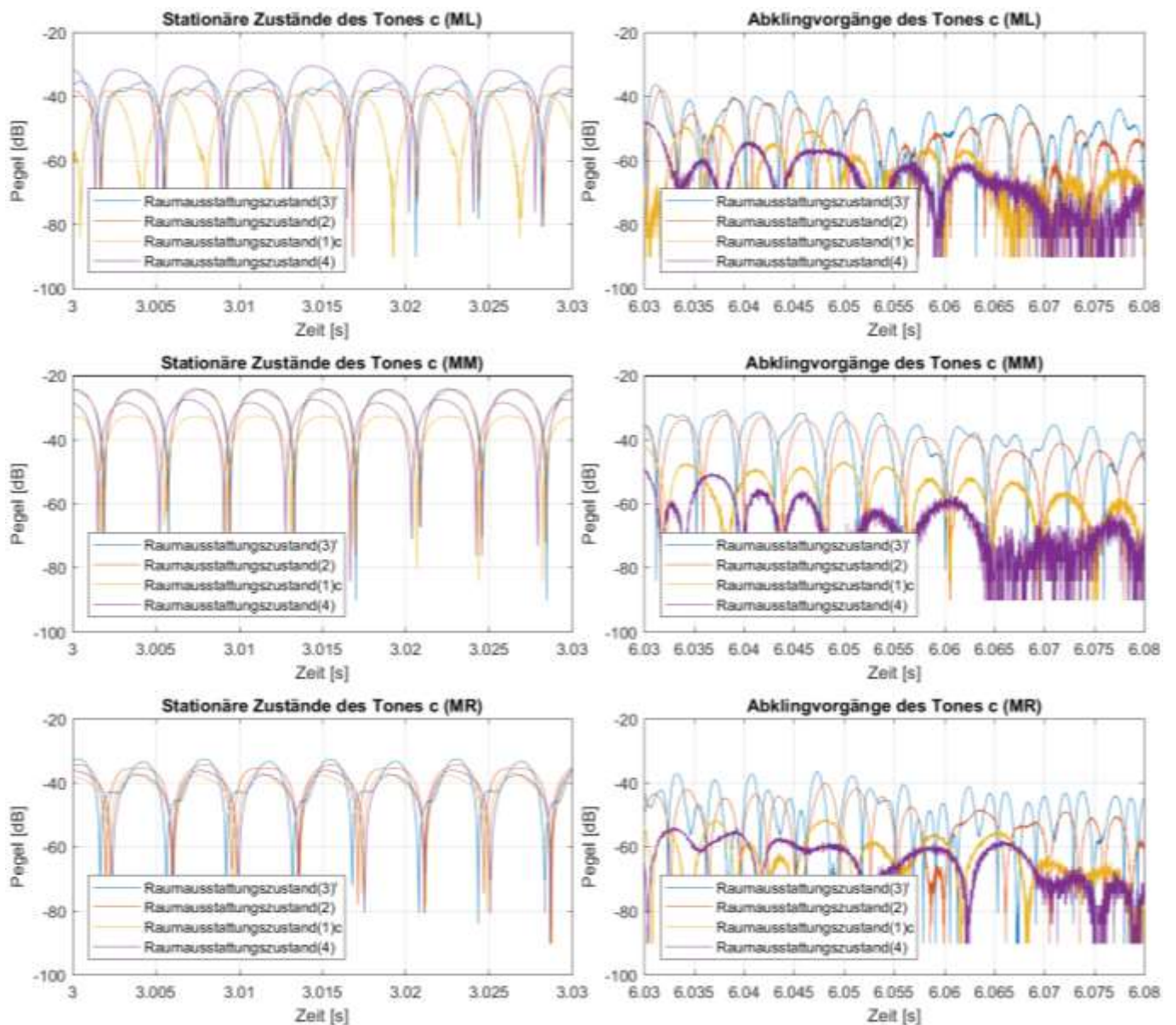


Abb. B2.13: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones c (≈ 132 Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

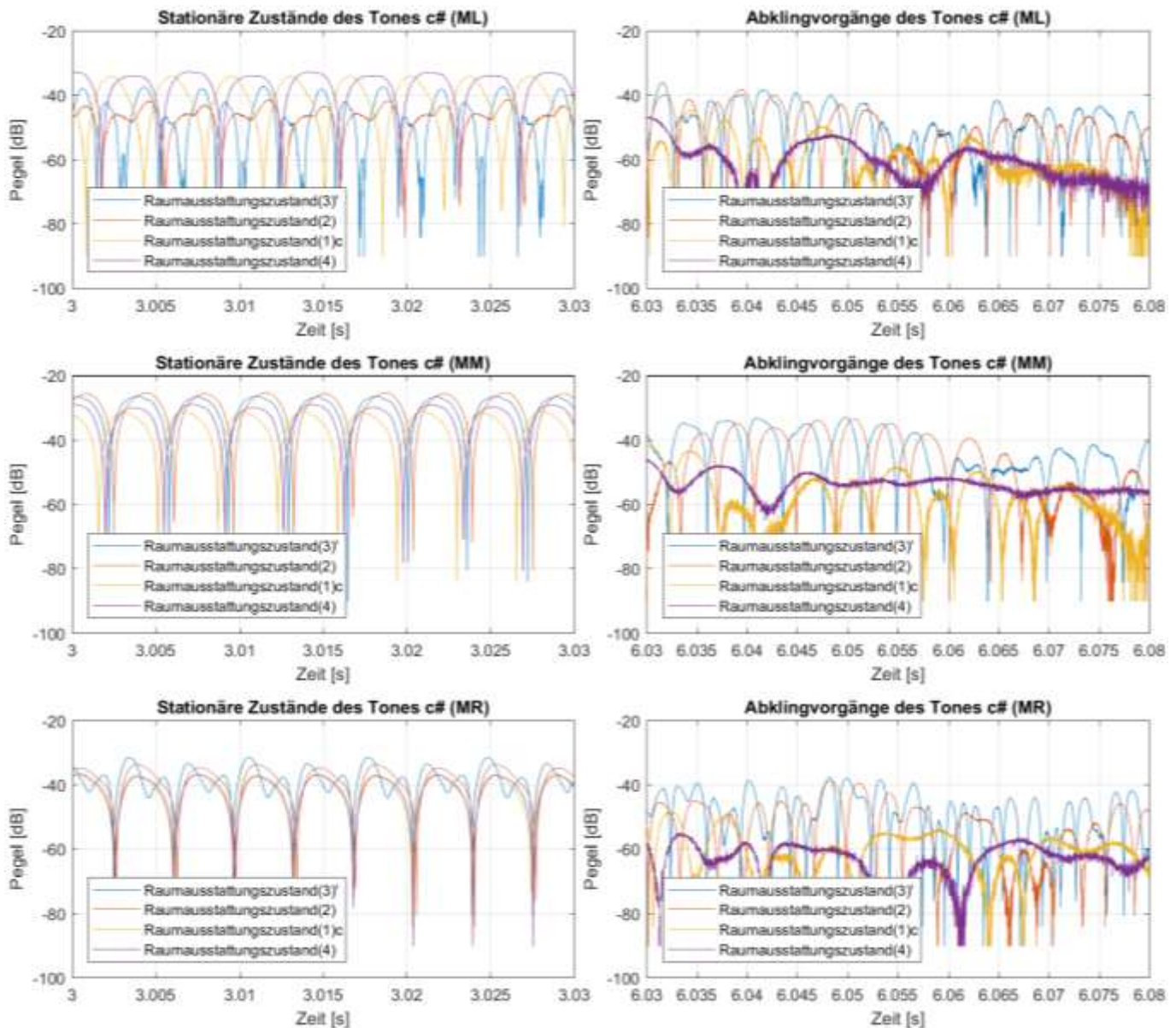


Abb. B2.14: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones c# (≈ 140 Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)j, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

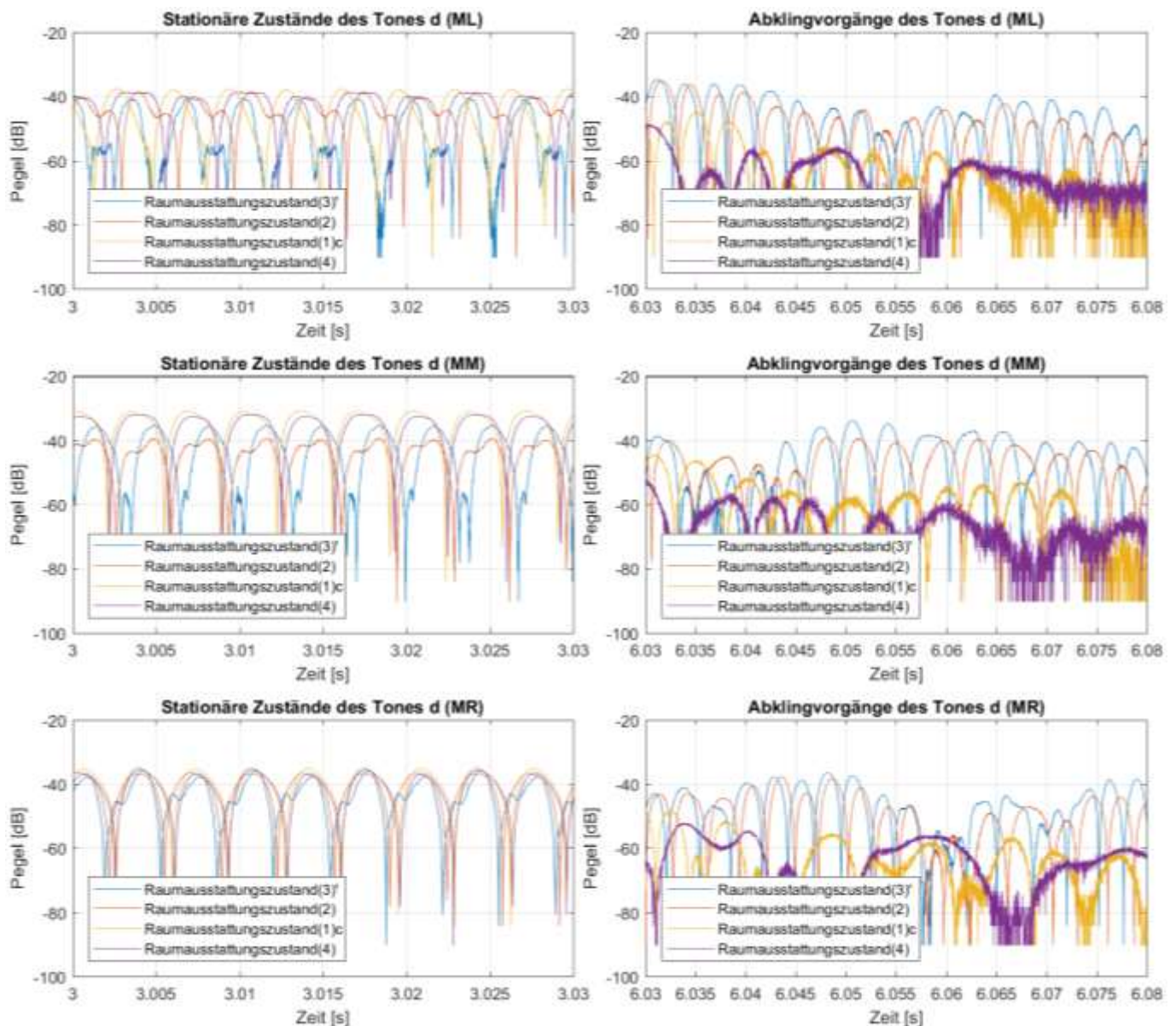


Abb. B2.15: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones d ($\cong 148$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

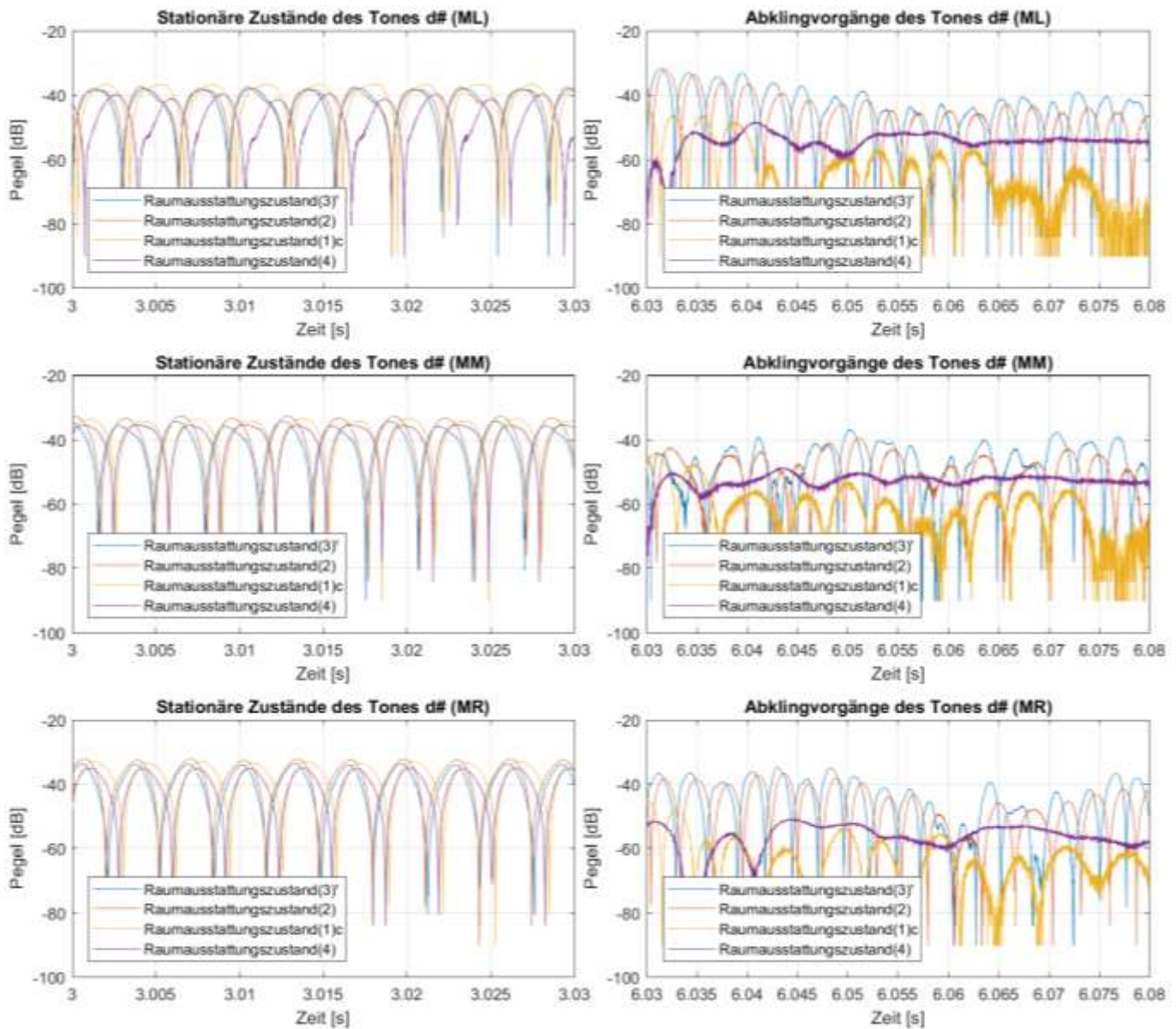


Abb. B2.16: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones d# ($\cong 157$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

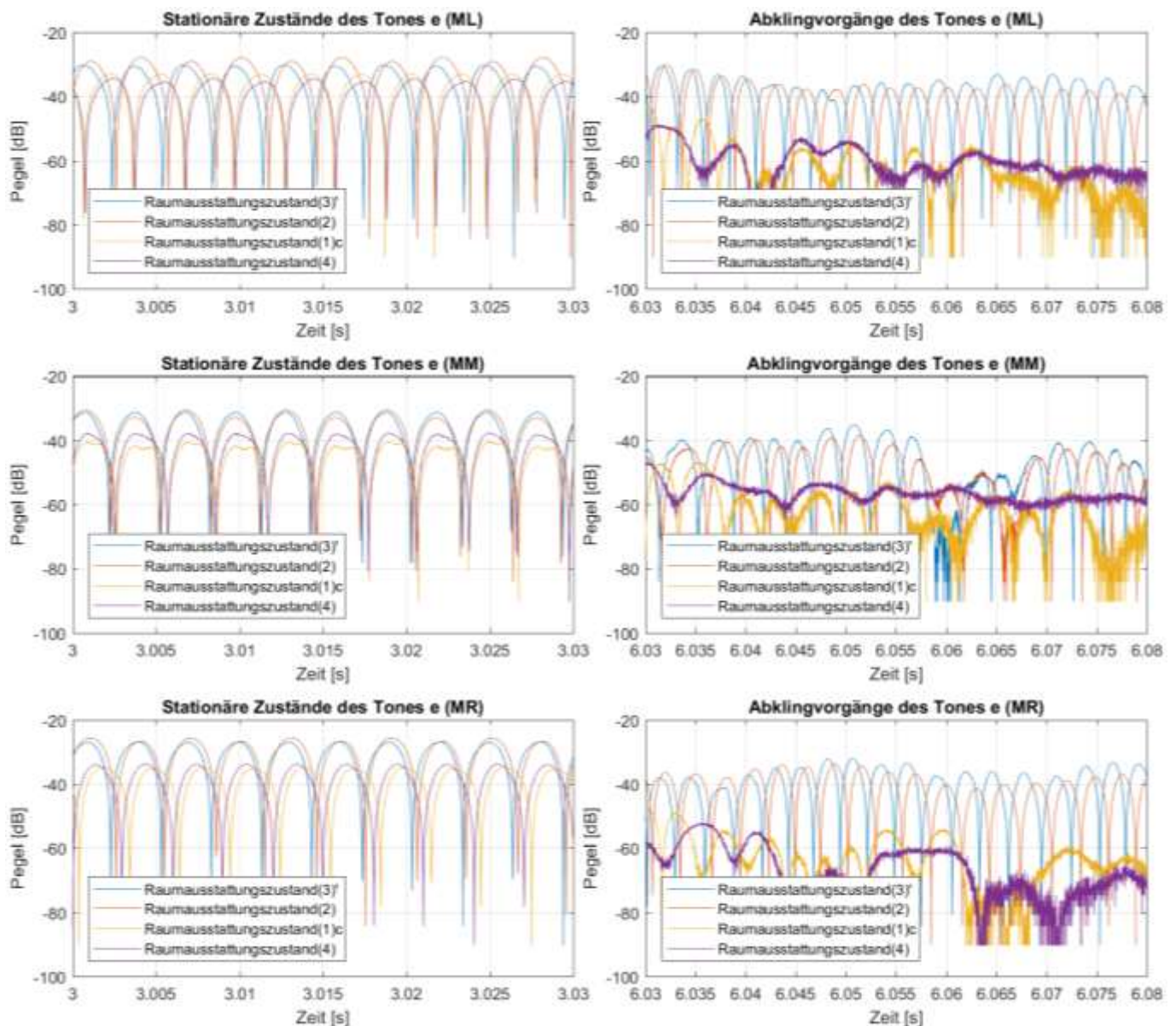


Abb. B2.17: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q2) mit der Grundfrequenz des Tones e (≈ 166 Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

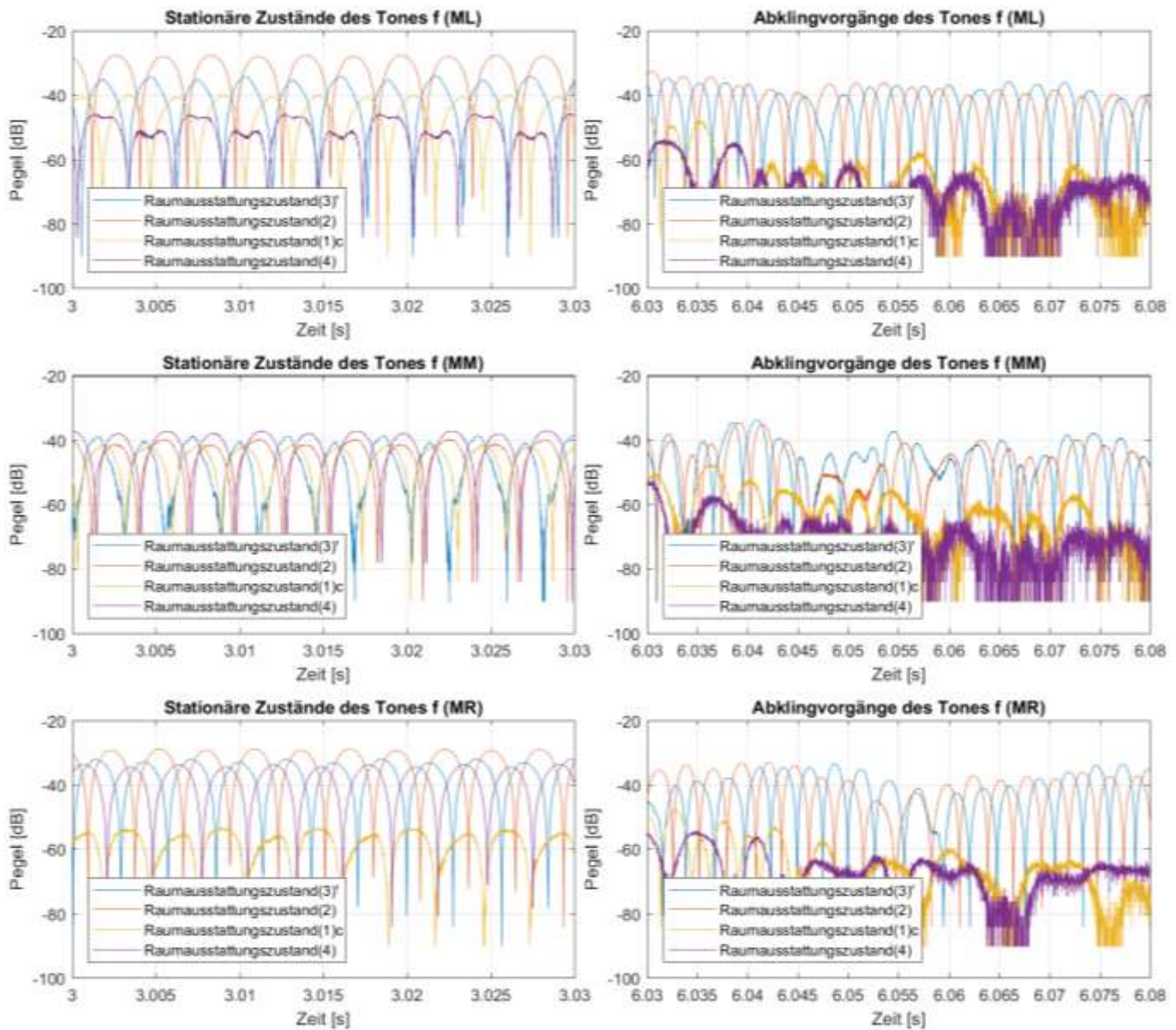


Abb. B2.18: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones f ($\cong 176$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^{*}, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

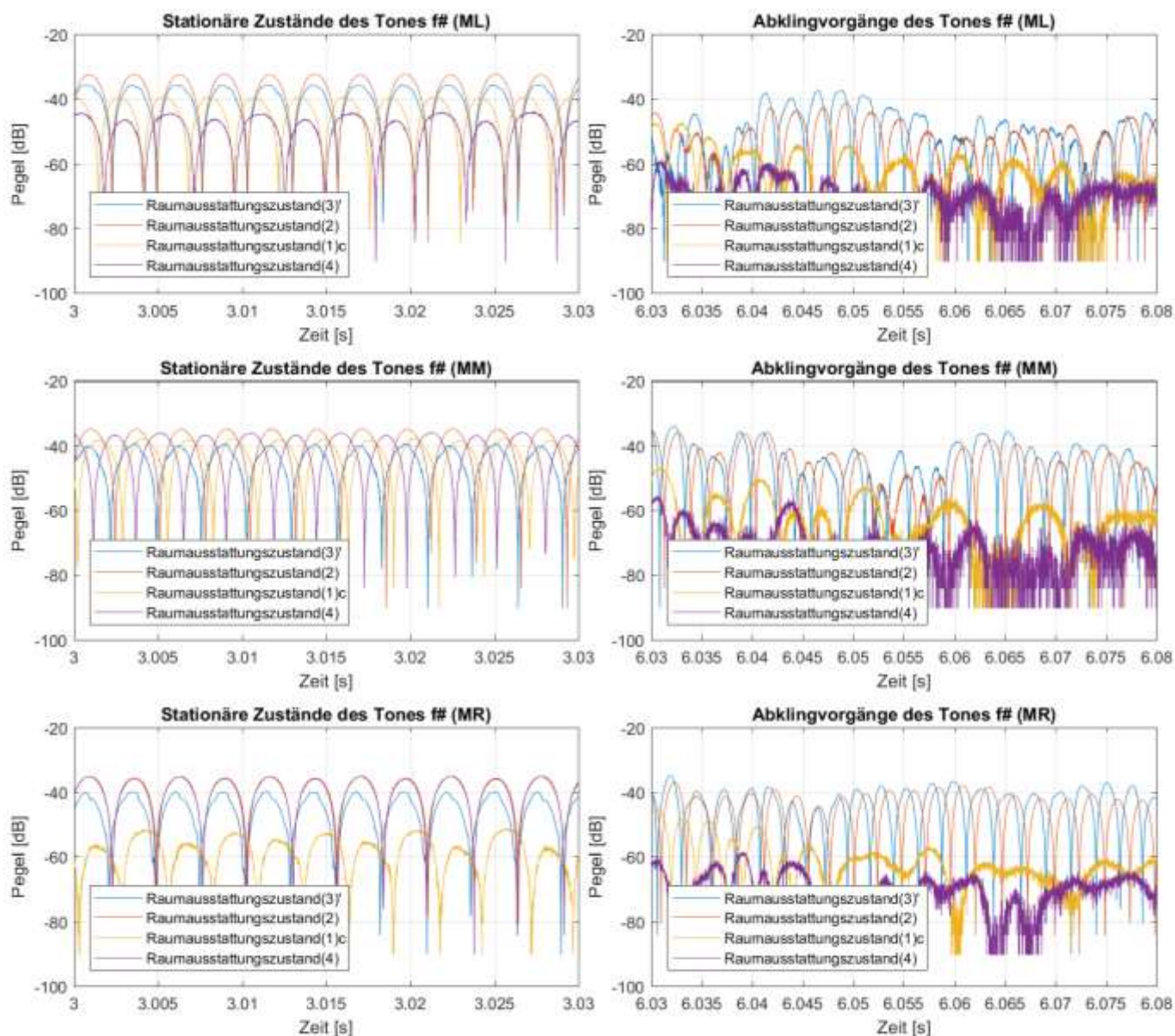


Abb. B2.19: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones f# ($\cong 186$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

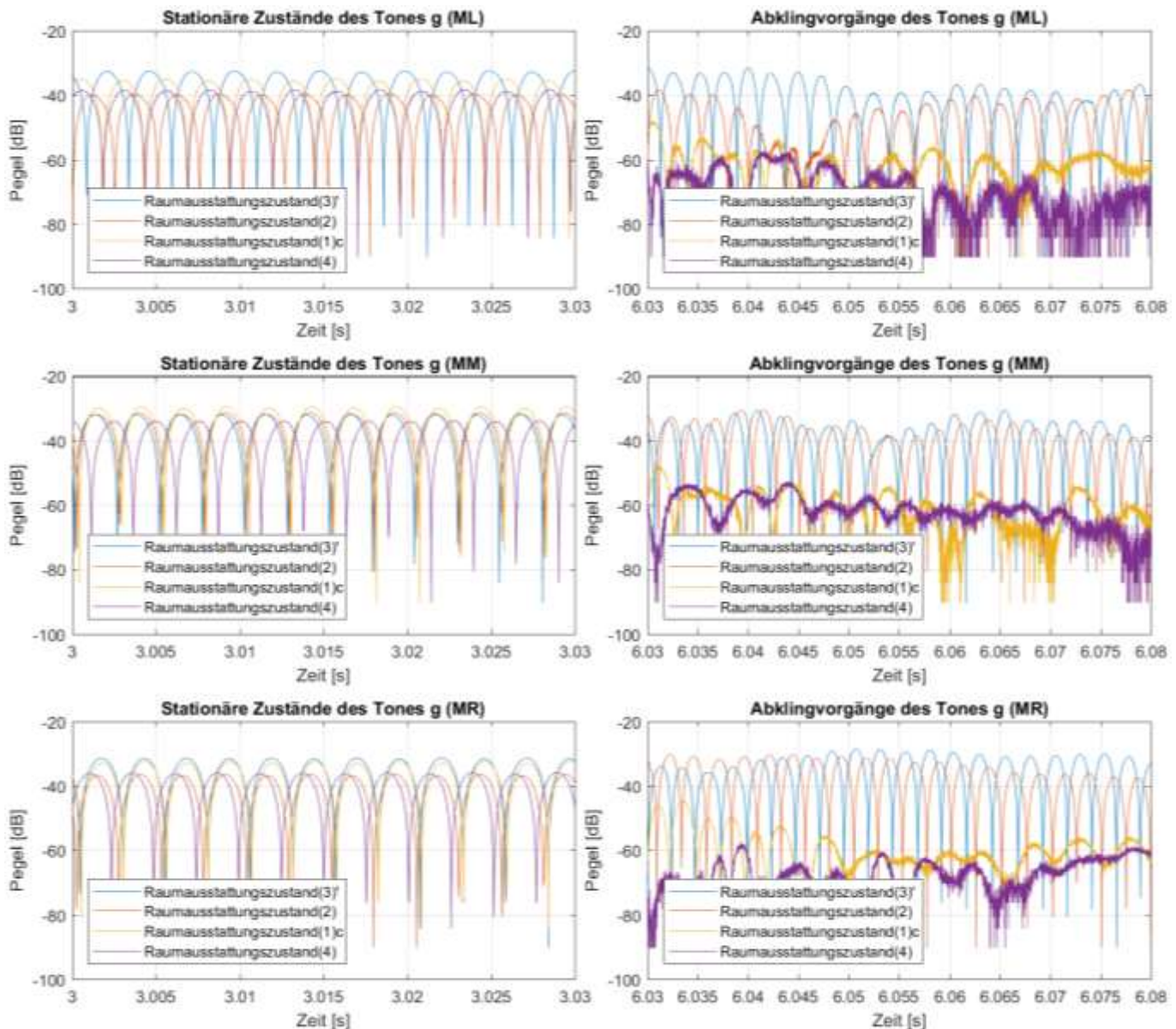


Abb. B2.20: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones g (≈ 197 Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)^{*}, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

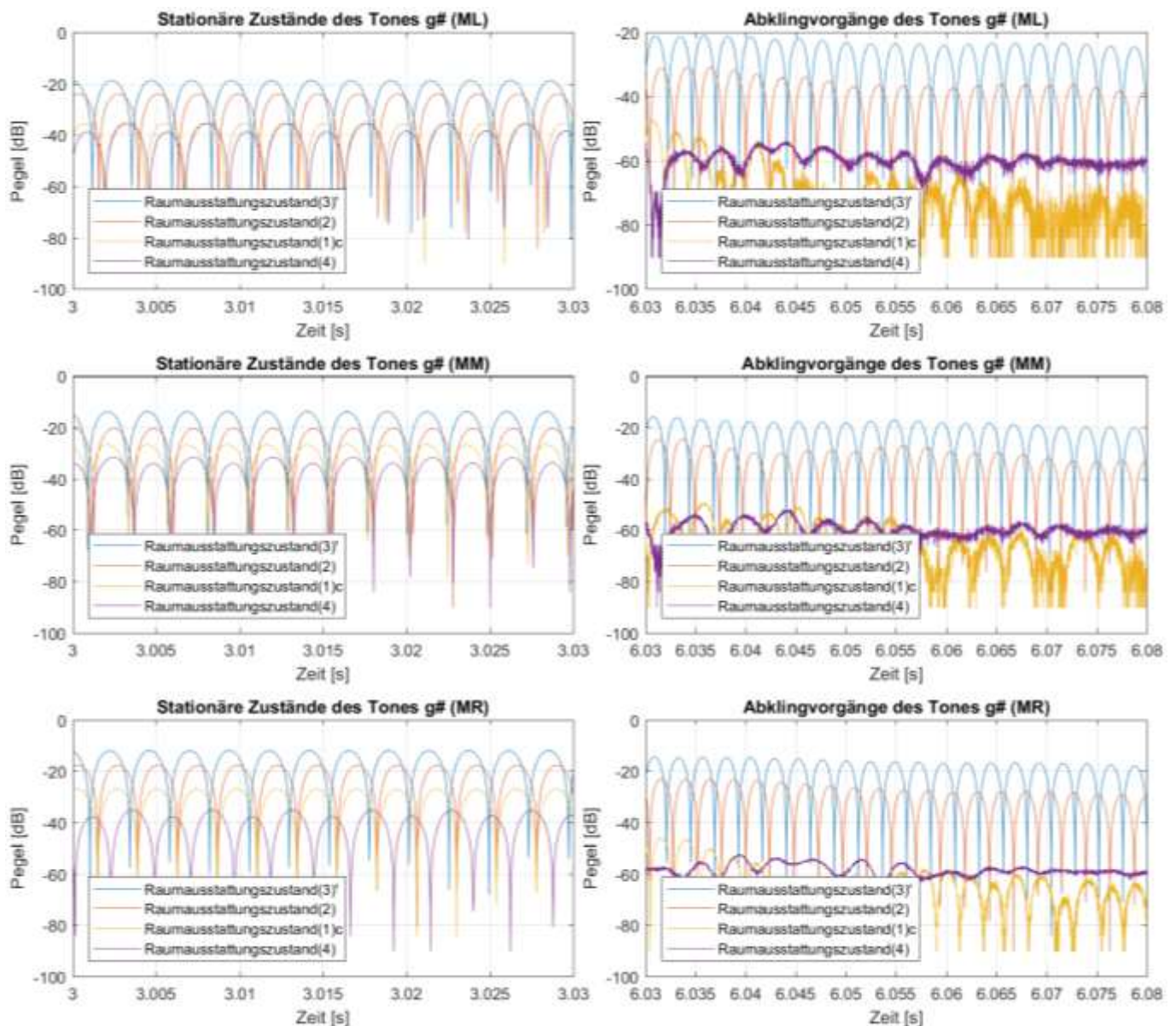


Abb. B2.21: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones g# ($\cong 209$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)^c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

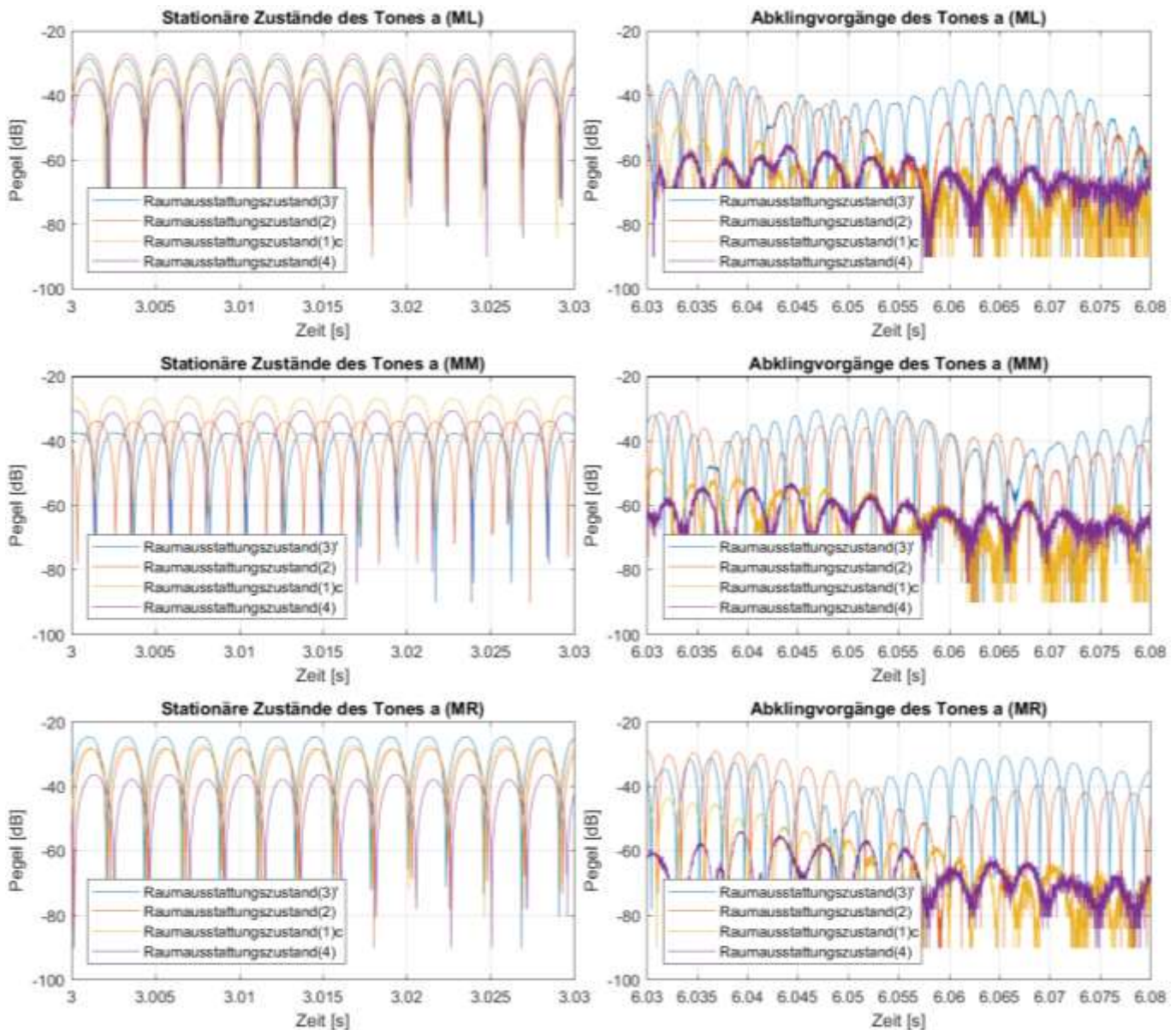


Abb. B2.22: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones a (≈ 222 Hz) für alle vier Raumausstattungszustände (3)⁺, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

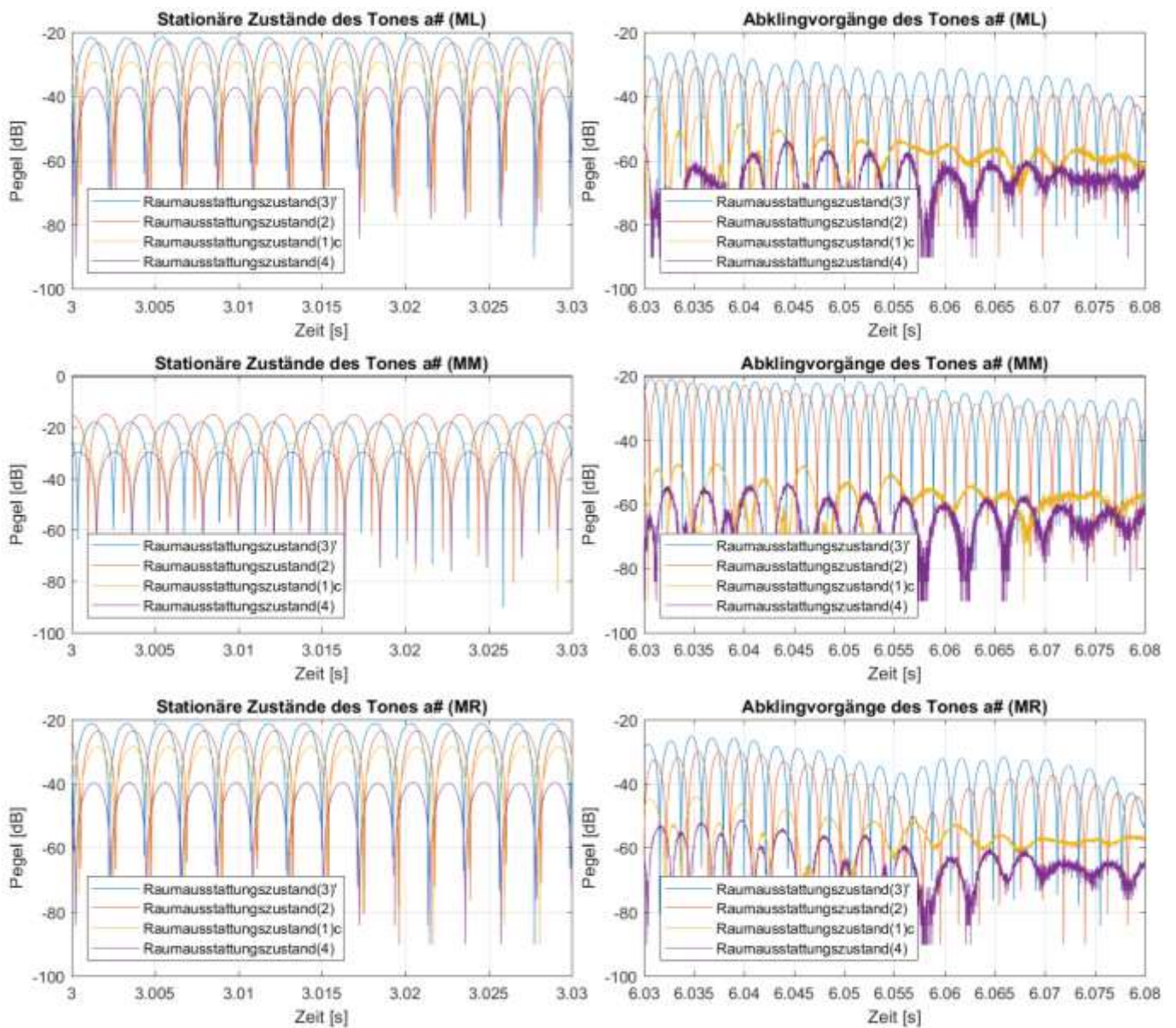


Abb. B2.23: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones a# ($\cong 235$ Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

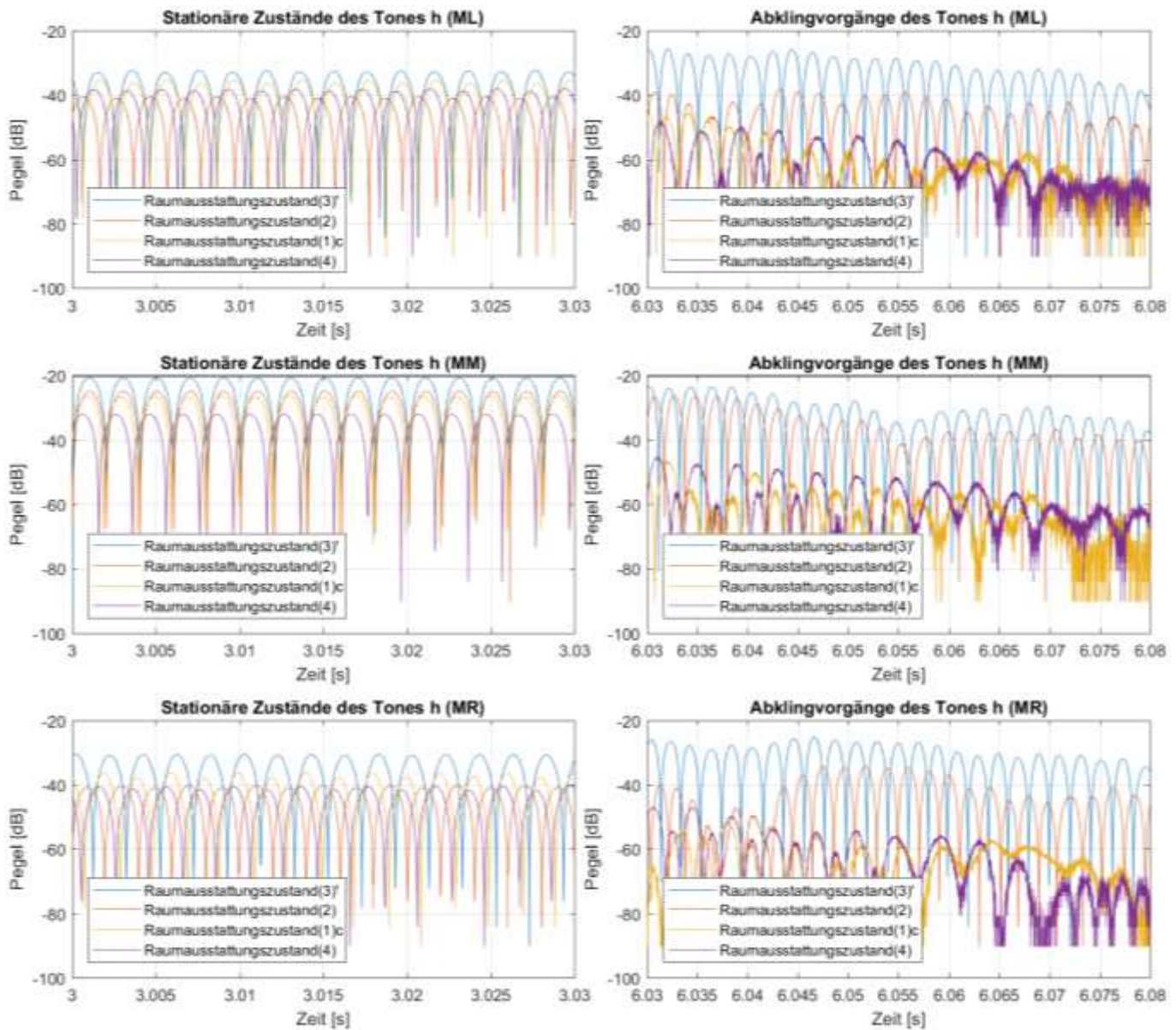


Abb. B2.24: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones h (≈ 249 Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3), (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

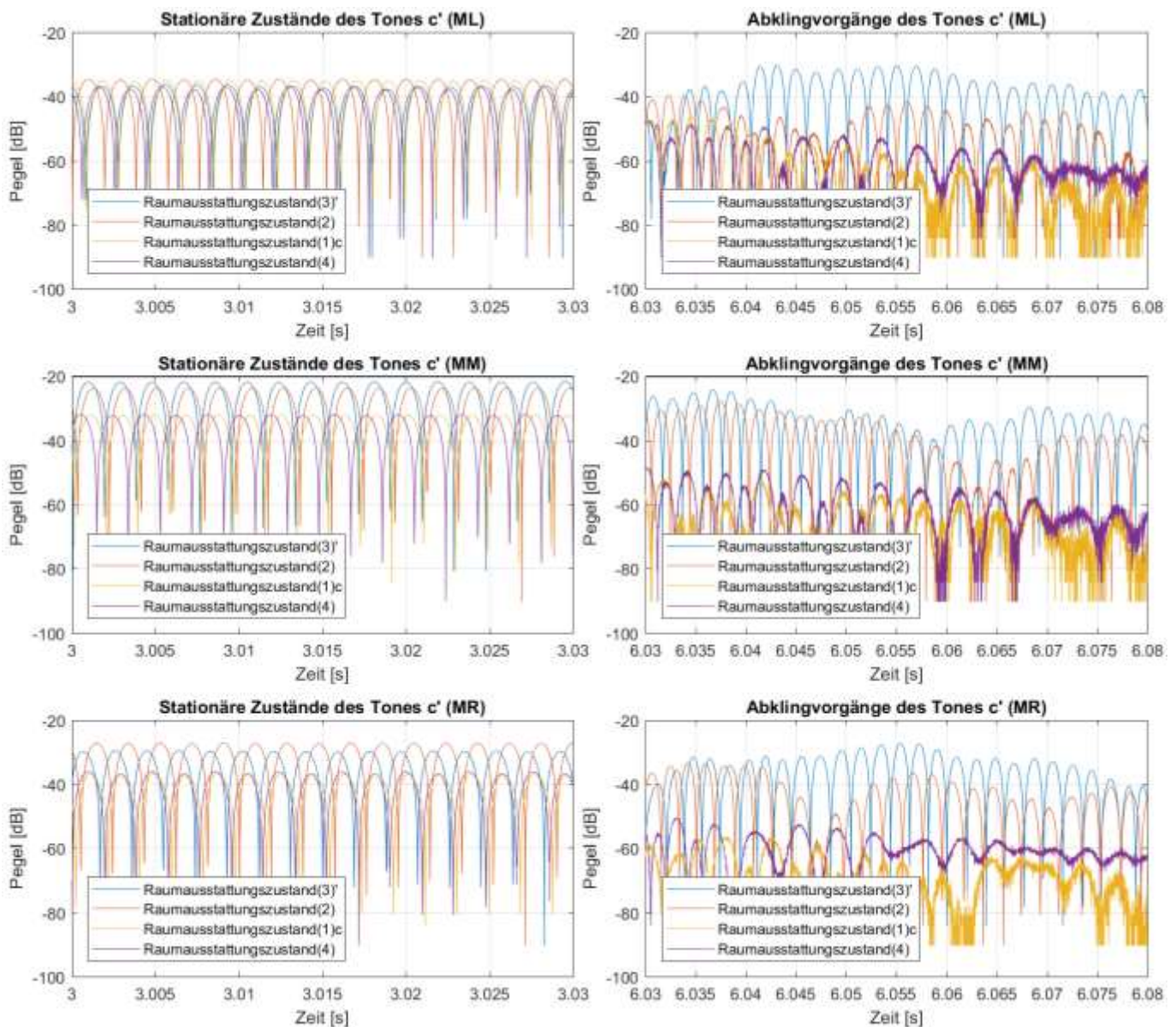


Abb. B2.25: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones c' (≈ 263 Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)', (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

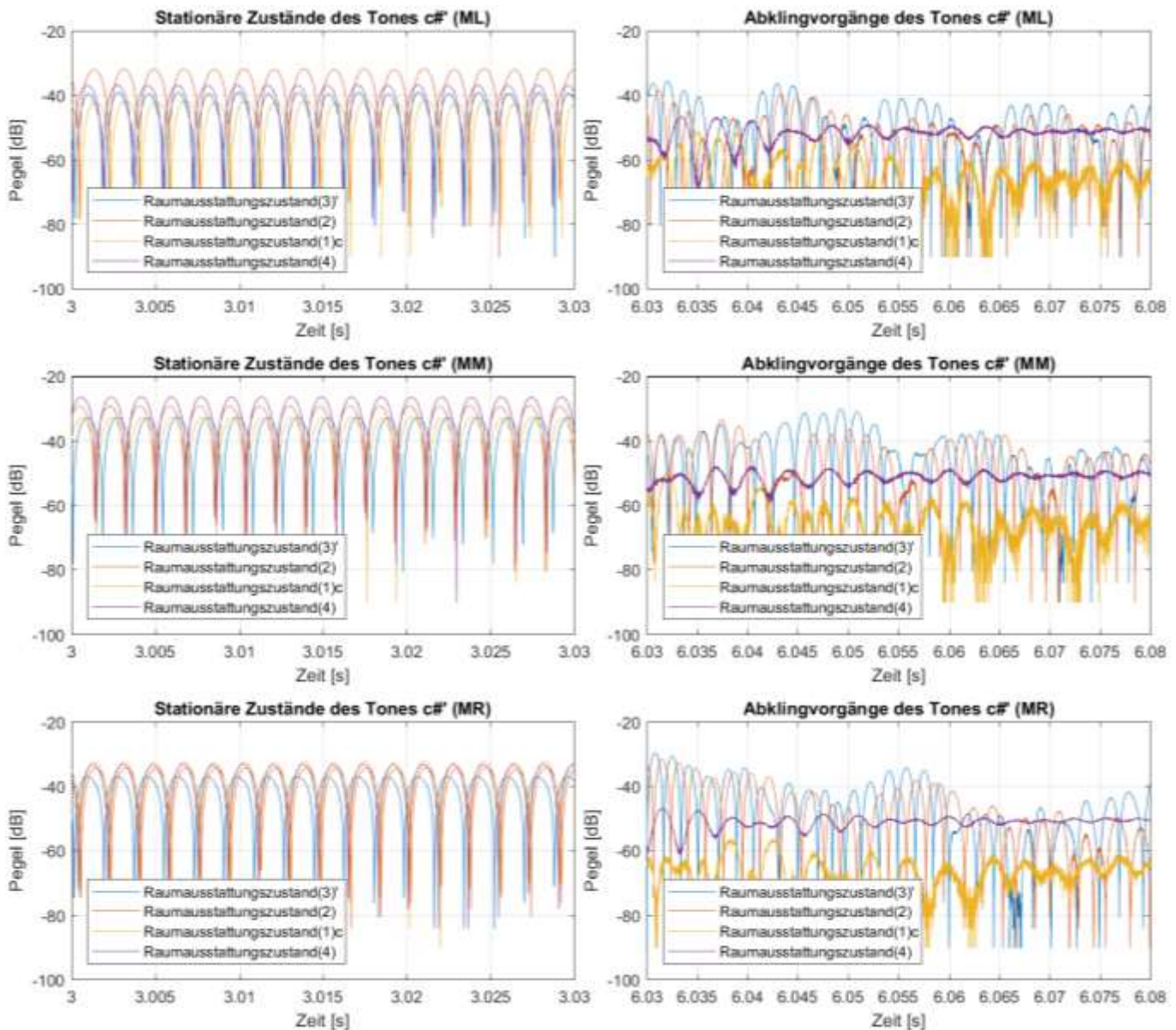


Abb. B2.26: Messsignalwellenformen der Marimbatonmessungen bei Anregung von Quellposition (Q3) mit der Grundfrequenz des Tones c# (≈ 279 Hz) für alle vier Raumausstattungs Zustände (3)^f, (2), (1)c und (4) sowie die Mikrofonpositionen (ML), (MM) und (MR)

Anhang C – Softwaretools (chronologisch geordnet)

Dateiname	Zugehöriges Programm	Funktion	Verwendet für
<i>Marimba.xlsx</i>	Excel	Berechnet ausgehend von der Frequenz der Note C die Frequenzen der nachfolgenden Töne. Die Zuordnung zu den technischen Terzen muss händisch erfolgen.	Tab. 2.1
<i>Eigenmoden.m</i>	MATLAB	Berechnet anhand der gewählten Parameter im m-File die resultierenden Raummoden und speichert diese als Moden.txt im Pfad des m-Files.	Tab. 3.1
<i>Nachhallzeitmessung_Sinus Sweep</i>	PAK	PAK-Projekt zur Festlegung der Messdatenpfade.	
<i>Fkt_Nachhallzeit50.m</i>	MATLAB	m-File zur Kompilierung (exe-File) mit Adaptierung des ausgewerteten Frequenzbereichs auf die Terzbänder von 50 Hz bis 10 kHz. Das exe-File <i>Fkt_Nachhallzeit.exe</i> wird von der PAK-Messdefinition <i>Nachhallzeitmessung_SinusSweep_6Mic_08s</i> benötigt.	
<i>Nachhallzeitmessung_Sinus Sweep_6Mic_08s</i>	PAK	Messdefinition zur Messung und Darstellung von Nachhallzeiten sowie raumakustischen Gütemaßen mittels Sweep-Messungen.	Abb. 5.1 Abb. 5.2 Abb. 5.5 Abb. 5.6 Tab. 5.1

<i>Fkt_PAK2WAV_fGR.m</i>	MATLAB	m-File zur Kompilierung (exe-File), um die gewünschten Messdaten aus PAK als wav-Files zu speichern. Wenn zu den Mikrofonsignalen ein Direktsignal übergeben wird, geht die Funktion automatisch von einer Sweep-Messung aus und führt die entsprechende Faltung mittels Spektraldivision durch, sodass bereits die Impulsantworten gespeichert werden. Dabei werden die Daten immer sowohl normalisiert als auch mit dem beim Aufruf bestimmbaren Nenner skaliert. Sollte es dabei zu Clipping kommen, wird die Wellenform des betroffenen Signals als MATLAB-Plot dargestellt. Das exe-File <i>PAK2WAV_fGR.exe</i> wird von den PAK-Messdefinitionen <i>Sweep_PAK2WAV_4Mic_08s</i> und <i>Einzelsinus_PAK2WAV_4Mic_08s</i> benötigt.	
<i>Sweep_PAK2WAV_4Mic_08s</i>	PAK	Messdefinition zum Durchführen der Sweep-Messungen und Speichern der Messdaten als Impulsantworten im wav-Format.	
<i>Einzelsinus_PAK2WAV_4Mic_08s</i>	PAK	Messdefinition zum Durchführen der Einzelsinuso-messungen und Speichern der Messdaten im wav-Format.	
<i>Nachhallzeit_Okt.m</i> <i>Nachhallzeit_Terz.m</i>	MATLAB	Modifiziertes m-File zur Nachhallzeit-Auswertung von wav-Impulsantworten mit Terz-respektive Oktavbandfiltern direkt in MATLAB. Die Ergebnisse werden für die bessere Vergleichbarkeit immer im Terzbandabstand (Zeilen) für jedes Mikrofon (Spalten) als <i>RT20</i> und <i>RT30</i> Variablen im Workspace abgelegt. Benötigt <i>Fkt_AbK.m</i> , <i>IR2AbK_C.m</i> und <i>F_AbK.m</i> sowie die verwendeten Filter als mat-Files im Aufrufverzeichnis.	die Berechnung aller Nachhallzeiten, welche im Stil von <i>Nachhallzeiten.xlsx</i> abgebildet wurden
<i>Fkt_AbK.m</i>	MATLAB	Modifiziertes m-File, welches die Terz- bzw. Oktavbandfilterung durchführt und die Funktion <i>IR2AbK_C.m</i> aufruft.	
<i>IR2AbK_C.m</i>	MATLAB	Modifiziertes m-File, welches die tatsächliche Nachhallzeitberechnung nach der Schrödrückwärtsintegration mittels <i>F_AbK.m</i> durchführt.	
<i>F_AbK.m</i>	MATLAB	Führt die Schrödrückwärtsintegration aus.	
<i>TerzFilter.m</i> <i>OktFilter.m</i>	MATLAB	Erstellt die gewünschten Filter als mat-Files.	die Generierung der beschriebenen Filter

<i>Nachhallzeiten.xlsx</i>	Excel	File zur Darstellung verschiedener Nachhall- und Filterabklingzeitverläufe.	Abb. 5.3 Abb. 5.4 Abb. 5.7 Abb. 5.9 u. ä.
<i>RT-Rechnung.xlsx</i>	Excel	File zur Berechnung der äquivalenten Absorptionsflächen der Absorber und den resultierenden Nachhallzeiten.	Tab. 5.2 u. ä. sowie für berechnete Nachhallzeitverläufe
<i>FilterKlassenTest.m</i>	MATLAB	Stellt die Filtercharakteristiken und Normanforderungen im Frequenzbereich dar. Benötigt <i>dirac.wav</i> sowie die zu testenden Filter als mat-Files im Aufrufverzeichnis.	Abb. 5.8
<i>pseudonoise.m</i>	MATLAB	Tool zur Generierung der Pseudoransch-Testsignale.	die Erstellung der Pseudoransch-Impulsantworten in Abschnitt 5.2.3.3
<i>FilterFehler.m</i>	MATLAB	Berechnet die Abklingzeiten der ungefilterten und gefilterten Testsignale, speichert diese als Variablen <i>RT</i> und <i>RT_filtered</i> im Workspace und gibt die zugehörigen Abklingkurven aus. Benötigt die jeweiligen Testsignale im entsprechenden Pfad sowie die zu testenden Filter als mat-Files und die Funktionen <i>IR2AbK_sine.m</i> und <i>IR2AbK_C.m</i> im Aufrufverzeichnis.	Abb. 5.11 Abb. 5.12 Abb. 5.13 Abb. 5.14 Abb. 5.15 Abb. 5.16 und zugehörige Tabellen
<i>FFT_SPL.m</i>	MATLAB	Berechnet die jeweiligen Schalldruckpegelverläufe mittels FFT und stellt selbige grafisch dar.	Abb. 5.19 Abb. 5.20 Abb. 6.30 u. ä.
<i>Einzel sinus Abklingzeit.m</i>	MATLAB	File zur Auswertung der Einzelsinusmessungen. Speichert die entsprechenden Abklingzeiten als <i>RT20</i> und <i>RT30</i> Variablen sowie die im stationären Zustand gemessenen Schalldruckpegel als <i>L</i> Variable im Workspace und gibt entsprechende Grafiken aus bzw. speichert diese direkt im Aufrufverzeichnis. Benötigt <i>IR2AbK_sine.m</i> im selben Verzeichnis sowie die Messsignale in den entsprechenden Pfaden.	Abb. 6.15 Abb. 6.16 Abb. 6.17 Abb. 6.20 Abb. 6.22 Abb. 6.24 u. ä. sowie zur Berechnung der Werte in Tab. 6.5 Tab. 6.6

<i>IR2AbK_sine.m</i>	MATLAB	Modifiziertes m-File, welches die Abklingzeitberechnung der mittels Moving-Average-Filter geglätteten Abklingvorgänge durchführt.	
<i>Einzelsinus_RT Plot.m</i>	MATLAB	Gibt die berechneten Einzelsinusabklingzeiten zusammen mit den Terz- oder Oktavbandnachhallzeiten gemeinsam aus.	Abb. 6.11 Abb. 6.12 Abb. 6.13 Abb. 6.14
<i>ER.m</i>	MATLAB	Tool zur Berechnung der konstruktiven und destruktiven Erstreflexionen. Dabei erfolgt eine grafische Ausgabe, welche es ermöglicht, die betroffenen Frequenzen sowie die verantwortlichen Begrenzungsflächen zu identifizieren. Zudem erleichtern die jeweiligen k Variablen im Workspace das Auffinden des jeweiligen Erstreflexionspunkts.	
<i>Pegelstreu ungen.m</i>	MATLAB	Berechnet die statistischen Parameter der gemessenen Schalldruckpegel und gibt die Ergebnisse grafisch aus.	Abb. 6.25
<i>Rechen beispiel.m</i>	MATLAB	Führt die Berechnungen des Rechenbeispiels durch und speichert die Pegeleinbrüche als L_1 bzw. L_2 Variablen im Workspace.	Rechenbeispiel

Tab. C.1: Verwendete Softwaretools