

Exakte Charakterisierung der Abklingvorgänge der Raummoden bei Verwendung von Kantenabsorbern im Hallraum der TU Graz

Masterarbeit

durchgeführt von

Lazar Radovanović, BSc

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

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

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Julian Koch, Dipl.-Ing. Eric Kurz

Graz, im Dezember 2023

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)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich von Herzen bei meinen Betreuern, Julian Koch, Werner Weselak und Eric Kurz bedanken. Besonders danke ich Julian Koch, für seine rund um die Uhr Betreuung, seine wertvollen Korrekturvorschläge und seine blitzschnellen E-Mail-Antworten. Werner Weselak möchte ich für seine inspirierenden Diskussionsbeiträge und seine Hilfe bei der Organisation der Messungen danken. Eric Kurz gebührt mein Dank für die ursprüngliche Motivation zu dieser Arbeit sowie für seine tatkräftige Unterstützung bei den Hallraummessungen (und nicht zuletzt für seine beeindruckenden Parkour-Fähigkeiten).

Ein großes Dankeschön gilt auch Carmen Rieder, die mir mit ihrer Hilfe bei Grammatik und Rechtschreibung zur Seite stand. Ich möchte mich bei Leon Merkel für die kurzfristige Bereitstellung des Subwoofers bedanken und bei Florian Kraxberger für die Bereitstellung seiner Raummodenfrequenzberechnungen in Anwesenheit der Kantenabsorber. Ein herzlicher Dank geht an Christian Zagler, der mir während meiner Masterarbeit die Möglichkeit gab, berufliche Erfahrungen zu sammeln und aus erster Hand Einblicke in die Akustik zu gewinnen.

Mein Dank gilt auch all meinen Freunden in Serbien, Österreich, Spanien und der Schweiz, die mir diesen anspruchsvollen Weg erleichtert und verschönert haben.

Zuletzt ein riesengroßer Dank gebührt meinen Eltern, Sonja und Milomir, sowie meiner Schwester Milica und ihrer Familie, die mich während meines gesamten Studiums in Graz uneigennützig unterstützt haben. Sie haben an mich geglaubt, als ich selbst beinahe den Glauben an mich verloren hätte. Volim vas!

Gewidmet meiner Oma Lena, die leider das Ende meines Studiums nicht miterlebt hat und die mich stark während ihres Lebens motiviert hat, das Studium abzuschließen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Messmethode zur genauen und präzisen Messung der Abklingvorgänge und Nachhallzeiten bis 100 Hz im Hallraum der TU Graz. Hierbei werden die Auswirkungen von Resonanzen der Eingangstür, Kantenabsorbern und Temperaturänderungen auf den Frequenzgang des Hallraums untersucht. Die Messergebnisse dienen der Bereitstellung präziser Messdaten für ein FEM-Simulationsmodell von Kantenabsorbern. Es werden Vergleiche mit Arbeiten der Vorgänger durchgeführt, und anhand dieser wird der Einfluss von im Hallraum fest eingebauten akustisch wirkenden Elementen (Diffusoren und Plattenresonatoren) auf die Nachhallzeiten untersucht. Zudem wird eine Untersuchung der Reaktion des Raums auf die Ein- und Ausschaltvorgänge des Anregungssignals vorgenommen. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung einer Messmethode zur Bestimmung der Absorptionseigenschaften der Kantenabsorber und dienen der besseren akustischen Charakterisierung des Hallraums der TU Graz.

Abstract

The present study focuses on the development of a measurement method for accurate and precise measurement of decay processes and reverberation times up to 100 Hz in the reverberation chamber of TU Graz. The effects of resonances from the entrance door, edge absorbers, and temperature variations on the frequency response of the reverberation chamber are examined. The measurement results serve to provide precise measurement data for a finite element method (FEM) simulation model of edge absorbers. Comparisons with previous studies are conducted to investigate the influence of acoustically effective elements (diffusers and panel resonators) permanently installed in the reverberation chamber on reverberation times. Furthermore, an analysis of the room's response to the onset and offset of the excitation signal is performed. The findings yield insights for the development of a measurement method to determine the absorption properties of edge absorbers and contribute to a more accurate acoustic characterization of the reverberation chamber at TU Graz.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	11
2	Grundlagen.....	13
2.1	Absorption, Nachhallzeit und Abklingzeit	13
2.2	Hallraum und Normen.....	14
2.3	Raummoden.....	16
2.4	Kantenabsorber.....	17
3	Messkonzept	19
3.1	Modalanalyse und Abklingvorgänge.....	20
3.2	Aufnahme des Schwingungsverhaltens der Eingangstür.....	28
3.3	Aufnahme der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsänderung.....	29
3.4	Planung der Messung.....	29
4	Messteuerung.....	33
4.1	Ablesen der Temperatur	34
4.2	Ausführung der initialen Ecke-Ecke-Sweepmessungen.....	34
4.3	Ausführung der Messkampagne	34
5	Messdatenverarbeitung	37
5.1	Filterung und Downsampling	38
5.2	Verarbeitung von Sweepmessdaten.....	38
5.3	Verarbeitung von TBR- und Sinusmessdaten	39
5.4	Auswahl der Messpunkte für Sinusmessungen	41
6	Messergebnisse und Auswertung.....	43
6.1	Ergebnisse und Auswertung der langen Ecke-Ecke-Sweepmessung zur Untersuchung des Einflusses der Eingangstür	43
6.2	Sweepmessergebnisse- und Auswertung.....	44
6.2.1	Güte der Raummoden.....	44
6.2.2	Frequenzverschiebung von Raummoden	45
6.2.3	Statistische Auswertung der Frequenzverschiebung von Raummoden	47
6.2.4	Vergleich mit den berechneten Ergebnissen der Frequenzverschiebung von Raummoden	49

6.3 Abklingzeit- und Nachhallzeit-Messergebnisse	52
6.3.1 Darstellung der Messergebnisse	52
6.3.2 Vergleich der Abklingzeitmessergebnisse mit Ergebnissen aus einer bestehenden Messung	55
6.3.3 Vergleich der Nachhallzeiten und Abklingvorgänge bei verschiedenen Messmethoden	56
6.4 Untersuchung des Abschaltvorgangs.....	61
6.5 Evaluation der Trennbarkeit von nahbenachbarten Raummoden.....	67
7 Fazit und Ausblick	75
Literaturverzeichnis.....	77
Abkürzungsverzeichnis.....	79
Anhang A	
Ergebnisse der 3D-pv-Sonde-Messungen.....	81
Anhang B	
Graphische Darstellung der Abklingzeit- und Nachhallzeit-Messergebnisse	87
B.1 Sinusmessungen.....	87
B.2 TBR-Messungen	95
Anhang C	
Rekonstruktion der Nachhallzeiten aus den Sinus- und Sweepantworten für Terzbänder unterhalb vom 63 Hz – Terzband	99
Anhang D	
Frequenzgänge der ausgewählten Messpunkte (MK2 und MK3).....	107
D.1 MK2.....	107
D.2 MK3	109

1 Einleitung und Motivation

Bei einem Vergleich der Arbeiten von Hofer (1), Steffek (2) und Nell (3), die auf den Messungen im Hallraum der TU Graz basieren, lassen sich bestimmte Abweichungen in den Nachhallzeitergebnissen im tieffrequenten Bereich feststellen (Abbildung 1.1, Abbildung 1.2 und Abbildung 1.3). Des Weiteren sind lokale Absenkungen der Nachhallzeit im leeren Raum bei tiefen Frequenzen beobachtbar (T_{30} bei $f_m = 63$ Hz (1)), obwohl ein Anstieg der Nachhallzeit zu tieferen Frequenzen zu erwarten wäre (siehe Abbildung 1.1).

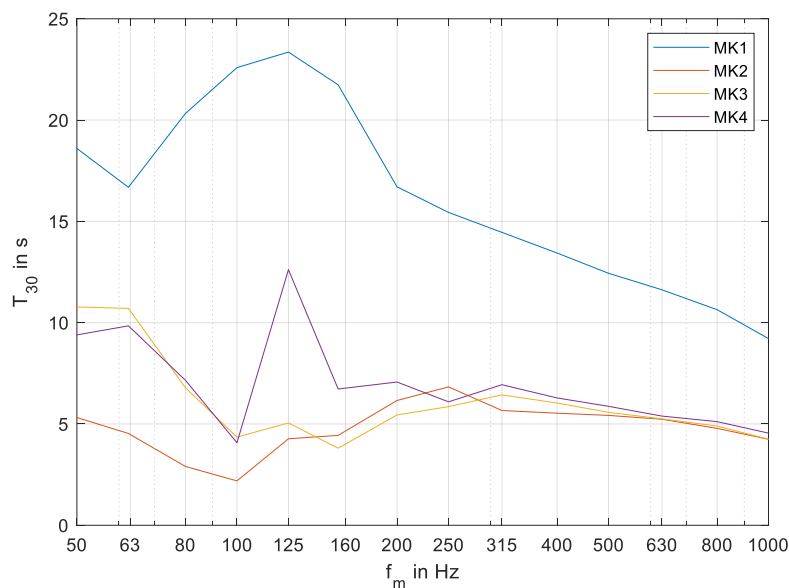


Abbildung 1.1: Nachhallzeiten für verschiedene Kantenabsorberkonfigurationen im leeren Hallraum (ohne Absorber, ohne Diffusoren), ermittelt von Hofer (1), gemessen in Anlehnung an ISO 354 (4).

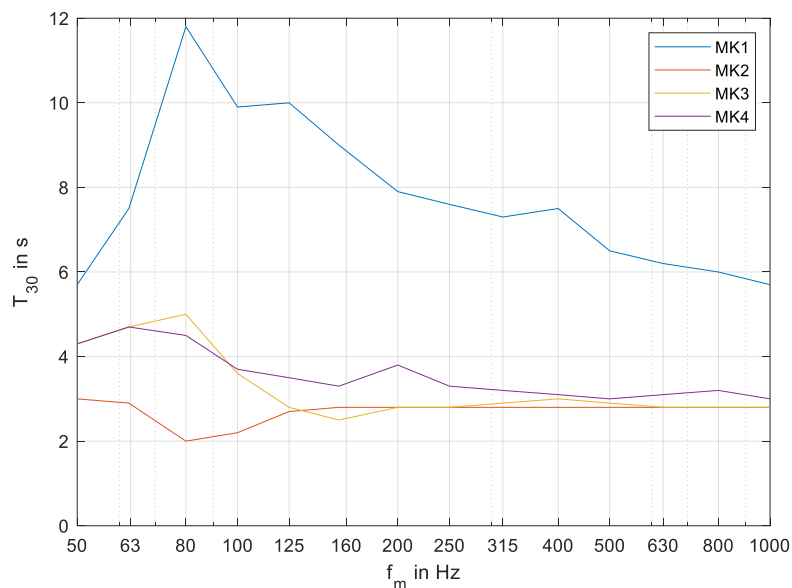


Abbildung 1.2: Nachhallzeiten für verschiedene Kantenabsorberkonfigurationen im Hallraum (mit Absorbieren, mit Diffusoren), ermittelt von Steffek (2), gemessen in Anlehnung an ISO 354 (4).

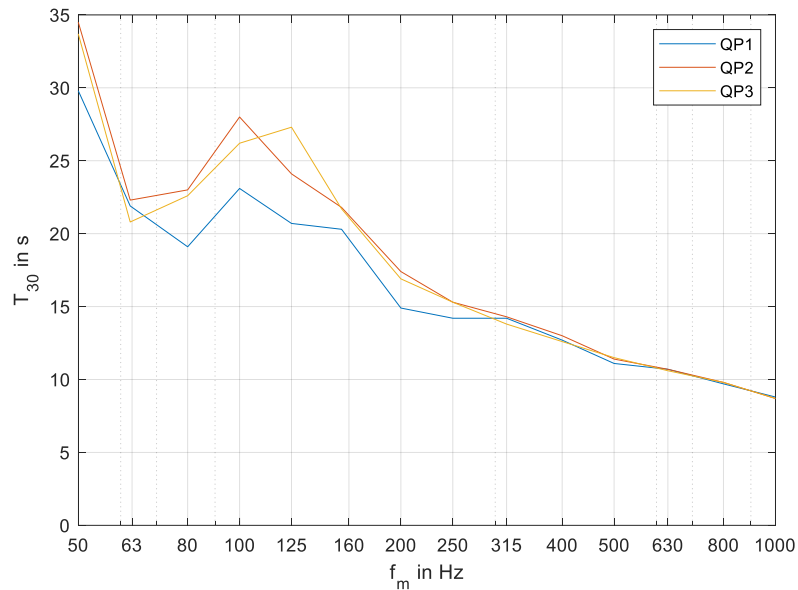


Abbildung 1.3: Über Messpositionen gemittelte Nachhallzeiten des Hallraums (ohne Absorber, mit Diffusoren) im leeren Raumzustand, bei 3 verschiedenen Positionen der Schallquelle, ermittelt von Nell (3), gemessen in Anlehnung an ISO 354 (4).

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Messmethode entwickelt werden, die eine genaue und präzise Messung der Abklingvorgänge aller Raummoden (bis zu einer gewissen Grenzfrequenz) im Hallraum der TU Graz ermöglicht. Dabei ist eine präzise Auswertung der Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich (bis und einschließlich 100 Hz Terzband) durchzuführen, wobei die Einflüsse von Temperaturänderungen und möglichen Resonanzen der Eingangstür zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus soll der Einfluss von Kantenabsorbern auf die Abklingvorgänge, Nachhallzeiten und mögliche Frequenzverschiebungen untersucht werden. Die Messergebnisse dieser Arbeit sollen unter anderem dazu dienen, präzise Messdaten für das FEM-Simulationsmodell von Kantenabsorbern (entwickelt von Leon Merkel im Rahmen seines Toningenieurprojekts "Finite Element Simulations of Edge Absorbers" (5)) bereitzustellen.

2 Grundlagen

2.1 Absorption, Nachhallzeit und Abklingzeit

Wird einer Schallwelle Energie entzogen, so spricht man von Schallabsorption, die durch den Schallabsorptionsgrad α ausgedrückt wird. Der Absorptionsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der absorbierten Schallenergie und der gesamten Schallenergie beim Auftreffen des Schalls auf eine Begrenzungsfläche. Er liegt zwischen 0 und 1 und ist frequenzabhängig (Gleichung 2.1):

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Schallenergie}}{\text{auftreffende Schallenergie}} \quad 2.1$$

Multipliziert man den Schallabsorptionsgrad eines Materials α mit der tatsächlich eingebrachten Fläche S , so bekommt man die äquivalente Absorptionsfläche A (6) (Gleichung 2.2). A stellt diejenige Fläche dar, die bei einem Absorptionsgrad $\alpha = 1$ die gleiche Absorptionswirkung hätte (6).

$$A = \alpha \cdot S \quad 2.2$$

Die Nachhallzeit T beschreibt die Zeit, in der der Schalldruck nach dem Ende eines Schallerignisses in einem Raum auf ein Tausendstel seines Wertes oder der Schalldruckpegel um 60 dB abgefallen ist. Die Pegeldifferenz von 60 dB entspricht jener Lautstärkeabnahme, bei der das Ohr unmittelbar nach dem Ende eines Nutzsignales völlige Ruhe empfindet, auch wenn der verbleibende Geräuschpegel deutlich über der Hörschwelle liegt (6). Die Nachhallzeit kann über die äquivalente Absorptionsfläche berechnet werden (Gleichung 2.3):

$$T \approx 55.3 \cdot \frac{V}{Ac_0} \approx 0.163 \cdot \frac{V}{A} \quad 2.3$$

Dabei beschreibt $c_0 \approx 340 \text{ m/s}$ die Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft. Da es sich hier um Größen aus der statistischen Raumakustik handelt, gelten diese Beziehungen unter der Annahme eines **diffusen Schallfeldes**.

Messtechnisch wird die Nachhallzeit ermittelt, indem nach der Anregung des Raumes mit einem entsprechenden Messsignal (üblicherweise MLS, Impulsanregung oder Sweep) der Zeitpunkt des 60 dB-Abfalls bestimmt wird (Abbildung 2.1, a). Da in der Praxis oft kein Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von 60 dB zur Verfügung steht, wird nach dem Zeitpunkt des 30 dB-Abfalls gesucht. Dies geschieht nicht unmittelbar nach dem Abschalten des Messsignals, sondern erst nach einem 5 dB-Abfall. Anhand dieses Zeitpunkts und des Zeitpunkts des 30 dB-Abfalls (entsprechend -35 dB in diesem Fall) wird eine Gerade gezeichnet, auf der nach dem -60 dB-Wert gesucht wird (Abbildung 2.1, b). Der so erhaltene Zeitwert wird als die Nachhallzeit T_{30} bezeichnet. Um bei noch geringeren Signal-Rausch-Verhältnissen zu messen oder eine subjektive Einschätzung der Nachhallzeit zu erhalten, können auch andere Nachhallzeitparameter ermittelt werden (T_{10} , T_{20} , **Early Decay Time EDT**, Abbildung 2.1, b).

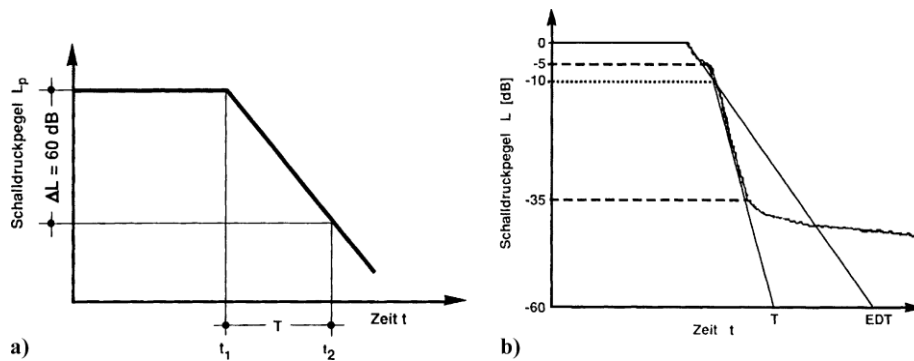


Abbildung 2.1: Ermittlung der Nachhallzeit. a) schematisch; b) praktisch (7).

Da der Begriff „Nachhallzeit“ in der statistischen Raumakustik Verwendung findet (siehe Gleichung 2.3), wird bei der Anregung des Raumes mit einzelnen Frequenzen der Begriff **Abklingzeit** verwendet. Die Abklingzeit τ beschreibt die exponentielle Zeitkonstante, mit der die Schallenergie $E(t)$ im Raum nach dem Abschalten einer Schallquelle sinkt (der exponentielle Abklingvorgang ist gegeben durch $E(t) = E_0 e^{-t/\tau}$) (8). Sie steht mit der Nachhallzeit T in folgender Beziehung (Gleichung 2.4, (6)):

$$T = \tau \cdot \ln \frac{E_0}{E(T)} \quad 2.4$$

Dabei ist E_0 die Anfangsenergiegedichte. Da ein Tausendstel des Schalldruckes einem $\frac{1}{10^6}$ Faktor der Schallenergie entspricht, ergibt sich für einen 60 dB Abfall der Anfangsschallenergie der folgende Zusammenhang (Gleichung 2.5):

$$T = \tau \cdot \ln 10^6 \approx 13.8 \cdot \tau \quad 2.5$$

Aufgrund dieser Verwandtschaft der beiden Größen werden im Rahmen dieser Arbeit zwar u.a. die Abklingzeiten der einzelnen Raummoden bei der Anregung des Raums mit einzelnen Frequenzen gemessen, sie werden aber in gleicher Weise wie die Nachhallzeiten ausgewertet.

2.2 Hallraum und Normen

Zur Untersuchung der Absorptionseigenschaften eines Materials werden üblicherweise zwei Messverfahren angewendet: die Messung im Impedanzrohr und die Messung im Hallraum.

Im Impedanzrohr wird der Absorptionsgrad eines Materials ermittelt, indem der Schalldruckpegel an zwei oder mehr festen Positionen im Rohr bei senkrechtem Schalleinfall gemessen wird. Das zu untersuchende Material wird innerhalb des Rohres platziert. Der Absorptionsgrad wird aus der Transferfunktion des Impedanzrohrs gewonnen. Der Frequenzbereich von Messungen im Impedanzrohr ist durch die Abmessungen und die Konfiguration (Rohrdurchmesser, Rohrhalslänge und Mikrofonabstände) des Rohres begrenzt (9).

Im Hallraum wird der Absorptionsgrad aus der Differenz der Nachhallzeiten im leeren Raum und im Raum mit dem zu untersuchenden Material ermittelt. Im Vergleich zum Impedanzrohrverfahren hat das Hallraumverfahren den Vorteil, dass der Schalleinfall aus allen Richtungen gemessen wird und somit die Werte allgemeingültiger sind. Im Gegensatz zum Impedanzrohr wird die obere Grenzfrequenz der Messungen im Hallraum nicht unmittelbar durch dessen

Abmessungen begrenzt. Das Hallraumverfahren ermöglicht somit Messungen in einem breiten Frequenzbereich. Allerdings können aufgrund der Kantenbeugungseffekte an den Begrenzungsflächen des Prüfobjekts Absorptionsgrade $\alpha > 1$ auftreten. Solche theoretisch unmöglichen Werte sind für praktische Anwendungen (wie beispielsweise in vielen Simulationsprogrammen) mit $\alpha = 1$ zu ersetzen (7).

Messungen im Hallraum wurden in zwei ISO-Normen (bzw. Ö-Normen) behandelt:

- ÖNORM EN ISO 354 (2003): Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen (4);
- ÖNORM EN ISO 3741 (2010): Akustik - Bestimmung der Schallleistungs- und Schalldruckenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 (10).

ISO 354 (4) legt die Messverfahren zur Bestimmung des Absorptionsgrades, die geeigneten Messsignale, die Anzahl und Positionierung der Messmikrofone, die Anforderungen an die Prüfobjekte und Hallräume, sowie die Auswertungsmethoden fest. Die Norm enthält unter anderem folgende Anforderungen und Empfehlungen:

- Frequenzbereich der Messungen: 100 Hz – 5 kHz (in Terzbänder auszuwerten);
- Das Volumen des Hallraums: 200 m³ – 500 m³;
- Verwendung von Diffusoren verschiedener Größen, empfohlen zwischen 0.8 m² und 3 m²;
- Maximale äquivalente Absorptionsfläche des leeren Hallraums (Tabelle 2.1):

Frequenz, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k
Äquivalente Schallabsorptionsfläche in m ²	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7	7.5	8	9.5	10.5	12	13	14

Tabelle 2.1: Maximale äquivalente Schallabsorptionsfläche für den Rauminhalt $V = 200 \text{ m}^3$ (4).

- Fläche des Prüfobjektes 10 – 12 m².
- Mindesttemperatur 15 °C, Luftfeuchtigkeit zwischen 30% und 90%;
- Abstände der Mikrofonpositionen mind. 1.5 m voneinander, 2 m von der Schallquelle und 1 m zu Raumbegrenzungsflächen;
- Mind. 3 Mikrofonpositionen, mind. 2 Schallquellenpositionen;

Da im Rahmen unserer Messung der Fokus hauptsächlich auf dem Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz liegt und die Messung im modalen Schallfeld stattfindet, werden viele dieser Anforderungen nicht erfüllt (z.B. befinden sich alle Mikrofone direkt an den Raumbegrenzungsflächen, es gibt nur eine Schallquellenposition usw.). Dennoch dienen Teile dieser Norm als Grundlage für die Erstellung des Messkonzeptes und für die Durchführung der Messung.

Die Norm ISO 3741 (10) beschäftigt sich hauptsächlich mit den Messverfahren zur Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen und ist für diese Arbeit weniger relevant. Dennoch enthält sie nützliche Informationen, wie z. B. zulässige Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Hallraum (Tabelle 2.2).

Die Norm gibt einen Richtwert für die Frequenz an, unterhalb derer der Einfluss von Raummoden relevant ist (Gleichung 2.6, (10)):

$$f = \frac{2000}{V^{\frac{1}{3}}} \quad 2.6$$

Obwohl in weiterer Folge der Arbeit ein anderer Richtwert verwendet wird (siehe Unterkapitel 3.1, S.20 – S.21), dient diese Berechnungsformel als Ausgangspunkt für weitere Überlegungen zur Festlegung der (im Fall dieser Messung) oberen Grenzfrequenz.

Bereiche der Temperatur θ °C	Bereiche der relativen Luftfeuchte %		
	< 30 %	30 % bis 50 %	> 50 %
	Zulässige Schwankungsbreiten für Temperatur und relative Luftfeuchte		
$-5 \leq \theta < 10$	$\pm 1 \text{ °C}, \pm 3 \%$	$\pm 1 \text{ °C}, \pm 5 \%$	$\pm 3 \text{ °C}, \pm 10 \%$
$10 \leq \theta < 20$	$\pm 1 \text{ °C}, \pm 3 \%$	$\pm 3 \text{ °C}, \pm 5 \%$	$\pm 3 \text{ °C}, \pm 10 \%$
$20 \leq \theta \leq 50$	$\pm 2 \text{ °C}, \pm 3 \%$	$\pm 5 \text{ °C}, \pm 5 \%$	$\pm 5 \text{ °C}, \pm 10 \%$

Tabelle 2.2: Zulässige Schwankungsbreiten für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte während der Messungen im Hallraum (10).

Der Hallraum der TU Graz befindet sich im Labor für Bauphysik und hat folgende Eigenschaften:

- Länge: 8.34 m; Breite: 5.99 m; Höhe: 4.9 m; Raumvolumen: 244.79 m³;
- 5 Diffusoren 1.2 m x 1.6 m; 4 Diffusoren 0.8 m x 1.25 m;
- 3 Tieftonplattenabsorber.

2.3 Raummoden

Raummoden (auch Eigenmoden genannt) sind stehende Wellen, die sich in einem Raum zwischen den Raumbegrenzungsflächen aufgrund seiner Abmessungen ausbilden. Die Frequenzen der Raummoden können wie folgt berechnet werden (Gleichung 2.7):

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad 2.7$$

c – Schallgeschwindigkeit; n_x, n_y, n_z – Ordnungszahlen; l_x, l_y, l_z – Abmessungen des Raumes.

Je nach Art und Richtung der Ausbreitung, unterscheidet man zwischen axialen-, tangentialen und obliquen Raummoden (Abbildung 2.2):

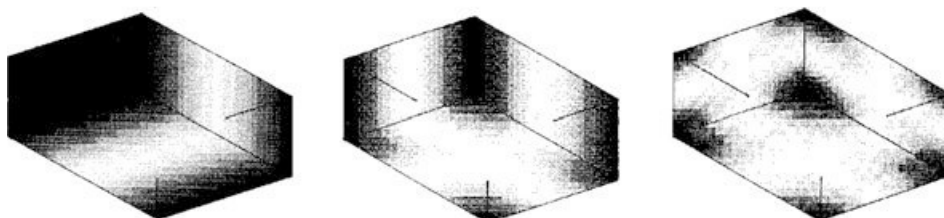


Abbildung 2.2: Darstellung der niedrigsten axialen (1-0-0), tangentialen (1-1-0) und obliquen (1-1-1) Mode in einem rechteckigen Raum (11). Schwarz – Bereiche der hohen Schalldruckpegel; weiß – Bereiche der niedrigen Schalldruckpegel.

Ab einer bestimmten Frequenz wird die Dichte der Raummoden so hoch, dass sie nicht mehr als störende Einzelfrequenzen wahrnehmbar sind. Mit steigendem Raumvolumen verringert

sich die Frequenz, unterhalb derer der Einfluss von störenden Raummoden spürbar wird. Diese obere Grenzfrequenz kann durch folgende Berechnung ermittelt werden (Gleichung 2.8, (6)):

$$f_{n,gr} \approx 2000 \sqrt{\left(\frac{T}{V}\right)} \quad 2.8$$

T – Nachhallzeit in s; V – Volumen in m^3 .

2.8 ist nur eine der vielen Varianten zur Berechnung dieser Frequenz (Vergleich mit 2.6). Auf die anderen Varianten wird im Unterkapitel 3.1 (S.20 – S.21) näher eingegangen.

Da die Raummoden die Resonanzfrequenzen eines Raums aufgrund seinen Abmessungen darstellen, ist es zweckmäßig, deren Güte zu berechnen. Im Allgemeinen ist die Güte Q ein Maß für die Breitbandigkeit einer Resonanz und berechnet sich wie folgt (Gleichung 2.9):

$$Q = \frac{f_{Res}}{B} \quad 2.9$$

f_{res} – Resonanzfrequenz; B – -3 dB Bandbreite;

Die -3 dB Bandbreite lässt sich über die Nachhallzeit ausdrücken (12) (Gleichung 2.10):

$$B = \frac{6.91}{\pi T} \quad 2.10$$

Setzt man die Gleichungen 2.5 und 2.9 in Gleichung 2.10 ein und formt nach der Abklingzeit τ um, so ergibt sich der Zusammenhang zwischen der Abklingzeit und der Raummodengüte (Gleichung 2.11):

$$\tau = \frac{1}{2\pi B} = \frac{Q}{2\pi f_{Res}} \quad 2.11$$

Die Raummoden mit einer höheren Güte weisen also längere Abklingzeiten auf.

2.4 Kantenabsorber

Kantenabsorber sind in der Praxis ein häufig verwendetes Mittel, um hohe Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen zu reduzieren. In der Regel handelt es sich dabei um poröse Absorber, die die kinetische Schallenergie in Wärme umwandeln (Abbildung 2.3).

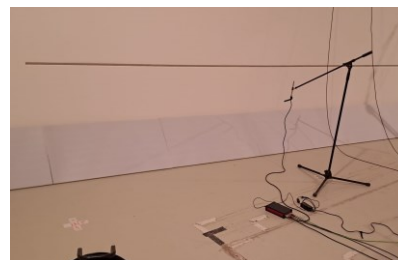
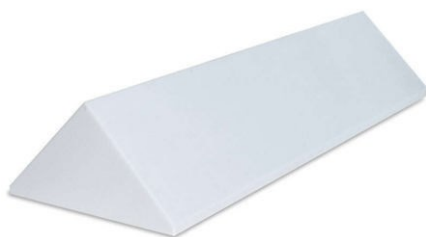


Abbildung 2.3: Kantenabsorber aus Basotect. Links: Darstellung eines Absorberelementes (1); Rechts - Anordnung der Absorber in Messkonfiguration 4 (siehe Abbildung 3.1) bei der Messung im Hallraum.

Allerdings gibt es keine zuverlässigen Daten über das Absorptionsverhalten von Kantenabsorbern, was den raumakustischen Planungsprozess erschwert. Der Grund dafür ist, dass die zu untersuchende Absorber gemäß ISO 354 (4) mindestens 1m von den Wänden entfernt sein müssen, wodurch die Wirkungsweise der Kantenabsorber nicht erfasst werden kann. Somit ist ein direkter Vergleich mit standardisierten Messungen unmöglich (2). Kantenabsorber nutzen die Interferenzeffekte an den Raumkanten, um eine hohe Absorptionswirkung bei tiefen Frequenzen zu erzielen (13). Diese Effekte werden in den normierten Messverfahren jedoch ausgeschlossen.

Trotz ihrer hohen Effektivität bei tiefen Frequenzen, verringert sich die Absorptionsfähigkeit der Kantenabsorber ab einer Grenzfrequenz zunehmend in Richtung niedrigerer Frequenzen. Reisinger (13) hat basierend auf seinen Messergebnissen die folgende Formel ermittelt:

$$f_{uG,KA} = \frac{c}{d_K \cdot 8} \quad 2.12$$

d_K – die Länge der Diagonale des Kantenabsorberquerschnittes.

Ein Kantenabsorberelement, das bei den Messungen aus dieser Arbeit verwendet wird, hat eine Länge von 1100 mm. Die Abmessungen des Kantenabsorbers werden in Abbildung 2.4 dargestellt:

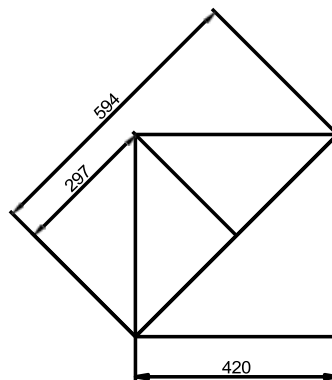


Abbildung 2.4: Seitenansicht eines KA-Elementes mit Bemaßung (1).

Somit ergibt sich nach der Gleichung 2.12 die untere Grenzfrequenz für die Wirkungsweise des Kantenabsorbers (Berechnung 2.13):

$$f_{uG,KA} = \frac{c}{0.594 \text{ m} \cdot 8} \approx 72 \text{ Hz} \quad 2.13$$

3 Messkonzept

Durch die Besprechungen mit den Betreuern, sowie durch Vergleiche mit Arbeiten der Vorgänger (1)(2)(3), ergab sich ein Messkonzept, welches die Modalanalyse, die Abklingvorgänge, die Aufnahme des Schwingungsverhaltens der Eingangstür und die Aufnahme der Temperaturänderung umfasst.

Für die Messung werden alle akustisch wirkenden Elemente (tiefabsorbierende Plattenabsorber und Diffusoren) aus dem Raum entfernt.

Die Messung wird mit folgenden vier Messkonfigurationen (bzw. unterschiedlichen Kantenabsorberstellungen) durchgeführt (Abbildung 3.1):

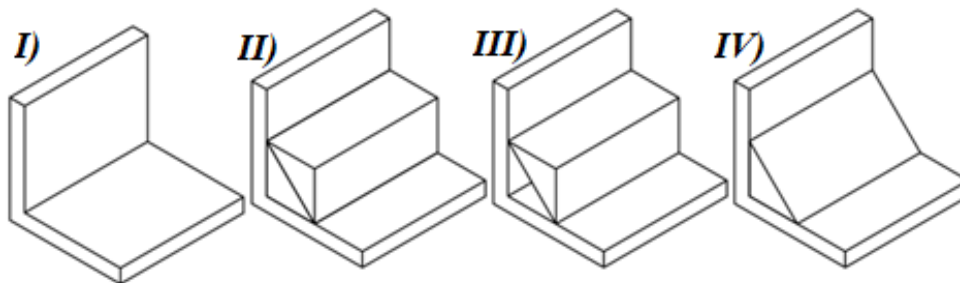


Abbildung 3.1: Darstellung der MK 1 bis 4. I) MK 1: Kante ohne KA II) MK 2: doppelt; III) MK 3: einfach; IV) MK 4: einfach invertiert.

Zu Beginn der Messung werden zwei lange Sinussweeps im leeren Hallraum abgespielt. Die Schallquelle wird dabei in den zwei unteren Raumecken auf der Seite der Eingangstür positioniert und es wird bei jeder Quellposition (QP) jeweils ein Sweep abgespielt. Die Schallquelle ist nach dem ersten Sweep auf die zweite QP umzustellen. Die Aufnahme der Sweepmessungen erfolgt durch Platzierung eines Mikrofons in der oberen, von der Tür aus gesehen, rechten Raumecke auf der gegenüberliegenden Seite der Tür (**Ecke-Ecke-Messung**). Da sich eine Schallquellenposition näher an der Eingangstür befindet, ist in diesem Schritt zu prüfen, inwieweit dies die Messergebnisse beeinflusst und welche der beiden Ecken für weitere Messungen verwendet werden soll. Außerdem ist eine größtmögliche Frequenzauflösung für die Analyse des Schwingungsverhaltens der Eingangstür durch die ausreichende Sweeplänge zu gewährleisten.

Vor der Messung der Abklingvorgänge einzelner Raummoden ist in jeder Messkonfiguration eine Sweepmessung durchzuführen, um die Frequenzgänge des Hallraums bei verschiedenen Messkonfigurationen zu ermitteln und die Frequenzverschiebungen der Raummoden aufgrund der Anwesenheit von Kantenabsorbern später analysieren zu können (**Sweepmessung**).

Um zu bestimmen, bei welchen Frequenzen die Abklingzeiten genau gemessen werden sollen, wird eine **Modalanalyse** vor jeder Messung des Abklingvorgangs durchgeführt: die Schallquelle (Subwoofer) wird in einer Raumecke positioniert. Der Hallraum wird mit einem exponentiellen Sinussweep angeregt, um die Frequenzlage der Raummoden zu bestimmen. Dies wird vor jeder Messung durchgeführt, um eventuelle Verschiebungen der Raummoden aufgrund von Temperaturschwankungen zu berücksichtigen.

Danach sollen die einzelnen Moden (**Sinusmessung**) bzw. Terzbänder (**Terzbandrauschen-Messung**) angeregt werden (Messung der Abklingvorgänge). Bei der Anregung von einzelnen Raummoden ist darauf zu achten, dass sich nah beieinanderliegende Moden bei der Messung der Abklingvorgänge gegenseitig beeinflussen. Daher soll beim Entwurf des Messkonzepts darauf geachtet werden, dass benachbarte Moden durch geschickte Wahl von weiteren Mikrofonpositionen messtechnisch voneinander "getrennt" werden können (siehe Unterkapitel 3.1, sowie Tabelle 3.1).

Die Aufnahme des Schwingungsverhaltens der Eingangstür erfolgt parallel zu allen oben beschriebenen Messschritten. Diese Messung wird realisiert, indem zwei Beschleunigungssensoren in die Mitte beider Türflügel montiert werden.

Die Aufnahme der Temperatur erfolgt ebenfalls gleichzeitig mit allen anderen Messschritten und wird durchgehend aufgezeichnet.

3.1 Modalanalyse und Abklingvorgänge

Um präzise Aussagen über die Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich treffen zu können, ist eine genaue Untersuchung des modalen Schallfeldes erforderlich. Dabei werden die Schalldruckverläufe bzw. Abklingvorgänge betrachtet. Um ein möglichst lineares Verhalten beim Abspielen sehr tiefer Frequenzen zu ermöglichen, wird ein Subwoofer benötigt. Die genauen Einzelsinustöne, die abgespielt werden sollen, werden anhand der durchgeführten Modalanalyse bestimmt. Als untere Grenzfrequenz, ab der die Modendichte so hoch ist, dass die einzelnen Eigenfrequenzen nicht mehr wahrnehmbar sind, gilt die Schröderfrequenz. Sie berechnet sich für den Hallraum der TU Graz nach Gleichung 3.1 (9):

$$f_{g,Hallraum} = \frac{1000}{\sqrt[3]{V}} = 160 \text{ Hz} \quad 3.1$$

Nell (3) hingegen verwendet zur Bestimmung der unteren Grenzfrequenz in seiner Arbeit das Kriterium von Späh (14): Sind in einem Terzband mehr als 20 Eigenfrequenzen vorhanden, so sind ab diesem Terzband keine störenden „Einzelraummoden“ mehr hörbar. Nell hat unterhalb dieses Terzbandes, also im Frequenzbereich von 20 Hz – 100 Hz, insgesamt 43 Eigenfrequenzen gefunden. Dabei ist in diesem Frequenzbereich zwischen zwei Modengruppen zu unterscheiden: Terzbänder mit weniger als 5 Eigenmoden (sehr tiefe Frequenzen) und Terzbänder mit 5 bis 20 Eigenmoden (tiefe Frequenzen) (15).

Ein Paper von Zha (15) weist drauf hin, dass die Raummoden, die innerhalb von Terzbändern mit mehr als 5 und weniger als 20 Eigenfrequenzen liegen, mithilfe von **Terzbandrauschsignalen** (TBR) angeregt werden sollten, um die Eigenschaften des modalen Schallfeldes durch das Abklingen aller im Terzband enthaltenen Raummoden zu berücksichtigen (14). Dabei sind die Schallquelle und der Druckempfänger (Messmikrofon) in den gegenüberliegenden Raumecken zu positionieren. Die Raummoden, die innerhalb von Terzbändern liegen, die weniger als 5 Eigenfrequenzen beinhalten, sollten mit diskreten Einzelsinustönen angeregt werden.

Die Eigenfrequenzen eines idealen quaderförmigen Raumes berechnen sich nach Gleichung 2.7. Für die Zwecke dieser Arbeit sind die Terzbänder von 20 – 100 Hz zu betrachten. Innerhalb des 100 Hz – Terzbandes befinden sich 29 Eigenfrequenzen. Dieses Terzband wird dennoch berücksichtigt, da sich hier relevante Frequenzen für den Wirkungsbereich des Kantenabsorbers

befinden und die Vermutung besteht, dass aufgrund der geringen Abweichung vom Grenzwert (9 Moden mehr) die einzelnen Frequenzen aus diesem Terzband doch als "störende" Raummoden identifiziert werden können.

Fuchs (11) argumentiert, dass eine gewisse Unsicherheit besteht, wenn man die untere Grenzfrequenz f_g betrachtet, ab der sich ein diffuses Schallfeld in rechteckigen, wenig gedämpften Räumen ausbildet. Er gibt u.A. die folgende Formel an (Gleichung 3.2):

$$f_g = \frac{2c_0}{\sqrt[3]{V}} \approx 110 \text{ Hz} \quad 3.2$$

Die Eigenfrequenzdichte $\frac{\Delta N_f}{\Delta f}$ ist die Ableitung der Modenanzahl N_f nach der Frequenz f und berechnet sich nach Kuttruff (16) wie folgt (Gleichungen 3.3 und 3.4):

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 \quad 3.3$$

$$\frac{\Delta N_f}{\Delta f} = 4\pi V \frac{f^2}{c^3} \quad 3.4$$

Für Terzbänder gilt (Gleichung 3.5):

$$\frac{\Delta f}{f} = \sqrt[3]{2} - 1 \approx 0.26 \quad 3.5$$

Somit ergibt sich (Gleichung 3.6):

$$N_{max/Terz} \approx 4\pi V \frac{f^3}{c^3} \cdot 0.26 \approx 26 \quad 3.6$$

Basierend auf oben genannten theoretischen und empirischen Richtwerten, wurde die obere Grenze des 100 Hz - Terzbandes (112 Hz) als die höchste zu untersuchende Frequenz dieser Messung gewählt. Sie ist vernachlässigbar höher als die nach Gleichung 3.2 berechnete Grenzfrequenz und das 100 Hz - Terzband enthält nur 3 Raummoden mehr als die nach 3.6 berechnete maximale Modenanzahl pro Terzband.

Hofer (1) definiert in seiner Arbeit die **Frequenzabstandbedingung (FAB)**, die einen Mindestfrequenzabstand zwischen zwei benachbarten Raummoden voraussetzt. Laut ihm „kann sowohl die räumliche Trennung (Positionierung der Mikrofone) als auch die separierte Anregung der Raummodenfrequenzen nicht mehr gewährleistet werden, wenn der Raummodenfrequenzabstand zu gering ist“ (1). In seiner Arbeit werden solche Raummoden nicht analysiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird dennoch versucht, die Raummoden, die diese Bedingung nicht erfüllen, durch gezielte Platzierung der Mikrofone an den Punkten mit hohem Schalldruck einer Raummode und niedrigem Schalldruck der benachbarten naheliegenden Raummode mitzuerfassen. Die FAB von Hofer (1) wird von $\Delta f \geq 0.4 \text{ Hz}$ auf $\Delta f \geq 0.6 \text{ Hz}$ erweitert. Ist der Abstand kleiner als dieser Zahl, so werden die zwei Raummoden ihre Abklingvorgänge gegenseitig beeinflussen und müssen messtechnisch wie beschrieben voneinander getrennt werden. Das 63-Hz-Terzband ist das erste Terzband, innerhalb dem sich mehr als 5 Raummoden befinden. Daher sollte es mit TBR angeregt werden. Allerdings wäre für die weiteren Messungen interessant zu prüfen, inwieweit die Trennbarkeit der benachbarten Raummoden in diesem Grenzterzband

gewährleistet werden kann. Deswegen ist dieses Terzband sowohl mit TBR als auch mit Einzelsinustönen anzuregen. Die erste Raummode aus dem 80 Hz-Terzband (3-0-1) wird aufgrund des geringen Frequenzabstands zur letzten Raummode aus dem 63 Hz – Terzband (2–2–0) ebenfalls berücksichtigt.

Tabelle 3.1 listet die nach Gleichungen 3.8 und 3.9 berechneten Frequenzen aller Raummoden bis und einschließlich 100 Hz - Terzband bei der am Tag der Messung im Hallraum gemessenen Temperatur von 18.2 °C auf:

Nr.	Art	n_x	n_y	n_z	Frequenz [Hz]	Terzbandmittenfrequenz
1	axial	1	0	0	20.53	20 Hz
2	axial	0	1	0	28.58	31,5 Hz
3	axial	0	0	1	34.94	31,5 Hz
4	tangential	1	1	0	35.19	40 Hz
5	tangential	1	0	1	40.53	40 Hz
6	axial	2	0	0	41.06	40 Hz
7	tangential	0	1	1	45.14	50 Hz
8	oblique	1	1	1	49.59	50 Hz
9	tangential	2	1	0	50.03	50 Hz
10	tangential	2	0	1	53.91	50 Hz
11	axial	0	2	0	57.17	63 Hz
12	tangential	1	2	0	60.74	63 Hz
13	oblique	2	1	1	61.02	63 Hz
14	axial	3	0	0	61.59	63 Hz
15	tangential	0	2	1	67.00	63 Hz
16	tangential	3	1	0	67.90	63 Hz
17	axial	0	0	2	69.88	63 Hz
18	oblique	1	2	1	70.07	63 Hz
19	tangential	2	2	0	70.38	63 Hz
20	tangential	3	0	1	70.81	80 Hz
21	tangential	1	0	2	72.83	80 Hz
22	tangential	0	1	2	75.50	80 Hz
23	oblique	3	1	1	76.36	80 Hz
24	oblique	1	1	2	78.24	80 Hz
25	oblique	2	2	1	78.58	80 Hz
26	tangential	2	0	2	81.05	80 Hz
27	tangential	4	0	0	82.12	80 Hz
28	tangential	3	2	0	84.03	80 Hz
29	axial	0	3	0	85.75	80 Hz
30	oblique	2	1	2	85.94	80 Hz
31	tangential	4	1	0	86.95	80 Hz
32	tangential	1	3	0	88.17	80 Hz
33	tangential	4	0	1	89.24	80 Hz
34	tangential	0	2	2	90.28	100 Hz
35	oblique	3	2	1	91.00	100 Hz
36	oblique	1	2	2	92.59	100 Hz
37	tangential	0	3	1	92.59	100 Hz
38	tangential	3	0	2	93.15	100 Hz
39	oblique	4	1	1	93.71	100 Hz
40	oblique	1	3	1	94.84	100 Hz

41	tangential	2	3	0	95.07	100 Hz
42	oblique	3	1	2	97.43	100 Hz
43	oblique	2	2	2	99.18	100 Hz
44	tangential	4	2	0	100.05	100 Hz
45	oblique	2	3	1	101.29	100 Hz
46	axial	5	0	0	102.64	100 Hz
47	axial	0	0	3	104.82	100 Hz
48	tangential	3	3	0	105.57	100 Hz
49	oblique	4	2	1	105.98	100 Hz
50	tangential	5	1	0	106.55	100 Hz
51	tangential	1	0	3	106.81	100 Hz
52	tangential	4	0	2	107.83	100 Hz
53	tangential	5	0	1	108.43	100 Hz
54	tangential	0	1	3	108.65	100 Hz
55	oblique	3	2	2	109.29	100 Hz
56	oblique	1	1	3	110.57	100 Hz
57	tangential	0	3	2	110.62	100 Hz
58	oblique	3	3	1	111.20	100 Hz
59	oblique	4	1	2	111.55	100 Hz
60	oblique	5	1	1	112.13	100 Hz
61	oblique	1	3	2	112.51	100 Hz
62	tangential	2	0	3	112.58	100 Hz

Tabelle 3.1: Raummoden innerhalb von Terzbändern bis und inklusiv 100 Hz Terzband. Rote Schrift – nahbenachbarte Raummoden; weiß – Anregung mit Einzelsinustönen; blau – Anregung mit Einzelsinustönen und 63-Hz-Terzbandrauschsignal (TBR); orange - Anregung mit 80-Hz-TBR; grün - Anregung mit 100-Hz-TBR.

Aus Tabelle 3.1 ist ersichtlich, dass insgesamt 20 (10 + 9 aus 63 Hz-Terzband + 1 aus 80 Hz-Terzband) Einzelsinustöne- und 3 TBR für die Analyse des modalen Schallfelds des Hallraums verwendet werden. Um ein repräsentatives Ergebnis der TBR-Messungen zu erhalten, werden pro Terzband jeweils 3 unterschiedliche Rauschsignale generiert, abgespielt und die Ergebnisse gemittelt. Es sind also in dieser Messung insgesamt 29 TBR- und Sinussignale pro Messkonfiguration zu verwenden.

Abbildung 3.2 zeigt den Frequenzgang einer bereits durchgeführten Messung (3) und dient der graphischen Veranschaulichung von Raummoden, die mithilfe von Einzelsinustönen im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden.

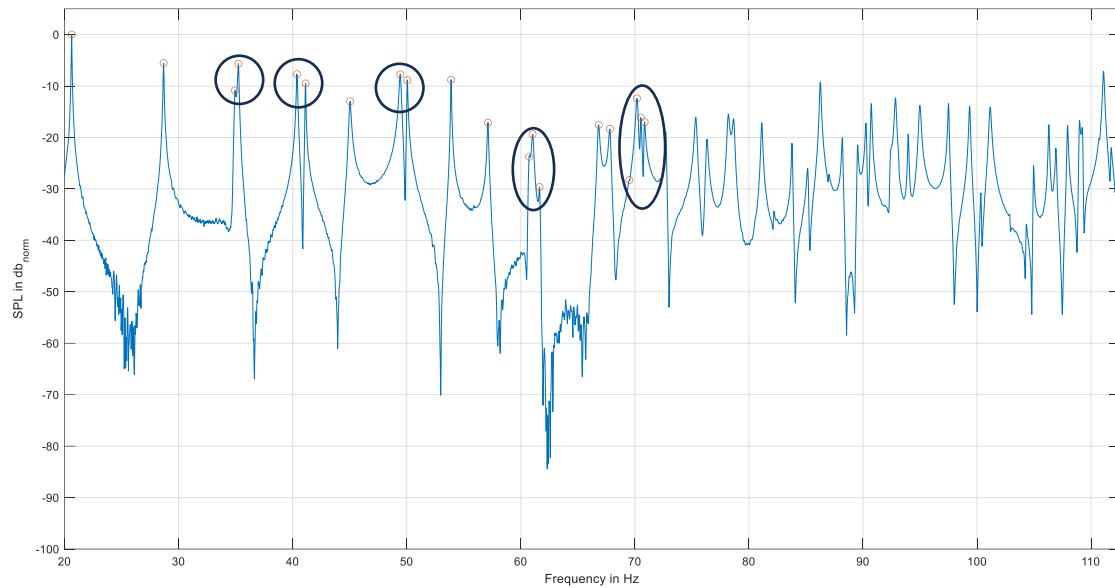


Abbildung 3.2¹: Amplituden der Raummoden aus der Sweepmessung im Hallraum der TU Graz, durchgeführt von Nell (3) und normiert auf die höchste vorkommende Amplitude ($0 \text{ dB}_{\text{norm}}$). In roten Kreisen befinden sich die Raummoden, die mit Einzelsinustönen angeregt werden. In schwarzen Kreisen sind die Raummoden, die nah zueinander liegen und durch zusätzliche Messpositionen getrennt werden müssen (siehe Tabelle 3.1).

Für diesen Messungstyp wird ein Subwoofer verwendet, der idealerweise im Frequenzbereich 20 Hz - 100 Hz ein lineares Verhalten aufweist. Der Mackie SRM 1850 steht zur Verfügung. Dieser Lautsprecher weist zwar nur zwischen etwa 44 Hz und 96 Hz einen quasi linearen Frequenzgang auf (-3 dB Grenze, Abbildung 3.3), hat sich jedoch in der Praxis als geeignet zur Untersuchung des modalen Schallfeldes bewährt.

Eine grobe Linearisierung des Subwoofer - Frequenzgangs wird bei den Sinusmessungen durch entsprechende Pegelanpassungen direkt im Messskript durchgeführt, um bei allen Frequenzen ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis zu garantieren (Tabelle 3.2).

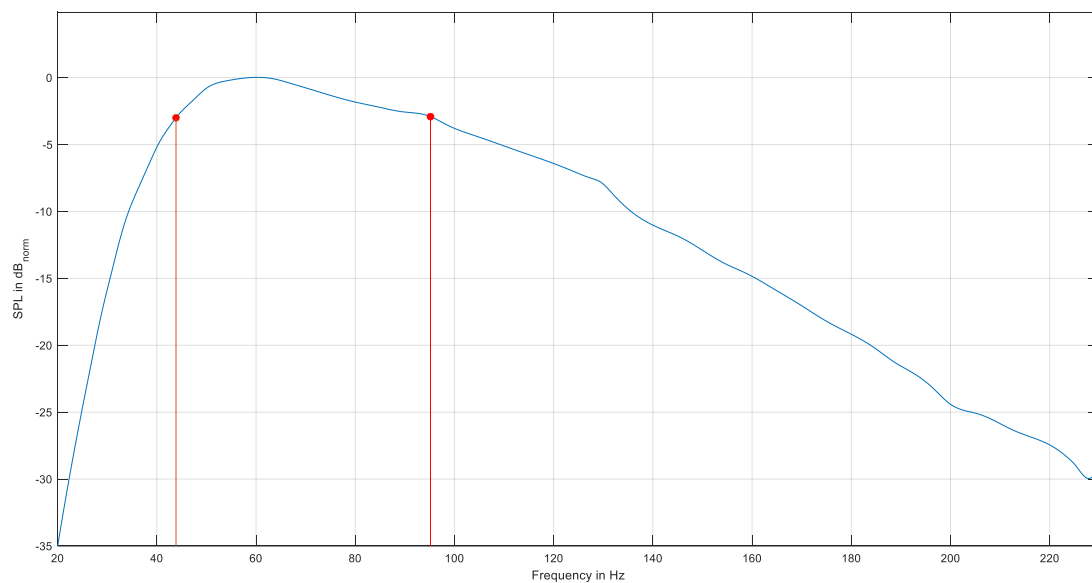


Abbildung 3.3: Frequenzgang des Mackie SRM1850 Lautsprechers. Die roten Punkte bezeichnen die -3 dB Grenzen.

¹ SPL steht für „Sound pressure level“. Im weiteren Text wird diese Abkürzung verwendet.

Raummode	Frequenz in Hz	Pegelanpassung in dB
1-0-0	20.5	+30
0-1-0	28.5	+19
0-0-1	34.9	+8.5
1-1-0	35.2	+5
1-0-1	40.4	+5
2-0-0	40.9	+2.5

Tabelle 3.2: Pegelanpassungen für eine grobe Linearisierung des Frequenzgangs der Schallquelle. Die restlichen Raummoden werden beim voll aufgedrehten Subwoofer mit einem -40 dBFS Sinussignal angeregt.

Auf der Empfängerseite wird ein Messmikrofon mit Kugelrichtcharakteristik verwendet. Das Messmikrofon ist in der oberen, von der Schallquelle gegenüberliegenden Ecke zu positionieren (siehe MP1 und QP1, Abbildung 3.9). Um die aus der Tabelle 3.1 ersichtlichen nah benachbarten Raummoden voneinander zu entkoppeln, betrachtet man die örtliche Verteilung des Schalldrucks dieser Moden (Abbildung 3.4, Abbildung 3.5, Abbildung 3.6, Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8).

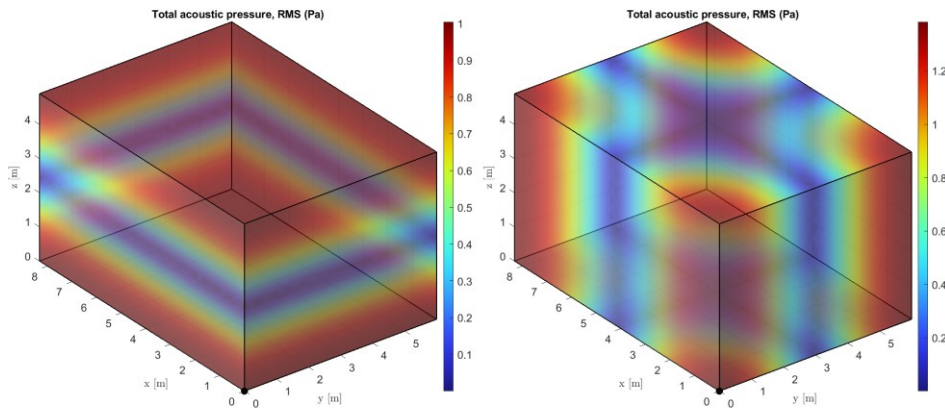


Abbildung 3.4: Örtliche Verteilung des Schalldrucks (RMS) der Raummoden 0-0-1 (links, 34.9 Hz) und 1-1-0 (rechts, 35.2 Hz).

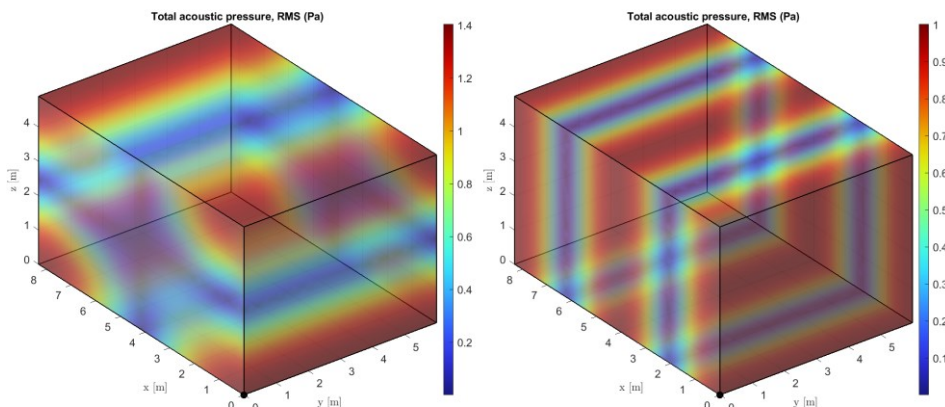


Abbildung 3.5: Örtliche Verteilung des Schalldrucks (RMS) der Raummoden 1-0-1 (links, 40.4 Hz) und 2-0-0 (rechts, 40.9 Hz).

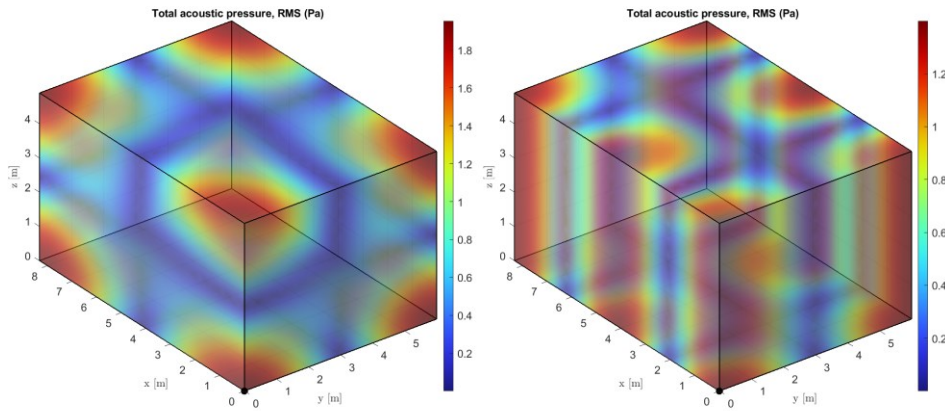


Abbildung 3.6: Örtliche Verteilung des Schalldrucks (RMS) der Raummoden 1-1-1 (links, 49.6 Hz) und 2-1-0 (rechts, 50 Hz).

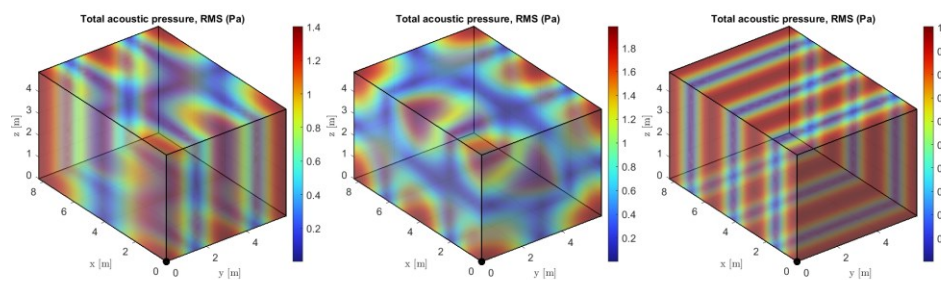


Abbildung 3.7: Örtliche Verteilung des Schalldrucks (RMS) der Raummoden 1-2-0 (links, 60.6 Hz) und 2-1-1 (Mitte, 60.9 Hz) und 3-0-0 (rechts, 61.5 Hz).

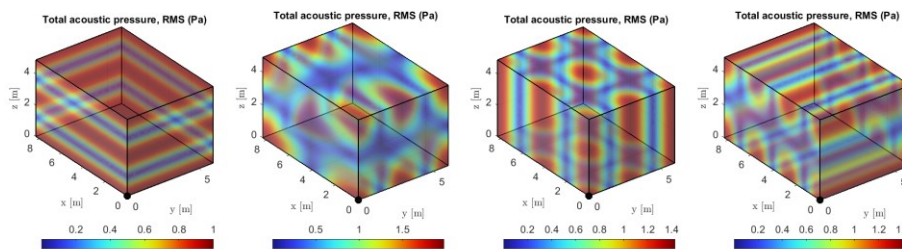


Abbildung 3.8: Örtliche Verteilung des Schalldrucks (RMS) der Raummoden 0-0-2 (links, 69.8 Hz) und 1-2-1 (Mitte links, 70 Hz), 2-2-0 (Mitte rechts, 70.3 Hz) und 3-0-1 (rechts, 70.7).

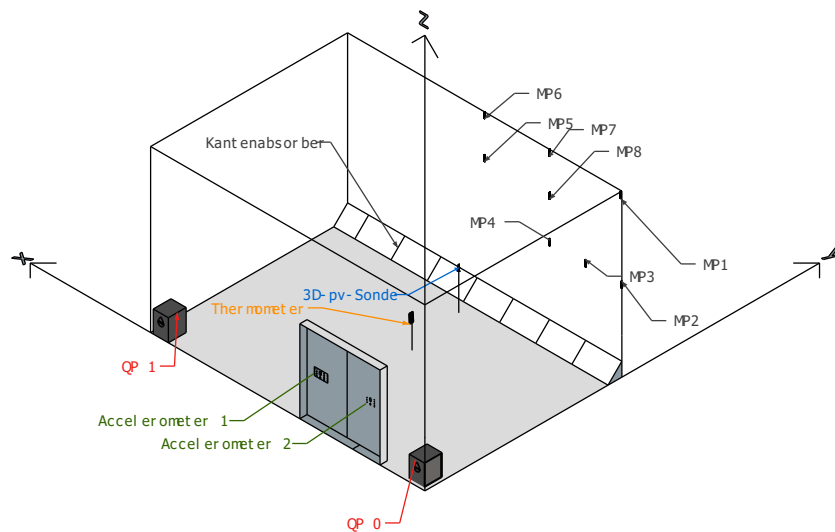


Abbildung 3.9: Schematischer Messaufbau. Die Abmessungen der Geräte wurden für eine bessere Sichtbarkeit vergrößert. QP 0 bezeichnet die erste Quelleposition für die lange Ecke-Ecke-Sweepmessung.

Messpunkt	x	y	z
MP1	0	5.99	4.9
MP2	0	5.99	2.45
MP3	1.043	5.99	2.45
MP4	2.085	5.99	2.45
MP5	4.17	5.99	3.675
MP6	4.17	5.99	4.9
MP7	2.085	5.99	4.9
MP8	2.085	5.99	3.675

Tabelle 3.3: Koordinaten aller Messpunkte.

Die Gewichtung der Raummoden an einem bestimmten Ort im idealen Quaderraum lässt sich wie folgt berechnen (Gleichung 3.7 (6)):

$$G_{Moden} = \left| \cos\left(\frac{\pi \cdot n_x \cdot x}{l_x}\right) \right| \cdot \left| \cos\left(\frac{\pi \cdot n_y \cdot y}{l_y}\right) \right| \cdot \left| \cos\left(\frac{\pi \cdot n_z \cdot z}{l_z}\right) \right| \quad 3.7$$

n_x, n_y, n_z – Ordnungszahlen; l_x, l_y, l_z – Abmessungen des Raumes; x, y, z – Koordinaten der Messpunkte.

Aus Gleichung 3.7 und den Koordinaten aus Tabelle 3.3 ergibt sich die Tabelle der Modengewichtung an ausgewählten Messpunkten (Tabelle 3.4).

	1-0-0	0-1-0	0-0-1	1-1-0	1-0-1	2-0-0	0-1-1	1-1-1	2-1-0	2-0-1	0-2-0	1-2-0	2-1-1	3-0-0	0-2-1	3-1-0	0-0-2	1-2-1	2-2-0	3-0-1
MP1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MP2	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
MP3	0.92	1	0	0.92	0	0.71	0	0	0.71	0	1	0.92	0	0.38	0	0.38	1	0	0.71	0
MP4	0.71	1	0	0.71	0	0	0	0	0	0	1	0.71	0	0.71	0	0.71	1	0	0	0
MP5	0	1	0.71	0	0	1	0.71	0	1	0.71	1	0	0.71	0	0.71	0	0	0	1	0
MP6	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
MP7	0.71	1	1	0.71	0.71	0	1	0.71	0	0	1	0.71	0	0.71	1	0.71	1	0.71	0	0.71
MP8	0.71	1	0.71	0.71	0.5	0	0.71	0.5	0	0	1	0.71	0	0.71	0.71	0.71	0	0.5	0	0.5

Tabelle 3.4: Modengewichtung G_{Moden} an allen Messpunkten. Dabei entspricht 1 einem Druckmaximum und 0 einem Druckminimum.

Aus Tabelle 3.4 folgen die Beziehungen zwischen den Raummoden und den acht Messpunkten, die in Tabelle 3.5 dargestellt werden:

Mode	Frequenz [Hz]	Hoher Schalldruckpegel	Niedriger Schalldruckpegel	Abbildung
0 0 1	34.9	MP6	MP2	Abbildung 3.4
1 1 0	35.2	MP2	MP6	
1 0 1	40.4	MP7	MP2	Abbildung 3.5
2 0 0	40.9	MP2	MP7	
1 1 1	49.6	MP7	MP2	Abbildung 3.6
2 1 0	50	MP2	MP 7	
1 2 0	60.6	MP3	MP4, MP6	Abbildung 3.7
2 1 1	60.9	MP6	MP3, MP4	
3 0 0	61.5	MP4	MP3, MP6	
0 0 2	69.8	MP4	MP5, MP8	Abbildung 3.8
1 2 1	70	MP8	MP5, MP4	
2 2 0	70.3	MP5	MP4, MP8	
3 0 1	70.7	MP7	MP3, MP6	

Tabelle 3.5: Nah benachbarte Raummoden und die messtechnische Trennung durch die Platzierung der Messpunkte an Stellen des hohen- bzw. niedrigen Schalldruckes der benachbarten Moden.

Abbildung 3.9, Tabelle 3.3 und Tabelle 3.5 zeigen, wie die Messmikrofone positioniert werden sollen, um eine Trennung aller Moden von Interesse zu gewährleisten (Abbildung 3.10, links).

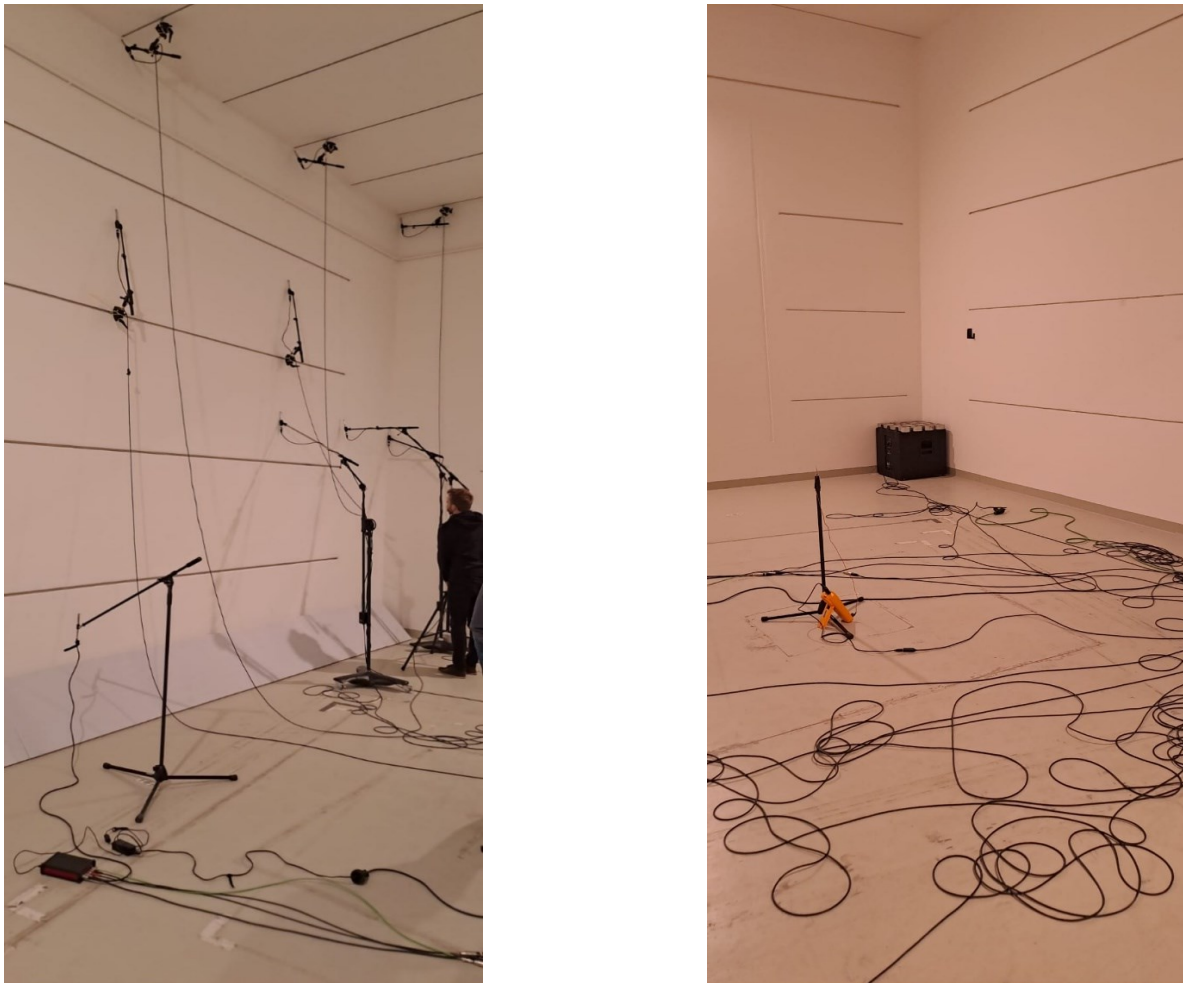


Abbildung 3.10: Links: Positionierung der Messmikrofone und der 3D-pv-Sonde. Rechts: Subwoofer und Thermometer. Der Subwoofer wurde mit Gewichten beschwert, um zu verhindern, dass er sich bei den hohen Schalldruckpegeln bewegt.

3.2 Aufnahme des Schwingungsverhaltens der Eingangstür

Es besteht die Vermutung, dass die Eingangstür des Hallraums als Plattenresonator wirkt und somit auch die Nachhallzeit beeinflusst. Inwiefern und bei welcher Frequenz dieser Effekt zustande kommt, ist mithilfe von Beschleunigungssensoren näher zu untersuchen. Ein Beschleunigungssensor (eng. Accelerometer) funktioniert folgenderweise: eine Schwingung verursacht eine Kraft, die die Ladungen innerhalb des Piezomaterials „komprimiert“. Dies hat eine elektrische Spannung zur Folge, die proportional der Kraft ist. Nachdem die Masse des Sensors konstant ist, ist die Spannung ebenso zur Beschleunigung proportional. Die Frequenz, die also ein Maximum der Beschleunigung am Sensor verursacht und nicht in Frequenzgängen der Messmikrofone als ein Maximum ersichtlich ist, ist die Resonanzfrequenz der Tür.

Die Messung ist zeitgleich zu den restlichen Messungen durchzuführen. Es sind zwei Beschleunigungssensoren auf beiden Türflügeln mittig zu platzieren. Bei den Anforderungen an den

Beschleunigungssensor ist darauf zu achten, dass die Masse des Sensors mindestens 10-mal geringer als die Masse des Objekts ist. Da die zur Verfügung stehenden Sensoren eine Masse von wenigen Gramm aufweisen (1 g bzw. 4 g für die Modelle aus Tabelle 3.6) und eine Eisentür vermessen werden sollte, ist diese Anforderung erfüllt.

3.3 Aufnahme der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsänderung

Der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit ist gegeben durch Gleichung 3.8 (7):

$$c(\vartheta) \approx (331,5 + 0,6\vartheta) \text{ m/s} \quad 3.8$$

Da die Wellenlänge der Raummoden durch die Abmessungen des Raumes bestimmt wird, bleibt sie konstant. Somit verursacht eine Änderung der Temperatur und somit der Schallgeschwindigkeit eine Änderung der Frequenz der Raummoden (Gleichung 3.9):

$$f = f_{\text{gemessen}} \cdot \frac{c(\vartheta_{\text{Bezug}})}{c(\vartheta_{\text{gemessen}})} \quad 3.9$$

f – temperaturkorrigierte Frequenz; f_{gemessen} – tatsächlicher Frequenzwert bei der Messung; $c(\vartheta_{\text{Bezug}})$ – Schallgeschwindigkeit bei der Bezugstemperatur 18.2 °C; $c(\vartheta_{\text{gemessen}})$ – Schallgeschwindigkeit bei gemessener Temperatur für die jeweilige Messung.

Die Temperatur ist also bei jeder Messung aufzuzeichnen, um möglichst präzise Aussagen über die Messergebnisse treffen zu können. Die Luftfeuchtigkeit ist einmal zum Messbeginn zu dokumentieren. Der Temperatursensor ist in der Raummitte auf einer Höhe von $\approx 1\text{m}$ zu platzieren.

Gemäß ISO 354 (4) wird eine Luftfeuchtigkeit von 30% - 90% und eine Temperatur von ≥ 15 °C vorgeschrieben.

3.4 Planung der Messung

Um die Signaldauer von Anregungssignalen zu bestimmen, sind die Dauer des Anhalls, des stationären Zustands und des Abklingvorgangs zu berücksichtigen (Abbildung 3.11).

Abbildung 3.11 besitzt streng genommen Gültigkeit nur im Rahmen der statistischen Raumakustik. Daher sind Begriffe wie „Anhall“ und „Nachhall“ für die Analyse der Abklingvorgänge einzelner Raummoden nicht adäquat. Dennoch wird diese Abbildung als Ausgangspunkt für die Bestimmung der Dauer von Sinusmessungen verwendet, da die Abklingkurven der einzelnen Raummoden einen ähnlichen Verlauf aufweisen.

Da ein Großteil der Messung unterhalb des Wirkungsbereiches vom Kantenabsorber durchgeführt wird (siehe Berechnung 2.13), ist für alle Signale die maximale Nachhallzeit aus dem leeren Hallraum anzunehmen. Im betrachteten Frequenzbereich sind Nachhallzeiten von bis zu 45s zu erwarten (3). Der Anhall und der stationäre Zustand sind für die Messung nicht relevant,

müssen aber dennoch bei der Bestimmung der Signallänge berücksichtigt werden. Dabei muss der stationäre Zustand nicht so lange wie in Abbildung 3.11 sein, da vor allem während des Nachhalls gemessen wird. Daher wird eine Gesamtlänge von **75s** gewählt, damit sowohl der Nachhall (ca. 45s max.) als auch der Anhall und der stationäre Zustand (Schätzwert 10s + 20s = 30s) berücksichtigt werden. Die Anregungssignale (Sinus- und TBR-Signale) dauern also 30s und nach dem Abschalten werden die Abklingvorgänge noch 45s aufgenommen.

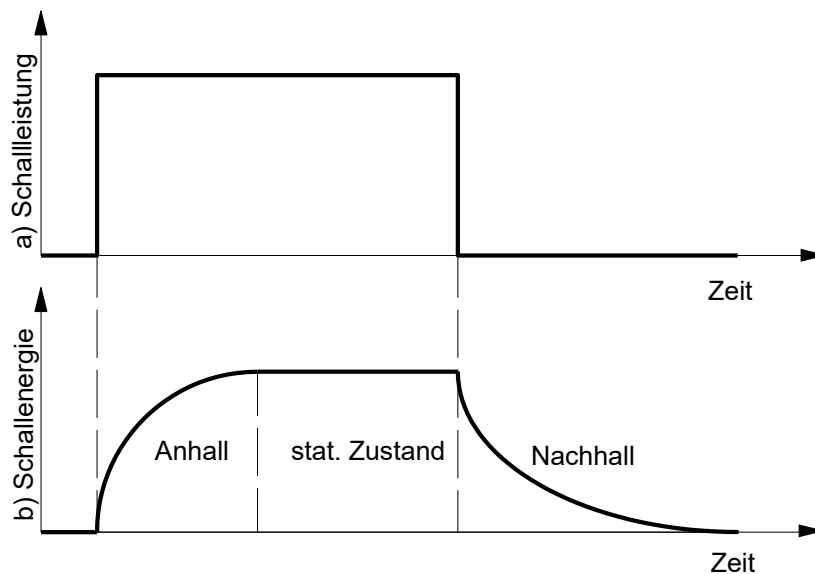


Abbildung 3.11: Zeitverlauf: a) zugeführte Schalleistung, b) Auf- und Abbau der mittleren Schallenergie im Raum (17).

Um eine gleichmäßigere statistische Verteilung von Rauschsignalen zu erhalten und die Messunsicherheit zu verringern, sollten die TBR-Signale in mehreren Zyklen generiert und abgespielt werden, wie in der ÖNORM 3382-2 beschrieben (18). Daher werden 3 Zyklen pro TBR-Messung generiert, was zusammen 9 TBR-Signale pro Messkonfiguration ergibt.

Es werden bei jeder Messkonfiguration nacheinander 20 Einzelsinustöne und 9 TBR-Signale abgespielt. Das ergibt insgesamt 29 Signale pro Messkonfiguration. Jedes Signal hat eine Dauer von 75 Sekunden. Bei 4 Messkonfigurationen beträgt die Gesamtdauer 29 Signale x 75 Sekunden x 4 Messkonfigurationen = 8700 Sekunden.

Vor der Vermessung jeder Messkonfiguration werden die Sweepmessungen durchgeführt. Gemäß der ÖNORM EN ISO 18233 (19) gibt es keine speziellen Anforderungen, welche die Sweeppdauer mit der erwarteten Nachhallzeit in Verbindung setzen. Die Erfassungszeit muss jedoch länger als die Sweeppdauer sein, um den Nachhall so lange erfassen zu können, bis er im Grundgeräusch abgeklungen ist. Im Allgemeinen sind längere Sweeps vorzuziehen, da sie einen größeren Signalrauschabstand gewährleisten, die Anfälligkeit für zeitliche Varianzen verringern und die Trennung der Verzerrungsprodukte erleichtern. Wählt man einen langen Sweep von 100s, um eine gute Frequenzauflösung zu gewährleisten und lässt 45s Zeit nach dem Abschalten des Signales fürs Abklingen, so steigt der Messaufwand um $(100s + 45s) \times 4 = 580s$. Zusätzlich werden zu Beginn der Messung zwei gleich lange Sweeps ($2 \times 145s = 290s$) für die Ecke-Ecke-Auswertung durchgeführt.

Da ein Messzyklus bereits lange dauert (20 x Sinus + 9 x TBR + langer Sweep vor allen Messungen = 38 min und 40s) und daher nennenswerte Temperaturänderungen möglich sind, ist es sinnvoll, den Sweep auch vor jedem Sinussignal abzuspielen, um vor jeder Sinusmessung die

Modalanalyse durchzuführen und die Frequenzverschiebung aufgrund der Temperaturänderungen zu berücksichtigen. Diese Sweeps können die gleiche Länge wie die Einzelsinuston- und TBR-Signale haben ($30s + 45s = 75s$). Dadurch erhöht sich die Gesamtdauer um zusätzliche $20 \times 75s \times 4 = 6000s$.

Die gesamte effektive Messdauer beträgt also $8700s + 580s + 290s + 6000s = \mathbf{15570s}$ bzw. **4h 19min und 50s**. Aufgrund des Auf- und Abbaus des Messequipments, der Umstellung der vier Messkonfigurationen und des manuellen Ablesens der zu generierenden Sinusfrequenzen nach jeder Modalanalysemessung ist mit einem erhöhten Messaufwand zu rechnen. Abbildung 3.12 zeigt den prinzipiellen Messaufbau und die Tabelle 3.6 listet das verwendete Messequipment auf.

Das Schwingungsverhalten der Eingangstür und die Temperatur müssen bei jeder Messung aufgezeichnet werden. Die Luftfeuchtigkeit sollte einmal vor allen Messungen gemäß ISO 354 (4) überprüft werden. Während der Messung ist zu achten, dass die Anforderungen an die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit gemäß ISO 3741 (10) eingehalten werden (siehe Tabelle 2.2).

Für die Auswertung sind MATLAB-Skripte zu erstellen, die die Verarbeitung der Messdaten durchführen und die Ergebnisse darstellen.

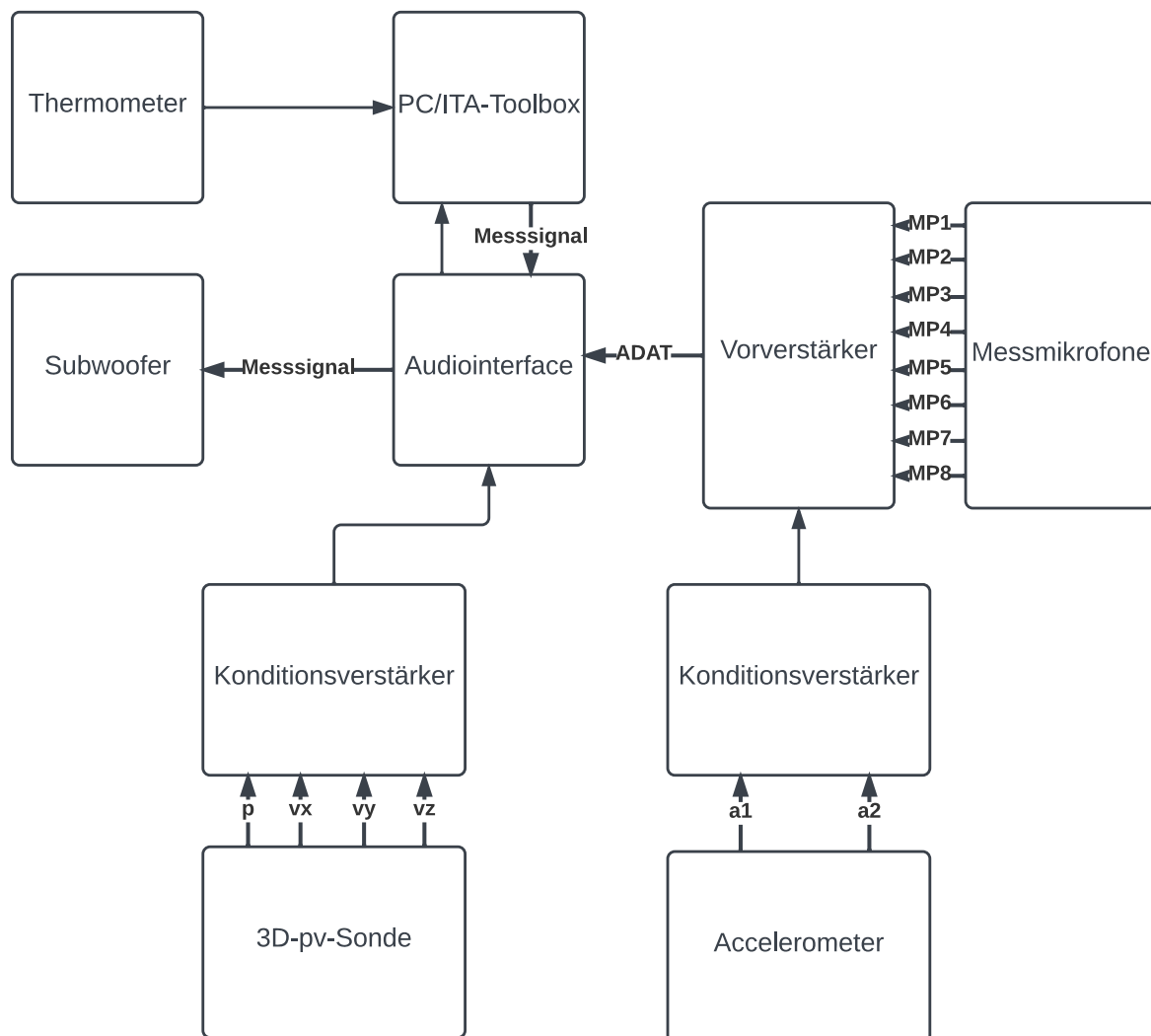


Abbildung 3.12: Blockschaltbild des Messaufbaus

Messequipment	Hersteller und Modell	Anzahl	Verfügbarkeit
Subwoofer	Mackie SRM 1850	1	HTU Graz
Messmikrofon	NTI Messmikrofone (+48V)	8	IEM Graz
3D-pv-Sonde + Konditionsverstärker	Microflown USP Regular Microflown MFPA-4	1	Laaber/Microflown
Accelerometer + Konditionsverstärker	PCB Piezotronics 333B30 und M317A41 Verstärker: 482A22	2	EMS Graz
Thermometer	Multimeter Fluke 289 mit 80BK-A	1	SPSC Graz
Galgen von Stativen	K&M	8	SPSC Graz
Stativ Overhead	K&M	3	SPSC Graz
Messsoftware	ITA-Toolbox/MATLAB	1	SPSC Graz
Vorverstärker	Focusrite Octopre MKII	2	SPSC Graz
Audiointerface	RME Fireface	1	SPSC Graz

Tabelle 3.6: Verwendetes Equipment bei den Messungen der Abklingvorgänge im Hallraum der TU-Graz.

4 Messsteuerung

Um die Messungen aus dem Kapitel 1 durchführen zu können, werden MATLAB-Skripte benötigt, die das Messverfahren automatisieren (Abbildung 4.1).

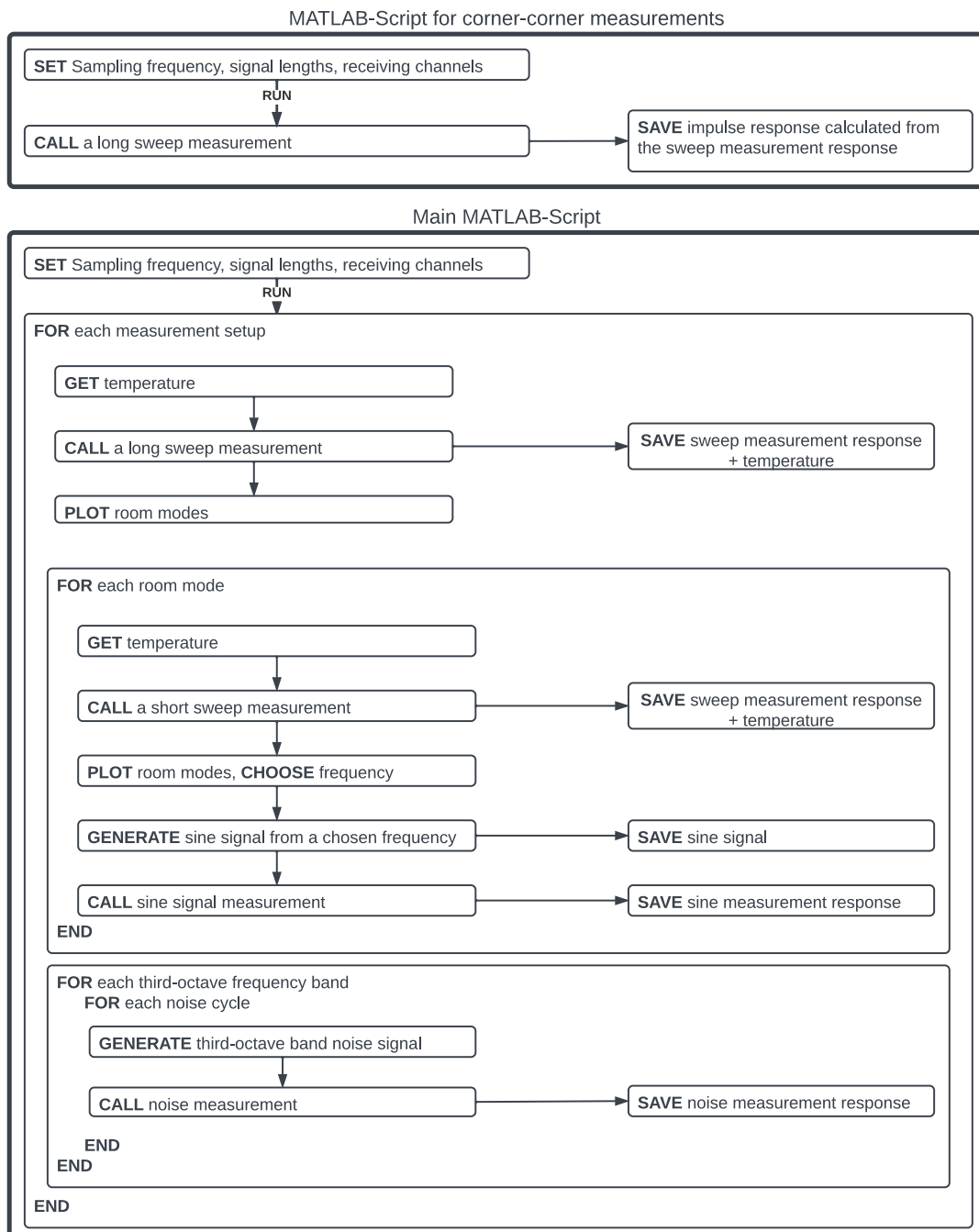


Abbildung 4.1: Pseudocode der MATLAB-App zur automatischen Steuerung des Messverfahrens.

Für die Erzeugung der Messsignale und die Durchführung von Messungen werden Funktionen aus der ITA-Toolbox der RWTH Aachen University verwendet.

4.1 Ablesen der Temperatur

Um eine präzise Auswertung während der Messung zu ermöglichen, muss die Temperaturverschiebung der Raummoden berücksichtigt und entsprechend korrigiert werden (siehe Gleichung 3.8). Vor jeder Sweepmessung ist die Temperatur abzulesen und einzugeben (siehe Abbildung 4.2). Dafür muss eine Verbindung zwischen dem FLUKE-289 Multimeter und dem PC hergestellt werden. Um die Temperaturdaten aus dem Hallraum am PC abzulesen, ist die „Fluke ViewForms“ App zu installieren. Die App zeigt die aktuelle Ausgabe des Multimeters an.

4.2 Ausführung der initialen Ecke-Ecke-Sweepmessungen

Für die initialen Ecke-Ecke-Sweepmessungen muss das MATLAB-Skript „initialMeasurement.m“ ausgeführt werden. Vor der Ausführung müssen folgende Variablen direkt im Skript festgelegt bzw. geändert werden:

fs – Samplingfrequenz, Voreinstellung: 48000 Hz;

track_length_long – Signaldauer. Voreinstellung: 100s;

silence_length – Dauer der aufgenommenen Abklingzeit. Voreinstellung: 45s;

mic_channels – aufzuzeichnende Kanäle;

f_rng – Frequenzbereich der Messung. Voreinstellung: 20 Hz – 125 Hz.

Nach der Ausführung erscheint das Fenster zur Eingabe der Temperatur (Abbildung 4.2). Der Wert wird aus der „Fluke ViewForms“ App manuell übernommen.

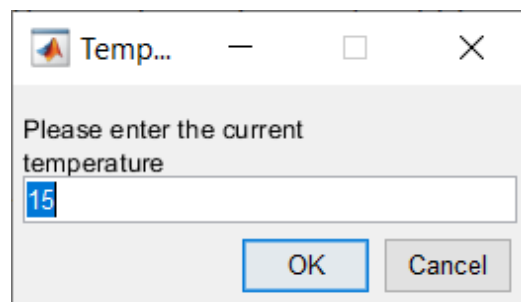


Abbildung 4.2: Fenster zur Temperatureingabe, das vor jeder Sweepmessung erscheint.

Anschließend wird die Messung durchgeführt und die Frequenzspektren vom MP1 und der beiden Accelerometer geplottet.

4.3 Ausführung der Messkampagne

Um die Sweep-, Sinus- und TBR-Messungen durchzuführen, muss das MATLAB-Skript "measurement.m" geöffnet werden. Vor der Ausführung müssen die gleichen Variablen wie im Unterkapitel 4.2 festgelegt werden. Eine zusätzliche Variable, *track_length_short*, ist noch zu ändern. Sie bezeichnet in diesem Fall die Gesamtaufzeichnungsdauer bei (kürzeren) Sweep-,

Sinus- und TBR-Messungen und ist standardmäßig auf 75s (30s Signaldauer + 45s restlicher Aufzeichnung nach dem Abschalten des Signales) eingestellt.

Vor jeder Sweepmessung wird die Temperatur eingegeben (siehe Abbildung 4.2). Nach der Messung wird der Frequenzgang der Sweepmessung um die zu untersuchende Mode geplottet (Abbildung 4.3).

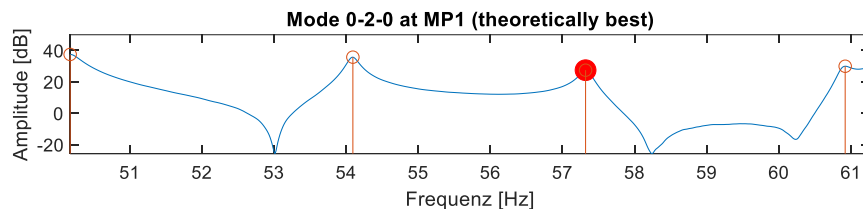


Abbildung 4.3: Beispiel eines Plots nach der Sweepmessung. Ist der Nutzer nicht zufrieden mit der automatischen Auswahl der Frequenz (roter Punkt), so kann er selbst die Frequenz eingeben oder den Frequenzgang um die zu untersuchende Mode an einem anderen Messpunkt anschauen. „Theoretically best“ bezieht sich auf den theoretisch bestmöglichen Messpunkt.

Der Benutzer hat drei Möglichkeiten: Fortfahren mit der vorgeschlagenen Modenfrequenz, einen anderen Messpunkt für die Darstellung des Frequenzgangs um die zu untersuchende Mode auswählen oder manuell eine andere Frequenz eingeben (Abbildung 4.4).

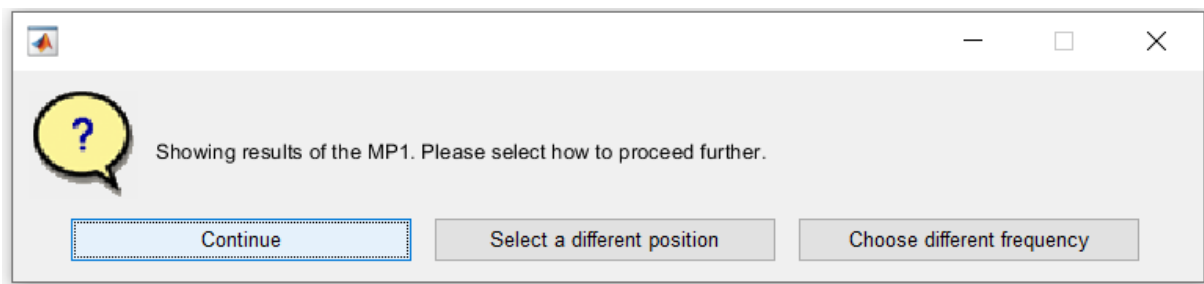


Abbildung 4.4: Fenster nach der Sweepmessung.

Aus der ausgewählten Frequenz wird dann ein Sinussignal generiert und abgespielt. Nach 20 Sweep- und Sinusmessungen, werden die TBR-Messungen automatisch durchgeführt.

Nach jeder Sinus- und TBR-Messung wird der Zeitverlauf der Messung geplottet, um mögliche Störungen frühzeitig erkennen zu können.

5 Messdatenverarbeitung

Abbildung 5.1 zeigt eine schematische Darstellung der Messdatenverarbeitung. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte erläutert.

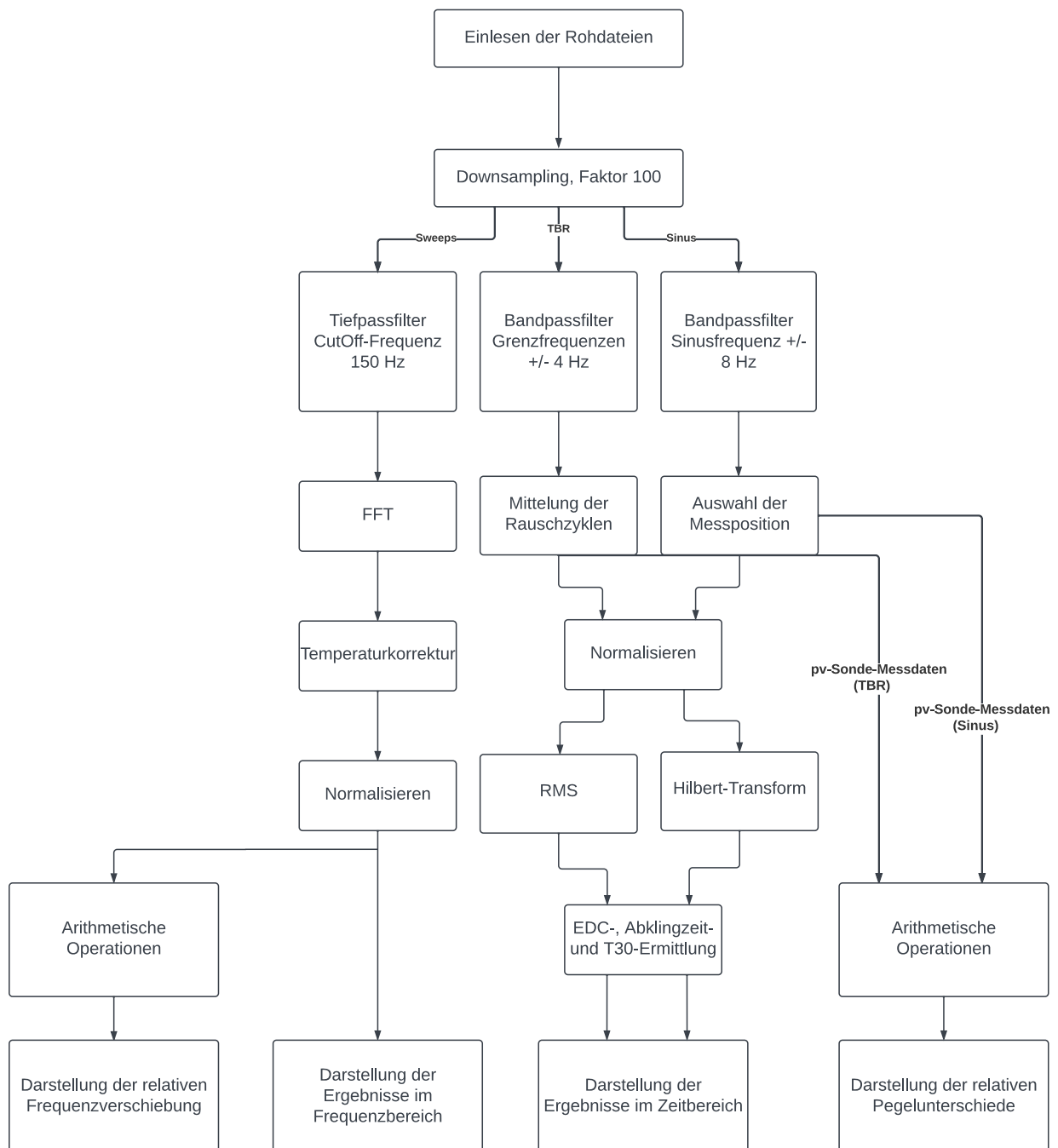


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Messdatenverarbeitung.

5.1 Filterung und Downsampling

Um die Datenmenge zu reduzieren (über 30 GB), werden die Daten, welche bei einer Samplingfrequenz von 48kHz aufgenommen wurden, downgesampled.

Alle Sweepsignale wurden von 20 Hz bis 125 Hz generiert. Daher wird bei allen Sweepantworten ein Butterworth-Tiefpassfilter 10. Ordnung mit 150 Hz CutOff-Frequenz gewählt.

Bei TBR- und Sinusmessungen ist eine Bandpassfilterung erforderlich. Empirisch wurde festgestellt, dass für diese Messdaten ein Butterworth-Bandpassfilter 2. Ordnung geeignet ist. Bei TBR-Signalen wird folgender Filterbereich gewählt²: $f_{uG, TB} - 4$ Hz bis $f_{oG, TB} + 4$ Hz; bei Sinussignalen: $f_{Sinus} - 8$ Hz bis $f_{Sinus} + 8$ Hz.

Die höchste darstellbare Frequenz wird nach dem Nyquist-Theorem durch die Abtastrate f_s (Samplingfrequenz) bestimmt (Gleichung 5.1) (20):

$$f_{max} = \frac{1}{2} f_s \quad 5.1$$

Es wird ein Downsamplingfaktor von 100 gewählt. So wird die ursprüngliche Abtastrate, die bei 48 kHz lag, auf 480 Hz verringert und die Nyquistbedingung aus 5.1 wird erfüllt, da die obere Grenzfrequenz der Messungen bei 125 Hz liegt und die höchste darstellbare Frequenz nach Gleichung 5.1 sich bei 240 Hz befindet. Downsampling wird mittels der Funktion *ita_resample* realisiert.

5.2 Verarbeitung von Sweepmessdaten

Die Sweepmessungen werden für die Modalanalyse verwendet und werden daher im Frequenzbereich ausgewertet. Dazu wird die Fast Fourier Transform (FFT) mit Hilfe der ITA-Toolbox durchgeführt.

Um eine Vergleichbarkeit der Daten aus verschiedenen Sweepmessungen zu gewährleisten, muss der Einfluss der Temperaturverschiebung auf die Frequenz berücksichtigt werden. Daher werden alle Sweepmessungen gemäß 3.8 und 3.9 auf eine Referenztemperatur normiert. Als Referenztemperatur wird der gemessene Wert 18.2 °C bei der ersten Ecke-Ecke-Messung gewählt.

Nachdem nur die aus den Sweepmessungen abgelesenen Modenfrequenzen für diese Arbeit relevant sind, können die Pegel der Messdaten im Frequenzbereich normalisiert werden. Für die Darstellung der Frequenzverschiebung aufgrund der Anwesenheit des Kantenabsorbers werden die Raummodenfrequenzen in allen Messkonfigurationen mit den Absorbern von den Raummodenfrequenzen des leeren Raums subtrahiert.

² $f_{uG, TB}$ – untere Grenzfrequenz des jeweiligen Terzbandes; $f_{oG, TB}$ – obere Grenzfrequenz des jeweiligen Terzbandes

5.3 Verarbeitung von TBR- und Sinusmessdaten

Nach dem Downsampling sollten die TBR-Messungen im Zeitbereich gemittelt werden. Die Mittelung wird über die drei Messzyklen durchgeführt.

Da Zeitverläufe der einzelnen Frequenzen bzw. Frequenzbänder für die Auswertung des Abklingverhaltens relevant sind, spielen auch hier die absoluten Pegel keine Rolle. Daher können die Pegel der Messdaten normalisiert werden. Eine Ausnahme bilden die 3D-pv-Sonde-Messdaten, da hier die Pegelunterschiede zwischen den Messkonfigurationen ausgewertet werden müssen.

Um die Hüllkurven der Sinus- und TBR-Antworten zu extrahieren, werden in dieser Arbeit zwei Methoden verglichen: die **Hilbert Transformation** und **Root-Mean-Square-Hüllkurvenmethode (RMS)**.

Die Hilbert Transformation eines Signales $x(t)$ ist wie folgt definiert (Gleichung 5.2, (21)):

$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad 5.2$$

Dabei ist $*$ der Faltungsoperator. Aus $\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{\pi t}$ wird das analytische Signal wie folgt definiert (Gleichung 5.3, (21)):

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = r(t)e^{j\theta(t)} \quad 5.3$$

In unserem Fall ist die Gleichung 5.3 wie folgt zu interpretieren: $r(t)$ beschreibt den zeitlichen Verlauf der Amplitudenhüllkurve des Schalldruckes, wobei θ der Momentanphase entspricht.

Die Hilbert Transformation ist hauptsächlich nur bei schmalbandigen Signalen anwendbar (21) und daher eignet sich diese Methode für die Gewinnung der Hüllkurven aus Sinusmessungen und ist für TBR-Messungen weniger geeignet.

Die RMS – Hüllkurvenmethode stellt eine der weitverbreitetsten Methoden für die Gewinnung von Hüllkurven aufgrund ihrer einfachen Implementation dar. Sie wird durch die Anwendung eines Gleitfensters auf die Signalamplituden realisiert (21):

$$RMS(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T w_i(t) x_i^2(t)} \quad 5.4$$

Dabei ist $x_i(t)$ das i -te Sample, das um t herum durch das Fenster $w_i(t)$ betrachtet wird, t ist die Anzahl der Samples, um die das Fenster $w_i(t)$ bei der Analyse verschoben wird und T ist die Fensterlänge (21). Aufgrund der einfachen Einsetzbarkeit und Ungeeignetheit der Hilbert Transformation für Rauschsignale, wird diese Methode für die Ermittlung der Hüllkurven aus TBR-Messungen verwendet. Um die optische Vergleichbarkeit der Hüllkurven aus beiden Methoden zu gewährleisten, müssen die Werte, gewonnen aus der Gleichung 5.4, zusätzlich mit $\sqrt{2}$ multipliziert werden.

Abbildung 5.2 zeigt den Vergleich der beiden Methoden bei einer Einzelsinustonmessung. Obwohl der Unterschied nicht sehr groß ist, wurde bei der Hüllkurvengewinnung bei Einzelsinustönen die Hilbert Transformation gewählt, da sie den Verlauf des Originalsignals etwa genauer rekonstruiert.

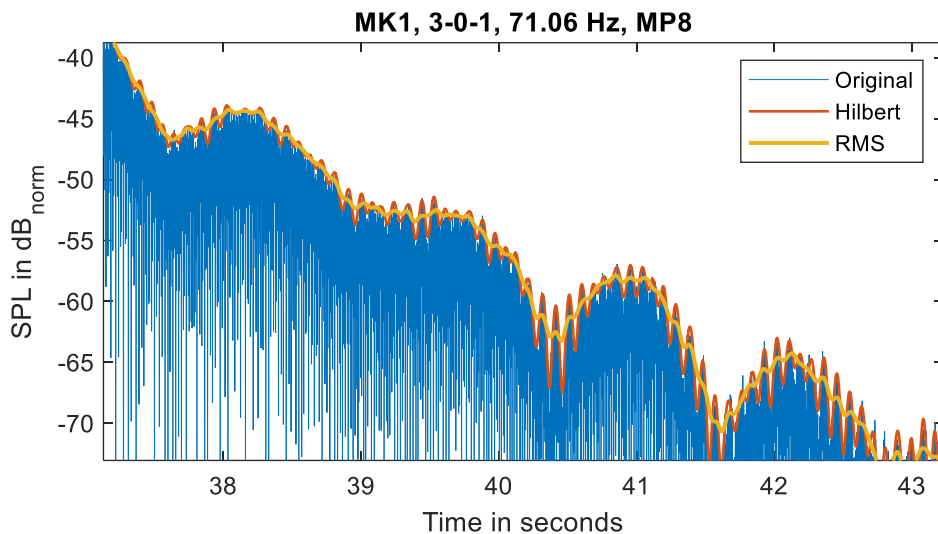


Abbildung 5.2: Vergleich der Hilbert Transform - und RMS-Methode zur Hüllkurvengewinnung. Beispiel: Mode 3-0-1, MK1, MP8, reingezoomte Abfallkurve.

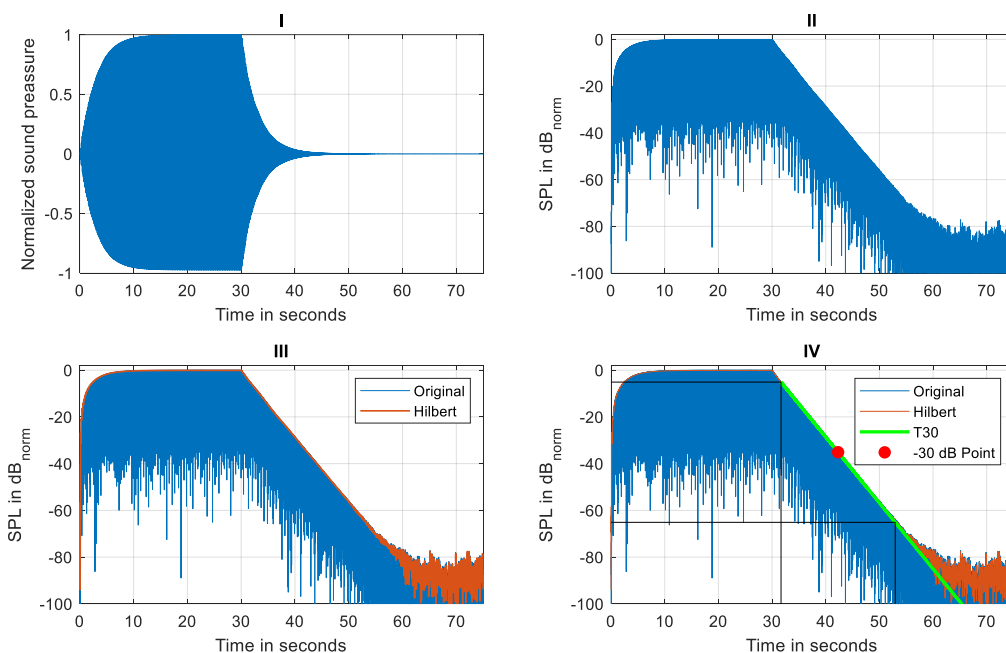


Abbildung 5.3: Verarbeitung der Messdaten im Zeitbereich. Beispiel: Mode 0-0-1, MK1, MP6. I - Normalisierte Sinusantwort; II - Logarithmieren, Sinusantwort in dB_{norm} ; III - Hilbert-Transform; IV - Ermittlung der T_{30} - Geraden. „-30 dB Point“ bezeichnet den Zeitpunkt des 30 dB-Abfalls ab dem Zeitpunkt des 5 dB-Abfalls.

Die Bestimmung der Zeitverläufe, des Abklingverhaltens und der Nachhallzeit T_{30} wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Für die Ermittlung der Abkling- und Nachhallzeiten T_{30} wird eine eigene Funktion verwendet, die auf der normalisierten, hilberttransformierten Sinus- bzw. auf der RMS der TBR-Antwort den ersten Punkt nach 30s (Abspielsignallänge), der sich um -5 dB vom Wert bei 30s befindet, sucht. Auf gleiche Weise wird nach einem Punkt bei -35 dB vom 30s-Wert gesucht. Anhand dieser zwei Punkte wird eine Gerade mittels linearer Interpolation zwischen den beiden Punkten erstellt, aus der die 60 dB-Abklingzeit abgelesen wird. Die

Entscheidung, eine eigene Funktion zu programmieren wurde getroffen, da die Ergebnisse der Funktionen aus der ITA-Toolbox bei sehr tiefen Frequenzen und sehr langen Nachhallzeiten nicht zuverlässig sind. Die Eingangsparameter dieser Funktion sind die hilbertransformierte Messdaten (Sinusmessungen) bzw. die RMS der Messdaten (TBR-Messungen).

Dabei wird die RMS-Hüllkurve mit einem Gleitfenster der Länge 100 Samples generiert. Sowohl die hilbertransformierte-, als auch die RMS-Daten werden tiefpassgefiltert (Kaiser-Fenster FIR Filter), mit einer Filtersteilheit von $S = 0.99$ und einer normalisierten Durchlassbandfrequenz von $\pi \cdot 0.05 \text{ rad/Sample}$.

Bei der Auswertung der 3D-pv-Sonde-Messdaten müssen die Pegelunterschiede zwischen den MK untersucht werden, wie in Hofer (1). Hierbei werden die Pegel aller 4 Komponenten der 3D-pv-Sonde in den Messkonfigurationen mit Absorbern von den Pegeln im leeren Raum subtrahiert.

5.4 Auswahl der Messpunkte für Sinusmessungen

Bei allen TBR-Messungen erfolgt die Auswertung am MP1, da sich dort die Schalldruckmaxima aller Raummoden befinden. Bei den Sinusmessungen muss jedoch berücksichtigt werden, dass es zu einer Überlappung der Moden kommen kann, wenn zwei Moden im Frequenzspektrum sehr nah beieinander liegen. Daher sollte vor der Auswertung jeder Sinusmessung anhand der geplotteten Frequenzgänge (Sweepmessungen) entschieden werden, welcher Messpunkt am besten die zu untersuchende Raummode erfasst (Abbildung 5.4):

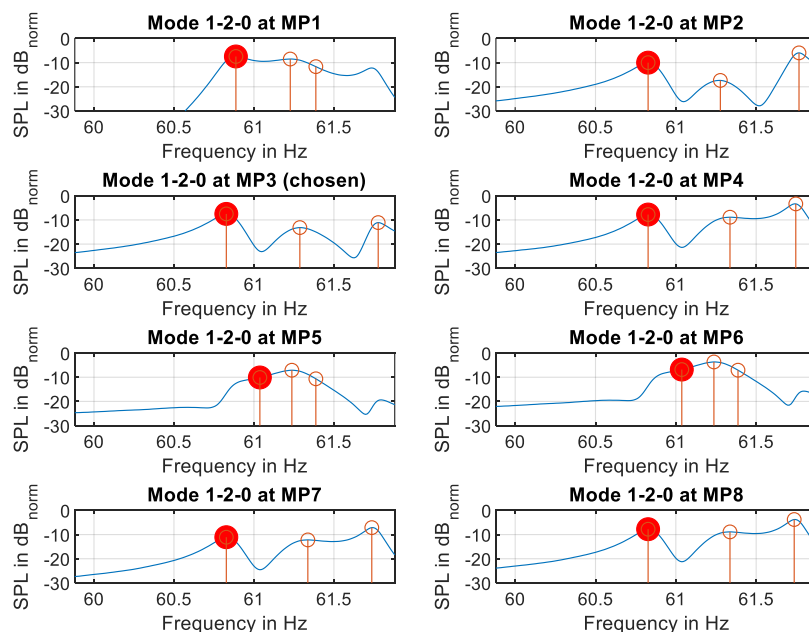


Abbildung 5.4: Frequenzgänge aller Messpunkte am Beispiel der Raummode 1-2-0, MK1.

Anhand der Frequenzgänge wird ein Messpunkt ausgewählt, bei der die gesuchte Raummode am stärksten und die nah benachbarten Raummoden am wenigsten ausgeprägt sind. In Abbildung 5.4 ist das MP3. Dies entspricht auch theoretisch dem optimalen Messpunkt für diese Mode (siehe Abbildung 3.7, Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5).

6 Messergebnisse und Auswertung

Vor Beginn aller Messungen wurde die Luftfeuchtigkeit gemessen. Sie betrug 43.3 % und entspricht somit den Vorgaben der ISO 354 (4).

Das Ziel der Messungen mit der 3D-pv-Sonde bestand darin, einen Vergleich mit einem repräsentativen Messpunkt von Hofer (1) zu schaffen. Aufgrund eines Messfehlers (nicht exakt dieselbe Position wie bei Hofer) werden die Ergebnisse dieser Messungen in diesem Kapitel nicht präsentiert. Dennoch werden sie im Anhang A gezeigt, falls die verwendete Position bei zukünftigen Messungen erneut für einen Vergleich herangezogen werden sollte.

6.1 Ergebnisse und Auswertung der langen Ecke-Ecke-Sweepmessung zur Untersuchung des Einflusses der Eingangstür

Abbildung 6.1 zeigt die Frequenzgänge vom MP1 und der beiden Accelerometer, wenn der Subwoofer in beiden (vom Kantenabsorber freien) Raumecken positioniert wurde.

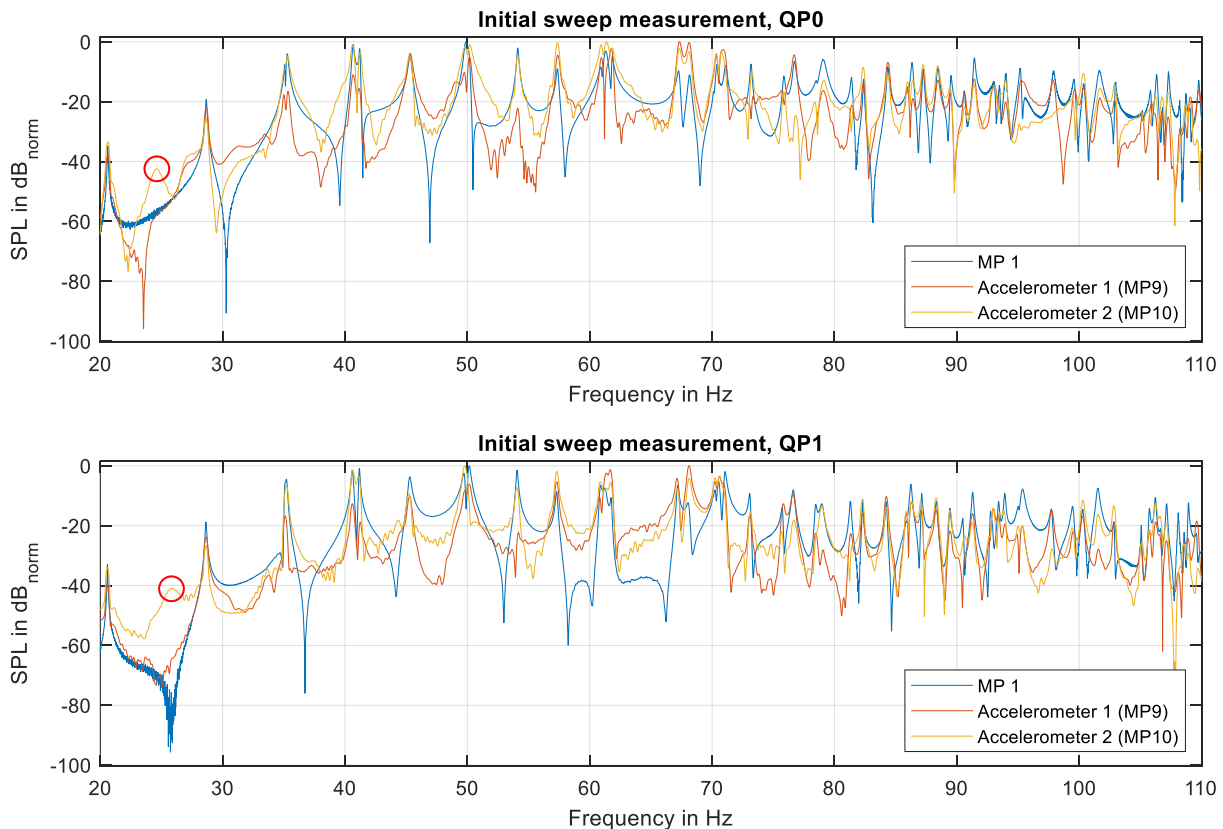


Abbildung 6.1: Ecke-Ecke-Messung in beiden freien Ecken für MP1 und die beiden Accelerometer.

Wie aus Abbildung 6.1 zu erkennen ist, sind keine nennenswerten Unterschiede in den Frequenzgängen vom MP1 und den beiden Accelerometern bei der Änderung der Quellenposition zu berichten. Bei QP1 beeinflusst die Eingangstür theoretisch die Frequenzgänge der Messpunkte weniger als bei QP0, da diese Quelleposition weiter von der Eingangstür entfernt ist. Daher hat man sich bei allen weiteren Messungen für QP1 entschieden.

In den roten Kreisen in Abbildung 6.1 ist die Türresonanz um 25 Hz bei beiden Quellenpositionen zu sehen. Bei der QP1 (unten in Abbildung 6.1), die weiter von der Tür entfernt ist, ist auch ein lokales Schalldruckminimum beim MP1 zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die Tür als Plattenabsorber wirksam ist, da um diese Frequenz die Tür schwingt und das Messmikrofon, das sich in der Ecke befindet, ein Schalldruckminimum aufweist – die Tür entzieht also die Schallenergie um 25 Hz aus dem Raum. Die Resonanz ist nur am Accelerometer 2 (linker Türflügel aus dem Hallraum betrachtet) zu sehen. Der rechte Türflügel (Accelerometer 1) scheint dagegen nicht zu schwingen und dessen Frequenzgang zeigt an dieser Stelle ebenfalls ein Schalldruckminimum.

Es wird vermutet, dass Resonanzfrequenzen, die Vielfache der 25 Hz-Resonanz sind, im Frequenzgang zu finden sind. Daher wird im Frequenzbereich um 50 Hz und 100 Hz nach weiteren Resonanzen in Abbildung 6.1 gesucht.

Die Vermutung von Hofer (1) war, dass die Eingangstür als Plattenresonator im Bereich um 63 Hz wirkt und daher ein lokales Minimum der Nachhallzeit in diesem Terzband verursacht. In unseren Messungen können sowohl das 63 Hz -, als auch das 50 Hz – Terzband als lokale Nachhallzeitminima interpretiert werden (siehe Abbildung 6.18 und Abbildung 6.19). Obwohl die Nachhallzeiten darauf hinweisen, konnte die 50 Hz – Resonanz in Frequenzgängen der beiden Accelerometer nicht mit absoluter Gewissheit bestätigt werden – zu erwarten wäre dort ein eindeutiger Peak in den Frequenzgängen der Accelerometer, der nicht im Frequenzgang vom MP1 zu finden ist bzw. wo MP1 eventuell ein Schalldruckminimum aufweisen würde. Eine Erklärung könnte in der geringen örtlichen Auflösung der Schwingungsmessung durch die Verwendung nur eines Sensors (bzw. nur einer Sensorposition) pro Türflügel liegen: nachdem die erwartete Schwingung das erste Vielfache der 25 Hz-Grundschiwingung ist, sollte sie eigentlich in der Mitte des Türflügels ein Minimum aufweisen (22). Es können in einem zukünftigen Forschungsschritt Messungen mit einem Schwingungserreger und mehreren Accelerometerpositionen durchgeführt werden, um genaue Messdaten des Schwingungsverhaltens der Eingangstür zu erhalten, ohne dass die Raummoden die Frequenzgänge der Accelerometer beeinflussen.

6.2 Sweepmessergebnisse- und Auswertung

6.2.1 Güte der Raummoden

Abbildung 6.2 zeigt die Frequenzgänge aller Messkonfigurationen beim MP1. Es ist ersichtlich, dass die Frequenzgänge in allen vier Messkonfigurationen bis etwa 60 Hz ähnlich verlaufen (die Frequenzverschiebung aufgrund der Anwesenheit von Kantenabsorbern wird an dieser Stelle vernachlässigt und wird später näher erläutert). Ab ca. 60 Hz zeigen die Raummoden breitere Resonanzkurven bzw. niedrigere Resonanzgüten in Messkonfigurationen mit Kantenabsorbern (siehe Gleichung 2.9).

Dies ist nachvollziehbar, da die untere Grenzfrequenz des Wirkungsbereiches vom Kantenabsorber ungefähr mit dieser Frequenz übereinstimmt (siehe Berechnung 2.13) und somit die Abklingzeiten kürzer werden (siehe Gleichung 2.11). Betrachtet man den Frequenzbereich zwischen 60 Hz und 80 Hz in Abbildung 6.2, so lässt sich erkennen, dass die Peaks in MK2 am breitesten sind bzw. deren Güte am geringsten ist. Die nah benachbarten Moden sind visuell nicht mehr trennbar, da sie durch ihre Breitbandigkeit miteinander verschmelzen. Dieser Effekt ist bei MK3 und MK4 weniger ausgeprägt.

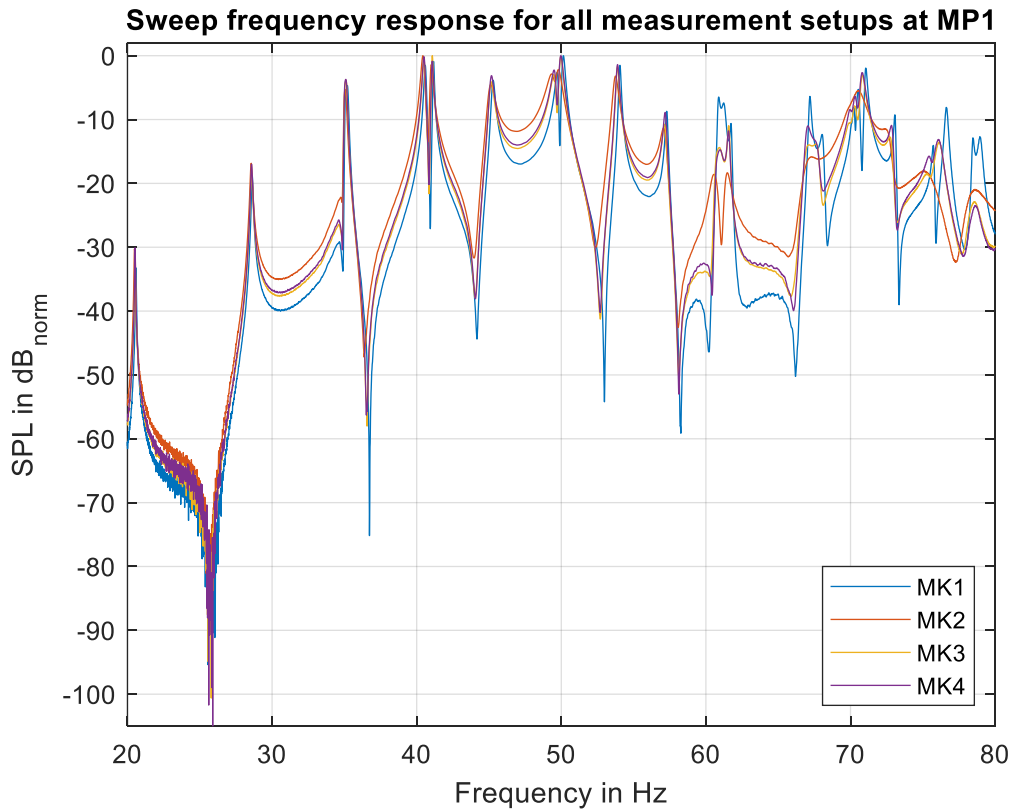


Abbildung 6.2: Frequenzgänge aller Messkonfigurationen beim MP 1.

6.2.2 Frequenzverschiebung von Raummoden

Durch das Auslesen der Raummodenfrequenzen aus den Frequenzgängen der für die Auswertung verwendeten Messpunkte wird Abbildung 6.3 erstellt. Die Raummodenfrequenzen in Messkonfigurationen mit Kantenabsorbern wurden von denen im leeren Hallraum subtrahiert und die relativen Differenzen sind in Abbildung 6.3 geplottet (Gleichung 6.1). Tabelle 6.1 stellt einen Überblick der für die Auswertung verwendeten Messpunkte und ausgelesenen Raummodenfrequenzen dar.

$$\Delta f_{rel, MK_n} = \frac{(f_{MK_n} - f_{MK_1})}{f_{MK_1}} \cdot 100, \quad 2 \leq n \leq 4 \quad 6.1$$

Neben der theoretischen Eignung der Messpunkte für die Auswertung der Abklingvorgänge einzelner Raummoden (siehe Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5), wurde bei der Auswahl der Messpunkte für Tabelle 6.1 darauf geachtet, dass die zu untersuchende Raummode im gewählten Messpunkt bestmöglich zu erkennen ist. Außerdem verschieben sich die Schalldruckminima und -maxima der Raummoden örtlich bei der Anwesenheit der Kantenabsorber und somit auch die optimalen Messpunkte für die zu untersuchende Raummode (dies wird im Detail in

Unterkapitel 6.5 diskutiert). Daher hat man sich zum Teil für Messpunkte entschieden, die nicht unbedingt den theoretisch bestmöglichen Messpunkten im leeren Hallraum entsprechen, wie aus Tabelle 6.1 ersichtlich.

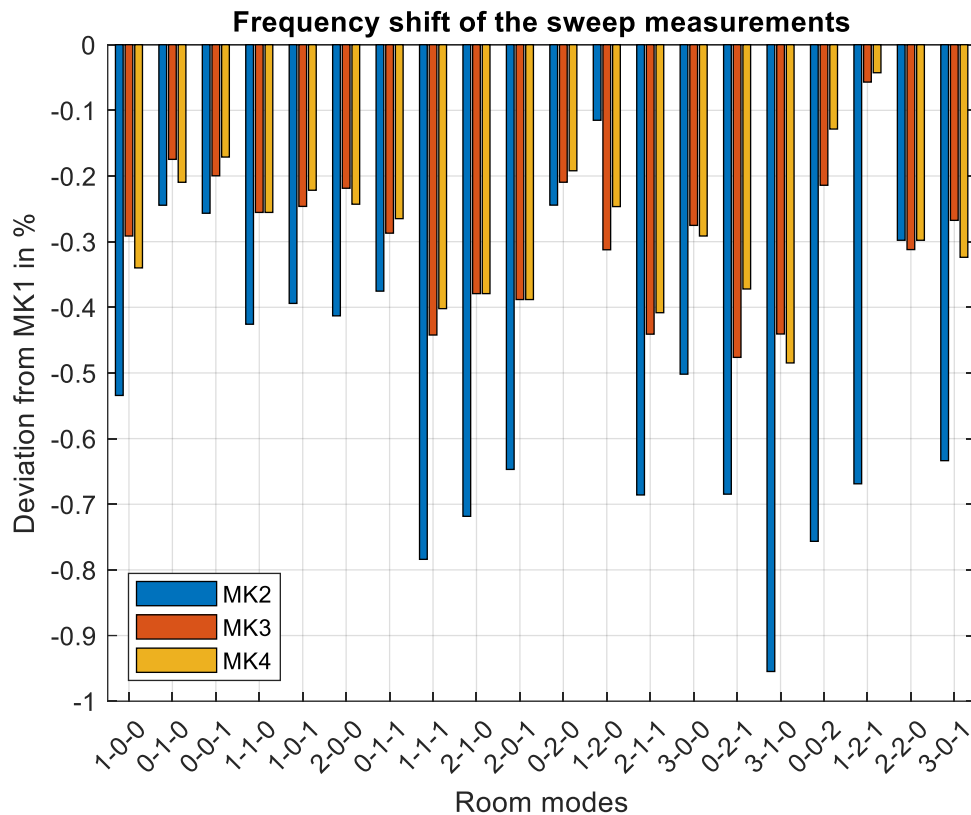


Abbildung 6.3: Frequenzverschiebung der Raummoden aufgrund der Anwesenheit von Kantenabsorbem, Daten aus Sweepmessungen.

Mode	Berechnet		MK1		MK2		MK3		MK4	
	MP (theoretisch)	Freq. [Hz]	MP	Freq. [Hz]	MP	Freq. [Hz]	MP	Freq. [Hz]	MP	Freq. [Hz]
1-0-0	MP1	20.53	MP1	20.59	MP1	20.48	MP1	20.53	MP1	20.52
0-1-0	MP1	28.58	MP1	28.63	MP1	28.56	MP1	28.58	MP1	28.57
0-0-1	MP6	34.94	MP6	35.06	MP6	34.97	MP6	34.99	MP6	35.00
1-1-0	MP2	35.19	MP2	35.23	MP2	35.08	MP2	35.14	MP2	35.14
1-0-1	MP7	40.53	MP7	40.60	MP7	40.44	MP7	40.50	MP7	40.51
2-0-0	MP2	41.06	MP2	41.16	MP2	40.99	MP5	41.07	MP5	41.06
0-1-1	MP1	45.14	MP1	45.29	MP1	45.12	MP1	45.16	MP1	45.17
1-1-1	MP7	49.59	MP7	49.75	MP7	49.36	MP7	49.53	MP7	49.55
2-1-0	MP2	50.03	MP2	50.11	MP2	49.75	MP2	49.92	MP2	49.92
2-0-1	MP1	53.91	MP1	54.10	MP1	53.75	MP1	53.89	MP1	53.89
0-2-0	MP1	57.17	MP1	57.29	MP7	57.15	MP7	57.17	MP1	57.18
1-2-0	MP3	60.74	MP3	60.83	MP3	60.76	MP3	60.64	MP3	60.68
2-1-1	MP6	61.02	MP6	61.24	MP6	60.82	MP6	60.97	MP6	60.99
3-0-0	MP4	61.59	MP2	61.77	MP2	61.46	MP2	61.60	MP2	61.59
0-2-1	MP1	67.00	MP1	67.19	MP5	66.73	MP5	66.87	MP5	66.94
3-1-0	MP1	67.90	MP2	68.08	MP4	67.43	MP4	67.78	MP4	67.75
0-0-2	MP4	69.88	MP4	70.06	MP2	69.53	MP7	69.91	MP7	69.97
1-2-1	MP8	70.07	MP8	70.27	MP7	69.80	MP3	70.23	MP3	70.24
2-2-0	MP5	70.38	MP5	70.50	MP5	70.29	MP5	70.28	MP5	70.29
3-0-1	MP7	70.81	MP8	71.02	MP1	70.57	MP1	70.83	MP1	70.79

Tabelle 6.1: Überblick der bei der Auswertung verwendeten Messpunkte und ausgelesenen Raummodenfrequenzen. Rote Farbe bezeichnet nahenachbarte Raummoden. Alle Frequenzen wurden auf die Bezugstemperatur 18.2 °C korrigiert.

6.2.3 Statistische Auswertung der Frequenzverschiebung von Raummoden

Die Frequenzverschiebung ist allgemein am größten in MK2, außer bei den Raummoden 1-2-0 und 2-2-0 (siehe Abbildung 6.3). Da sich beide Raummoden in einem „Modencluster“ mit 3 bzw. 4 nahbenachbarten Raummoden befinden, wird die messtechnische Ermittlung ihrer genauen Frequenz bei Anwesenheit von Kantenabsorbieren durch das Verschmelzen der benachbarten Raummoden nicht mehr möglich, und dadurch wird das Ablesen der Raummodenfrequenz erschwert (siehe Abbildung D. 4 und Abbildung D. 5). Die erschwerte messtechnische Trennung der Raummoden wird ausführlicher im Unterkapitel 6.5 diskutiert. Mehr Absorptionsmaterial in der Raumkante führt also zu einer höheren Frequenzverschiebung hin zu tieferen Frequenzen.

Betrachtet man die Frequenzverschiebung der Raummoden zweiter Ordnung 1-1-0 bis 0-1-1, sowie Raummoden dritter Ordnung 1-1-1 bis 2-0-1 aus Abbildung 6.3, so ist zu erkennen, dass die Verhältnisse zwischen den Verschiebungen der drei Messkonfigurationen zueinander ähnlich für die jeweilige Modenordnung sind. In diesem Sinne stellt die Mode 1-2-0 einen Ausreißer dar, da sie die einzige Raummode ist, die in MK2 die geringste Verschiebung aufweist. Dies ist auf die geringere Verlässlichkeit der Frequenzverschiebungsdaten bei höheren Frequenzen (ab ca. 60 Hz) zurückzuführen, die aufgrund der erschwerten Erkennbarkeit der einzelnen Peaks zustande kommt. Der Ausreißer deckt sich interessanterweise mit dem Punkt der nicht vorhandenen Konvergenz vom iterativen Algorithmus zur Berechnung der Frequenzverschiebungen von Raummoden von Kraxberger et.al (23). Dies wird ausführlicher im Abschnitt 6.2.4 diskutiert.

Ein statistischer Zusammenhang zwischen der Frequenzverschiebung der Raummoden und der Modenordnung³ bzw. Modenart konnte festgestellt werden (Tabelle 6.2, Abbildung 6.4, Tabelle 6.3 und Abbildung 6.5). Allgemein könnte behauptet werden, dass die Frequenzverschiebung mit zunehmender Ordnung und Komplexität der Moden steigt.

Schaut man sich die Medianen der Boxplots aus Abbildung 6.4 an, so ist ersichtlich, dass sie sich mit steigender Modenkomplexität bei allen Messkonfigurationen in negativer Richtung verschieben. Das dritte Quartil, unter dem 75% der Werte liegen, verschiebt sich tendenziell in gleicher Weise, außer bei MK3 und MK4 bei obliquen Moden, was auf das erschwerte Ablesen der Mode 1-2-1 aufgrund der unmöglichen Trennung von der Mode 2-2-0 zurückzuführen ist (siehe Abbildung 6.42, Abbildung D. 5 und Abbildung D. 10). Die Mittelwerte aus Tabelle 6.2 folgen dem gleichen Trend wie die Medianen. All dies unterstützt die Behauptung, dass die Frequenzverschiebung der Moden mit steigender Modenkomplexität ebenso steigt.

Bei den Boxplots aus Abbildung 6.5 verschieben sich bei MK2 sowohl die Medianen als auch die Quartile in negativer Richtung mit steigender Modenordnung. Bei MK3 und MK4 gilt dies für die Moden vierter Ordnung nicht mehr. Der Grund dafür ist, dass alle Moden vierter Ordnung bereits über 60 Hz liegen und dementsprechend sich in einem kritischen Bereich für die Erkennbarkeit von Peaks der einzelnen Raummoden befinden. Daher ist die Verlässlichkeit der Daten für Moden vierter Ordnung geringer als bei Moden niedriger Ordnung. Die Mittelwerte aus Tabelle 6.3 verschieben sich ebenso in negativer Richtung bei steigender Modenordnung außer bei Moden vierter Ordnung in MK3 und MK4 aus den gleichen Gründen. Auch diese

³ Bei der 1D-Schallausbreitung entspricht die Modenordnung der Anzahl der Wellenknoten bzw. -bäuche. Für die 3D-Schallausbreitung könnte man analog dazu die Anzahl von Bereichen mit maximalem bzw. minimalem Schalldruck betrachten. Dies entspricht der Summe aller Ordnungszahlen einer Raummode.

Analyse unterstützt die Behauptung, dass die Frequenzverschiebung mit steigender Modenordnung ebenso steigt.

Bei den Raummoden 0-1-0, 0-0-1 und 0-2-0 ist die Frequenzverschiebung zwischen MK2 und MK3 sowie MK2 und MK4 am geringsten. Allgemein ist die Frequenzverschiebung bei diesen Raummoden am geringsten (unter Vernachlässigung des Ausreißers 1-2-0 bei MK2 und der Moden oberhalb von 60 Hz). Diese Moden zeichnen sich gemeinsam dadurch aus, dass sie axial sind und ihre Ordnungszahl $n_x = 0$ ist (theoretisch konstanter Schalldruckpegel entlang der x-Achse). Die Raummode 0-2-0 ist dementsprechend verantwortlich für den oberen Ausreißer beim Boxplot der Raummoden zweiter Ordnung in Abbildung 6.5.

Verschiebung in %		-Modenart		
		Axial	Tangential	Oblique
MK	MK2	-0.4082	-0.4949	-0.7346
	MK3	-0.2180	-0.3053	-0.3818
	MK4	-0.2140	-0.2937	-0.3606

Tabelle 6.2: Mittlere Frequenzverschiebung nach Modenart und Messkonfiguration.

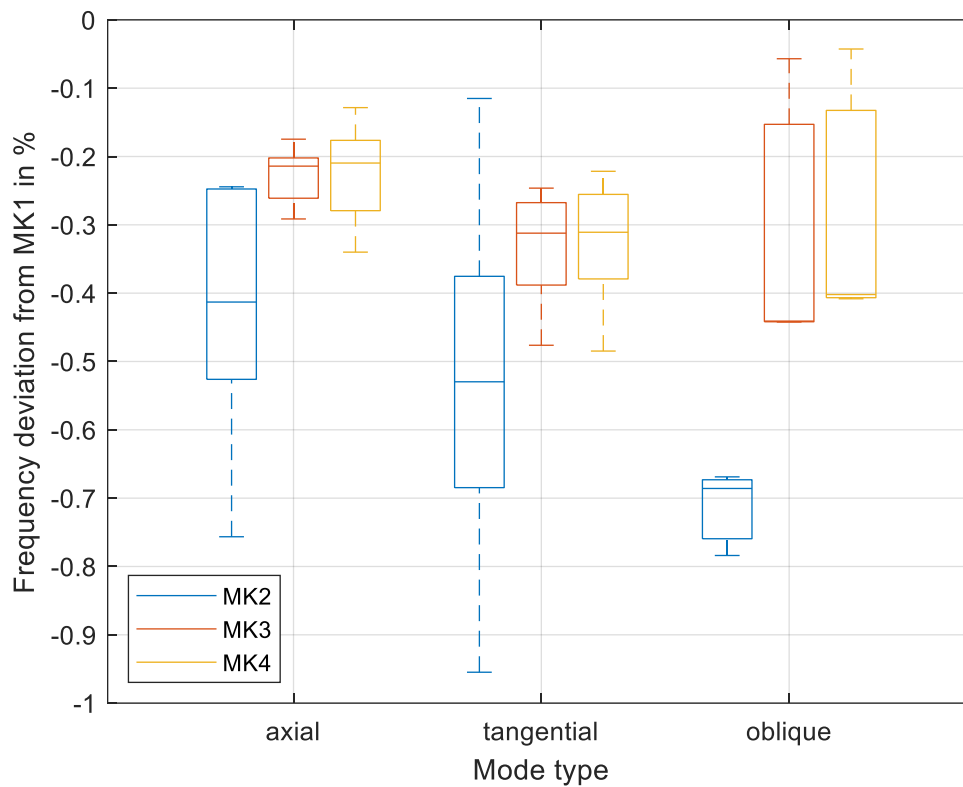


Abbildung 6.4: Boxplots der Frequenzverschiebung in Abhängigkeit der Modenart.

Verschiebung in %		Modenordnung			
		1.	2.	3.	4.
MK	MK2	-0.3451	-0.4349	-0.5751	-0.6482
	MK3	-0.2219	-0.2385	-0.3789	-0.3036
	MK4	-0.2402	-0.2176	-0.3466	-0.3115

Tabelle 6.3: Mittlere Frequenzverschiebung nach Modenordnung und Messkonfiguration.

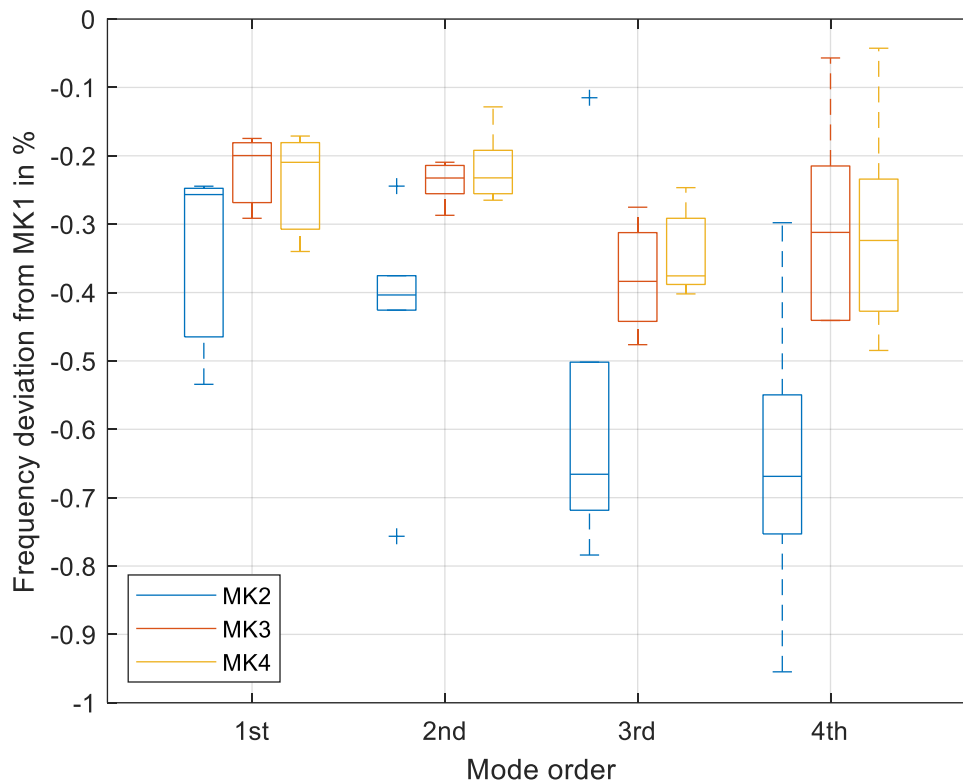


Abbildung 6.5: Boxplots der Frequenzverschiebung in Abhängigkeit der Modenordnung.

6.2.4 Vergleich mit den berechneten Ergebnissen der Frequenzverschiebung von Raummoden

Zum Vergleich werden auch die von Kraxberger et.al. (23) berechneten Frequenzverschiebungen in gleicher Weise wie in Abbildung 6.3 geplottet (Abbildung 6.6⁴). Um die Ergebnisse aus Abbildung 6.6 zu bekommen, sucht Kraxberger nach iterativen Lösungen eines nichtlinearen Eigenwertproblems. Dabei liegt die Ursache der Nichtlinearitäten in den frequenzabhängigen Materialparametern⁵ $K_{abs}(\omega)$ (Kompressionsmodul des Absorbers) und $\rho_{abs}(\omega)$ (Materialdichte des Absorbers), die durch das Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL) Modell abgeschätzt werden können. In diesem Modell werden die Materialparameter mithilfe eines auf die Ergebnisse der Impedanzrohrmessungen angewandten Fitting-Algorithmus gewonnen. Diese Parameter bestimmen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen im Absorber (Gleichung 6.2):

$$c_{abs}(\omega) = \sqrt{\frac{K_{abs}(\omega)}{\rho_{abs}(\omega)}} \quad 6.2$$

Vergleicht man Abbildung 6.3 und Abbildung 6.6, so ist ersichtlich, dass die berechneten und gemessenen relativen Frequenzverschiebungen voneinander abweichen. Die größten Abweichungen weist MK2 auf, wo die Frequenzverschiebung in den gemessenen Ergebnissen mit zunehmender Frequenz eine negativ- und bei den berechneten Ergebnissen eine positiv steigende Tendenz hat. Die Abweichungen sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Gründe für diese

⁴ Bei der Frequenzbestimmung der Raummode 1-2-0 konvergiert der iterative Algorithmus nicht.

⁵ ω steht für Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f$.

Abweichungen könnten in der Anlehnung an Impedanzrohrmessdaten im verwendeten JCAL-Modell liegen. Insbesondere im Frequenzbereich dieser Messung (20 Hz bis 100 Hz) liefern die Impedanzrohrmessungen aufgrund der Rohrabmessungen und Mikrofonabstände keine zuverlässigen Daten (für genaue Informationen über den Arbeitsfrequenzbereich eines Impedanzrohres siehe ÖNORM 10534-2 (24)). Allerdings sollte diese Vermutung durch eine zukünftige Studie genauer untersucht werden, da auch andere Gründe diese Abweichungen verursachen können (wie z.B. das Divergieren des iterativen Algorithmus (23)).

Da ab dem 63 Hz-Terzband die messtechnische Trennung der Raummoden bei Anwesenheit des Kantenabsorbers im Hallraum nicht mehr gewährleistet werden kann und somit die Identifikation der Raummodenfrequenzen erschwert ist (siehe Unterkapitel 6.5), werden im Folgenden beim Vergleich der Abweichungen von gemessenen und berechneten Ergebnissen der Frequenzverschiebung nur die ersten 11 Raummoden betrachtet (bis einschließlich Raummode 0-2-0 ~ 57 Hz).

Die in Abbildung 6.7 dargestellten Abweichungsverläufe zeigen über die ersten 11 Raummoden in allen drei Messkonfigurationen mit Kantenabsorber gewisse Ähnlichkeiten zueinander. Dabei ist die Abweichung in MK3 am geringsten und für die ersten 6 Raummoden vernachlässigbar.

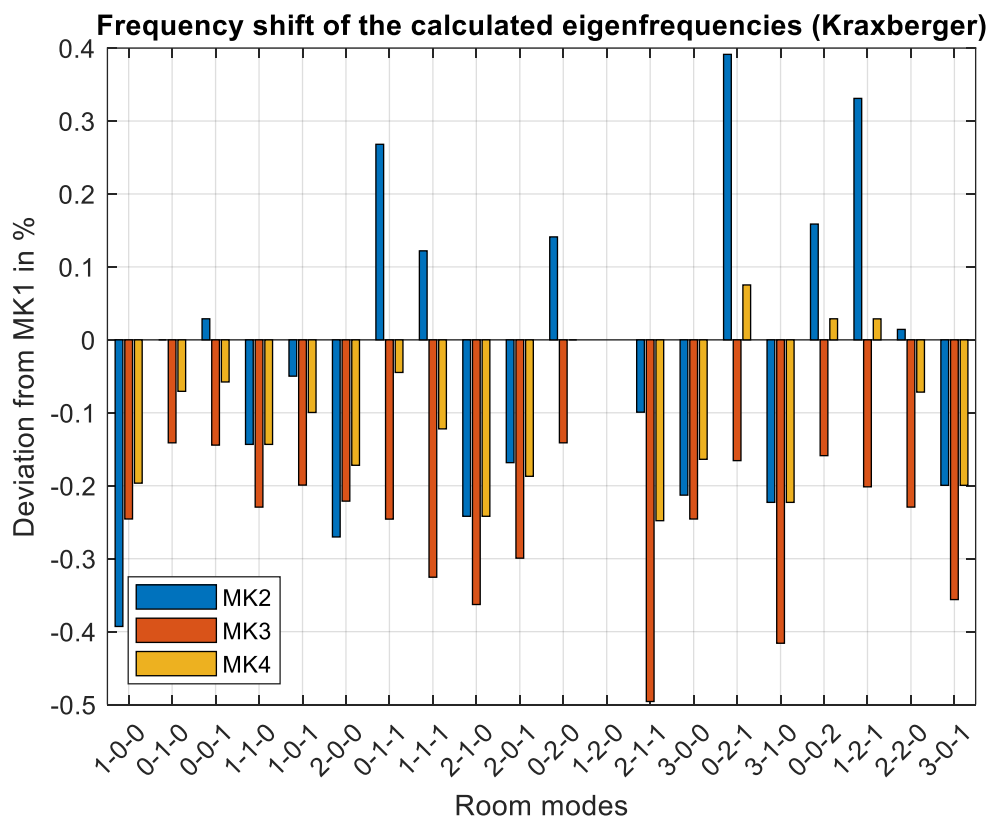


Abbildung 6.6: Frequenzverschiebung der Raummoden aufgrund der Anwesenheit von Kantenabsorbern, Daten aus Kraxberger et.al. (23), Table 2.

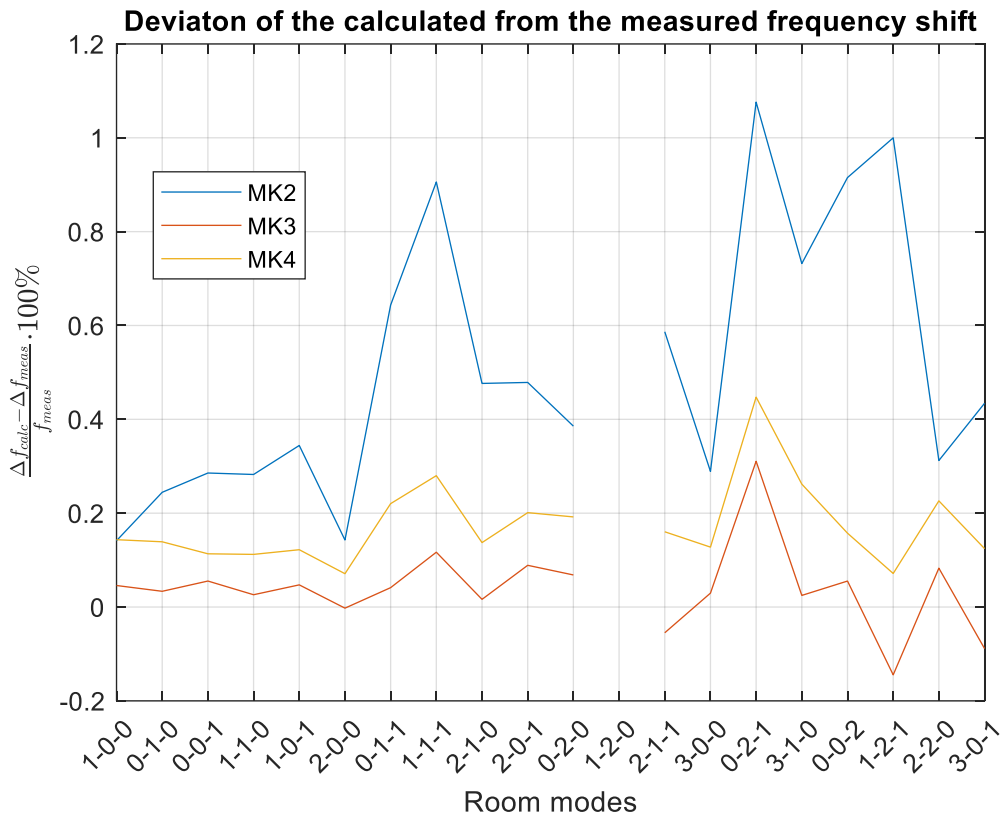


Abbildung 6.7: Abweichung der relativen Frequenzverschiebung der berechneten- von den gemessenen Frequenzen der Raummoden.

Abbildung 6.8 zeigt das von Kraxberger et.al. berechnete Dämpfungsverhältnis ζ der Raummoden. Das Dämpfungsverhältnis einer Raummode berechnet sich aus ihrer Abklingkonstante δ und ihrer ungedämpften natürlichen Frequenz f_n (Gleichung 6.3) (23).

$$\zeta = \delta / 2\pi f_n \tag{6.3}$$

In unserem Fall entspricht die Abklingkonstante der Abklingzeit τ in ihrer formalen Bedeutung (siehe Unterkapitel 2.1), und f_n entspricht der jeweiligen Raummodedefrequenz in MK1.

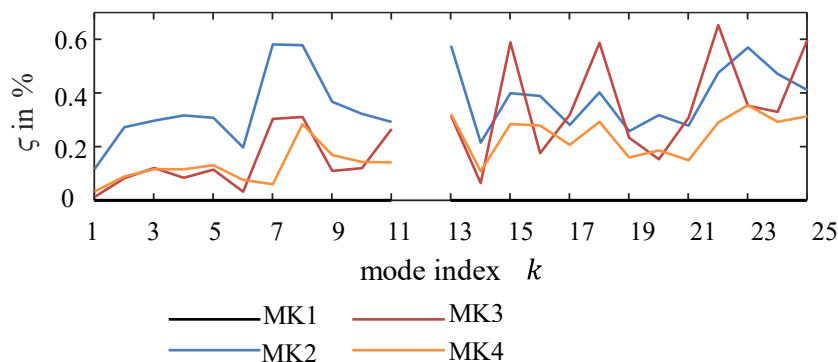


Abbildung 6.8: Dämpfungsverhältnis von numerisch ausgewerteten Raummoden (23).

Vergleicht man die Verläufe der Berechnungsabweichungen (Abbildung 6.7) und des Dämpfungsverhältnisses (Abbildung 6.8), so lassen sich gewisse Ähnlichkeiten beobachten. Dies weist auf einen proportionalen Zusammenhang hin. Diese Vermutung könnte in einem zukünftigen Forschungsschritt untersucht werden.

6.3 Abklingzeit- und Nachhallzeit-Messergebnisse

6.3.1 Darstellung der Messergebnisse

In Abbildung 6.9, Abbildung 6.10, Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12 werden beispielhaft die Messergebnisse für die Raummode 3-1-0 grafisch dargestellt. Abbildung 6.13, Abbildung 6.14, Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 zeigen die 80 Hz-TBR-Messungen. Die graphische Darstellung der Messergebnisse aller Raummoden- und Terzbänder ist im Anhang A zu finden. Die genauen Nachhall- und Abklingzeitergebnisse sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

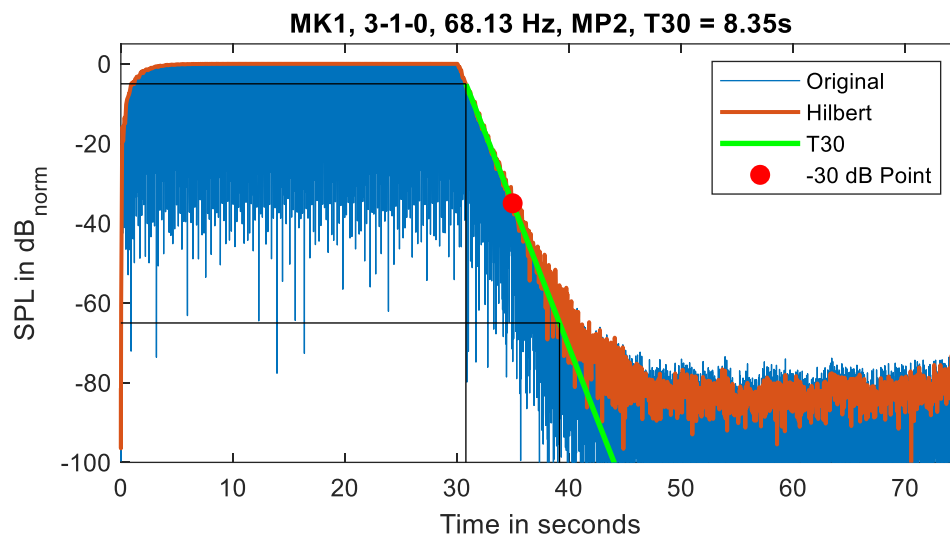


Abbildung 6.9: Abklingvorgang der Raummode 3-1-0 in MK1.

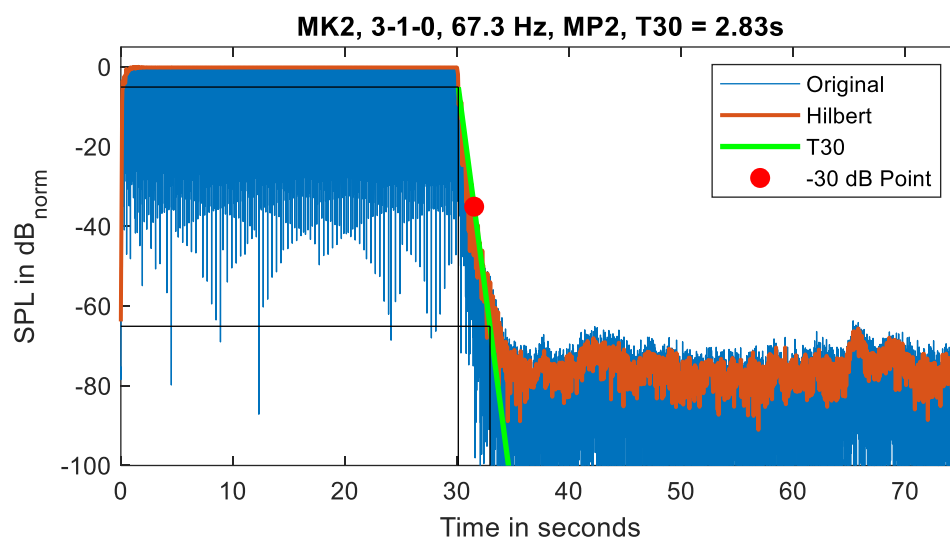


Abbildung 6.10: Abklingvorgang der Raummode 3-1-0 in MK2.

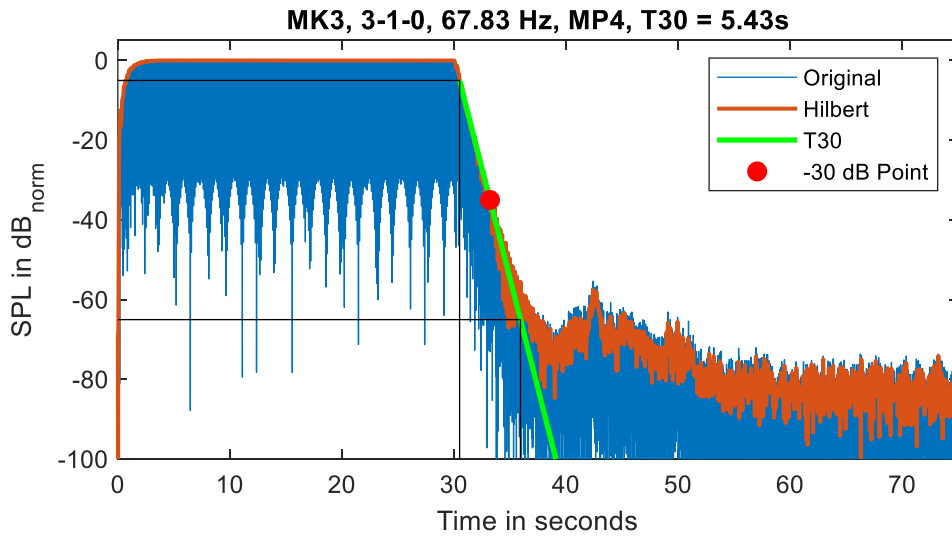


Abbildung 6.11: Abklingvorgang der Raummode 3-1-0 in MK3.

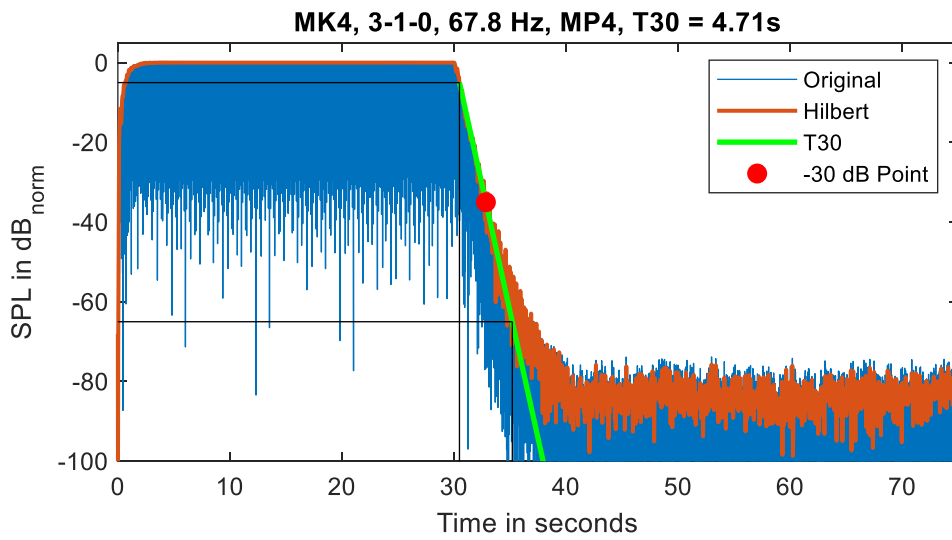


Abbildung 6.12: Abklingvorgang der Raummode 3-1-0 in MK4.

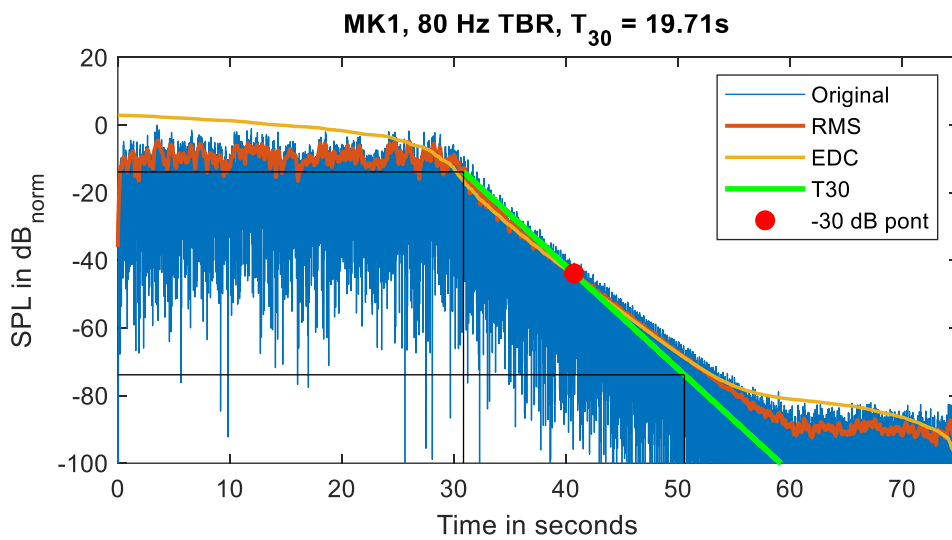


Abbildung 6.13: Abklingvorgang für 80-Hz-TBR in MK1.

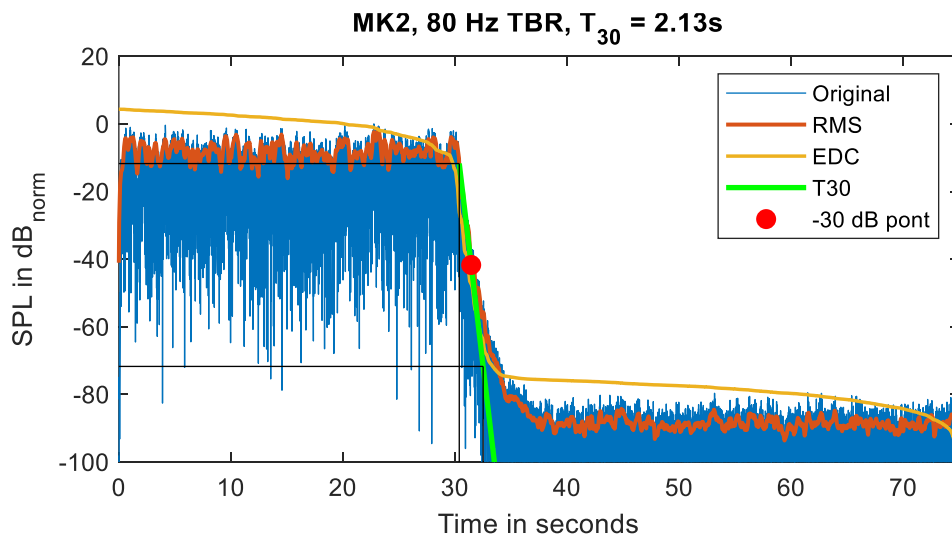


Abbildung 6.14: Abklingvorgang für 80-Hz-TBR in MK2.

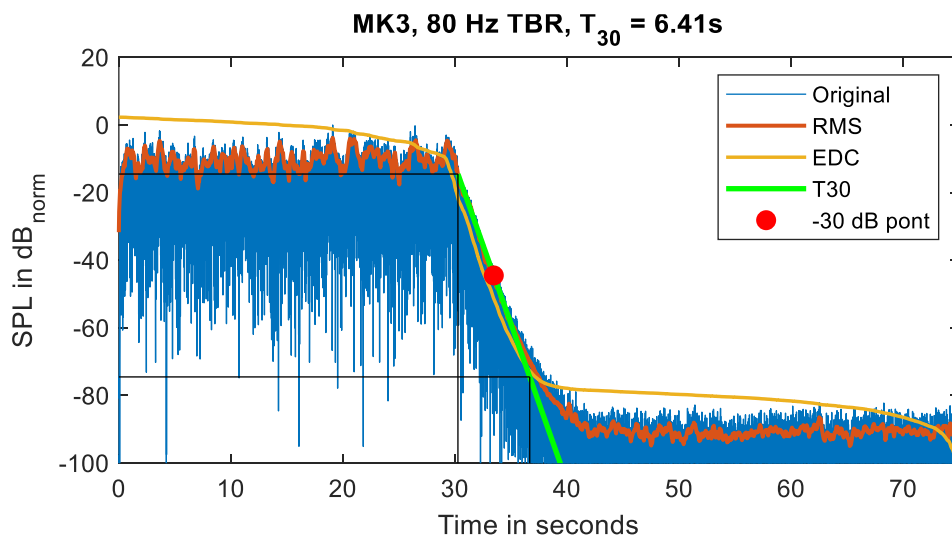


Abbildung 6.15: Abklingvorgang für 80-Hz-TBR in MK3.

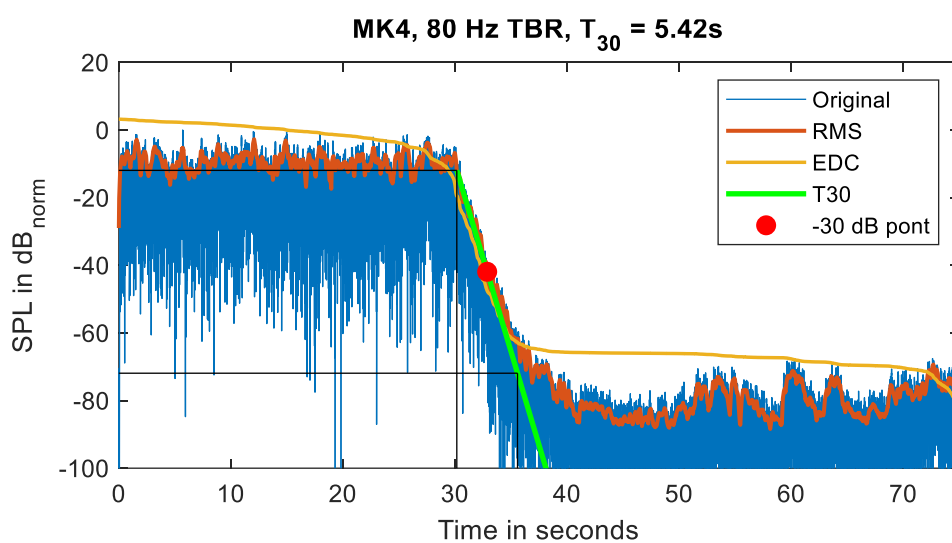


Abbildung 6.16: Abklingvorgang für 80-Hz-TBR in MK4.

Mode Nr. / Terzbandfrequenz	Generierte Frequenz in Hz bei MK1	T ₃₀ in MK1 in s	T ₃₀ in MK2 in s	T ₃₀ in MK3 in s	T ₃₀ in MK4 in s
1-0-0	20.60	41.3	32.2	40.3	39.7
0-1-0	28.63	18.8	13.7	15.8	17.0
0-0-1	35.07	21.3	13.2	16.7	18.3
1-1-0	35.23	14.5	10.1	10.7	10.0
1-0-1	40.60	13.3	8.3	10.4	9.9
2-0-0	41.17	21.3	10.3	17.6	14.2
0-1-1	45.30	9.6	4.5	6.4	6.8
1-1-1	49.77	10.2	4.4	5.8	6.3
2-1-0	50.13	7.7	4.3	6.9	6.3
2-0-1	54.07	14.4	5.6	9.8	9.1
0-2-0	57.30	14.6	5.2	8.1	9.5
1-2-0	60.87	13.9	2.9	6.1	6.1
2-1-1	61.27	6.3	3.6	4.7	4.1
3-0-0	61.77	17.2	4.6	12.7	10.5
0-2-1	67.23	11.0	2.3	3.9	4.9
3-1-0	68.13	8.3	2.8	5.4	4.7
0-0-2	70.07	23.1	4.4	4.8	5.5
1-2-1	70.30	13.7	3.5	6.3	5.7
2-2-0	70.53	9.4	3.0	6.0	6.3
3-0-1	71.06	10.2	2.8	6.2	5.2
63 Hz - TBR	56.2 – 70.8	13.0	4.8	7.3	8.0
80 Hz - TBR	70.8 – 89.1	19.7	2.1	6.4	5.4
100 Hz - TBR	89.1 - 112	16.0	1.6	4.1	3.3

Tabelle 6.4: Nachhallzeiten für Raummoden und Terzbänder in allen Messkonfigurationen.

6.3.2 Vergleich der Abklingzeitmessergebnisse mit Ergebnissen aus einer bestehenden Messung

Abbildung 6.17 ist eine graphische Darstellung der Tabelle 6.4. Die Abklingzeiten der Raummoden sind in den vier Messkonfigurationen sichtbar. Die Ergebnisse von Nell (3) werden separat (schwarze Kreuze) dargestellt, da diese Messungen mit Diffusoren im Raum stattgefunden haben. Mit Ausnahme der Raummode 0-0-1 scheint die Anwesenheit der Diffusoren eine erhöhte Abklingzeit der Raummoden im tieffrequenten Bereich zur Folge zu haben. Andere Unterschiede zwischen der Messung von Nell und der Messung aus dieser Arbeit, wie unterschiedliche Quellenpositionen und Messpunkte⁶, können jedoch nicht als mögliche Ursachen ausgeschlossen werden.

Obwohl die Abmessungen der Diffusoren kleiner sind als die Wellenlängen der von Nell gemessenen Raummoden (Wellenlängenbereich ≈ 8 m - 17 m) und daher keine Hindernisse für diese sehr tiefen Frequenzen darstellen sollten (Beugungsphänomen), ist in Abbildung 6.17 zu sehen, dass diese Einfluss auf die Abklingzeiten haben könnten. Wang (25) hat den Einfluss von Diffusoren auf tiefe Frequenzen in Hallräumen wie folgt zusammengefasst: kleine Diffusorplatten (in seinem Fall 1,5 m x 1,2 m) haben einen geringen Einfluss auf die Diffusität im Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz (bzw. beeinflussen die Abklingzeiten wenig). Große Diffusorplatten (4,5 m x 3,6 m) haben einen stärkeren Einfluss, wobei sie bei einigen Frequenzen die Diffusität des Schallfeldes verbessern und bei anderen Frequenzen verschlechtern und

⁶ Nell (3) hat in seiner Arbeit eine ähnliche Messmethode verwendet (Quellenposition in der Ecke, dedizierte Messpunkte zur Trennung der Raummoden), hat aber eine andere Raumecke und somit auch andere Messpunkte gewählt.

daher kein geeignetes Mittel zur gleichmäßigen Verteilung der Raummoden in Hallräumen darstellen. Obwohl die Diffusoren im Hallraum der TU Graz eher den Abmessungen der kleinen Diffusoren aus dieser Studie entsprechen (5 Diffusoren 1,2 m x 1,6 m und 4 Diffusoren 0,8 m x 1,25 m), deckt sich das Ergebnis aus Abbildung 6.17 mit der Erkenntnis für große Diffusorplatten. Die Änderung der Abklingzeiten variiert stark - bei der Mode 0-0-1 ist die Abklingzeit mit Diffusoren geringer (wenn auch vernachlässigbar) als im leeren Hallraum, während bei der Mode 2-0-0 die Diffusoren eine Erhöhung der Abklingzeit um etwa 15 Sekunden bewirken. Für weitere Forschungen wäre es interessant, den Einfluss von Diffusoren auf die Abklingzeit der einzelnen Moden im Hallraum genauer zu untersuchen und zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen den Abmessungen und der Position der Diffusoren sowie der Frequenz, Ordnung und räumlichen Verteilung der Raummoden besteht. Es ist auch zu prüfen, ob die Diffusoren bei der Anregung mit Einzelsinustönen mitschwingen. Dabei könnten alle 20 Raummoden bis und einschließlich 63 Hz-Terzband untersucht werden.

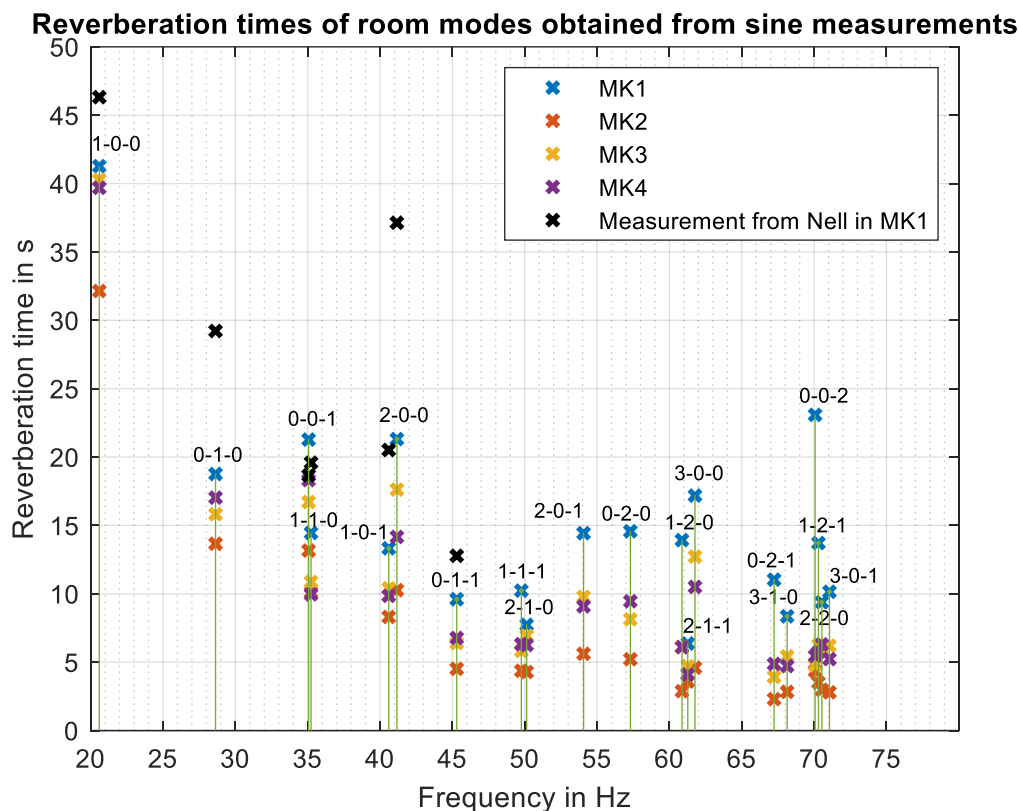


Abbildung 6.17: Abklingzeiten aus Sinusmessungen für die ersten 20 Raummoden. Vergleich mit den Werten von Nell (3) für die ersten 7 Raummoden.

6.3.3 Vergleich der Nachhallzeiten und Abklingvorgänge bei verschiedenen Messmethoden

Abbildung 6.18 zeigt die aus den TBR-Messungen gewonnenen Nachhallzeiten beim MP1. Die gestrichelten Linien stellen eine Rekonstruktion der Nachhallzeiten für Terzbänder unterhalb von 63 Hz dar, indem die nicht normalisierten Abklingvorgänge der Raummoden bei Anregung mit Einzel-Sinussignalen beim MP1 innerhalb dieser Terzbänder summiert und anschließend gemittelt werden. Nachdem es sich um eine Summe der Abklingvorgänge mehrerer Frequenzen handelt, wird die RMS-Methode mit einer Gleitfensterlänge von 100 Samples auf die Summe der Abklingvorgänge angewendet, um die Hüllkurven der rekonstruierten Terzbandabklingvor-

gänge zu erhalten. Es befinden sich keine Raummoden im 25 Hz-Terzband. Dieser Wert liegt auf der Geraden, die die Werte des 20 Hz- und 31.5 Hz-Terzbandes verbindet.

Wenn man die Nachhallzeiten aus Abbildung 6.18 mit denen von Steffek (2) vergleicht (siehe Abbildung 1.2), so ist in beiden Fällen ein Anstieg der Nachhallzeiten im leeren Raum beim 80 Hz-Terzband zu sehen. Da Steffek jedoch in einem Hallraum mit Plattenabsorbieren gemessen hat, beträgt die Nachhallzeit im 80 Hz-Terzband im leeren Raum 12 Sekunden im Gegensatz zu ca. 20 Sekunden in der Messung aus Abbildung 6.18.

Abbildung 6.19 zeigt die Nachhallzeiten, die aus den langen Sweepmessungen vor dem Beginn jeder Sinus- und TBR-Messkampagne mit Hilfe der ITA-Toolbox extrahiert wurden. Die Auswertung wurde mit nicht normalisierten Messdaten beim MP1 durchgeführt. Dabei wurde die *ita_roomacoustics*⁷ Funktion verwendet. Um genügend SNR für die Auswertung mittels dieser Funktion zu gewährleisten, müssen die aus Sweepmessungen berechneten Impulsantworten auf 60s verkürzt werden.

Vergleicht man diese Nachhallzeiten mit denen aus Abbildung 6.18, so ist ersichtlich, dass die Kurven in beiden Auswertungsmethoden (mit Ausnahme des 100 Hz-Terzbandes bei MK1) die gleichen Tendenzen aufweisen. Der nahezu identische Verlauf der Nachhallzeitkurven bis 63 Hz deutet darauf hin, dass die Raummoden den entscheidenden Einfluss auf die Nachhallzeit im Hallraum in diesem Frequenzbereich (20 Hz - 63 Hz) haben.

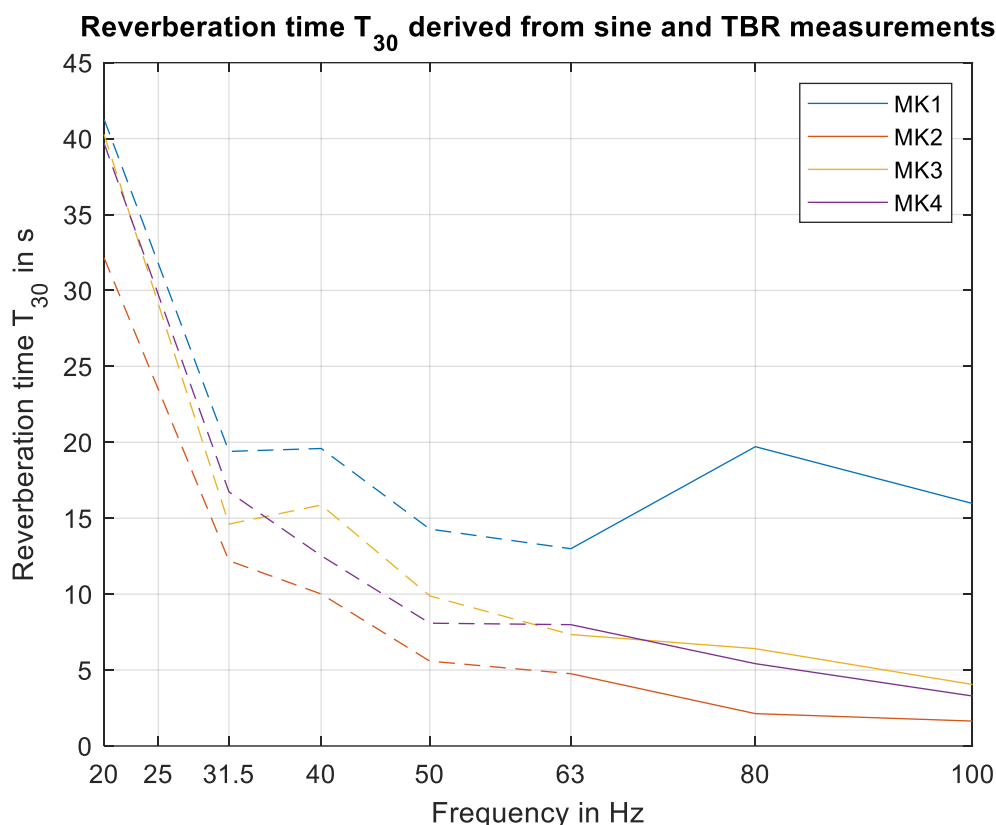


Abbildung 6.18: Nachhallzeiten in allen MK. Strichlierte Linien - Nachhallzeiten rekonstruiert aus den Sinusmessungen. Durchgehende Linien - Nachhallzeiten gemessen mit TBR.

⁷ Für mehr Details zu diesem Algorithmus wird auf <https://git.rwth-aachen.de/ita/toolbox> hingewiesen.

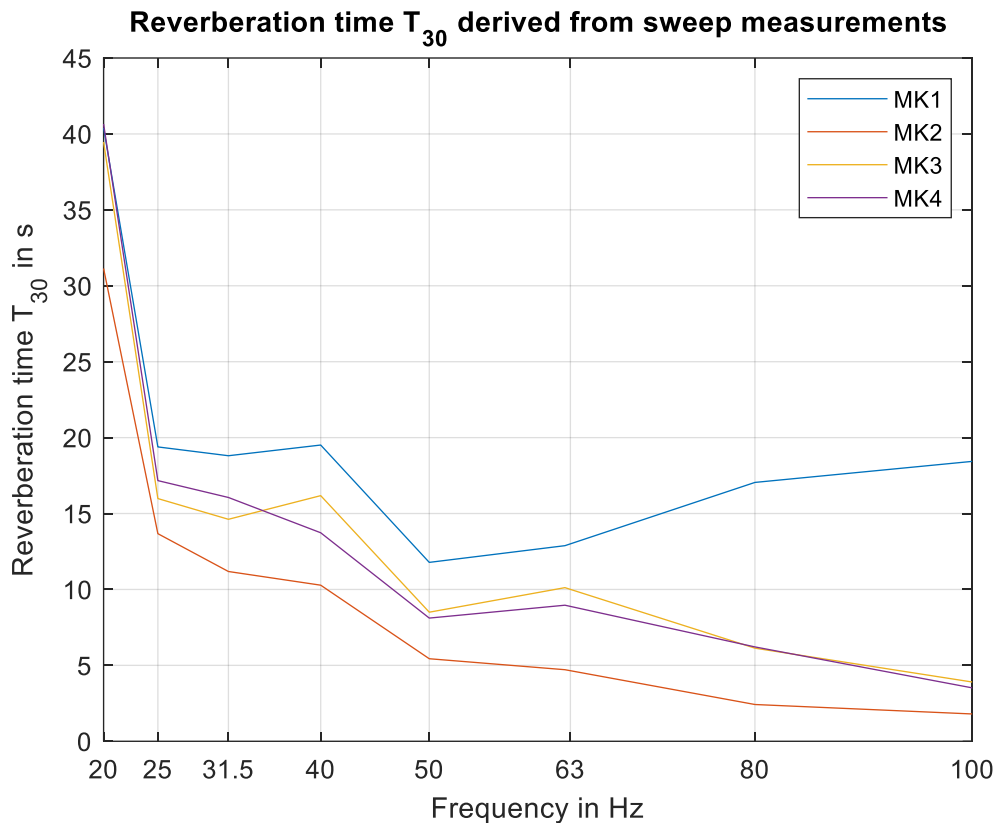


Abbildung 6.19: Nachhallzeiten in allen vier Messkonfigurationen, gewonnen aus den Sweepmessungen.

Um diese Vermutung näher zu untersuchen, werden die Abklingvorgänge der aus Sinusantworten „rekonstruierten“ Terzbänder mit denen aus den Sweepantworten verglichen. Um die Einflüsse der nahbenachbarten Raummoden so weit wie möglich zu minimieren, werden zuerst die Sinusantworten nochmal gefiltert: diesmal mit einem Hamming-Fenster Bandpassfilter der Ordnung 200 und mit CutOff-Frequenzen, die sich ± 0.5 Hz um die jeweilige Raummodenfrequenz befinden. Mit diesem Filter wird dann die nullphasige digitale Filterung durchgeführt. Die ersten 30s der Sinusantworten (Einschwingvorgang und stationärer Zustand) werden weggeschnitten, um Vergleichbarkeit mit Sweepantworten zu gewährleisten. Eine Sinusantwort wird anschließend zu den anderen Sinusantworten aus dem gleichen Terzband addiert.

Das Extrahieren der Abklingvorgänge von Terzbändern aus Sweepmessungen wurde mit dem gleichen Filter durchgeführt, wobei hier die Grenzfrequenzen des jeweiligen Terzbandes als die CutOff-Frequenzen verwendet wurden. Die Hüllkurven wurden in beiden Fällen mit der RMS-Methode gewonnen (mit gleichen Parametern wie für TBR-Messungen, siehe Gleichung 5.3) und sind (beispielhaft) für MK1 in Abbildung 6.20, Abbildung 6.21, Abbildung 6.22, Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 zu sehen. Die restlichen Messkonfigurationen sind im Anhang C dargestellt.

Es ist aus den erwähnten Abbildungen ersichtlich, dass die beiden Auswertungsmethoden sehr ähnliche Tendenzen aufweisen. Bei den 40 Hz- und 63 Hz-Terzbändern (Abbildung 6.22 und Abbildung 6.24) sind sogar die Schwabungen der Abklingkurve bei den Sinus- und Sweepabklingvorgängen ident. Dies gilt auch in Anwesenheit von Kantenabsorbern (siehe Anhang C). Man könnte sogar behaupten, dass je mehr Absorptionsmaterial in der Kante platziert ist, desto weniger weichen die Abklingkurven der zwei Auswertungsmethoden voneinander ab (siehe MK2, Abbildung C. 1 bis Abbildung C. 5).

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass die Nachhallzeiten der tiefen Frequenzen (bis und einschließlich 63 Hz-Terzband) im Hallraum der TU Graz allein durch die Abklingzeiten der Raummoden in diesem Frequenzbereich bestimmt sind.

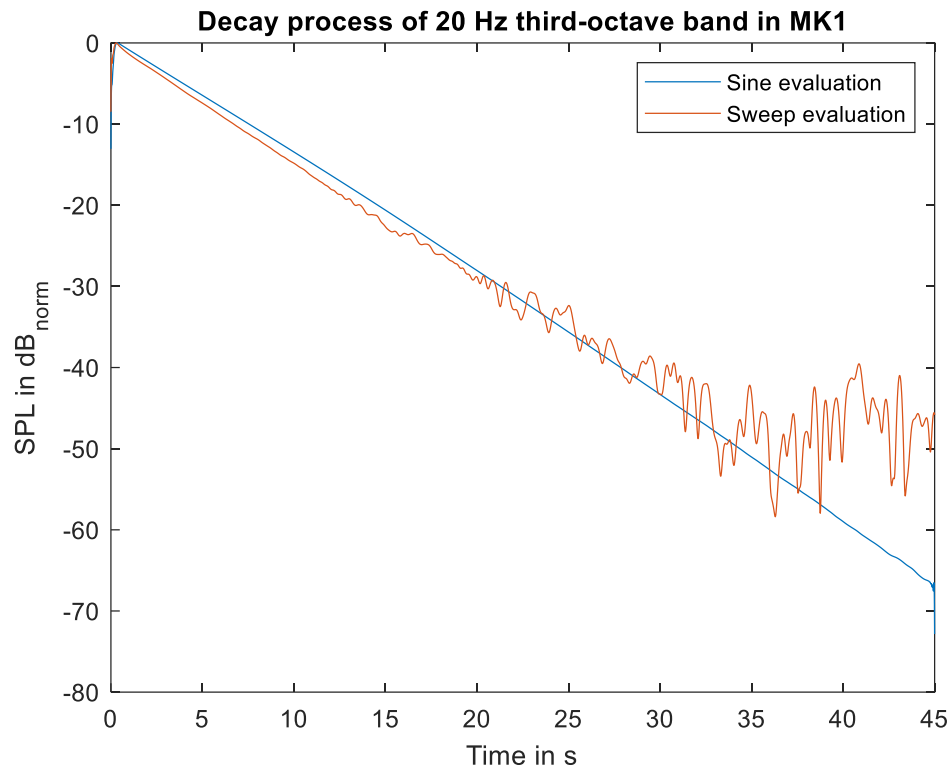


Abbildung 6.20: Abklingvorgang des 20 Hz - Terzbandes in MK1, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

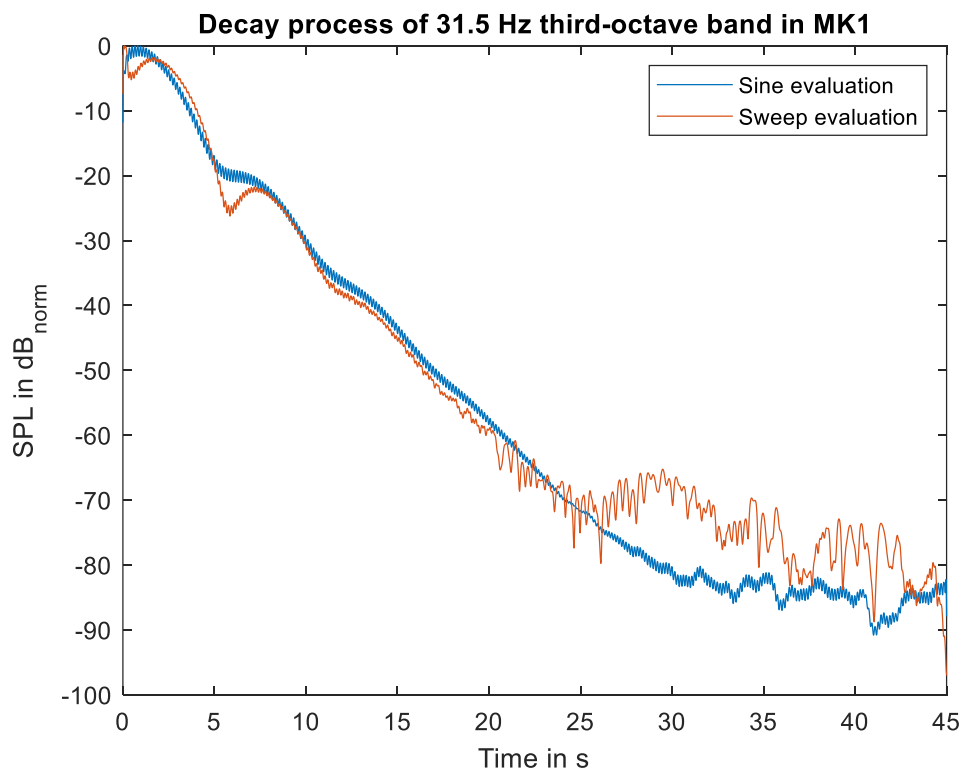


Abbildung 6.21: Abklingvorgang des 31.5 Hz - Terzbandes in MK1, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

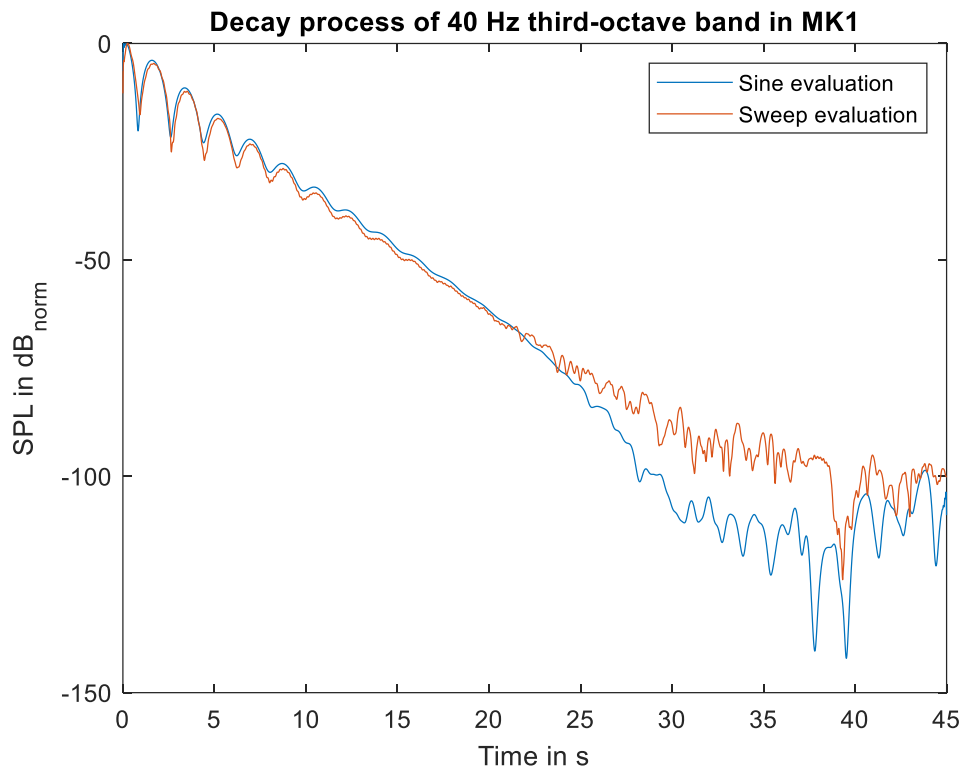


Abbildung 6.22: Abklingvorgang des 40 Hz - Terzbandes in MK1, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

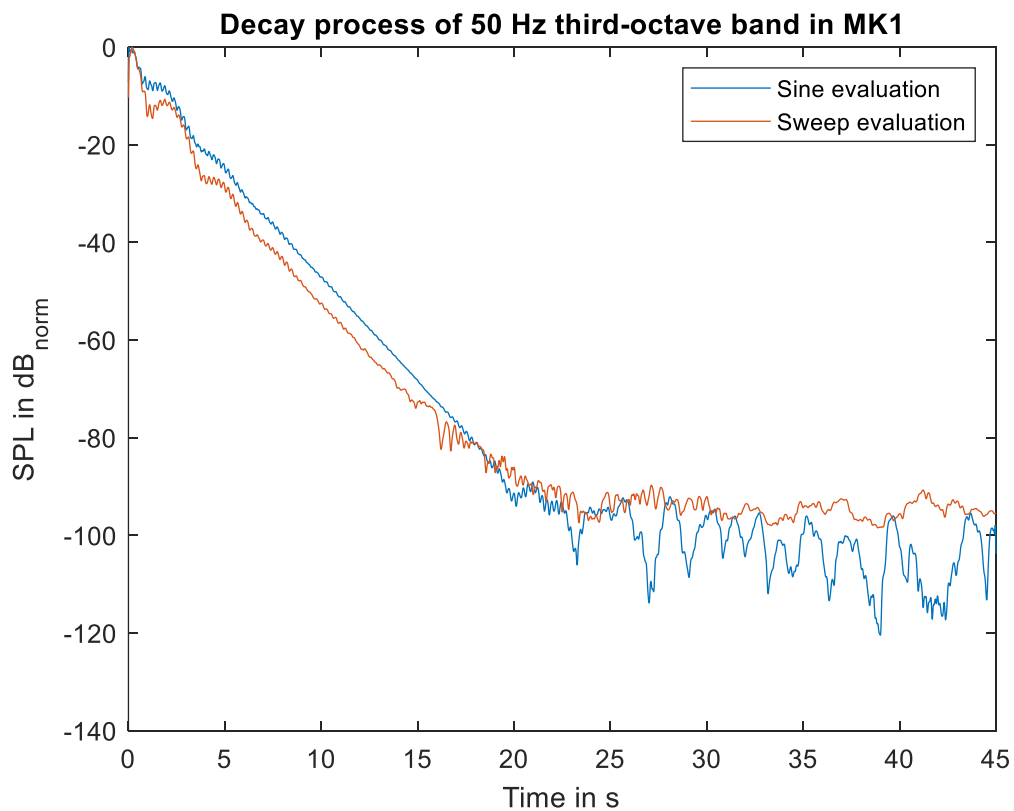


Abbildung 6.23: Abklingvorgang des 50 Hz - Terzbandes in MK1, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

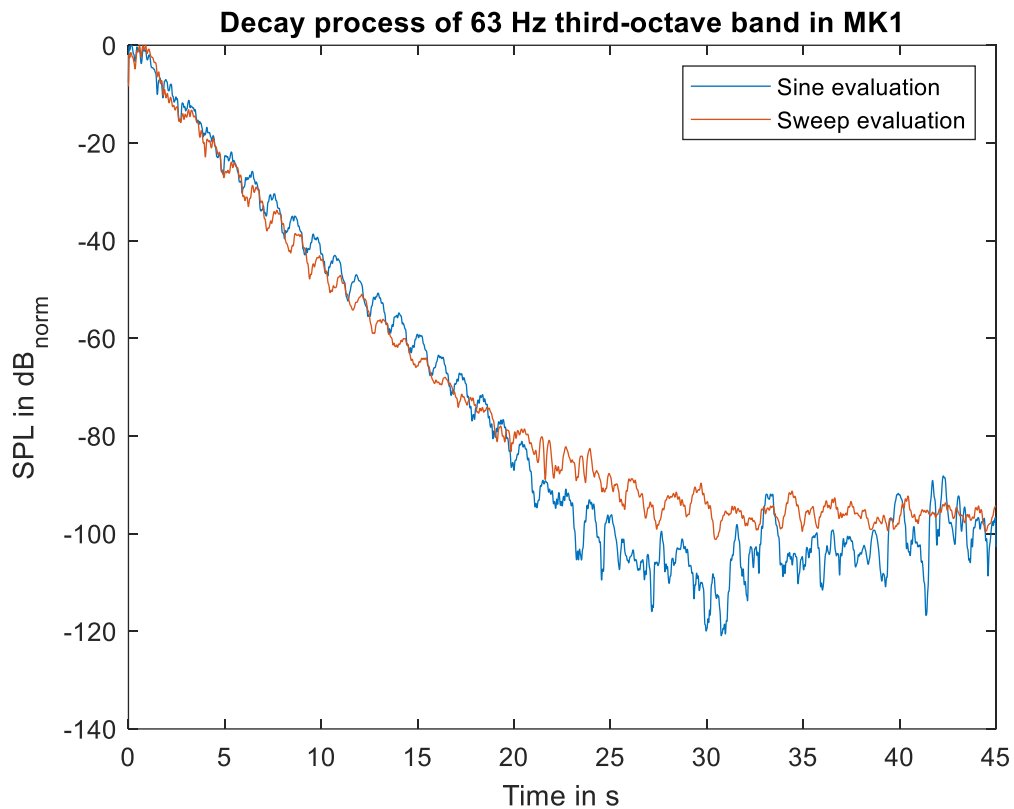


Abbildung 6.24: Abklingvorgang des 63 Hz - Terzbandes in MK1, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

6.4 Untersuchung des Abschaltvorgangs

Bei der spektralen Analyse der Sinusmessungen betrachtet man ein interessantes Phänomen: alle Raummoden werden zu Beginn und am Ende des Signals erneut angeregt. Dies wird am Beispiel der Raummode 2-1-1 dargestellt (Abbildung 6.25).

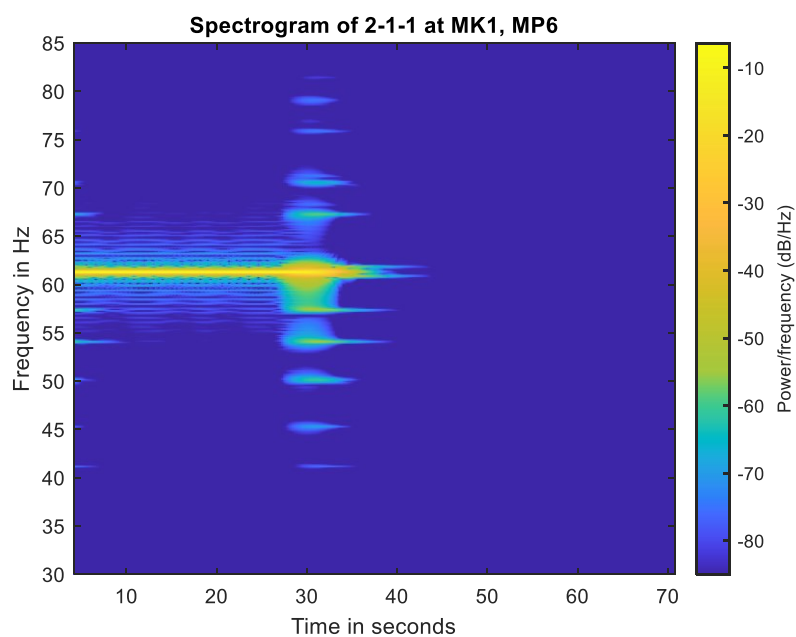


Abbildung 6.25: Spektrogramm der Raummode 2-1-1 (61.27 Hz) in MK1 und beim MP6.

Man könnte vermuten, dass dies als Folge eines abrupten Abschaltens des Signals und dementsprechend eines impulsartigen Abschaltgeräusches passiert. Die Sinussignale wurden aber so generiert, dass sie einen zwei Perioden langen Fade-Out besitzen, um dieses Abschaltgeräusch zu vermeiden. Die Länge des Fade-Outs (hier auch: Fensterlänge) darf auf der anderen Seite nicht sehr lang sein, damit die Auswertung des Abklingvorganges nicht beeinflusst wird.

Aus Abbildung 6.25 ist zu erkennen, dass die Moden, welche näher an der Anregungsfrequenz liegen, beim Abschaltvorgang stärker angeregt werden. Die nah benachbarten Moden 1-2-0 (60.87 Hz) und 3-0-0 (61.77 Hz) fließen sehr stark in den Abklingvorgang ein. Das ist der Grund für die Schwebungseffekte in den Abklingkurven (Abbildung 6.26).

Dieser Effekt nennt sich „Spectral Splatter“ (26). „Spectral Splatter“ beschreibt die Anregung von Teilen des Spektrums beim Abschalten eines reinen Sinustones. Mit steigender Länge der Fade-Outs wird der „Spectral Splatter“ schwächer ausgeprägt.

Der Effekt ist für den Fall des Hallraums näher zu untersuchen. Um mit verschiedenen Fensterungen und Fensterlängen testen zu können, wurde im Nachhinein eine Messung im Miniaturhallraum am SPSC Graz durchgeführt. Dieser Hallraum hat jeweils ein Zehntel der Abmessungen des Hallraumes der TU Graz und dementsprechend verschieben sich die Raummodenfrequenzen um den Faktor ≈ 10 nach oben (Abbildung 6.27). Für weitere Details über den Miniaturhallraum wird auf „*Entwurf und Konstruktion eines Modell-Hallraumes im Maßstab 1:10*“ von Martin Müller hingewiesen (27).

Abbildung 6.27 zeigt die Auswahl der Frequenzen für die Testmessung. Dabei hat man sich für die tiefste Mode, das erste Minimum danach, die ersten zwei nahbenachbarten Moden und das Minimum dazwischen entschieden. Die Testsignale setzen sich aus folgenden Teilen zusammen:

- 1 Sekunde Pause vor dem Sinus;
- Sinussignal für ca. 6 Sekunden, immer mit ganzzahliger Anzahl an Perioden generiert;
- 5 Sekunden Stille für den Abklingvorgang.

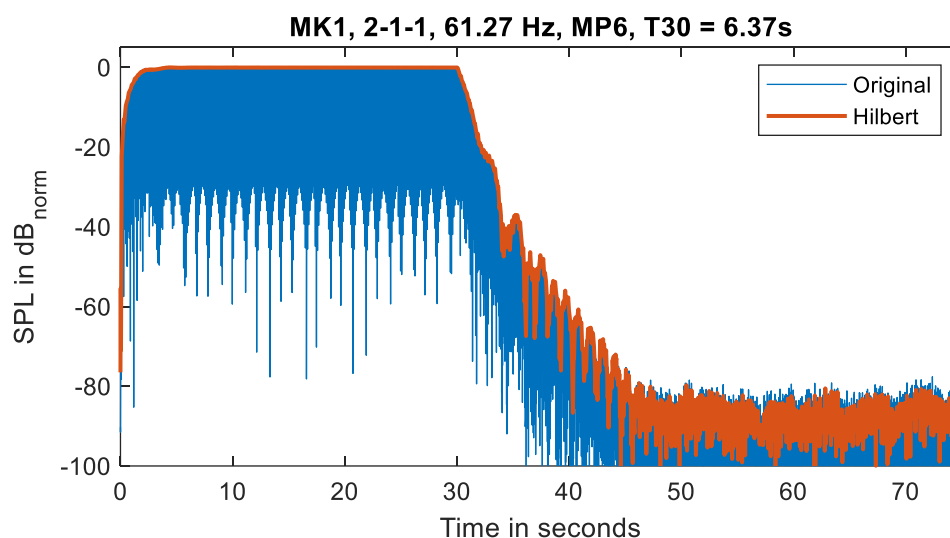


Abbildung 6.26: Abklingvorgang der Raummode 2-1-1, hier zur Veranschaulichung des Schwebungseffektes.

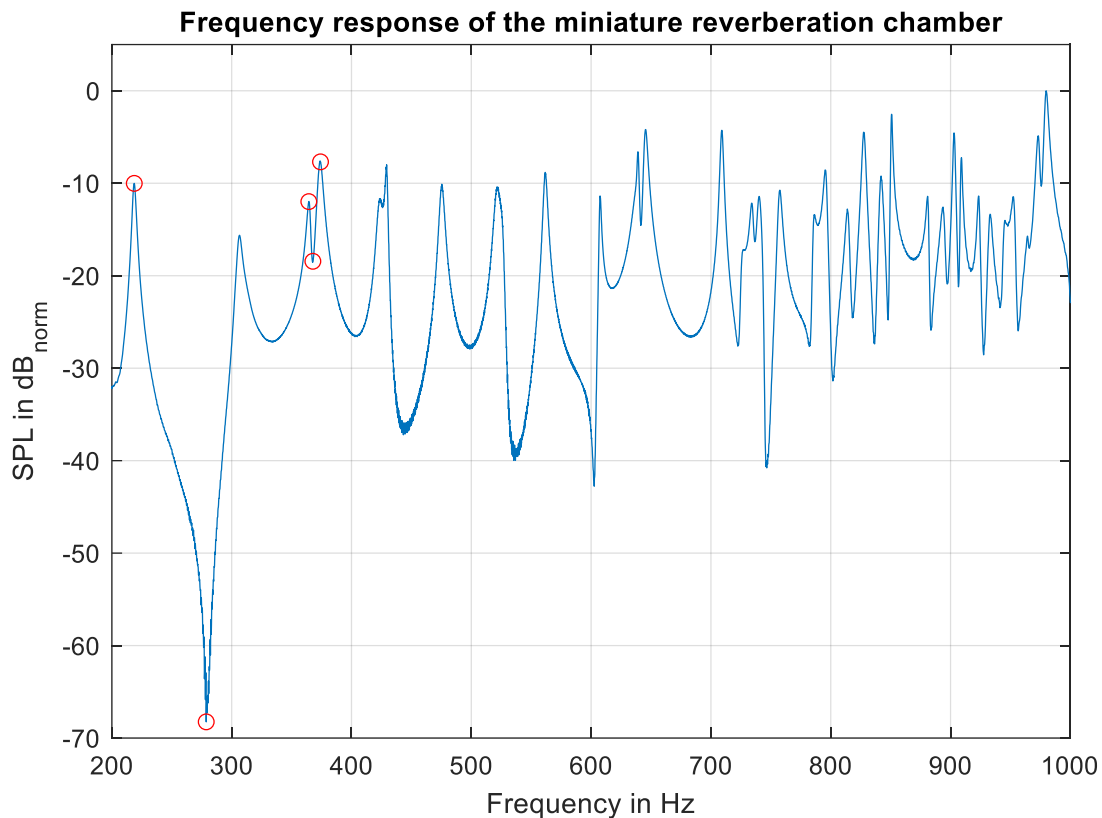


Abbildung 6.27: Frequenzgang des Miniaturhallraums. Die roten Kreise bezeichnen die Frequenzen, die für die Testmessung ausgewählt wurden. Zu beachten ist, dass sich die Raummodenfrequenzen im Miniaturhallraum etwas höher im Frequenzspektrum als das Zehnfache der Raummodenfrequenzen im Hallraum befinden.

Das Sinussignal selbst wurde mit verschiedenen Fenstern ausgefaded, wobei nur die zweite Hälfte des Fensters verwendet wurde, um eine Fade-Kurve zu generieren:

- Rectangular (kein Fade-Out)
- Triangular über 3 Sinus-Perioden
- Hamming über 3 Sinus-Perioden
- Triangular über 20 Sinus-Perioden
- Hamming über 20 Sinus-Perioden

Die Ergebnisse werden in Spektrogrammen dargestellt (Abbildung 6.28, Abbildung 6.29, Abbildung 6.30, Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32). Die Spektrogramme mit rechteckigem Fenster werden zur besseren Vergleichbarkeit doppelt, links und rechts geplottet. Links befinden sich die Spektren mit einer Fade-Out-Länge von 3 Sinusperioden. Rechts beträgt die Fade-Out-Länge 20 Perioden.

Es ist ersichtlich, dass bei allen angeregten Frequenzen bei einer rechteckigen Fensterung alle anderen Raummoden zum Signalende am stärksten angeregt werden. Bei den 3-Sinusperioden-Fenstern werden alle Raummoden zum Signalende ebenso angeregt, allerdings weniger stark. Erfolgt die Fensterung mit 20 Perioden, so ist die Amplitude der zum Signalende angeregten Moden noch geringer (bzw. bei der Anregung mit 219 Hz kaum mehr sichtbar, siehe Abbildung 6.28). Allgemein ist die Anregung der Raummoden zum Signalende ausgeprägter, wenn man mit einem Dreieck-Fenster das Anregungssignal ausblendet.

Generell wurde festgestellt, dass der Effekt der Anregung von restlichen Raummoden beim Abschalten eines Sinussignales bei allen fünf Varianten der Fensterungen- und Fensterlängen

auftritt. Natürlich ist das Phänomen weniger prominent mit steigender Fensterlänge, ist aber noch immer präsent. Je näher sich die Raummodenfrequenzen an der Frequenz des Anregungssignales befinden, desto stärker werden sie angeregt. Sogar wenn man ein lokales Minimum als Anregungssignal wählt, werden die Raummoden in der Nähe zum Signalende stark angeregt (siehe Abbildung 6.31).

Es wurde also bewiesen, dass jeder Abklingvorgang das Spektrum aufweitet. Eine allgemeine Formulierung lässt sich daher wie folgt schließen: alle Raummoden werden angeregt, wenn das Schallfeld aus dem stationären Zustand in einen Ein- oder Abklingvorgang übergeht. Je stetiger der Übergang zwischen zwei Zuständen des Schallfeldes ist, desto weniger prominent ist der Effekt. Dieser Effekt kann bei den Abklingvorgängen einzelner Raummoden, die in der unmittelbaren Nähe anderer Raummoden im Frequenzspektrum sind, Schwebungen in den Abklingkurven verursachen und dadurch die Evaluation der Abklingzeit erschweren.

Bei der Messung im Hallraum wurde ein Hannfenster der Länge von zwei Perioden des jeweiligen Sinussignals verwendet. Aus Abbildung 6.25 ist ersichtlich, dass die anderen Raummoden, vor allem die nahen, trotzdem sehr stark angeregt werden. Daher wäre für zukünftige Messungen empfehlenswert, ein längeres Fade-Out zu wählen (z.B. 10 Sinusperioden), um diesen Effekt zu minimieren.

Die Messung im Miniaturhallraum wurde mit einem Lautsprecher mit kleiner Membran durchgeführt, der schon bei moderaten Lautstärken harmonische Verzerrungen aufgewiesen hat (siehe Abbildung 6.28 und Abbildung 6.29). Mit steigender Frequenz werden die harmonischen Oberschwingungen generell weniger stark angeregt (siehe Abbildung 6.30, Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32).

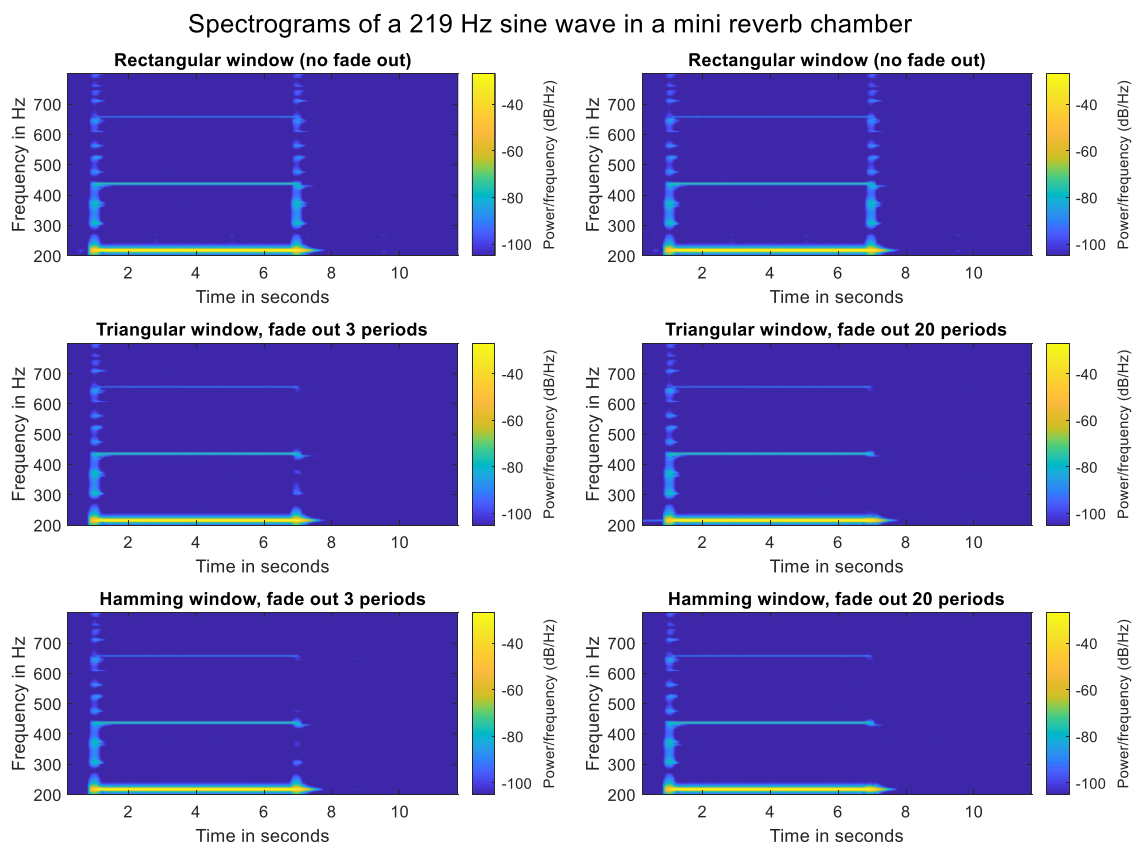


Abbildung 6.28: Spektrogramme des Abklingvorgangs bei Anregung mit einem 219 Hz Sinussignal (1-0-0) im Miniaturhallraum.

Spectrograms of a 280 Hz sine wave in a mini reverb chamber

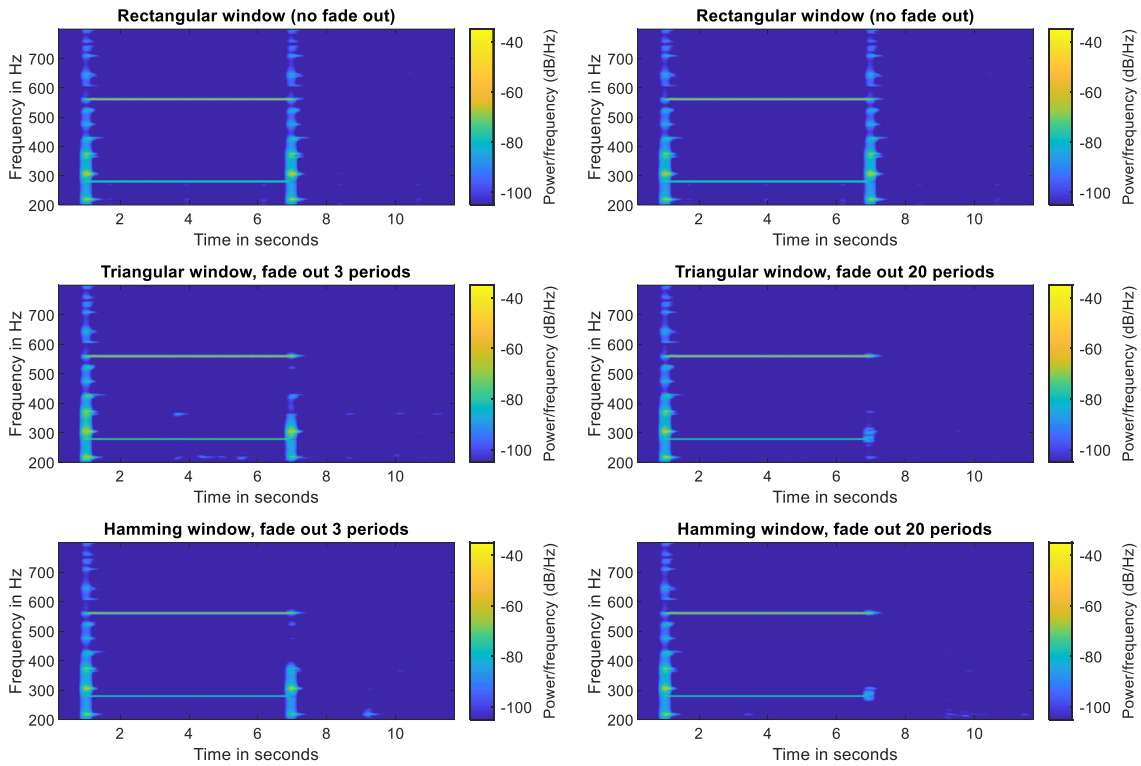


Abbildung 6.29: Spektrogramme des Abklingvorgangs bei Anregung mit einem 280 Hz Sinussignal im Miniaturhallraum.

Spectrograms of a 364 Hz sine wave in a mini reverb chamber

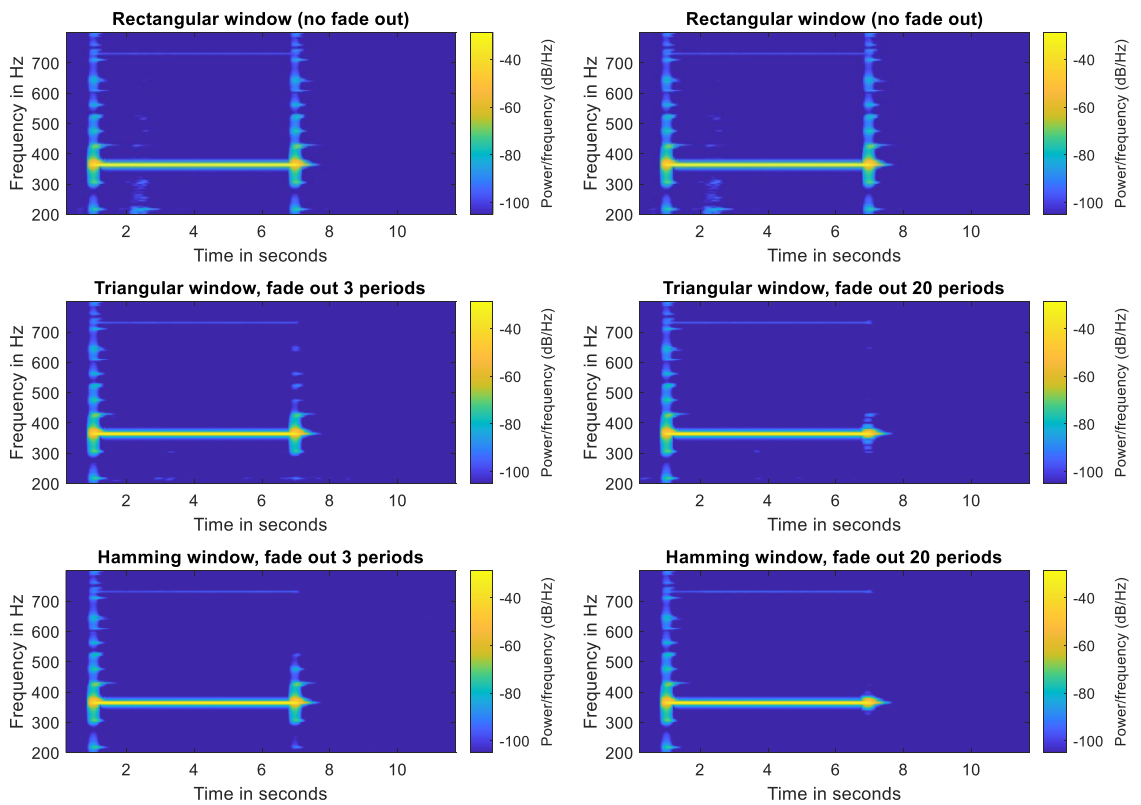


Abbildung 6.30: Spektrogramme des Abklingvorgangs bei Anregung mit einem 364 Hz Sinussignal (0-0-1) im Miniaturhallraum.

Spectrograms of a 368 Hz sine wave in a mini reverb chamber

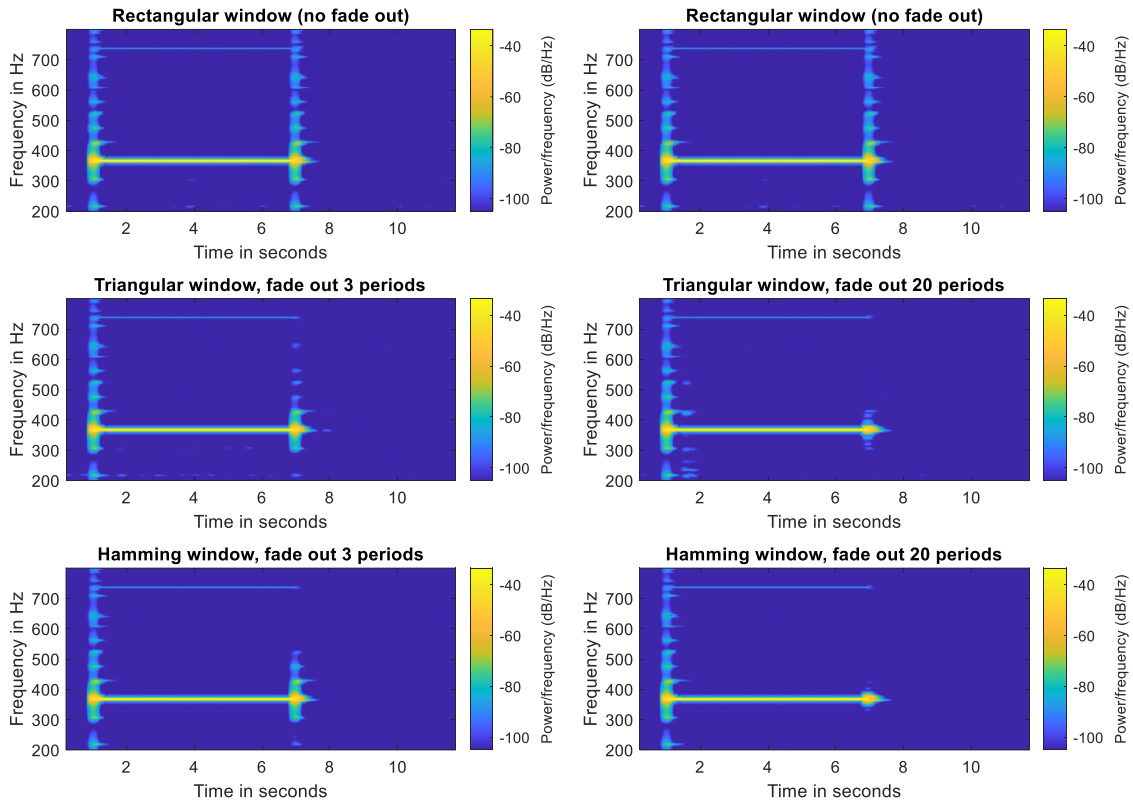


Abbildung 6.31: Spektrogramme des Abklingvorgangs bei Anregung mit einem 368 Hz Sinussignal im Miniaturhallraum.

Spectrograms of a 374 Hz sine wave in a mini reverb chamber

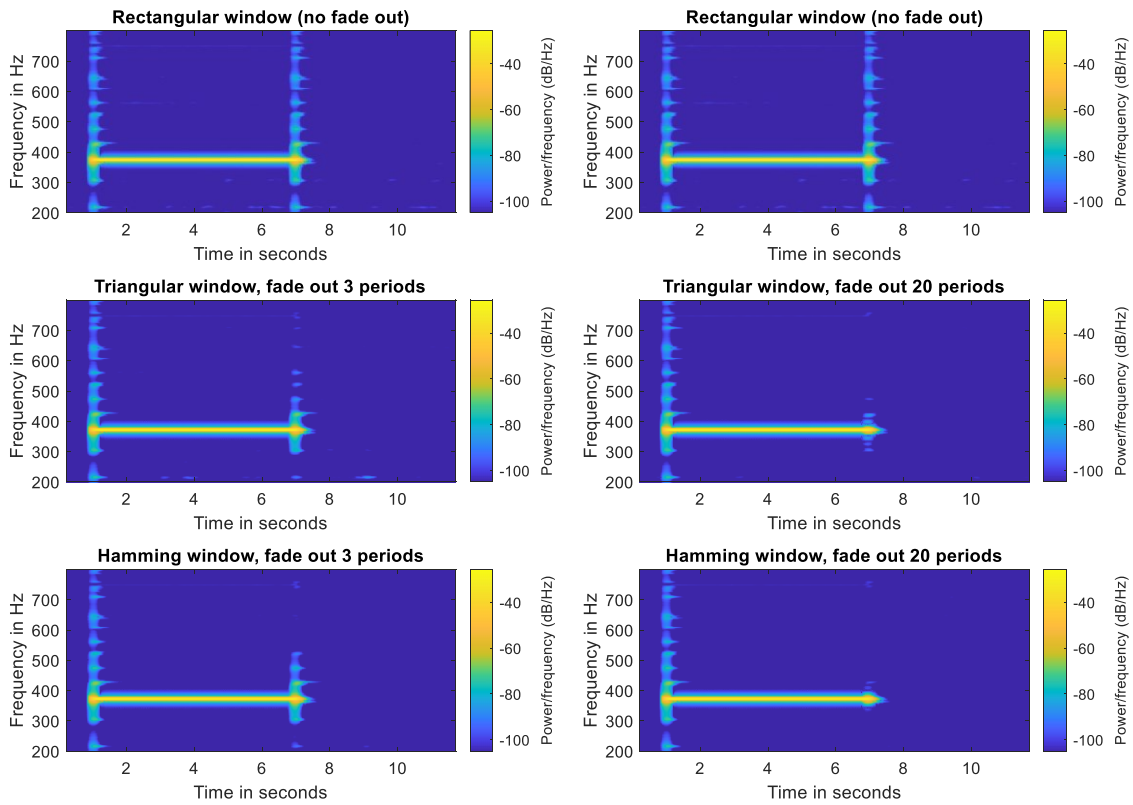


Abbildung 6.32: Spektrogramme des Abklingvorgangs bei Anregung mit einem 374 Hz Sinussignal (1-1-0) im Miniaturhallraum.

6.5 Evaluation der Trennbarkeit von nahbenachbarten Raummoden

Um die Abklingvorgänge einzelner Raummoden mit möglichst geringer Beeinflussung durch nahbenachbarte Raummoden auswerten zu können, müssen sie messtechnisch voneinander „getrennt“ werden. Dies wird realisiert, indem die Messmikrofone an Stellen mit hohem Schalldruck einer und niedrigem Schalldruck anderer nahbenachbarter Raummoden positioniert werden (siehe Abbildung 3.4 - Abbildung 3.8, sowie Tabelle 3.5). Für eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise wird auf Unterkapitel 3.1 hingewiesen.

Abbildung 6.33, Abbildung 6.34, Abbildung 6.35, Abbildung 6.36 und Abbildung 6.37 stellen die Frequenzgänge an ausgewählten Messpunkten dar. Dabei wurde die Frequenzachse so eingestellt, dass die Peaks der Raummoden im zu untersuchenden Modencluster ersichtlich sind.

Aus diesen Abbildungen geht hervor, dass die Trennung aller Moden im leeren Hallraum durch das entwickelte Messkonzept gewährleistet wurde. Selbst bei den Modenclustern mit drei bzw. vier Raummoden wurde erreicht, dass die untersuchte Mode zumindest stärker ausgeprägt ist als ihre unmittelbaren Nachbarn (siehe Abbildung 6.36 und Abbildung 6.37). Jedoch ist die Trennung erschwert möglich, wenn Messungen im Hallraum mit Kantenabsorbieren durchgeführt werden. Dies wird am Beispiel von MK4 dargelegt.

Die Trennung bleibt bei Modenclustern mit zwei Raummoden erhalten (siehe Abbildung 6.38, Abbildung 6.39 und Abbildung 6.40). Bereits beim Cluster mit drei Raummoden (siehe Abbildung 6.41) wird deutlich, dass die Identifizierung der einzelnen Raummoden erschwert wurde. Beim Cluster mit 4 Raummoden (siehe Abbildung 6.42) ist schon eindeutig erkennbar, dass die Raummoden 1-2-1 und 2-2-0 nicht mehr voneinander trennbar sind (bzw. sie „verschmelzen“ zu einem einzelnen breiten Peak – das gilt auch in MK2 und MK3 (Anhang D, Abbildung D. 4 und Abbildung D. 9), weil der Kantenabsorber ungefähr ab dieser Frequenzen eine nennenswerte Wirkung aufweist und somit deren Abklingzeiten kürzer- und Güten niedriger werden (siehe Gleichung 2.11 und Berechnung 2.13). Die Raummoden lassen sich umso schlechter trennen, je mehr Absorptionsmaterial verwendet wird (Anhang D, D.1). Da die beiden Cluster innerhalb vom 63 Hz – Terzband liegen, deckt sich diese Erkenntnis mit den Anforderungen des Grenzterzbandes, wie im Unterkapitel 3.1, S.21 diskutiert.

Daraus lässt sich folgende Erkenntnis ableiten: Durch gezieltes Platzieren der Messmikrofone ist es möglich und sinnvoll, im leeren Hallraum Raummoden in einem Terzband mit bis zu 10 Raummoden mithilfe einzelner Sinustöne anzuregen. Dies kann als eine Erweiterung der Erkenntnisse von Späh (14) und Zha (15) betrachtet werden, die Terzbänder mit bis zu 5 Raummoden mithilfe einzelner Sinustöne untersucht haben. Allerdings verliert diese Aussage ihre Gültigkeit, wenn absorbierendes Material im Raum vorhanden ist, welches in diesem Terzband eine merkliche Wirkung hat.

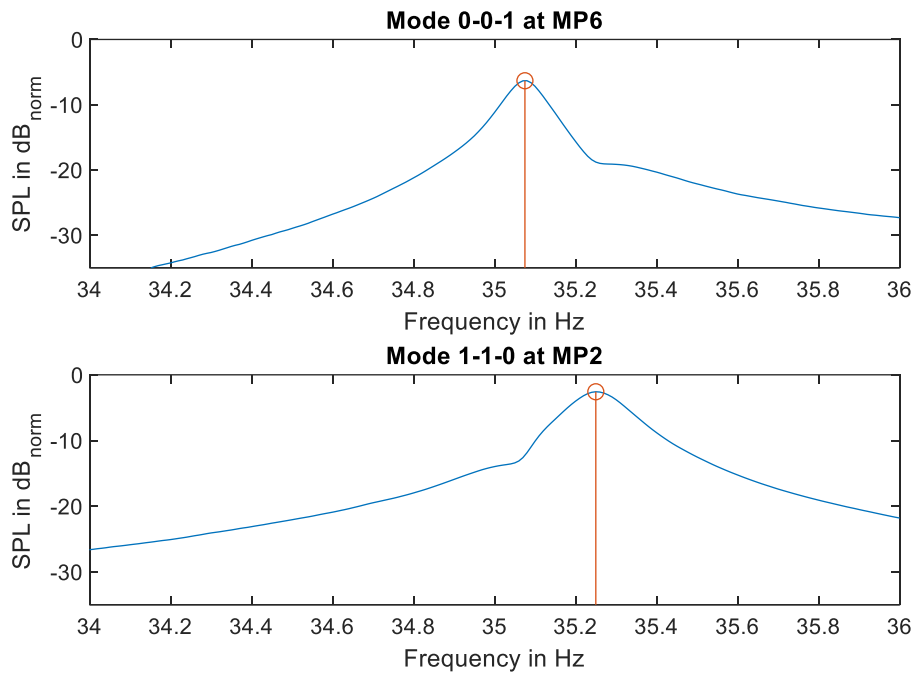


Abbildung 6.33: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 0-0-1 und 1-1-0 in MK1 bei ausgewählten Messpunkten MP6 und MP2.

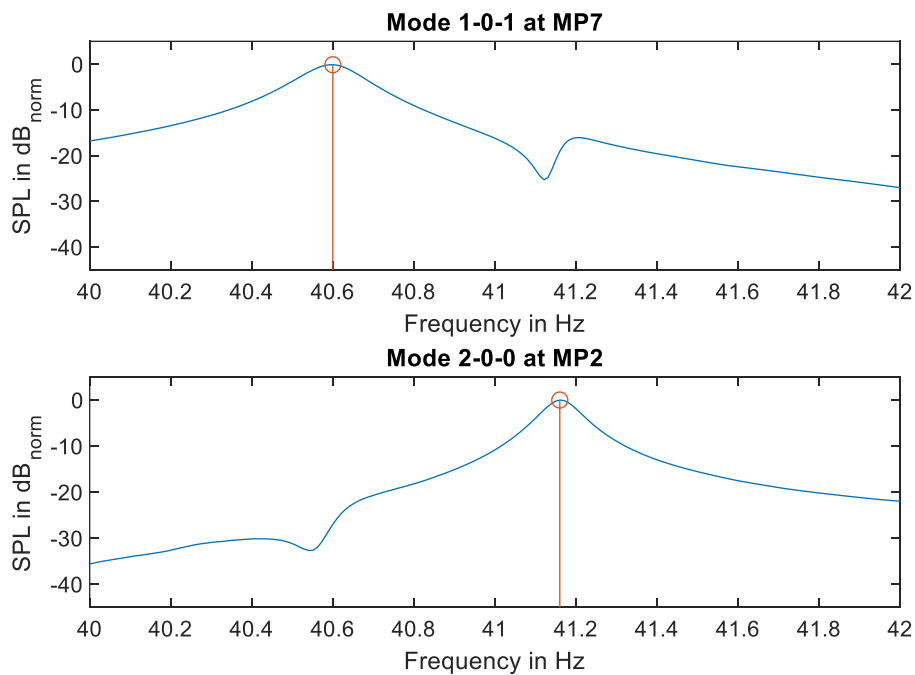


Abbildung 6.34: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-0-1 und 2-0-0 in MK1 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP2.

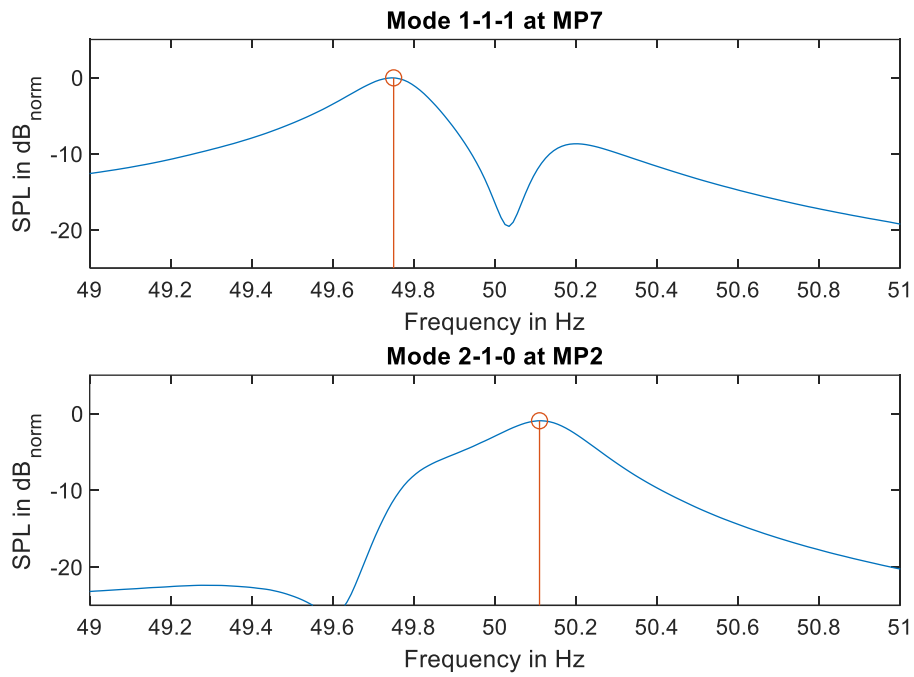


Abbildung 6.35: Ansicht der zwei nahenachbarten Moden 1-1-1 und 2-1-0 in MK1 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP2.

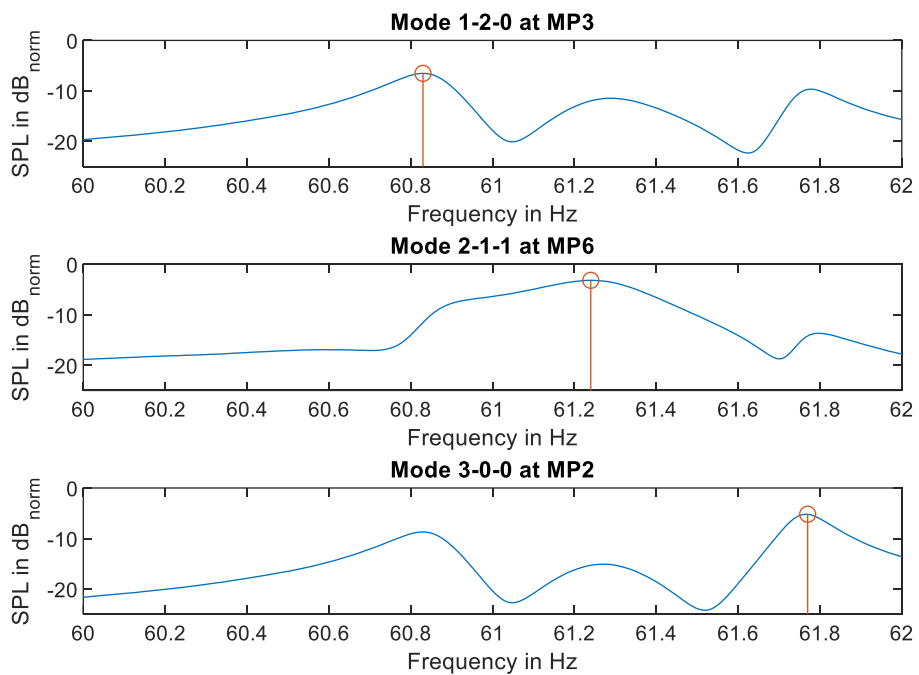


Abbildung 6.36: Ansicht der drei nahenachbarten Raummoden 1-2-0, 2-1-1 und 3-0-0 in MK1 bei ausgewählten Messpunkten MP3, MP6 und MP2.

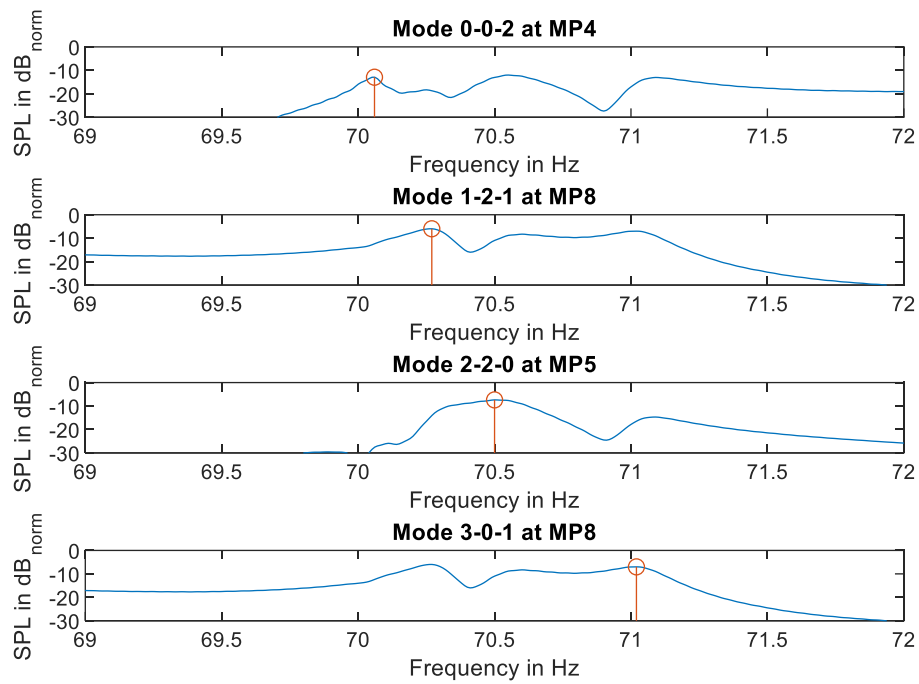


Abbildung 6.37: Ansicht der vier nahenachbarten Raummoden 0-0-2, 1-2-1, 2-2-0 und 3-0-1 in MK1 bei ausgewählten Messpunkten MP4, MP5 und MP8.

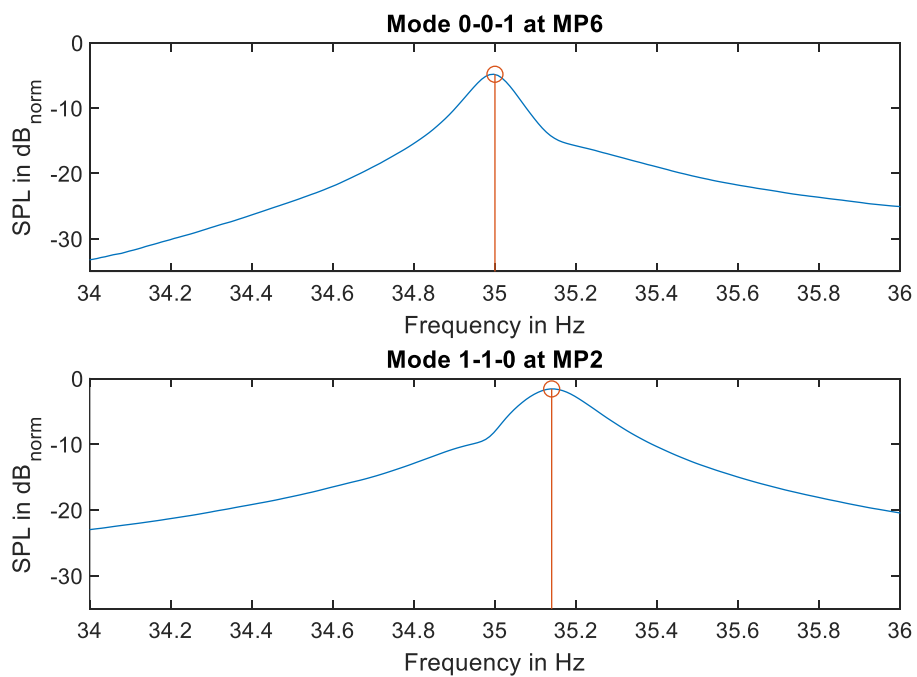


Abbildung 6.38: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 0-0-1 und 1-1-0 in MK4 bei ausgewählten Messpunkten MP6 und MP2.

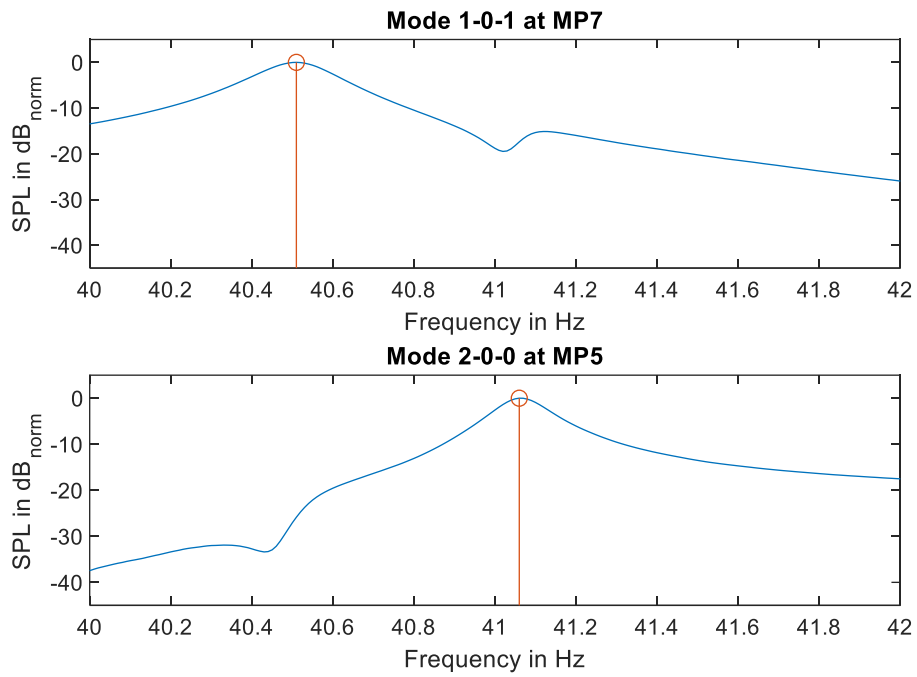


Abbildung 6.39: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-0-1 und 2-0-0 in MK4 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP5.

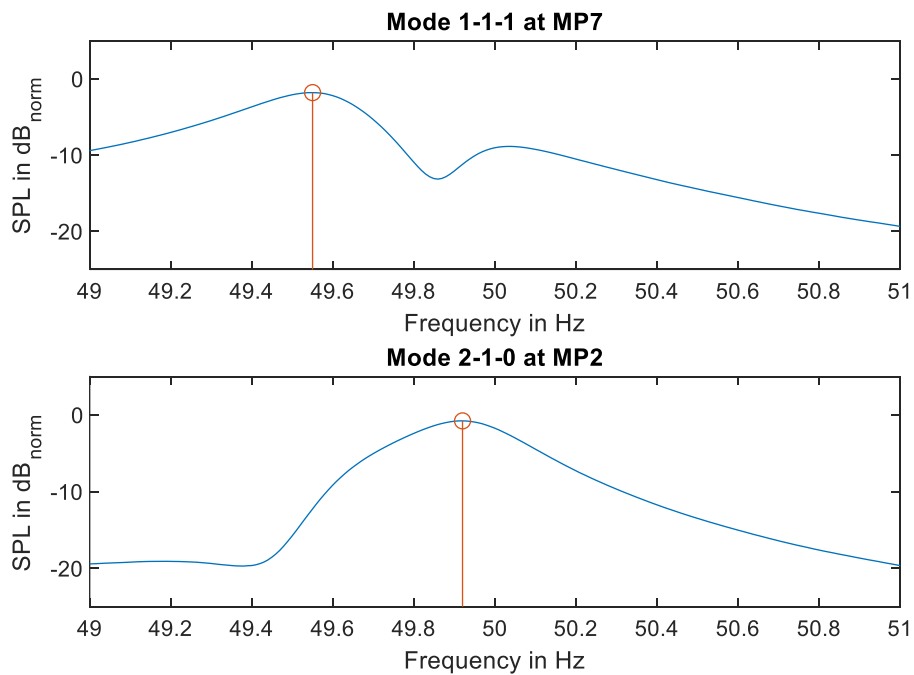


Abbildung 6.40: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-1-1 und 2-1-0 in MK4 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP2

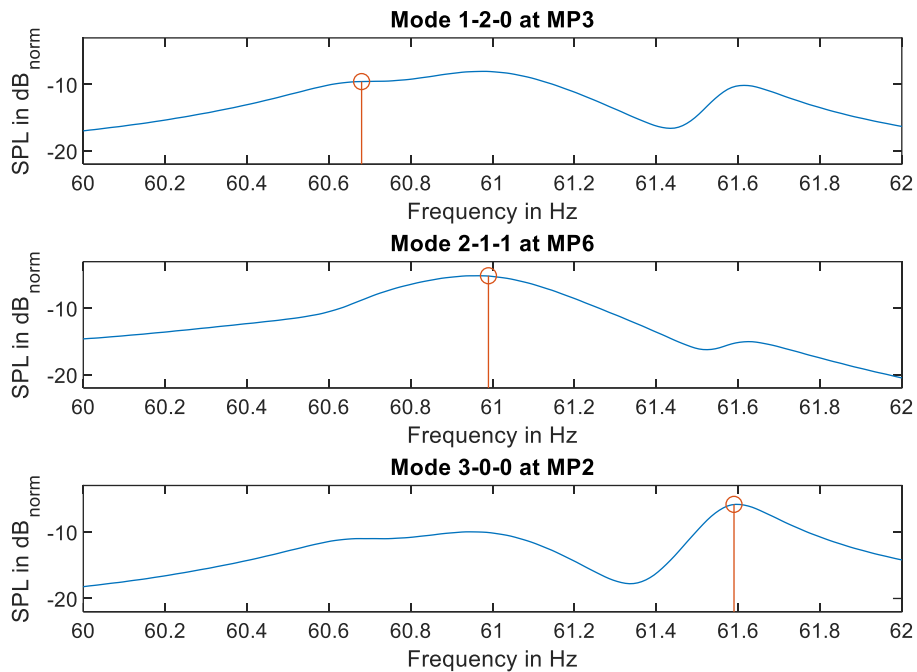


Abbildung 6.41: Ansicht der drei nahenachbarten Raummoden 1-2-0, 2-1-1 und 3-0-0 in MK4 bei ausgewählten Messpunkten MP3, MP6 und MP2.

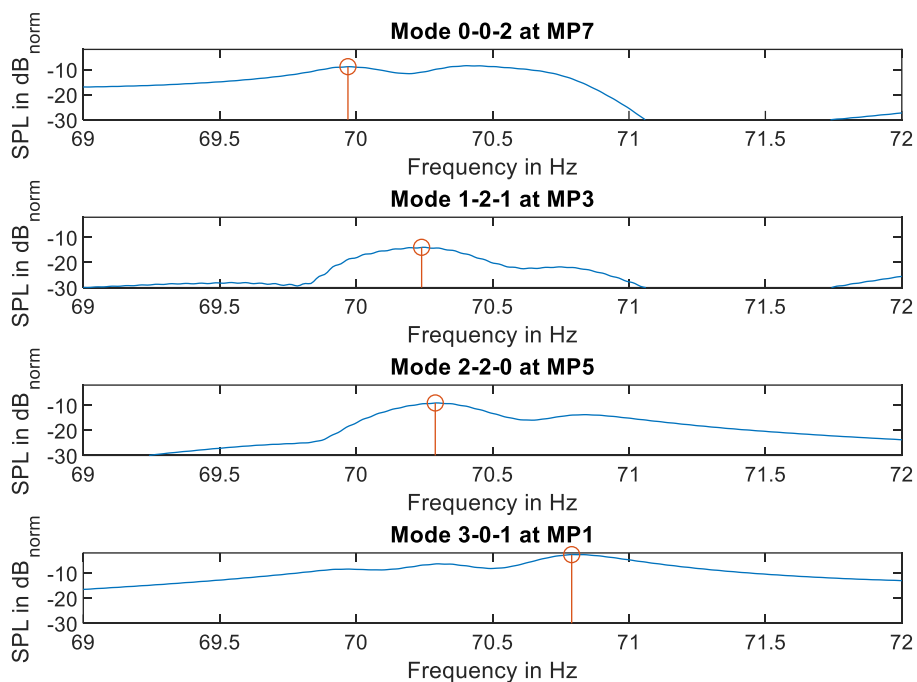


Abbildung 6.42⁸: Ansicht der vier nahenachbarten Raummoden 0-0-2, 1-2-1, 2-2-0 und 3-0-1 in MK4 bei ausgewählten Messpunkten MP7, MP3, MP5 und MP1.

Die Ursache der erschwerten Trennung der Raummoden bei Anwesenheit der Kantenabsorber liegt nebst der Verbreiterung der Moden-Peaks und daraus resultierenden stärkeren Überlappung auch im Folgenden: durch die Kantenabsorber wird das Schallfeld im Hallraum „verzerrt“ bzw. die örtliche Verteilung des Schalldruckes erfolgt nicht mehr wie in Abbildung 3.4 - Abbildung 3.8, sondern weist ein anderes Verteilungsmuster auf, wie von Leon Merkel im Rahmen

⁸ Peaks im Frequenzspektrum entsprechen nicht notwendigerweise genau den Modenfrequenzen, da sie sich gegenseitig beeinflussen/verschieben.

seines Projektes untersucht (5). Hier wird beispielhaft die aus der FEM-Simulation von Merkel (5) gewonnene örtliche Verteilung des Schalldruckes der Raummode 2-0-0 bei Anwesenheit der Kantenabsorber (MK3) gezeigt (Abbildung 6.43):

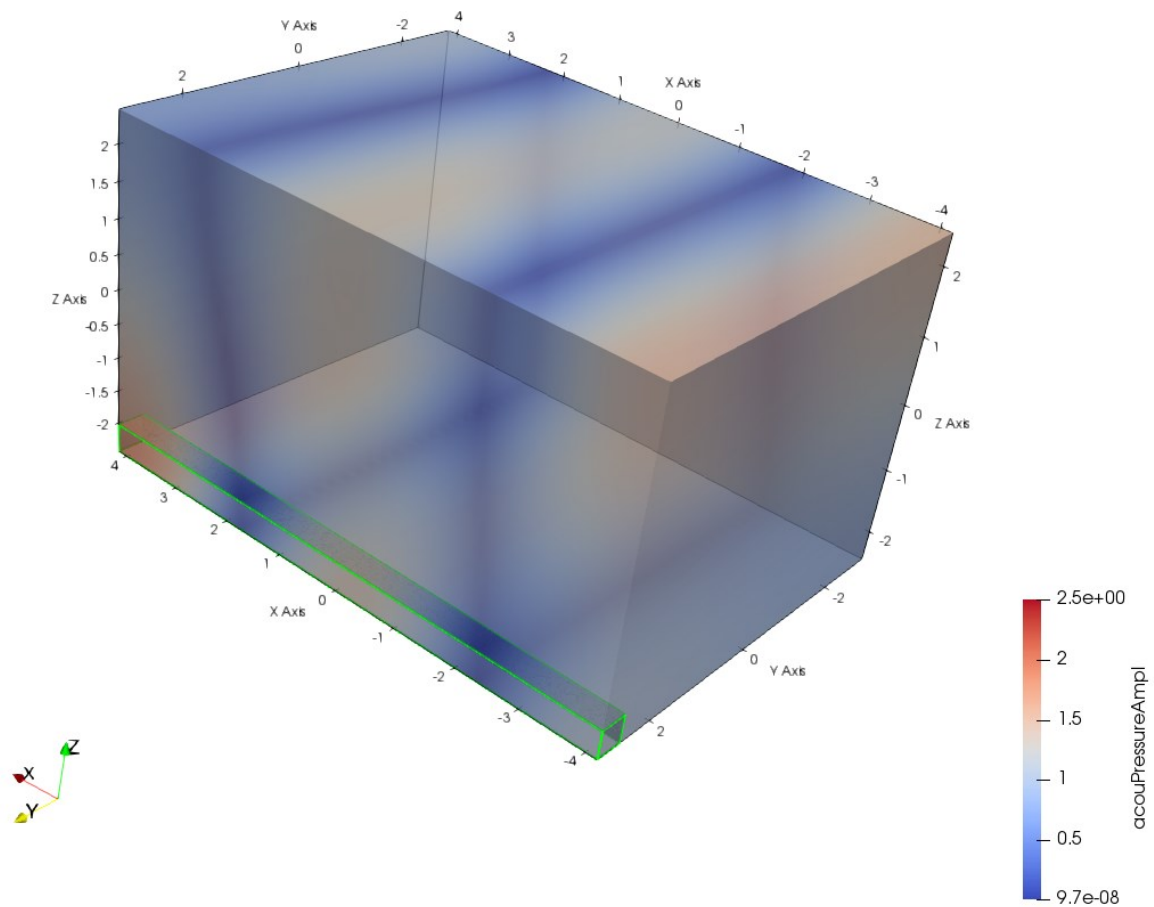


Abbildung 6.43: Örtliche Verteilung des Schalldruckes der Raummode 2-0-0 bei Anwesenheit von Kantenabsorbern in MK3 (5).

Vergleicht man Abbildung 6.43 mit Abbildung 3.5 (rechts), so ist eindeutig, dass die Schalldruckminima- und Maxima sich nicht an den gleichen Orten wie im leeren Hallraum befinden, wenn die Kantenabsorber anwesend sind. Raummode 2-0-0 weist nicht mehr ein Maximum beim MP2 auf (siehe Abbildung 3.9 und Tabelle 3.3) und somit kann dieser Messpunkt nicht mehr als die optimale betrachtet werden. Die Aussagekraft der Messpunkte aus dieser Arbeit verringert sich somit bei Anwesenheit der Kantenabsorber.

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde erfolgreich eine Messmethode zur genauen Bestimmung der Abklingvorgänge der Raummoden im Hallraum der TU Graz entwickelt. Es wurde eine präzise Auswertung der Nachhall- und Abklingzeiten im tieffrequenten Bereich (bis und einschließlich 100 Hz Terzband) durchgeführt und die Einflüsse von Resonanzen der Eingangstür und Kantenabsorber untersucht. Des Weiteren wurden die Frequenzverschiebungen aufgrund der Anwesenheit von Kantenabsorbern analysiert. Eine Untersuchung der Raumantwort bei Ein- und Ausschaltvorgängen wurde mithilfe der Messungen im Miniaturhallraum durchgeführt. Abschließend wurde die Effizienz der Messmethode hinsichtlich der Trennung benachbarter Raummoden im Frequenzspektrum bewertet.

Die Messkampagne setzt sich aus Modalanalyse, der Messung der Abklingvorgänge und der Aufnahme des Schwingungsverhaltens der Eingangstür zusammen. Als Anregungssignale wurden exponentielle Sweeps (Modalanalyse), Sinussignale (Abklingvorgänge für $f_m \leq 63 \text{ Hz}$) und Terzbandrauschen (Abklingvorgänge für $f_m \geq 63 \text{ Hz}$) generiert und abgespielt. Als Schallquelle wurde ein Subwoofer verwendet, während als Empfänger 8 Messmikrofone und 2 Accelerometer (für die Aufnahme des Schwingungsverhaltens der Eingangstür) eingesetzt wurden. Die 8 Mikrofone wurden so positioniert, dass eine Trennung der nahenachbarten Raummoden im Frequenzbereich ermöglicht wurde. Es wurden MATLAB-Skripte für die Messsteuerung- und Auswertung entwickelt, die für zukünftige Messungen mit ähnlichen Zielen angepasst werden können.

Es wurde festgestellt, dass die Frequenzverschiebung mit der Erhöhung der Quantität des Absorptionsmaterials in der Raumkante ebenso steigt. Es wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen der Modenordnung und Ausbreitungsart einerseits und der Frequenzverschiebung andererseits gefunden. Die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Ergebnissen der Frequenzverschiebungen wurden ermittelt.

Eine Türresonanz bei 25 Hz wurde entdeckt. Die Vermutung, dass ein lokales Minimum in den Nachhallzeiten beim 50 Hz- und 63 Hz-Terzband aufgrund einer Türresonanz entsteht, konnte nicht mit absoluter Gewissheit bestätigt werden. Die Resonanz bei 25 Hz deutet jedoch darauf hin, dass dies aber trotzdem der Fall sein könnte, da genau in diesem Frequenzbereich das erste Vielfache der Grundschwingung liegen würde. Es wäre interessant, diese Annahme durch eine genauere Schwingungsmessung zu überprüfen. Für diese Messung ist die Tür mit einem Schwingungserreger anzuregen und ihr Schwingungsverhalten ist mit Accelerometern auf den Punkten der Maxima aller erwarteten Schwingungen aufzunehmen. Damit wird der Einfluss von Raummoden auf die Schwingungsmessung der Eingangstür minimiert und alle Türresonanzen im tieffrequenten Bereich abgedeckt.

Beim Vergleich mit der Arbeit von Nell (3) wurden Diskrepanzen in den Abklingzeiten der tiefsten 7 Raummoden festgestellt. Da bei beiden Messungen die Einzelsinustonmessmethode mit der Quellenposition in einer Raumecke und dedizierten Messpunkten für die Trennung benachbarter Raummoden im Frequenzspektrum verwendet wurde, könnte dies auf die Anwesenheit der Diffusoren zurückgeführt werden, obwohl die Unterschiede aufgrund ihrer Abmessungen nicht zu erwarten waren. Ein zukünftiger Forschungsschritt wäre die Untersuchung des Einflusses von Diffusorabmessungen, -positionen und -anzahl auf die Abklingzeiten aller 20

im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Raummoden mittels einer Messung. Das Schwingungsverhalten von Diffusoren könnte im Rahmen dieser zukünftigen Messung ebenso untersucht werden.

Durch den Vergleich von Rekonstruktionen der Abklingkurven für Terzbänder unterhalb von und einschließlich des 63 Hz – Terzbandes aus Sinus- und Sweepmessungen wurde festgestellt, dass die Nachhallzeit in diesem Frequenzbereich ausschließlich durch die Abklingvorgänge der Raummoden bestimmt wird.

Aus den Messungen im Miniaturhallraum und Versuchen mit verschiedenen Fensterungen und Fensterlängen wurde festgestellt, dass alle Raummoden beim Übergang des Schallfeldes aus dem stationären Zustand in einen Ein- oder Abklingvorgang erneut angeregt werden. Je stetiger der Übergang zwischen zwei Zuständen des Schallfeldes ist, desto weniger prominent ist der Effekt. Die Anregung von weiteren Raummoden führt zu Schwebungen in den Abklingkurven einzelner Raummoden.

Die im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelte Messmethode ermöglicht eine präzise Trennung der Raummoden im leeren Hallraum und in Terzbändern mit 10 oder weniger Raummoden. Wenn jedoch absorbierendes Material vorhanden ist, das in diesen Terzbändern eine merkliche Wirkung hat, kann keine Trennung der Raummoden im Frequenzbereich gewährleistet werden.

Insgesamt liefert diese Masterarbeit wichtige Erkenntnisse zur Messung und Analyse der Raummoden im Hallraum der TU Graz. Die entwickelte Messmethode und die erzielten Ergebnisse dienen als Grundlage für weitere Forschungen in diesem Bereich und tragen zu einem besseren Verständnis der Raumakustik und der Funktionsweise von Kantenabsorbern bei. Sie unterstützen Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie Raumakustik, technische Akustik und akustische Messtechnik. Die Ergebnisse können für die FEM-Simulation von Kantenabsorbern, die an der TU Graz entwickelt wird, verwendet werden und somit zu einem genaueren raumakustischen Planungsprozess beitragen.

Literaturverzeichnis

- (1) Hofer, R. (2022). *Analyse des modalen Schallfeldes zur Untersuchung der Funktionsweise von Kantenabsorbern*. Graz: SPSC.
- (2) Steffek, A. (2021). *Untersuchung und Modellierung der Funktionsweise von Kantenabsorbern*. Graz: SPSC.
- (3) Nell, R. (2019). *Messung tieffrequenter Absorptionsgrößen im Hallraum*. Graz: SPSC.
- (4) ÖNORM EN ISO 354. (2003). *Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen*.
- (5) Merkel, L. (2023). *Finite Element Simulations of Edge Absorbers*. Graz: SPSC.
- (6) Graber, G., Weselak W. (2016). *Raumakustik, Vorlesungsskript*. Graz: SPSC.
- (7) Fasold, W. e. A. (1998). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin.
- (8) Balint, J. (2014). *Theoretische Planung und messtechnische Evaluierung eines Hallraumes*. Graz: SPSC.
- (9) Brunnader, R. (2002). *Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter*. TU Graz.
- (10) ÖNORM EN ISO 3741. (2010). *Akustik - Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1*.
- (11) Fuchs, H. v. (2017). *Raumakustik und Lärminderung (4. Ausg.)*. Deutschland: Springer-Verlag.
- (12) Bonello, O.J. (2012). *A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes**. Solidyne S.R.L., Buenos Aires, Argentina.
- (13) Reisinger, D. (2019). *Entwicklung und Messung von Kantenabsorber*. Graz: SPSC.
- (14) Späh. (1995). *Verbund-Platten-Resonatoren für tiefe Frequenzen in kleineren Räumen*. Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- (15) Zha, e. A. (1996). *Messung des effektiven Absorptionsgrades in kleinen Räumen*. Rundfunktechnische Mitteilungen.
- (16) Kutruff, H. (2017). *Room Acoustics (6. Ausg.)*. Aachen: Institute of Technical Acoustics Aachen.
- (17) Möser, M. (2009). *Technische Akustik*. Springer Verlag, Berlin.

-
- (18) ÖNORM EN ISO 3382-2. (2008). *Akustik — Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*
- (19) ÖNORM EN ISO 18233. (2006). *Akustik - Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik.*
- (20) Möser, M. (2010). *Messtechnik der Akustik.* Deutschland: Springer-Verlag.
- (21) Caetano M., et.al. (2011). *Improved Estimation of the Amplitude Envelope of Time-Domain Signals using True Envelope Cepstral Smoothing.* ICASSP.
- (22) Wandinger, J. (2013). *Elastodynamik 2 – Plattenschwingungen.* FH Landshut.
- (23) Kraxberger F., et.al. (2023). *The nonlinear eigenfrequency problem of room acoustics with porous edge absorbers.* Graz: IGTE und SPSC.
- (24) ÖNORM EN ISO 10534-2. (2002). *Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion.*
- (25) Wang, S. (2020). *A note on using panel diffusers to improve sound field diffusivity in reverberation rooms below 100 Hz.* Applied Acoustics 169 (2020).
- (26) Suied, C., et.al. (2014). *Auditory gist: Recognition of very short sounds from timbre cues.* The Journal of the Acoustical Society of America.
- (27) Müller, M. (2016). *Entwurf und Konstruktion eines Modell-Hallraumes im Maßstab 1:10.* Graz: SPSC

Abkürzungsverzeichnis

EDT	Early decay time
FAB	Frequenzabstandbedingung
FFT	Fast-Fourier-Transform
FEM	Finite-Elemente-Methode
JCAL	Johnson-Champoux-Allard-Lafarge
MK	Messkonfiguration
MLS	Maximum Length Sequence
MP	Messpunkt
QP	Quellposition
RMS	Root-Mean-Square
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPL	Sound Pressure Level
TBR	Terzbandrauschen

Anhang A

Ergebnisse der 3D-pv-Sonde-Messungen

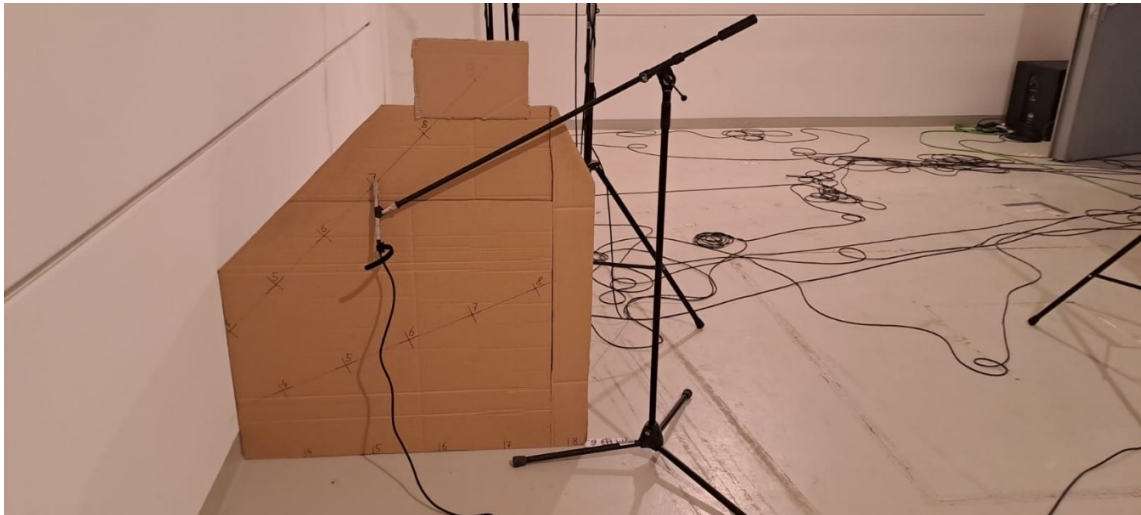


Abbildung A. 1: Positionierung der 3D-pv-Sonde. Koordinaten: $x = 5.57$ m; $y = 4.17$ m; $z = 0.85$ m.

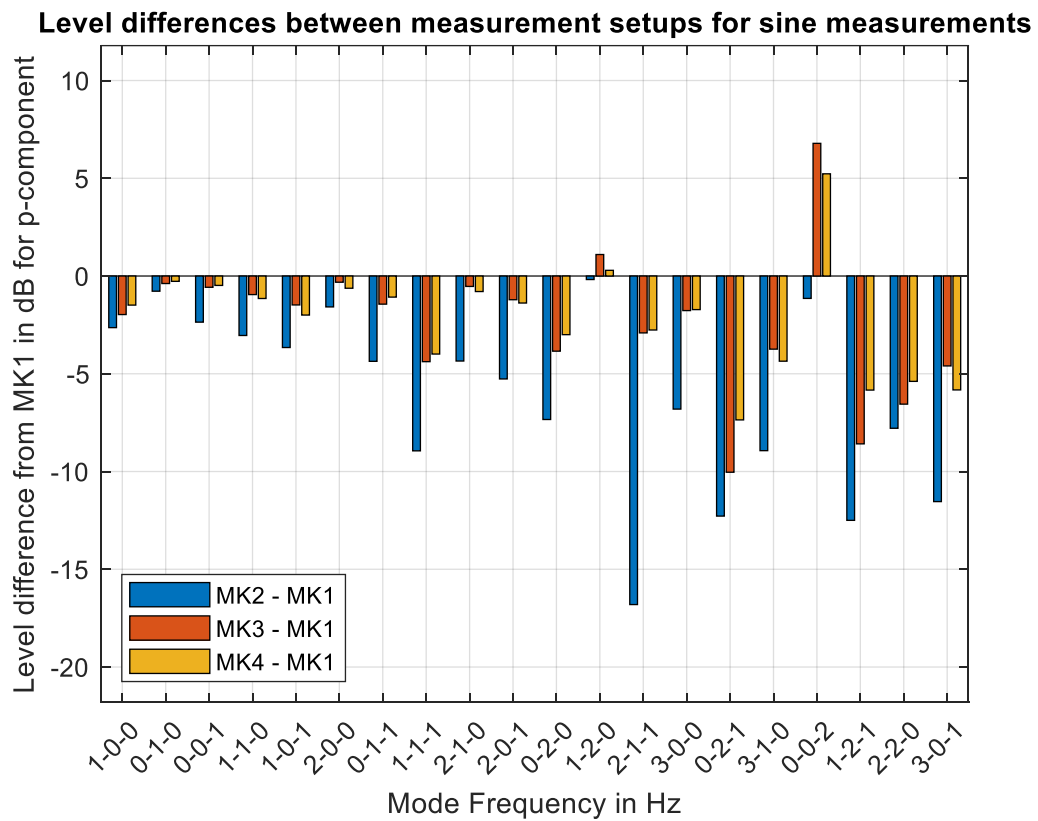


Abbildung A. 2: Pegeldifferenzen der p-Komponente für Sinsmessungen.

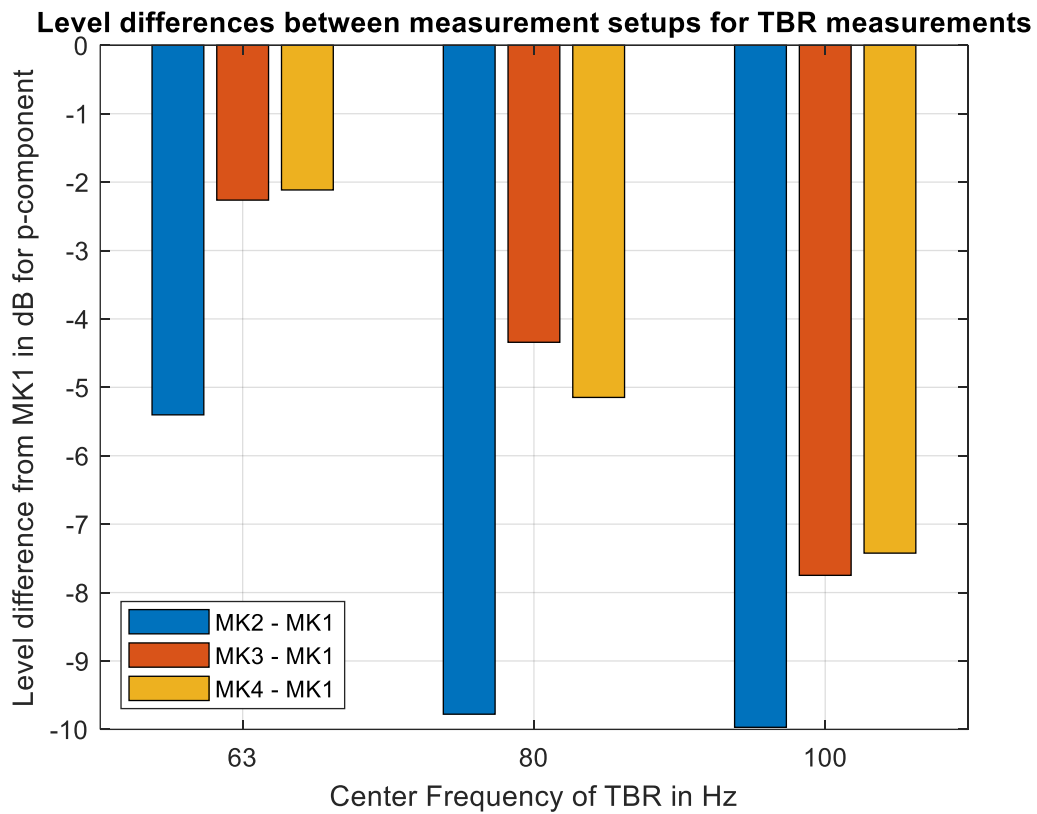


Abbildung A. 3: Pegeldifferenzen der p-Komponente für TBR-Messungen.

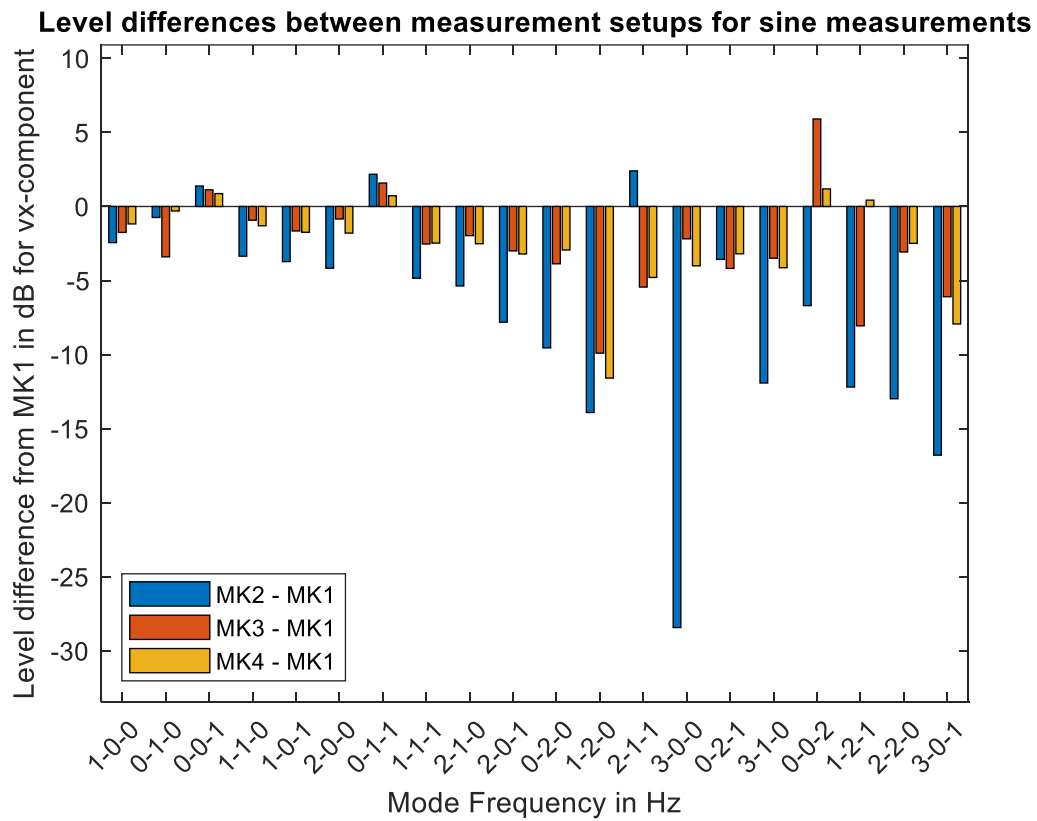


Abbildung A. 4: Pegeldifferenzen der vx-Komponente für Sinusmessungen.

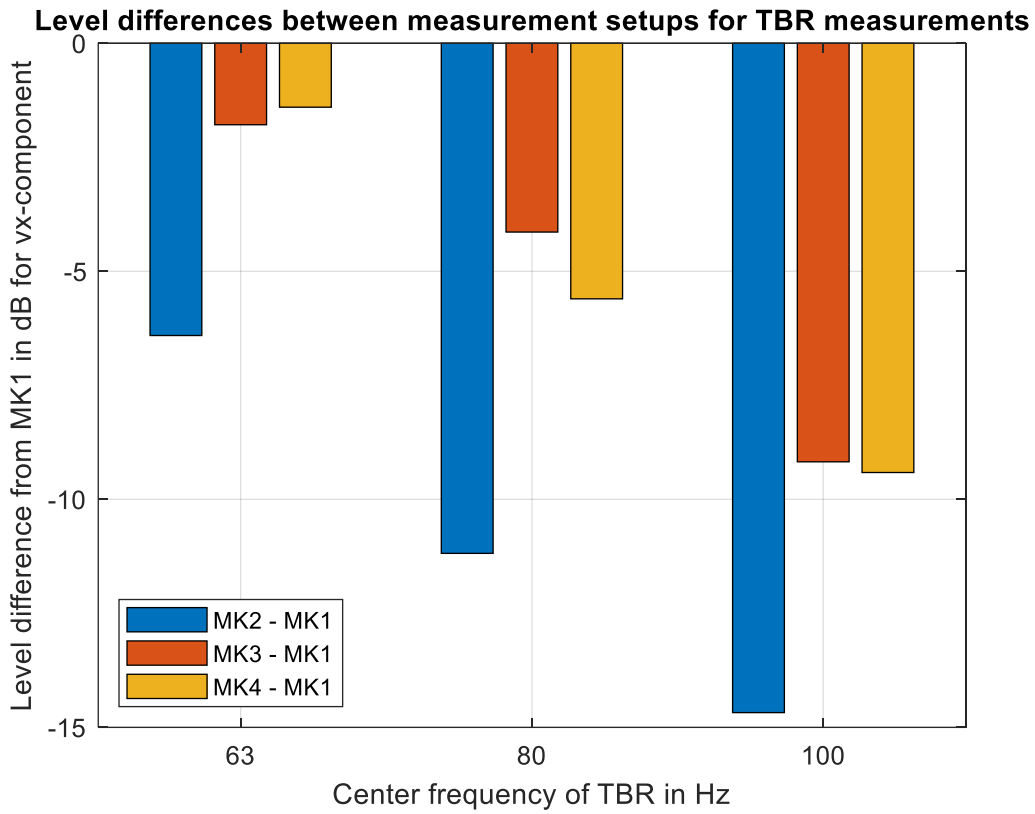


Abbildung A. 5: Pegeldifferenzen der vx-Komponente für TBR-Messungen.

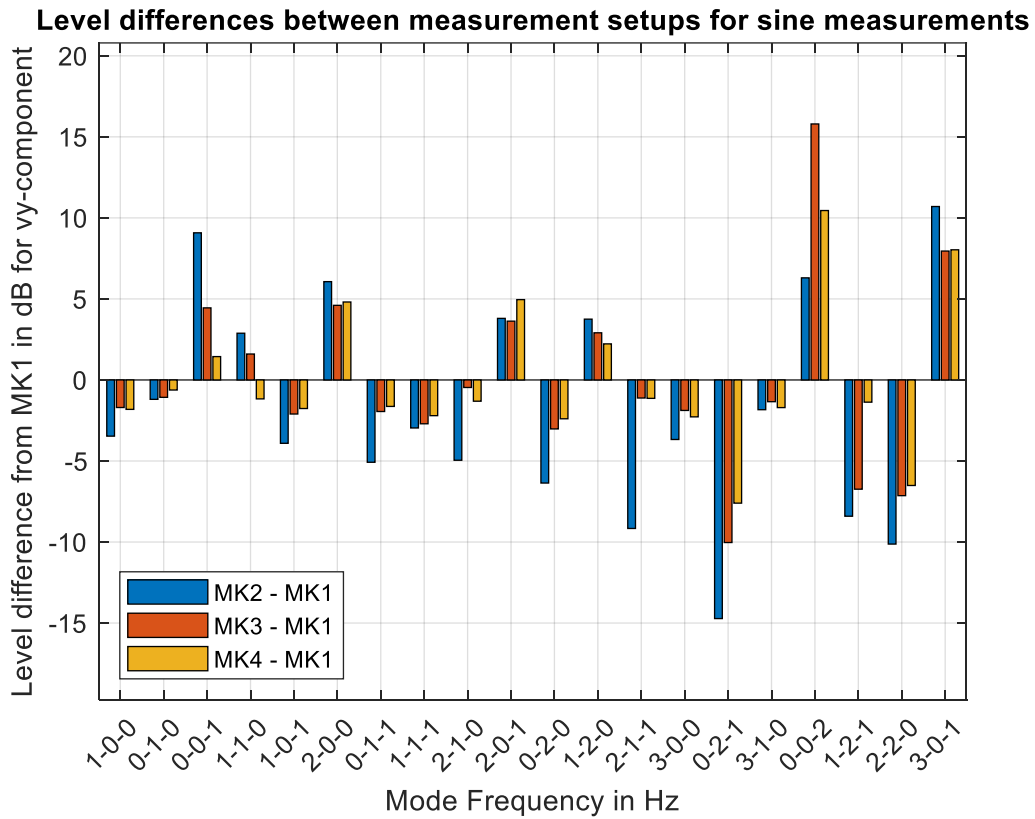


Abbildung A. 6: Pegeldifferenzen der vy-Komponente für Sinusmessungen.

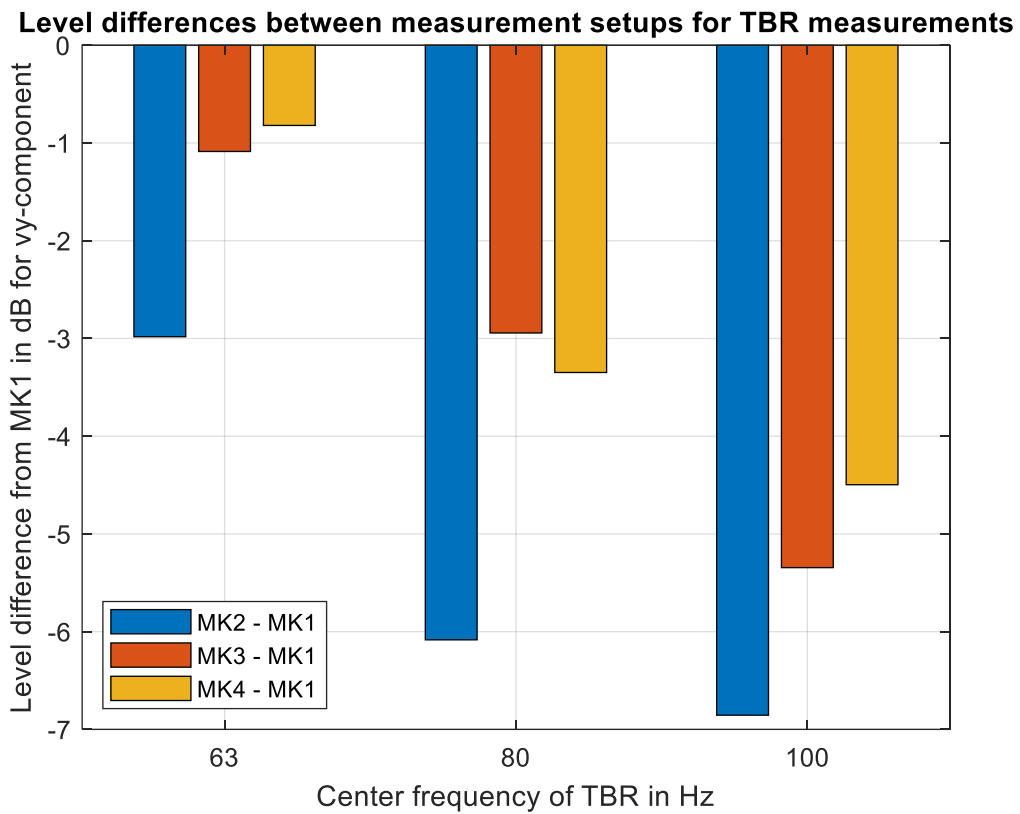


Abbildung A. 7: Pegeldifferenzen der vy-Komponente für TBR-Messungen.

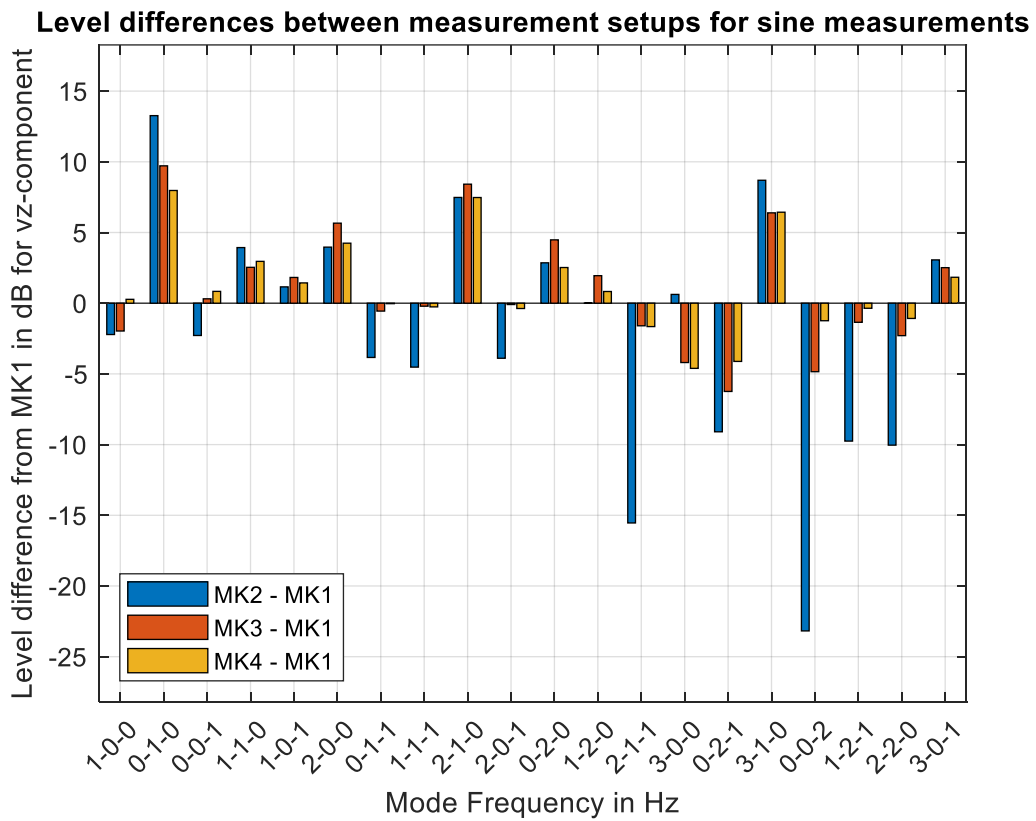


Abbildung A. 8: Pegeldifferenzen der vz-Komponente für Sinusmessungen.

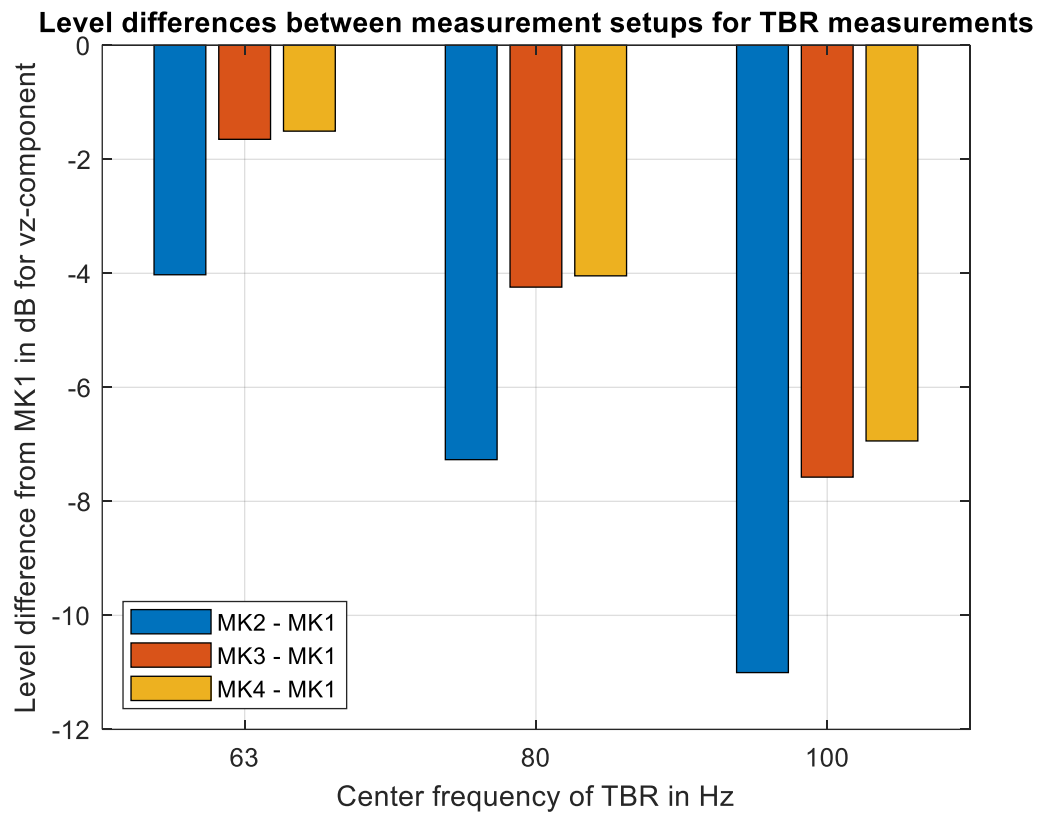
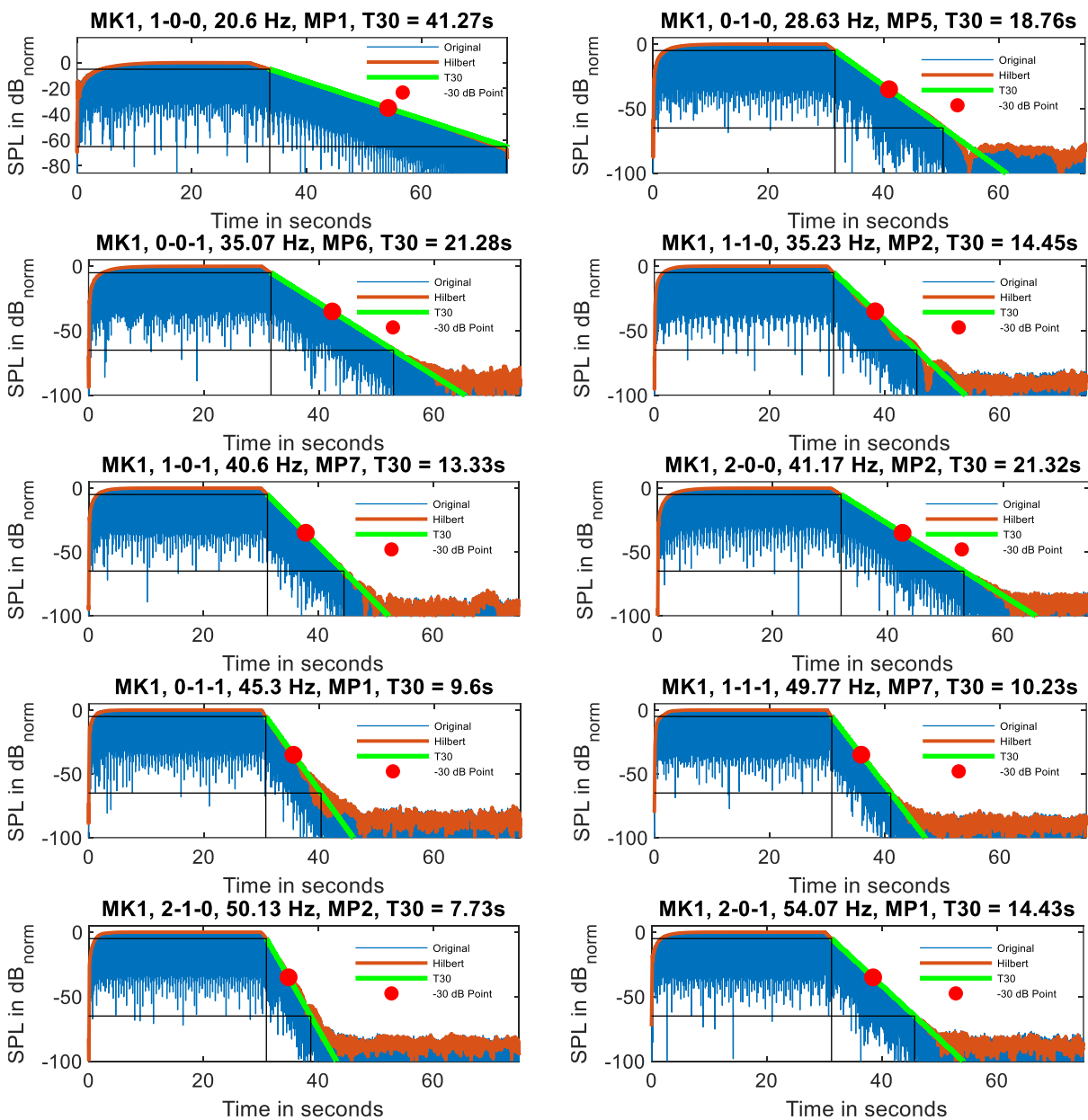


Abbildung A. 9: Pegeldifferenzen der vz-Komponente für TBR-Messungen.

Anhang B

Graphische Darstellung der Abklingzeit- und Nachhallzeit-Messergebnisse

B.1 Sinusmessungen



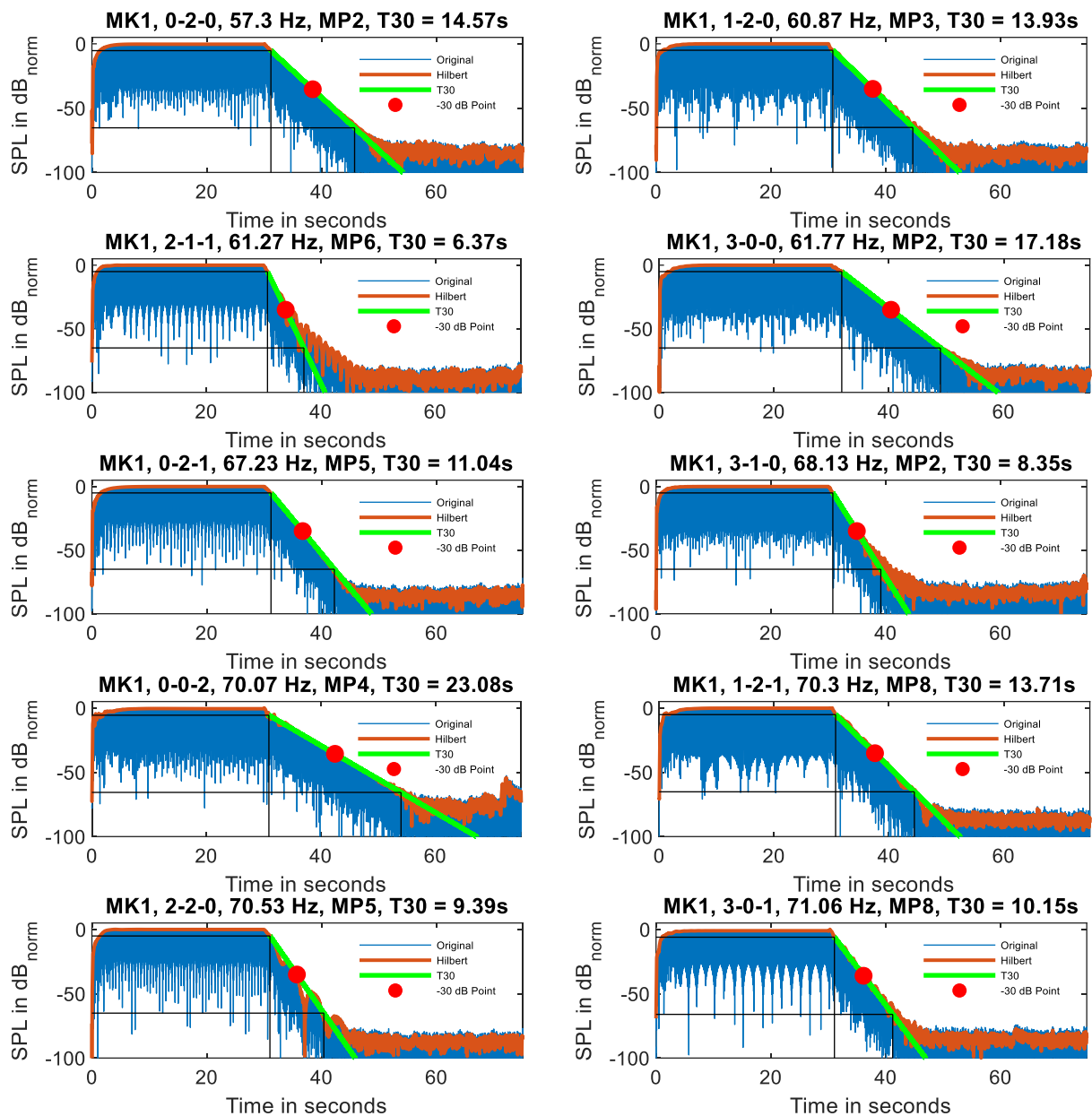
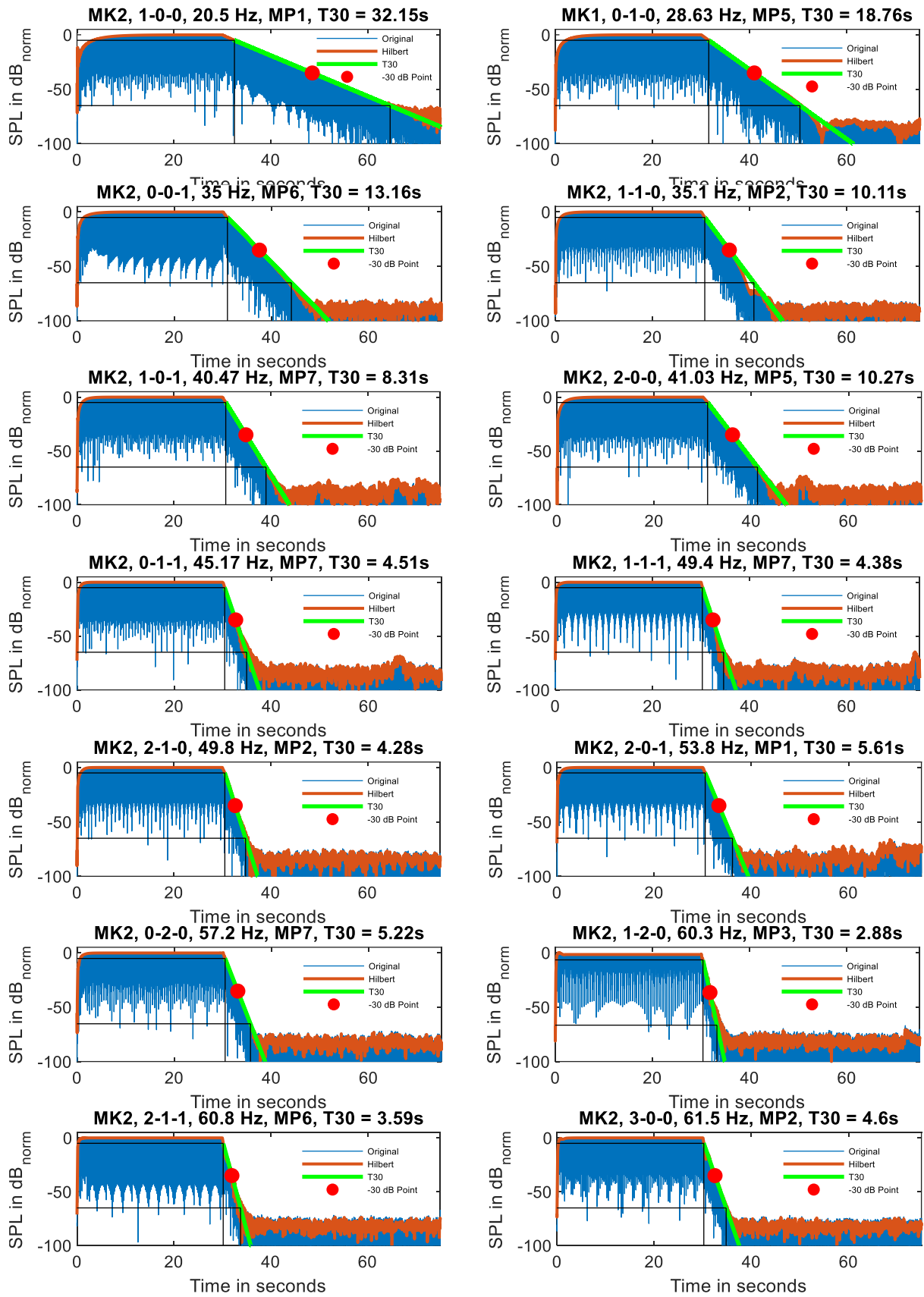


Abbildung B. 1: Messergebnisse aller Raummoden in MK1, Sinusmessung.



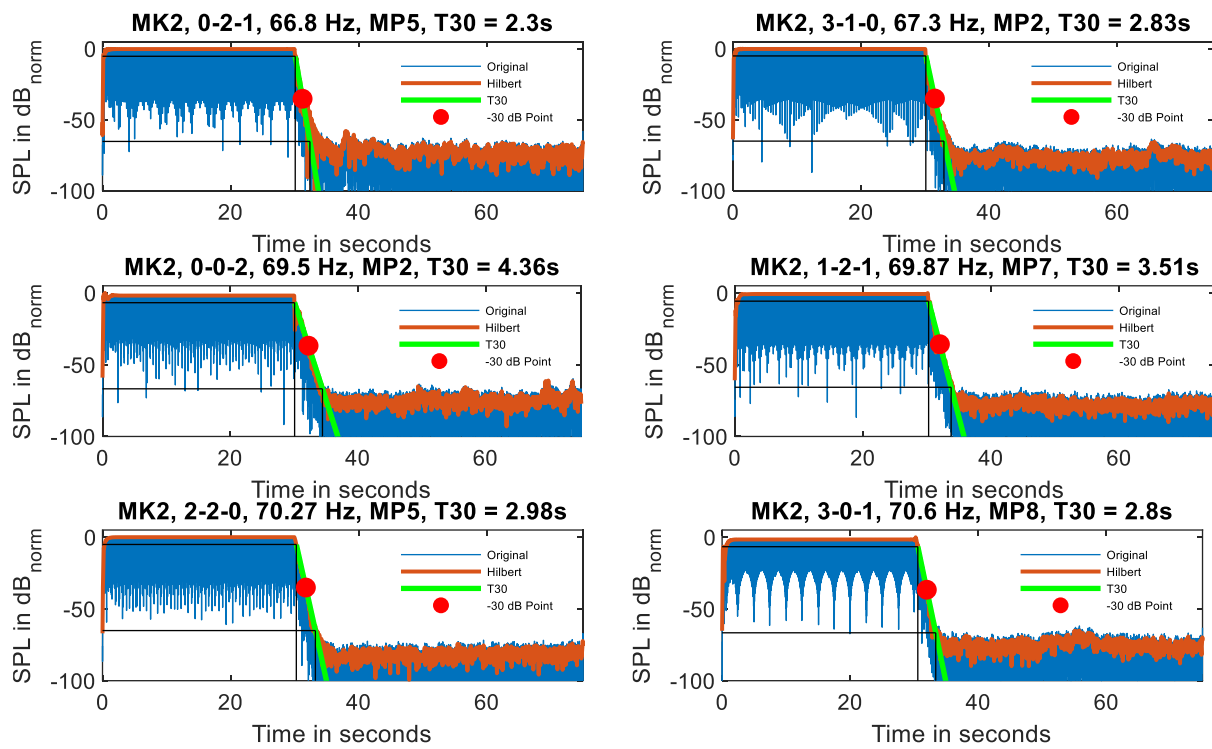
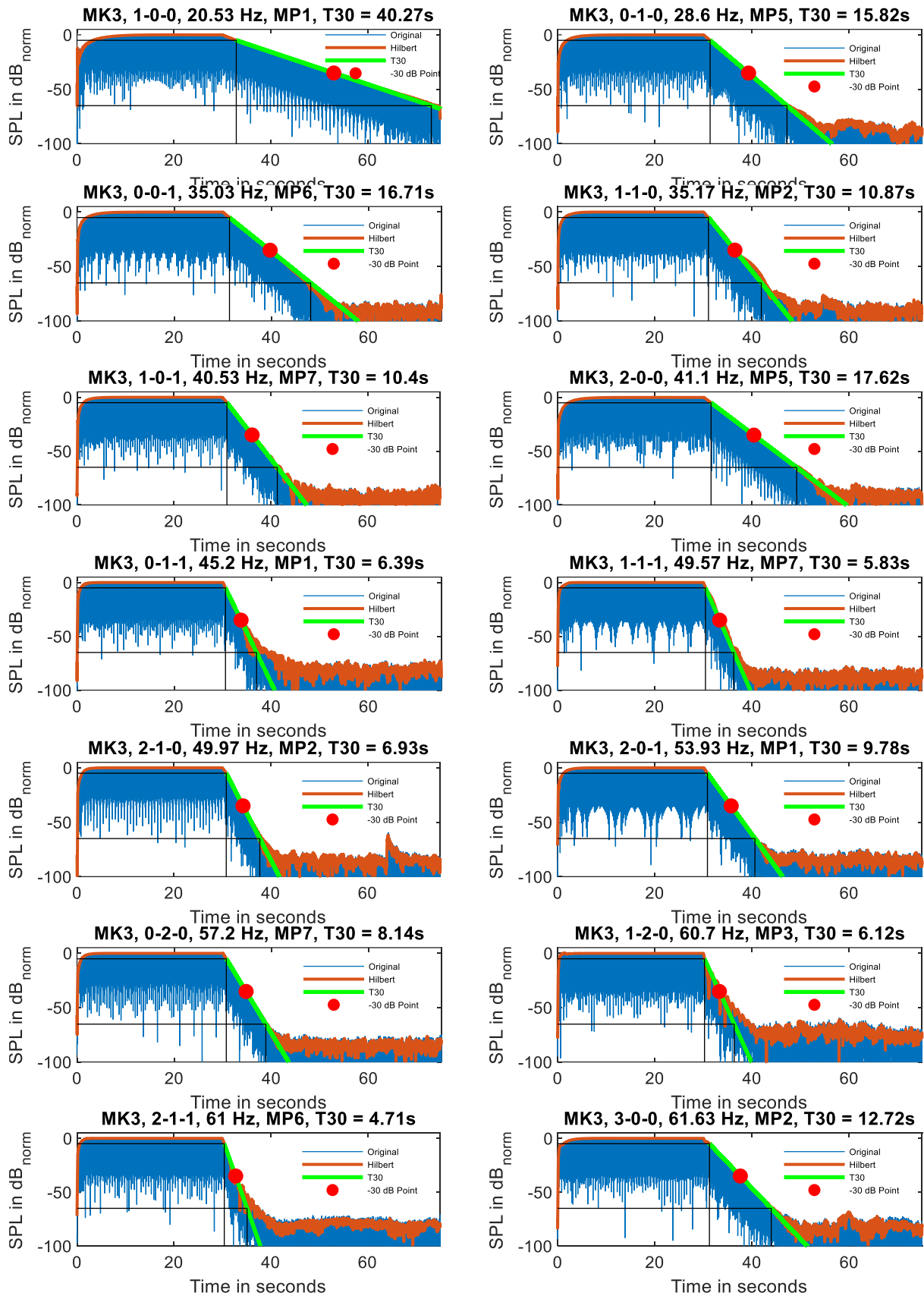


Abbildung B. 2: Messergebnisse aller Raummoden in MK2, Sinusmessung.



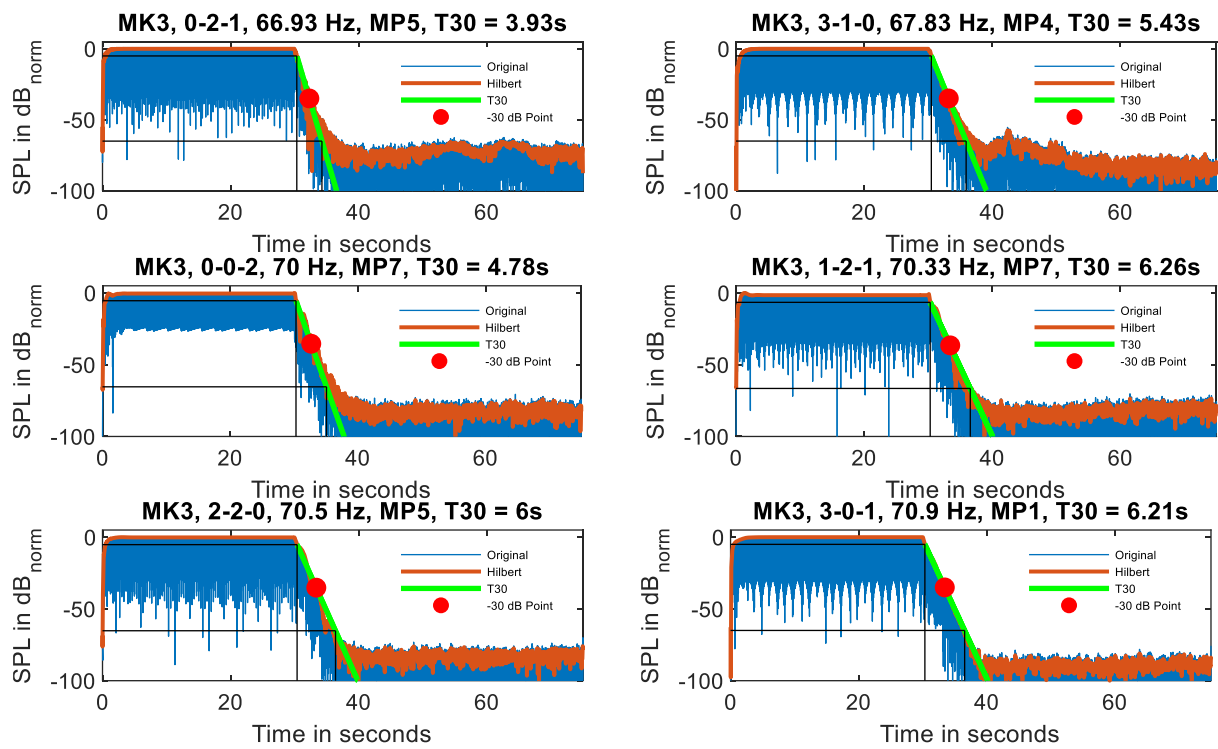
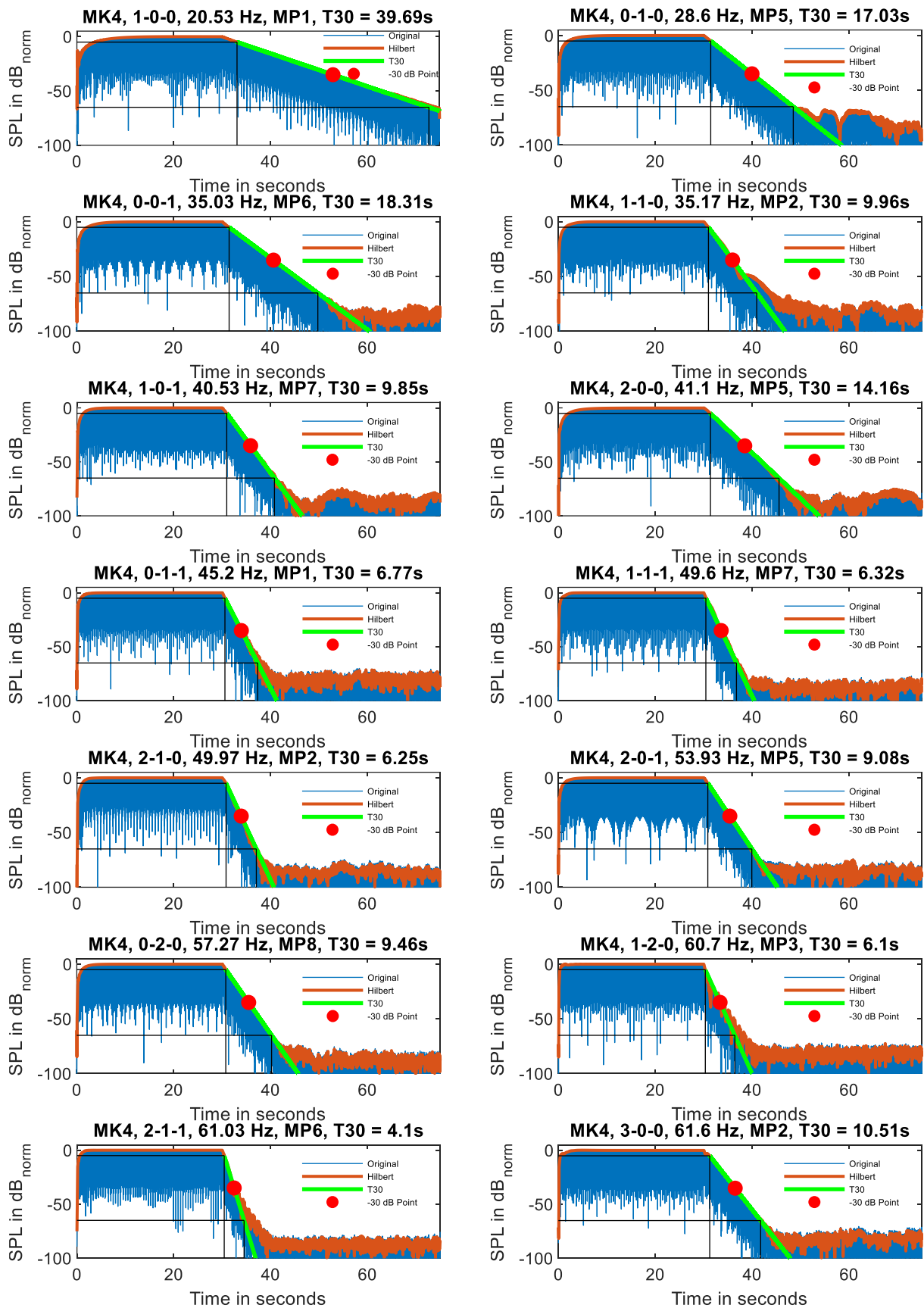


Abbildung B. 3: Messergebnisse aller Raummoden in MK3, Sinusmessung.



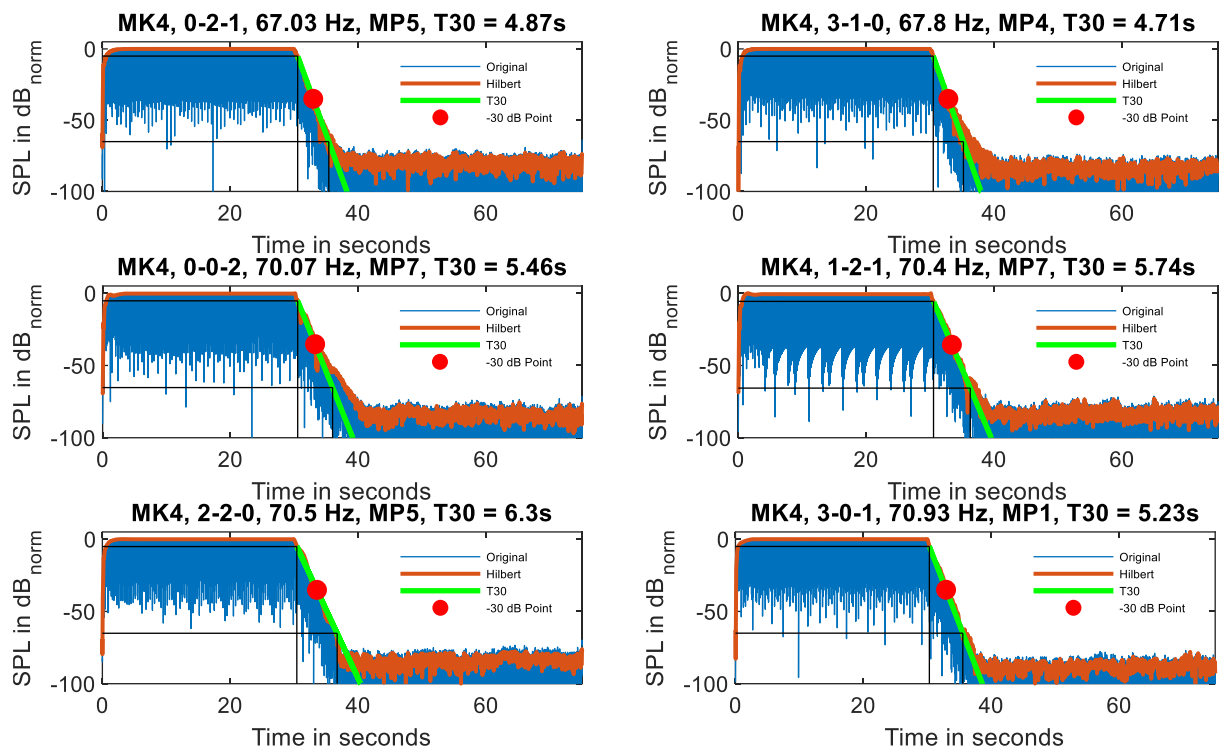


Abbildung B. 4: Messergebnisse aller Raummoden in MK4, Sinusmessung.

B.2 TBR-Messungen

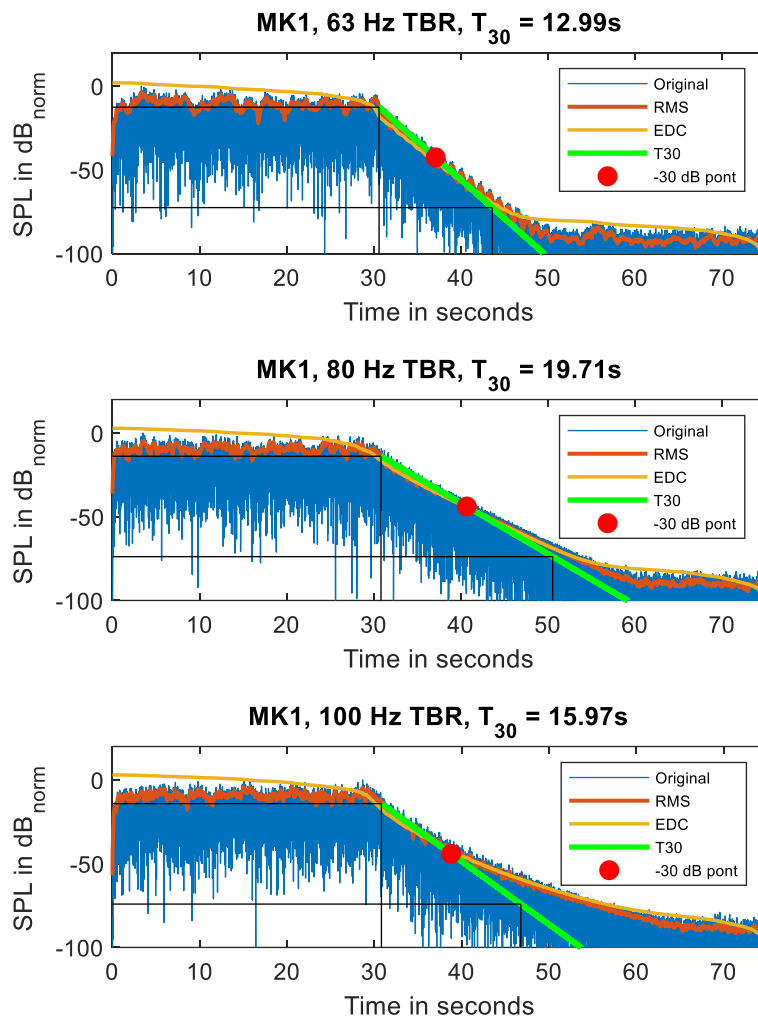


Abbildung B. 5: Ergebnisse der TBR-Messungen in MK1 beim MP1.

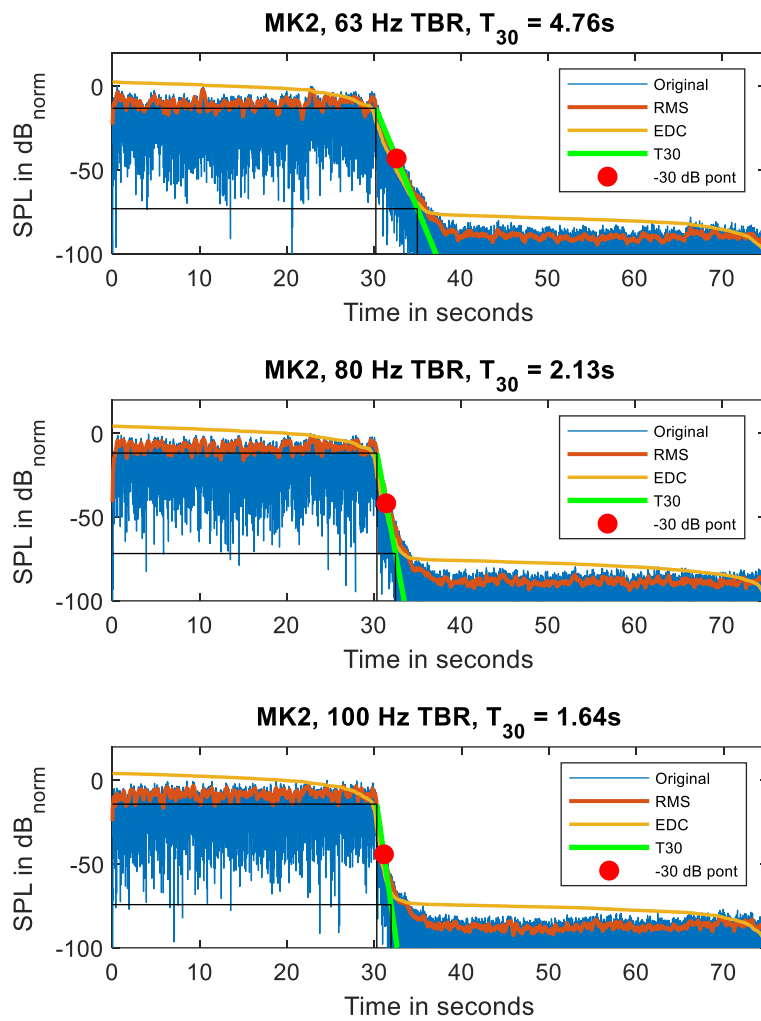


Abbildung B. 6: Ergebnisse der TBR-Messungen in MK2 beim MP1.

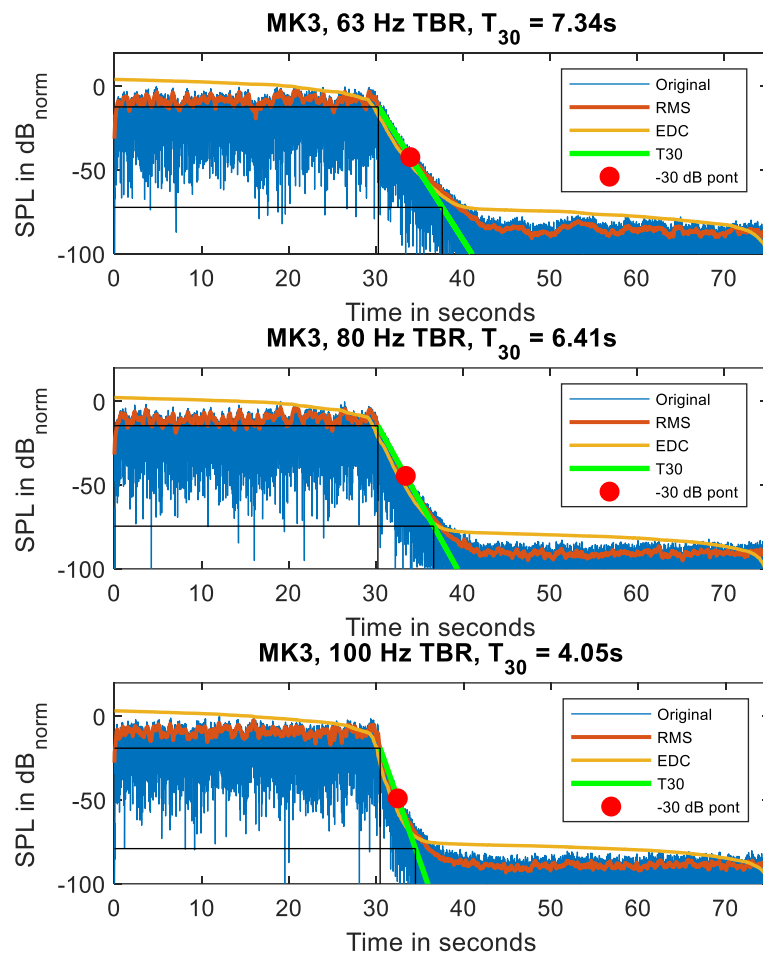


Abbildung B. 7: Ergebnisse der TBR-Messungen in MK3 beim MP1.

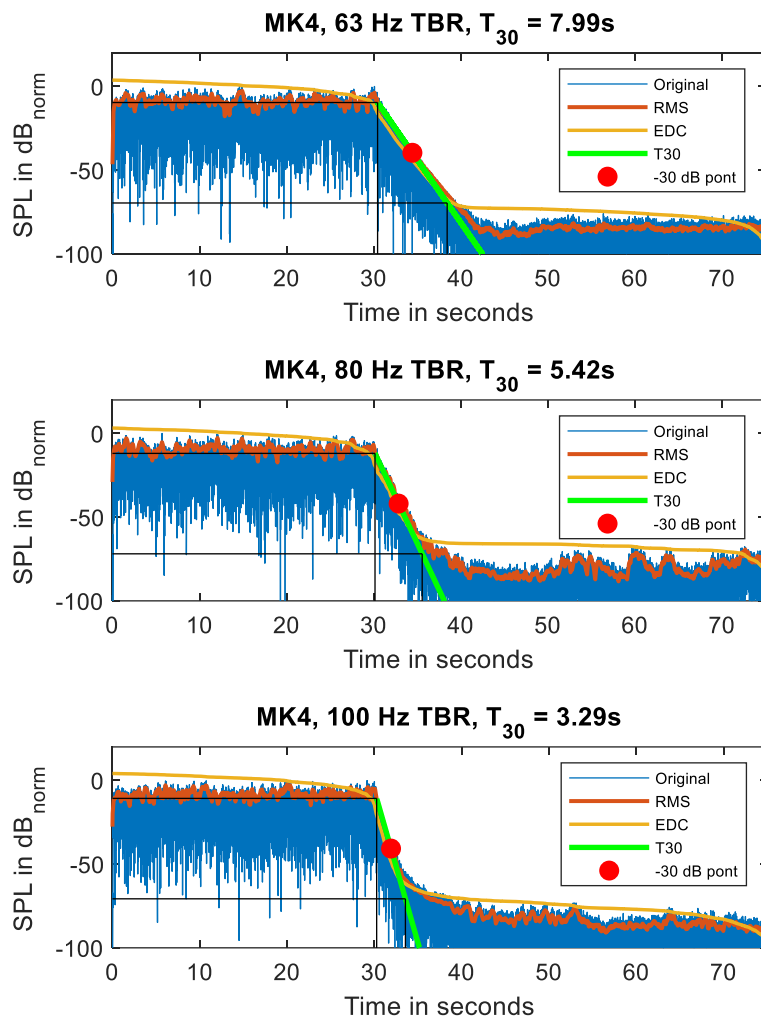


Abbildung B. 8: Ergebnisse der TBR-Messungen in MK4 beim MP1.

Anhang C

Rekonstruktion der Nachhallzeiten aus den Sinus- und Sweepantworten für Terzbänder unterhalb vom 63 Hz – Terzband

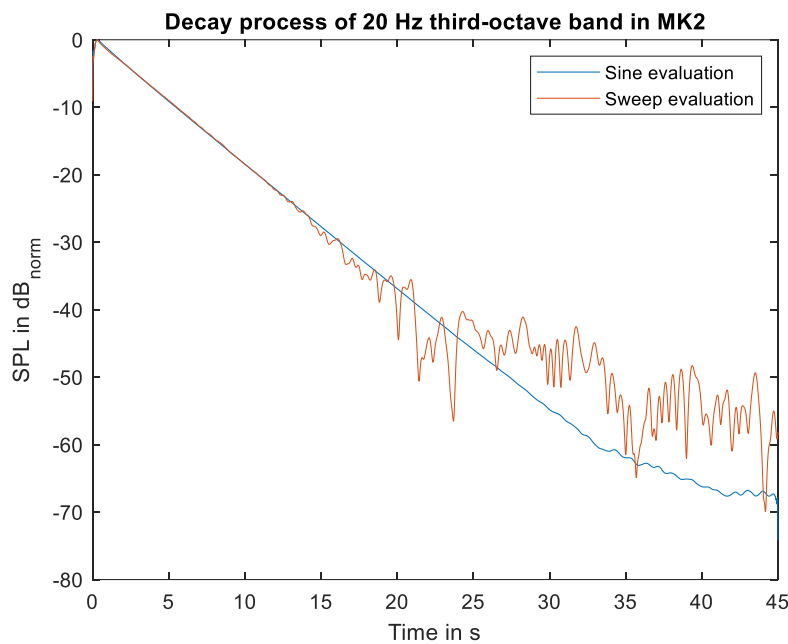


Abbildung C. 1: Abklingvorgang des 20 Hz - Terzbandes in MK2, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

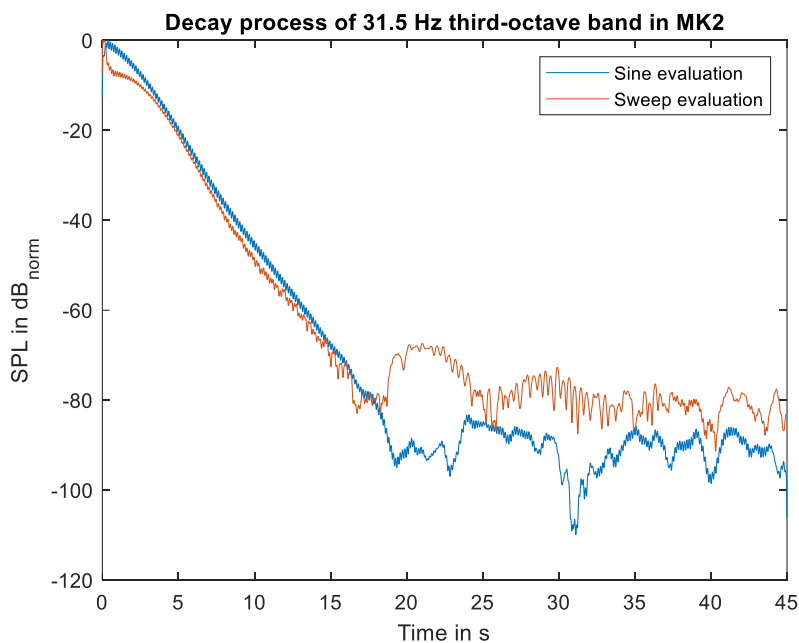


Abbildung C. 2: Abklingvorgang des 31.5 Hz - Terzbandes in MK2, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

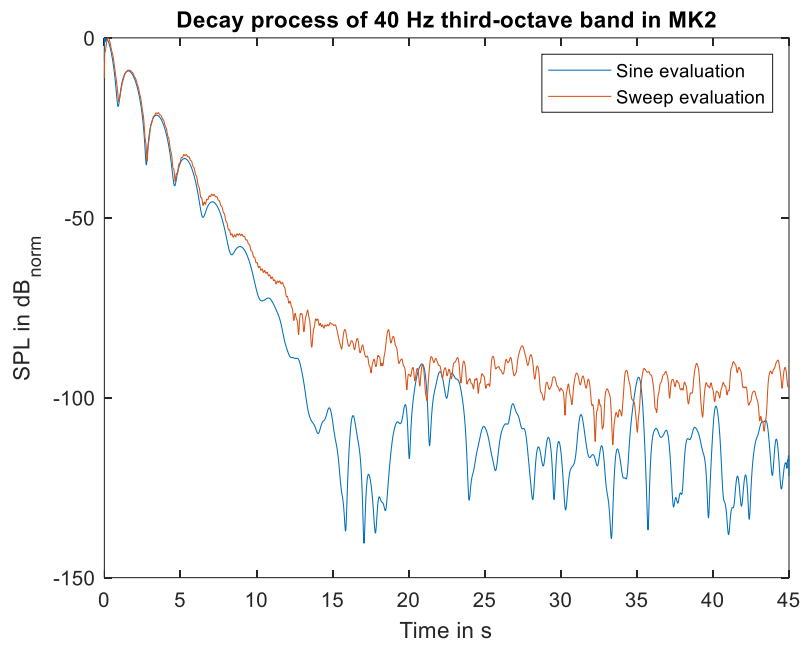


Abbildung C. 3: Abklingvorgang des 40 Hz - Terzbandes in MK2, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

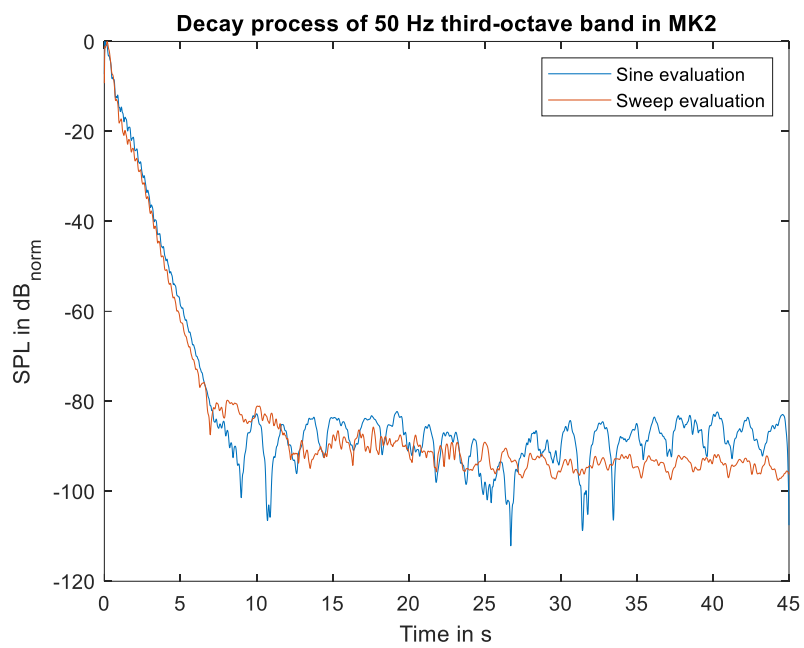


Abbildung C. 4: Abklingvorgang des 50 Hz - Terzbandes in MK2, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

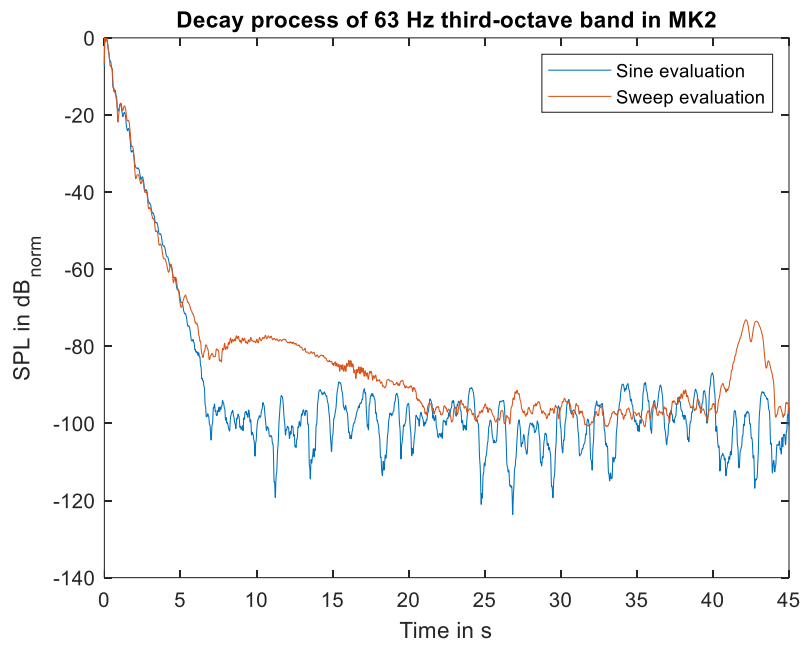


Abbildung C. 5: Abklingvorgang des 63 Hz - Terzbandes in MK2, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

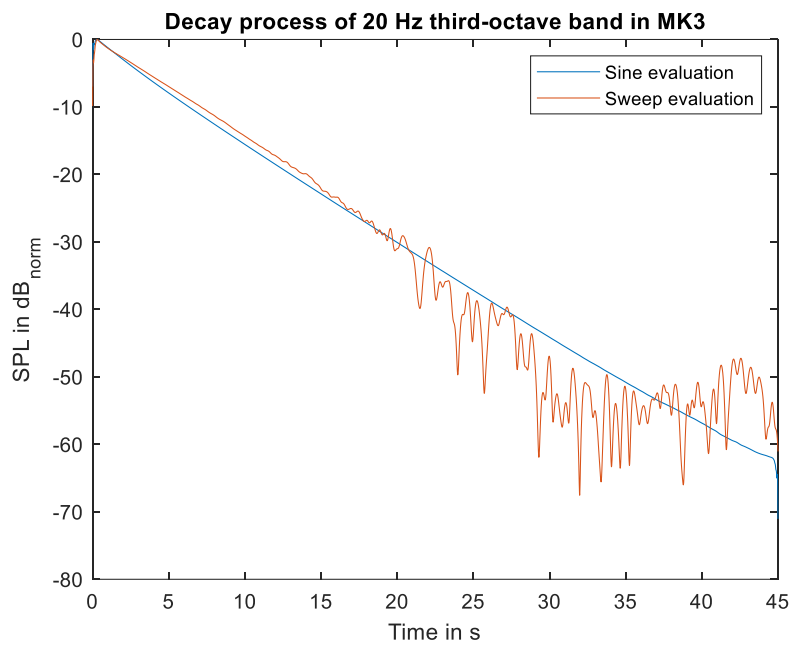


Abbildung C. 6: Abklingvorgang des 20 Hz - Terzbandes in MK3, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

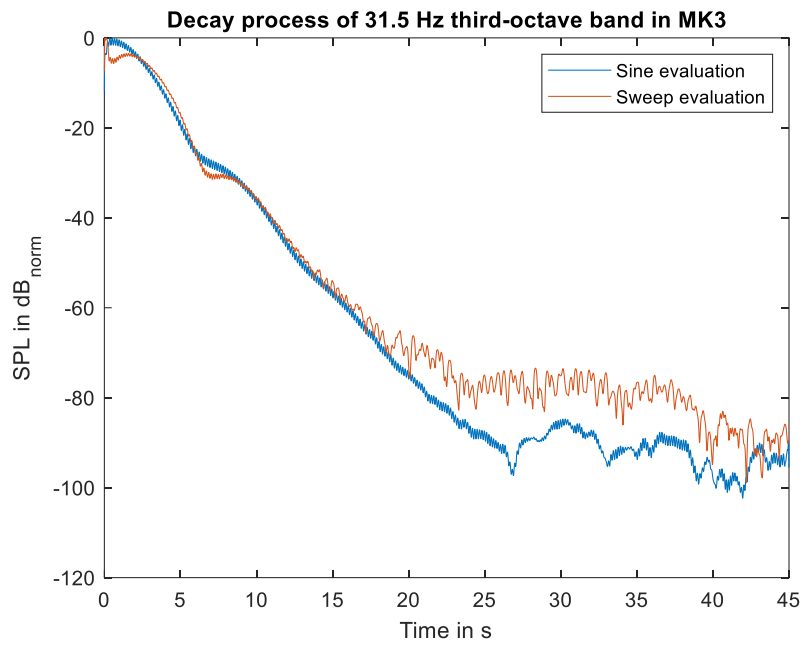


Abbildung C. 7: Abklingvorgang des 31.5 Hz - Terzbandes in MK3, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

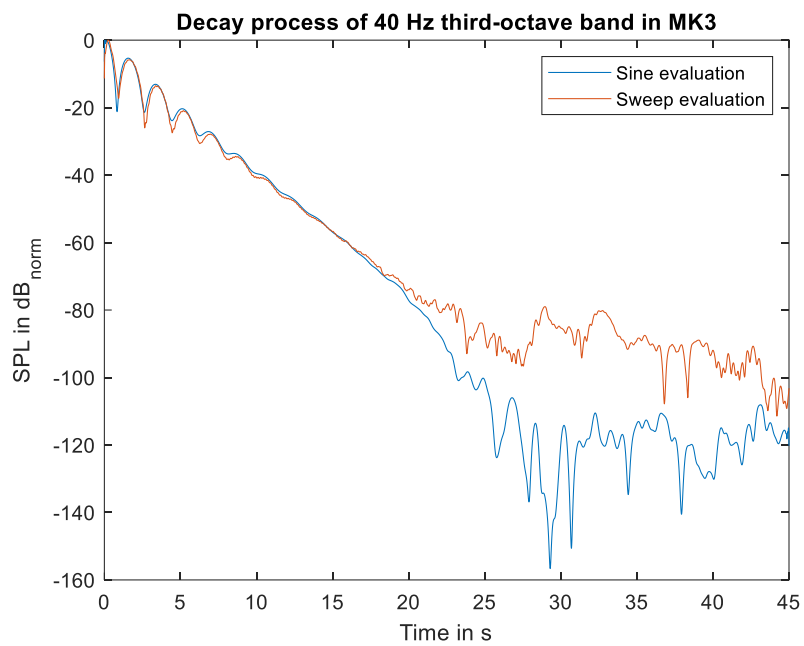


Abbildung C. 8: Abklingvorgang des 40 Hz - Terzbandes in MK3, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

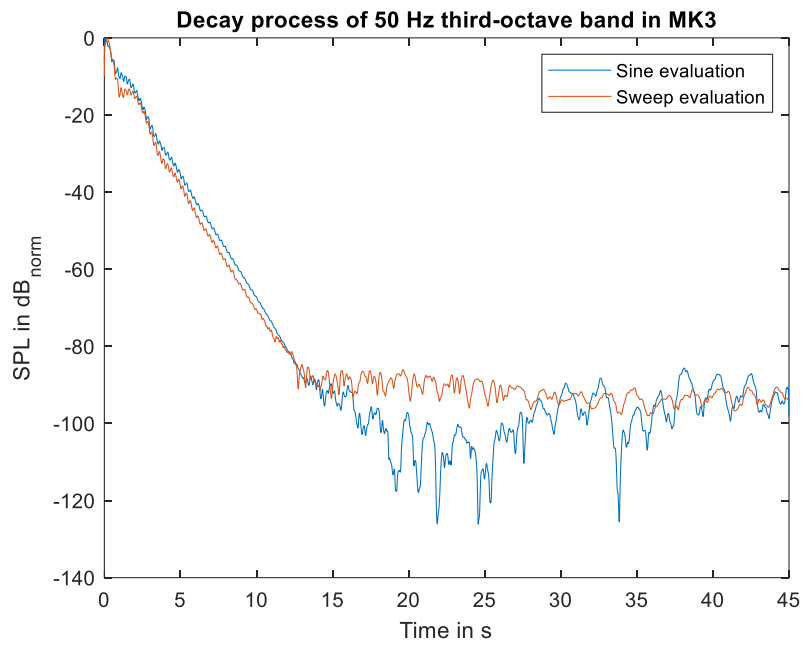


Abbildung C. 9: Abklingvorgang des 50 Hz - Terzbandes in MK3, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

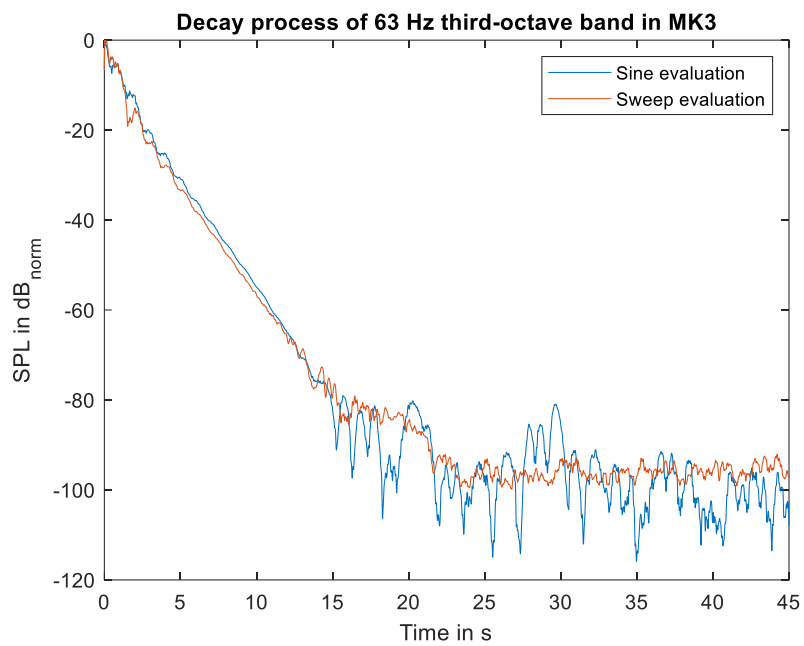


Abbildung C. 10: Abklingvorgang des 63 Hz - Terzbandes in MK3, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

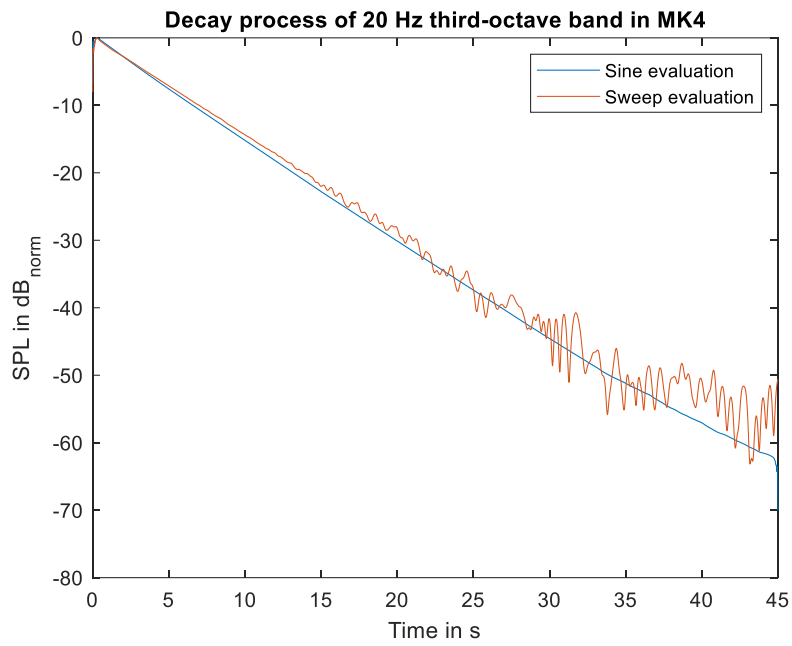


Abbildung C. 11: Abklingvorgang des 20 Hz - Terzbandes in MK4, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

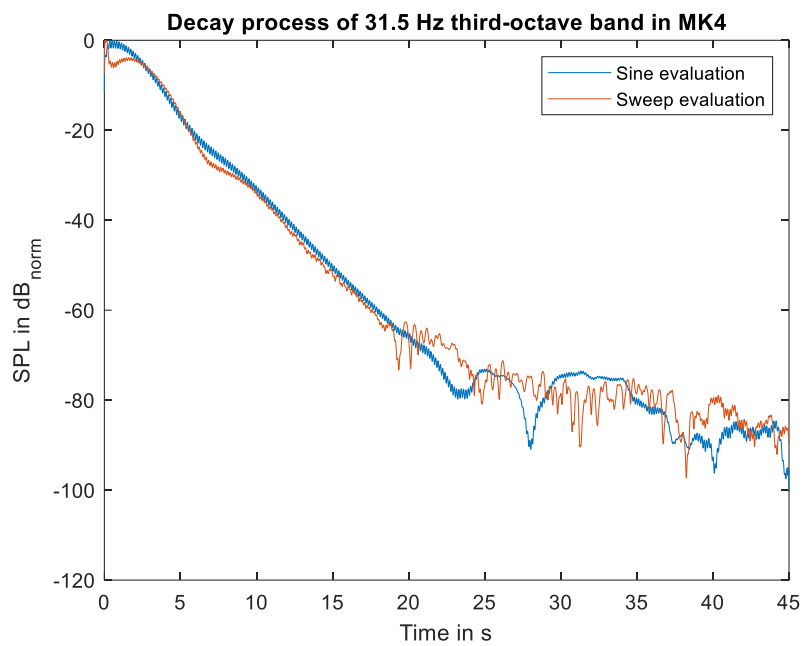


Abbildung C. 12: Abklingvorgang des 31.5 Hz - Terzbandes in MK4, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

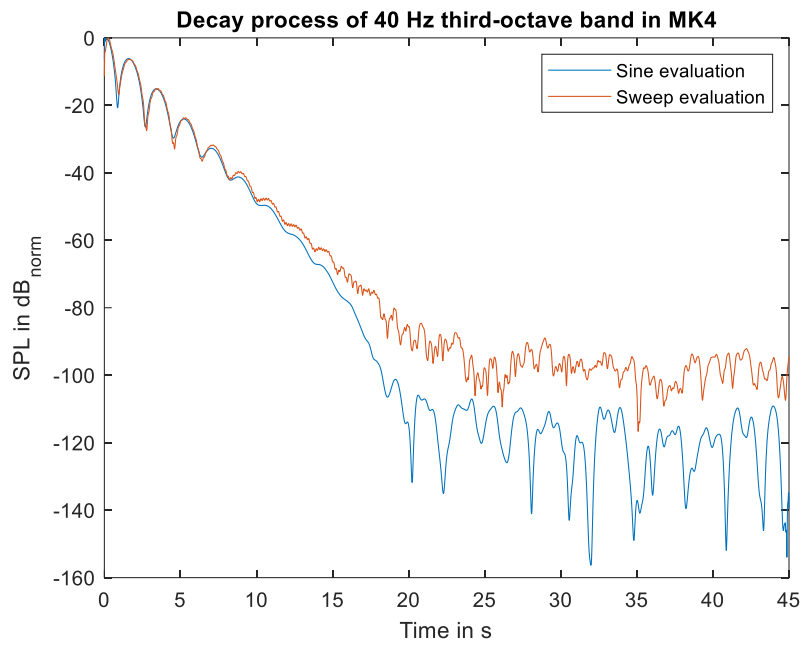


Abbildung C. 13: Abklingvorgang des 40 Hz - Terzbandes in MK4, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

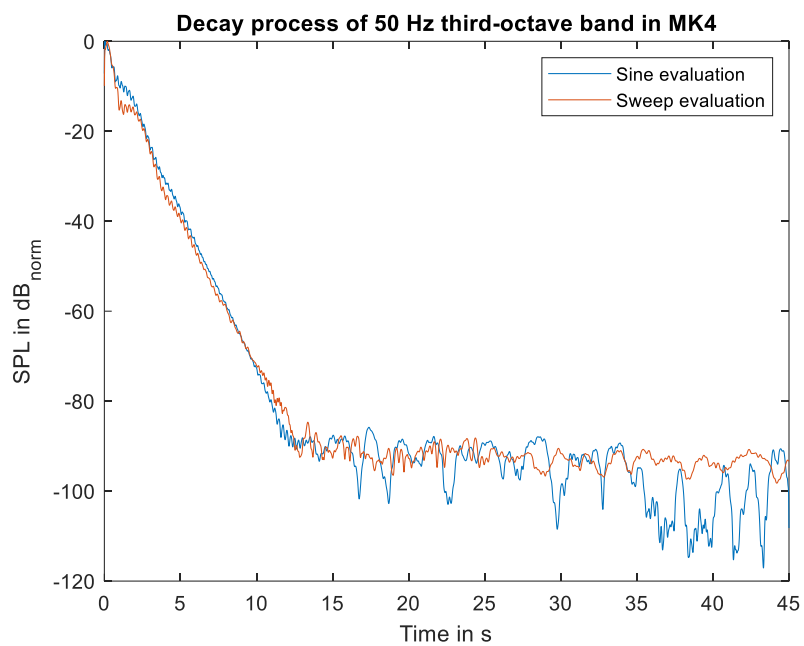


Abbildung C. 14: Abklingvorgang des 50 Hz - Terzbandes in MK4, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

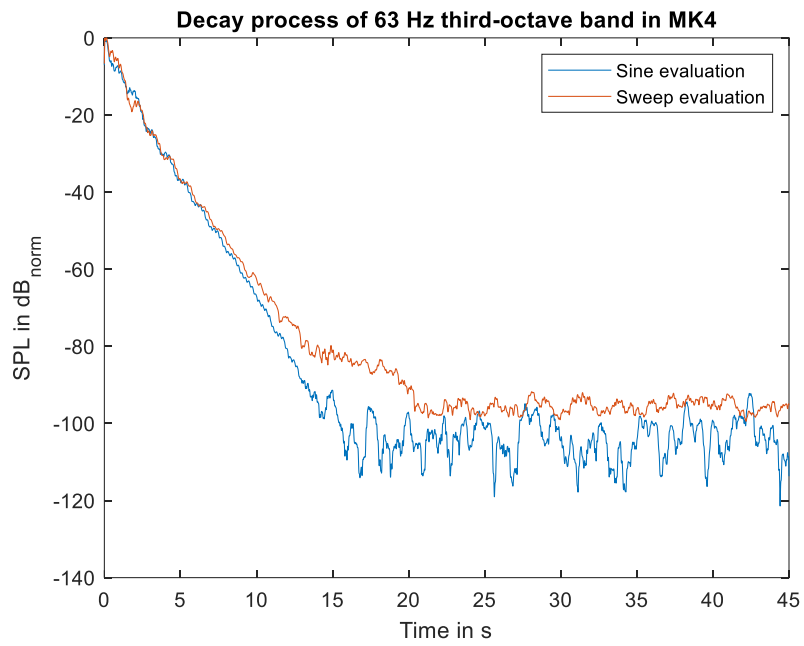


Abbildung C. 15: Abklingvorgang des 63 Hz - Terzbandes in MK4, rekonstruiert aus Sinus- und Sweepantworten.

Anhang D

Frequenzgänge der ausgewählten Messpunkte (MK2 und MK3)

D.1 MK2

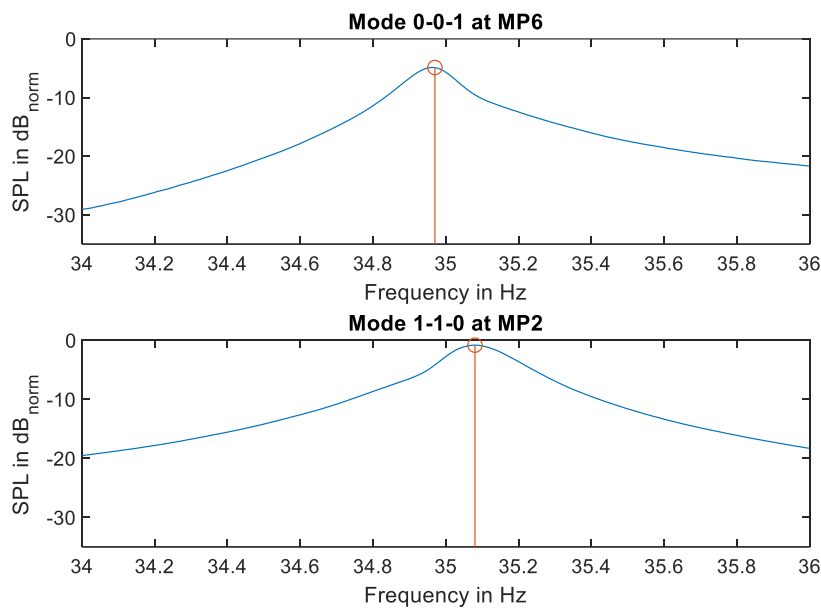


Abbildung D. 1: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 0-0-1 und 1-1-0 in MK2 bei ausgewählten Messpunkten MP6 und MP2.

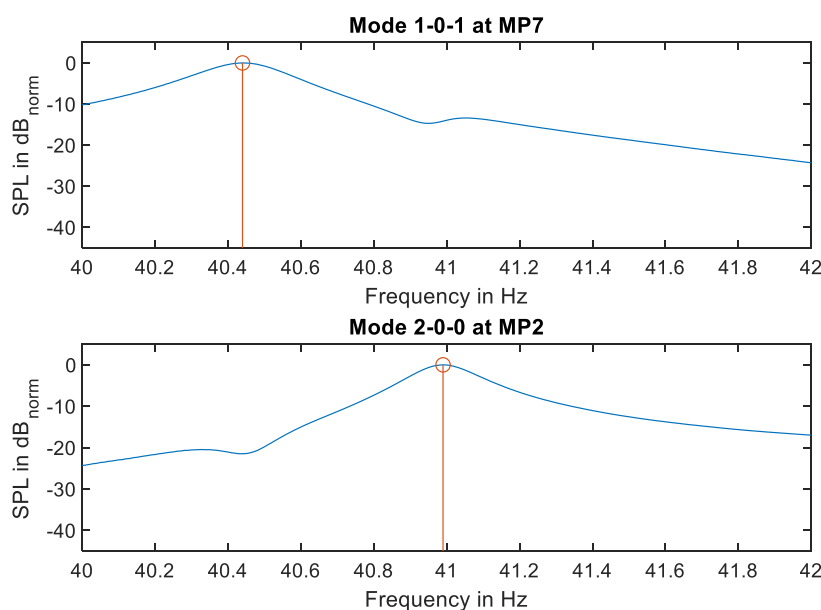


Abbildung D. 2: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-0-1 und 2-0-0 in MK2 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP2.

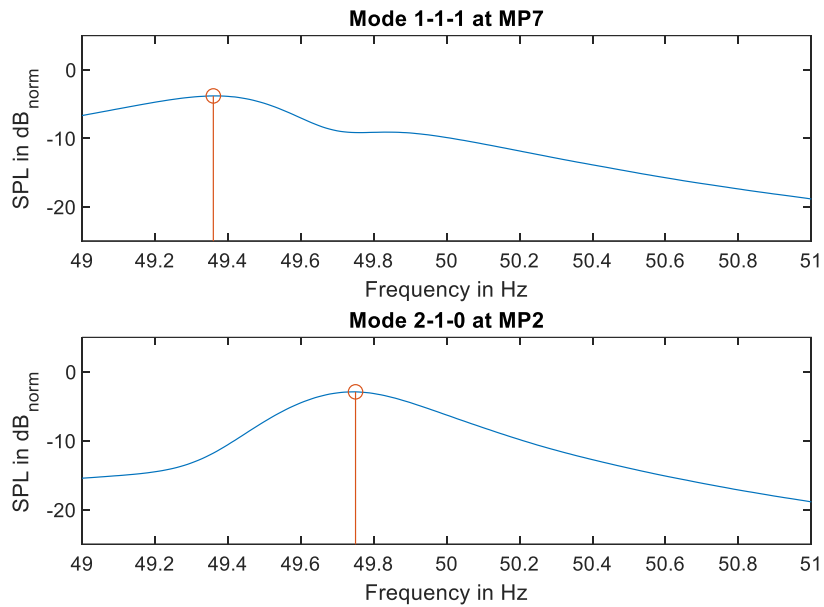


Abbildung D. 3: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-1-1 und 2-1-0 in MK2 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP2.

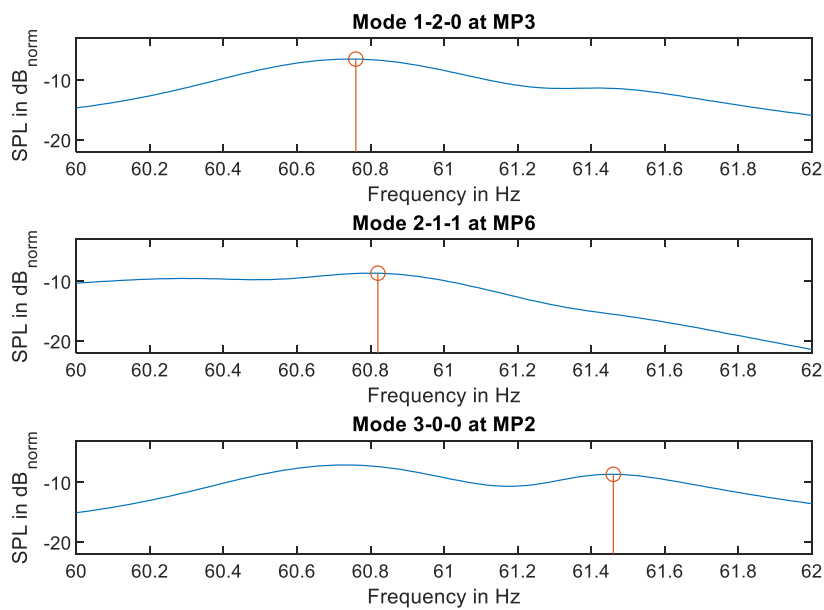


Abbildung D. 4: Ansicht der drei nahenachbarten Raummoden 1-2-0, 2-1-1 und 3-0-0 in MK2 bei ausgewählten Messpunkten MP3, MP6 und MP2.

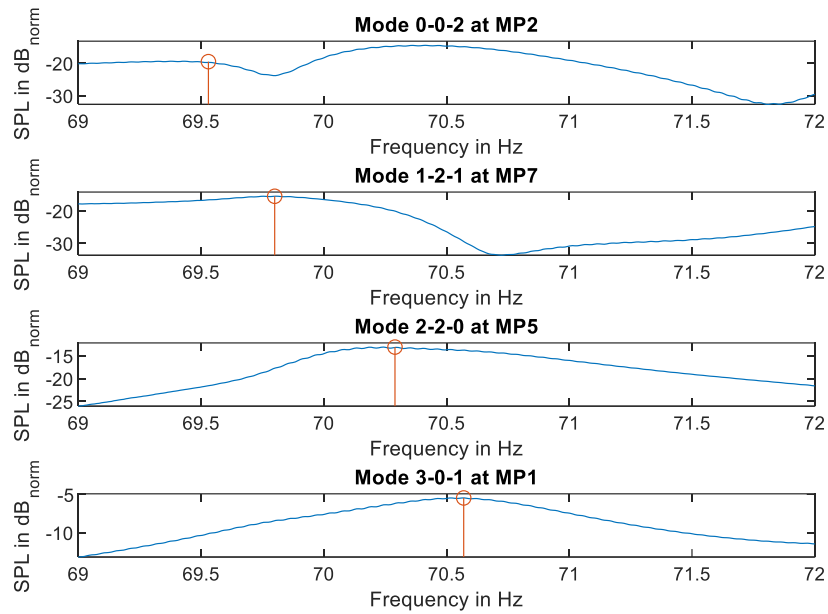


Abbildung D. 5: Ansicht der vier nahenachbarten Raummoden 0-0-2, 1-2-1, 2-2-0 und 3-0-1 in MK2 bei ausgewählten Messpunkten MP2, MP7, MP5 und MP1.

D.2 MK3

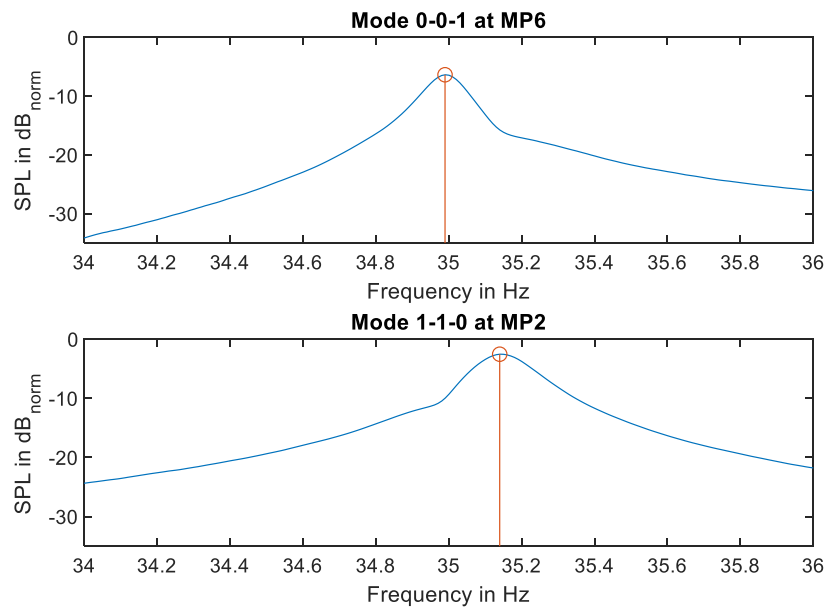


Abbildung D. 6: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 0-0-1 und 1-1-0 in MK3 bei ausgewählten Messpunkten MP6 und MP2.

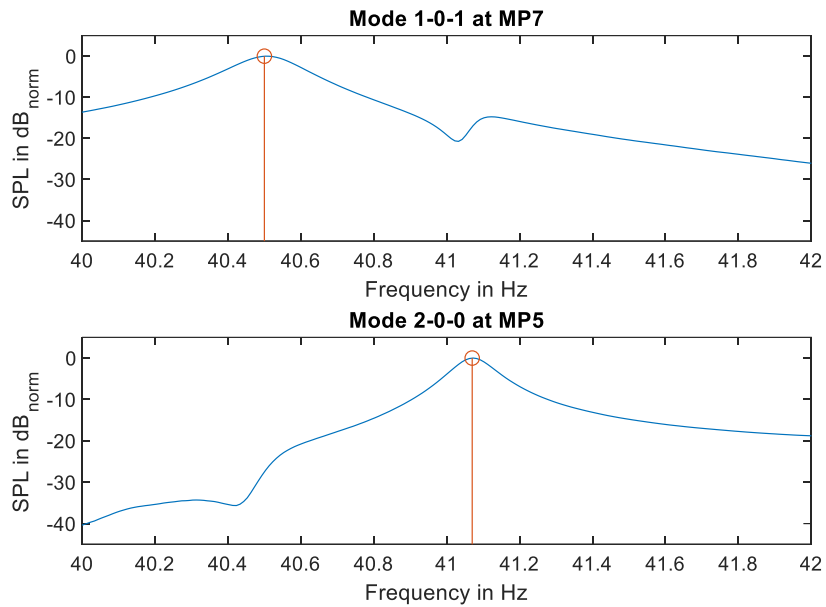


Abbildung D. 7: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-0-1 und 2-0-0 in MK3 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP5.

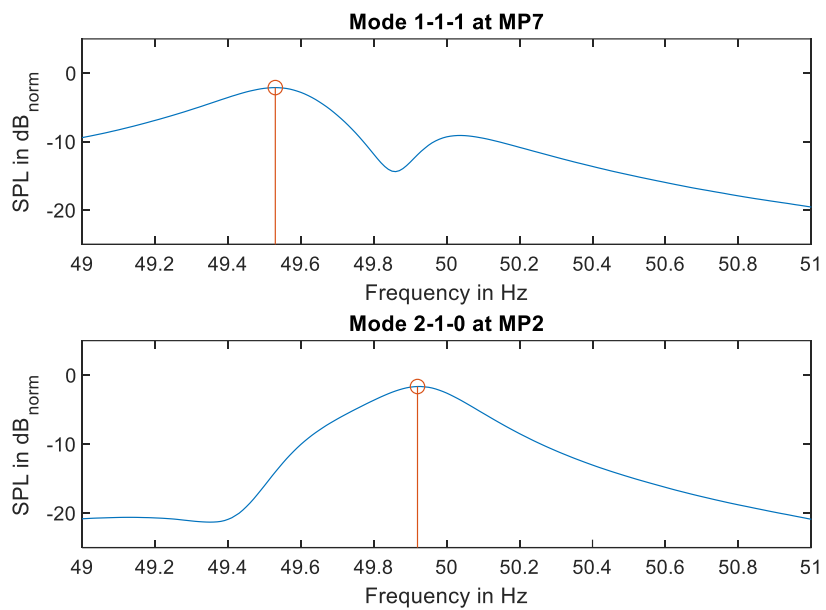


Abbildung D. 8: Ansicht der zwei nahenachbarten Raummoden 1-1-1 und 2-1-0 in MK3 bei ausgewählten Messpunkten MP7 und MP2.

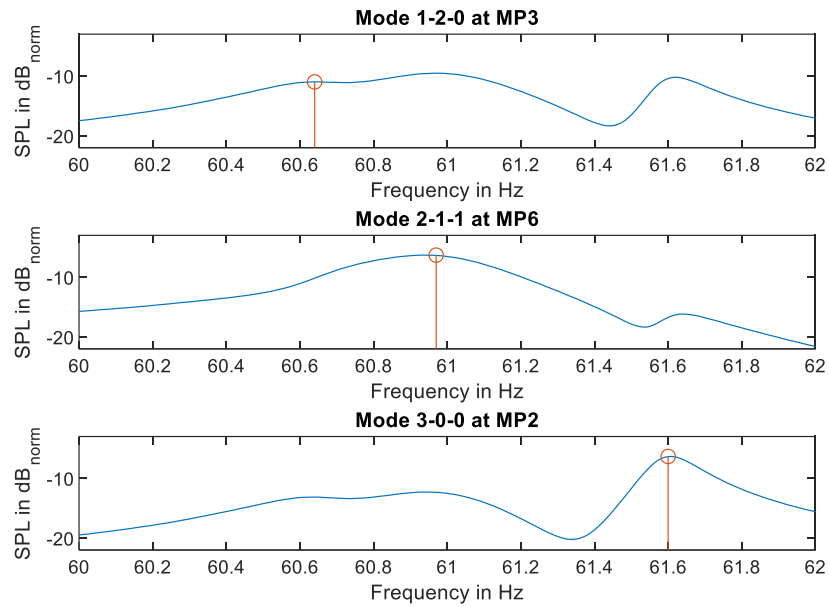


Abbildung D. 9: Ansicht der drei nahenachbarten Raummoden 1-2-0, 2-1-1 und 3-0-0 in MK3 bei ausgewählten Messpunkten MP3, MP6 und MP2.

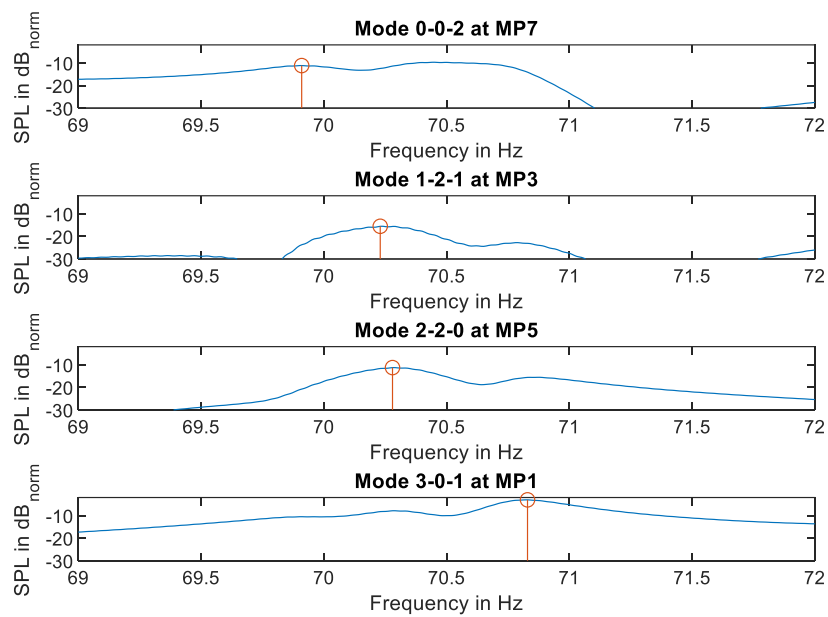


Abbildung D. 10: Ansicht der vier nahenachbarten Raummoden 0-0-2, 1-2-1, 2-2-0 und 3-0-1 in MK3 bei ausgewählten Messpunkten MP7, MP3, MP5 und MP1.