

Messraumabgleich zwischen Viertel-Freifeldraum und Sonderhallraum

Masterarbeit

durchgeführt von

Stefan Plagg

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

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

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

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

Graz, im Mai 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Zusammenfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Raumabgleich zwischen Viertelfreifeldraum und Sonderhallraum im Hinblick auf Schallleistungsmessungen bei der Firma Liebherr in Lienz.

Das erste Kapitel gibt eine kurze Einleitung und enthält die Aufgabenstellung und die Gliederung der Arbeit.

Im zweiten Kapitel werden die Messumgebungen genau untersucht und dokumentiert. Kapitel drei enthält Ergebnisse und Diskussionen zu den Basismessungen. Diese werden anhand fünf ausgewählter Messobjekte durchgeführt und dienen als Bewertungsgrundlage für die Qualität des Raumabgleichs.

Der vierte Teil beschäftigt sich mit der Referenzschallquelle die bei Liebherr verwendet wird. Dabei wird sowohl die Quelle und deren Kalibrierungsvorgang, als auch deren Aufstellungsort für die Messungen untersucht und diskutiert.

Kapitel fünf enthält jene Optimierungsschritte die den Raumabgleich ermöglichen.

Kapitel sechs enthält schließlich die Ergebnisse der Masterarbeit. Es zeigt, dass der Raumabgleich funktioniert und, dass die Aufgabenstellung erfüllt werden konnte.

Abstract

This Master thesis deals with the reconciliation of Sound power measurements in anechoic test rooms over two reflecting planes and in special reverberation test rooms at the company Liebherr in Lienz.

The first chapter gives an introduction and shortly displays the task and the outline of the thesis.

The second chapter provides an overview of the two different test rooms. The third part deals with the differences between the results, if the same device under test is measured in both the test rooms. Based on that evaluation, the final result is rated.

Chapter four describes the reference sound source which is in use at Liebherr. In the process the source itself, as well as its position in the test rooms are investigated and discussed. The fifth chapter gives some proposal for optimization of both the test rooms.

In the last chapter the research results are analyzed and displayed. It shows, that the reconciliation between the two test rooms could be achieved.

Danksagung

Mein größter Dank geht natürlich an meine Eltern, die mir dieses Studium erst ermöglicht und mich immer unterstützt haben.

Meinem Betreuer Werner möchte ich zuerst dafür danken, dass er diese Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr überhaupt ermöglicht hat. Und natürlich auch für die tatkräftige Unterstützung und Hilfe bei der Durchführung der Arbeit. Ohne die vielen anregenden Gespräche und die Fachsimpelei wäre das Ergebnis sicher ein anderes.

Meinem Begutachter Prof. Graber möchte ich auch dafür danken, dass er die Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr ermöglicht hat. Und auch ihm danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung und für den letzten Feinschliff der Arbeit.

Ein großer Dank geht natürlich auch an die Firma Liebherr in Lienz, vor allem an meine zwei Betreuer vor Ort. Roland und Frowi, danke für die tatkräftige Unterstützung und dafür, dass ihr immer sofort zur Stelle wart, wenn mal etwas nicht funktioniert hat.

Ein besonderer Dank geht natürlich auch an meine Freundin Irene für die Geduld und Unterstützung. Und an alle Freunde, Verwandte und Bekannte die mich immer unterstützt und gestärkt haben, ein großes Vergelts Gott.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
<hr/>		
1.1	Motivation & Aufgabenstellung	1
1.2	Gliederung.....	2
2	Messumgebung	3
<hr/>		
2.1	LE-Viertel-Freifeldraum	3
2.1.1	Außenhülle	4
2.1.2	Raumauskleidung	4
2.1.3	Normanforderungen	5
2.1.4	Messsystem	9
2.2	QM-Sonderhallraum	10
2.2.1	Außenhülle	11
2.2.2	Raumauskleidung	12
2.2.3	Normanforderungen	14
2.2.4	Messsystem	20
2.3	Zusammenfassung.....	21
3	Basismessungen	23
<hr/>		
3.1	Messobjekte.....	23
3.2	Messprogramm.....	26
3.3	LE-FFR & QM-SHR im Vergleich.....	27
3.4	Zusammenfassung.....	30
4	Referenzschallquelle	31
<hr/>		
4.1	RSS 31	
4.2	RSS-Schalleistung als Funktion des Wandabstandes	32
4.2.1	LE-Freifeldraum	32
4.2.2	QM-Sonderhallraum.....	39
4.3	Zusammenfassung.....	42
5	Optimierung	43
<hr/>		
5.1	Eigenmoden und Grenzfrequenzen im QM-SHR	43
5.2	Berechnung der Schalleistung.....	48
5.3	Klassifizierungsmessungen	57
5.4	Anzahl der Aktor-/Sensorpositionen bei tonalen Anteilen	70
5.5	Fremdgeräuschanalyse	79

Inhaltsverzeichnis	Messraumabgleich
5.6 RSS-Kalibrierung im Viertel-Freifeld.....	83
5.6.1 Messung der Schalleistung.....	83
5.6.2 K2-Umgebungskorrektur.....	89
5.7 REq-X	93
5.8 Zusammenfassung.....	93
6 Ergebnisse	95
6.1 Optimierungen.....	95
6.2 Ergebnisse	96
6.3 Zusammenfassung.....	102
7 Fazit und Ausblick	103
8 Literaturverzeichnis	105
9 Anhang A	107
10 Anhang B	113
10.1 Begriffserklärungen.....	113

1 Einleitung

1.1 Motivation & Aufgabenstellung

Die Firma Liebherr in Lienz produziert premium Kühl- und Gefriergeräte für den Haus- und Gewerbegebrauch. Dabei spielt auch die Akustik eine immer wichtigere Rolle. Bereits bei der Planung und Entwicklung wird stets auch auf ein möglichst gutes Klangbild der Geräte geachtet. Im Vordergrund steht hierbei im Moment noch die abgestrahlte Schallleistung, die möglichst gering sein sollte. Aber auch für die Qualitätssicherung und Serienüberwachung bieten Geräuschmessungen sehr gute Möglichkeiten. So können zum Beispiel Überschreitungen gewisser Schwellwerte vom Messsystem automatisch erkannt und so technische Mängel entdeckt werden. Ein Entwicklungsingenieur mit der nötigen Erfahrungen kann dann oft bereits nach kurzem Anhören des Geräusches erkennen, woher die Probleme kommen.

Es sind nun also zwei Bereiche in denen bei Liebherr akustische Messungen durchgeführt werden. Für den Bereich Labor & Entwicklung wird dazu ein Viertel-Freifeldraum verwendet. Im Bereich der Qualitätssicherung und Serienüberwachung wird ein Sonderhallraum verwendet. Die Bestimmung des Label-Wertes der schließlich auf das Energielabel der Geräte kommt, erfolgt im Sonderhallraum, da hier viel mehr Geräte gemessen werden. Durch Vergleichsmessungen zwischen beiden Räumen (und zusätzlich auch werksübergreifend) wurde festgestellt, dass zwischen den Ergebnissen Abweichungen bestehen. Da diese Abweichungen immer in dieselbe Richtung tendieren, also die Pegel aus dem Viertel-Freifeldraum stets höher sind, konnte daraus geschlossen werden, dass es sich hierbei wohl um eine systematische Abweichung zwischen den Messumgebungen handelt, die gefunden und korrigiert werden kann. Dieser Messraumabgleich ist wichtig da die im Entwicklungsprozess erzielten Schallleistungspegel der Geräte, auch in der Serienfertigung erreicht werden sollen. Und das kann nur überprüft werden, wenn die Ergebnisse aus beiden Messumgebungen abgeglichen sind.

Die Aufgabenstellung lautet deshalb den Raumabgleich zwischen Viertel-Freifeldraum und Sonderhallraum, im Hinblick auf Schallleistungsmessungen zu erzielen. Dazu sollen die Messumgebungen und die gesamte Messkette auf die Einhaltung der Normanforderungen geprüft werden. Für die Klassifizierung der Prüfräume sollen Abnahmemessungen mit Hilfe des Messsystems der TU-Graz (PAK) durchgeführt werden. Ein zusätzlicher wichtiger Punkt für Liebherr ist es, genaue Fremdgeräuschanalysen durchzuführen um daraus dann Messgrenzen für die Messumgebungen abzuleiten (zukünftige Geräte werden Schallleistungspegel um 25dB(A) erreichen). Als Ergebnis der Arbeit sollen schließlich Optimierungsvorschläge für den Raumabgleich gegeben werden, um die Zielforderung einer Messabweichung zwischen den beiden Räumen von $\Delta L_W < 1\text{dB}$ zu erreichen.

1.2 Gliederung

Im ersten Kapitel wird eine kurze Einleitung zur vorliegenden Arbeit gegeben. Es enthält die Motivation, die Aufgabenstellung und die Gliederung der Arbeit.

In Kapitel 2 werden die bei Liebherr Lienz vorhandenen Messumgebungen genau untersucht und dokumentiert. Dabei werden die wichtigsten Punkte zu den Messräumen und zur Messhardware bzw. Messsoftware besprochen. Kapitel 2.1 behandelt den Viertel-Freifeldraum und Kapitel 2.2 den Sonderhallraum.

Kapitel 3 zeigt und diskutiert die Basismessungen. In Kapitel 3.1 werden die dazu ausgewählten Messobjekte kurz beschrieben. Kapitel 3.2 beschreibt das Messprogramm, das durchgeführt wurde, und in Kapitel 3.3 werden schließlich die Ergebnisse gezeigt und diskutiert.

Das 4. Kapitel beschäftigt sich mit der Referenzschallquelle. In Kapitel 4.1 wird die bei Liebherr verwendete RSS beschrieben. Kapitel 4.2 enthält die Ergebnisse zu den Untersuchungen der abgestrahlten Schallleistung durch die RSS in Abhängigkeit der Positionierung im Prüfraum.

Kapitel 5 enthält Untersuchungen zu möglichen Optimierungsschritten zur Erreichung des Raumabgleichs. In Kapitel 5.1 wird eine Abschätzung der unteren Grenzfrequenz für den Sonderhallraum gegeben. Kapitel 5.2 zeigt sämtliche in dieser Arbeit vorkommenden Berechnungsmethoden für die Schallleistung. In Kapitel 5.3 werden die Ergebnisse der Klassifizierungsmessungen mit Hilfe des Messsystems der TU-Graz gezeigt und diskutiert. Kapitel 5.4 beschäftigt sich mit der Anzahl der Aktor- und Sensorpositionen, die derzeit für die Messungen verwendet werden. In Kapitel 5.5 werden in beiden Räumen genaue Fremdgeräuschanalysen durchgeführt und die Ergebnisse gezeigt. Kapitel 5.6 beschäftigt sich mit der Kalibrierung der RSS¹ im Viertel-Freifeld. In Kapitel 5.7 wird noch gezeigt, wie die Diffusfeldkorrektur für die Messmikrofone im Sonderhallraum verwendet werden sollte.

Das sechste Kapitel zeigt schließlich das Ergebnis des Raumabgleichs. In Kapitel 6.1 werden sämtliche aus Kapitel 5 resultierenden Optimierungen aufgelistet. In Kapitel 6.2 werden Ergebnisse des Raumabgleichs gezeigt und diskutiert.

Kapitel 7 enthält ein kurzes Fazit zur Arbeit und zeigt einen Ausblick für mögliche zukünftige Arbeiten zu diesem Thema.

In Kapitel 8 ist das Literaturverzeichnis aufgelistet.

Anhang A enthält die Ergebnisse zu den Basismessungen in Terzbandauflösung.

In Anhang B werden noch einige Begriffe und Abkürzungen aufgelistet und erklärt.

¹ Erklärung siehe Anhang B

2 Messumgebung

Zu Beginn der Arbeit war es wichtig den „Ist-Zustand“ genau abzuklären. Dazu gehört sowohl eine Beschreibung der vorhandenen Messumgebungen und der verwendeten Hardware, als auch die Betrachtung der verwendeten Algorithmen. Die Messräume werden in der Arbeit mit LE-FFR und QM-SHR bezeichnet. Dabei steht LE-FFR für Labor Entwicklung-Freifeldraum und QM-SHR für Qualitätsmanagement-Sonderhallraum.

Kapitel 2.1 beschreibt den LE-FFR hinsichtlich Aufbau, Ausstattung und den Anforderungen laut Norm. In Kap. 2.2 folgt die Beschreibung des QM-SHR.

Den Abschluss bildet Kapitel 2.3 mit einer Zusammenfassung beider Räume und der jeweiligen Norm-Anforderungen.

2.1 LE-Viertel-Freifeldraum

Der Viertel-Freifeldraum wurde von der „P. Kapolnek Schall- und Schwingungsmesstechnik GmbH“ im Jahr 1991 geplant, gebaut und vor der Inbetriebnahme vermessen. Geplant war der Raum als Halb-Freifeldraum, für die Inbetriebnahme wurde aber eine zusätzliche schallharte Wand eingebracht und das Schallfeld somit zum Viertel-Freifeld umkonzipiert.



Abb. 2.1: LE-Viertel-Freifeldraum mit schallharter Wand (rechts)

Die lichten Innenabmessungen sind: Breite · Länge · Höhe = 5,8 · 3,4 · 4m. Das ergibt ein Volumen von $V = 79\text{m}^3$ und eine Innenraumoberfläche von $S = 113\text{m}^2$.

2.1.1 Außenhülle

Den Schallmessraum bildet ein Würfel aus Stahlbeton der auf 8 Federelementen mit einer Eigenfrequenz von 2,5Hz gelagert ist.

Boden

Im Raum befindet sich ein Betonboden der für optimale Reflexion versiegelt wurde (Abb. 2.1).

2.1.2 Raumauskleidung

Keilauskleidung

Die Wände und die Decke sind komplett mit einer reflexionsarmen Keilauskleidung versehen (Abb. 2.1). Die Keillänge beträgt 0,85m was eine untere Grenzfrequenzabschätzung von ca. 100Hz zulässt.

Schallharte Wand

Der Einbau der schallharten Wand war nach ([EN 60704] Kap. 6.5.3) notwendig, um den Anforderungen hinsichtlich Aufstellung und Befestigung der Geräte zu genügen. Die Wand besteht aus einer 38mm dicken Holz-Spanplatte mit einer Dichte von ca. 650 kg/m^3 und hat die Abmessungen $B \cdot H = 5 \cdot 4 \text{ m}$. Die Oberfläche wurde für optimale Reflexion mit einem glatten Kunststoff beschichtet (Abb. 2.1). Als Gerüst dient ein Rahmen aus $40 \cdot 40 \text{ mm}$ dicken Eisenprofilen, auf den die Wand, bestehend aus 4 Teilen, aufgeschraubt wurde (Abb. 2.2).

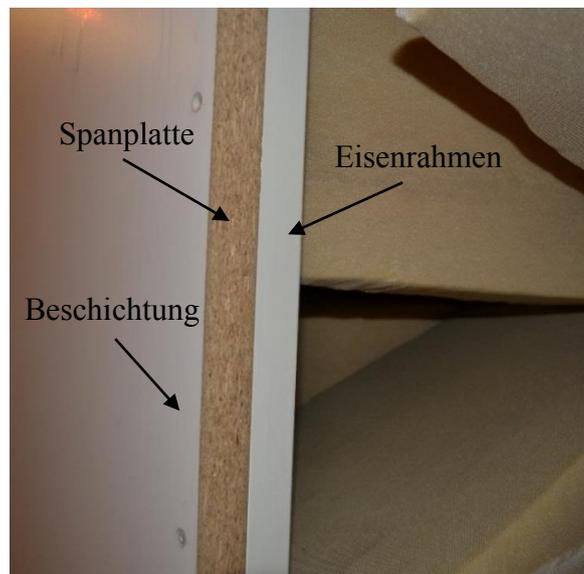


Abb. 2.2: Aufbau der schallharten Wand im LE-FFR

2.1.3 Normanforderungen

Im Viertel-Freifeldraum werden Messungen nach:

DIN EN ISO 3744 „Bestimmung der Schalleistungs- und der Energiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene“

Und nach:

Din EN 60704-2-14 „Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Prüfvorschrift für die Bestimmung der Luftschallemission - Teil2-14: Besondere Anforderungen an Kühlgeräte, Tiefkühlgeräte und Gefriergeräte“

durchgeführt. Dazu muss der Raum bestimmten Anforderungen genügen.

Allgemeines

Im Prüfraum muss eine Messfläche zur Verfügung stehen, die in einem im Wesentlichen freien Schallfeld ohne Reflexionen durch die Raumbegrenzungsflächen (außer durch den Boden und die eingebrachten reflektierenden Ebenen) liegt. Die Keilauskleidung im LE-FFR genügt den Anforderungen nach einem im Wesentlichen freien Schallfeld.

Reflektierende Ebenen

Die reflektierenden Ebenen müssen mindestens 0,5m über die Projektion der Messfläche auf die Ebenen hinausragen. Der Schallabsorptionsgrad muss im interessierenden Frequenzbereich kleiner als 0,1 sein ([ISO 3744] Kap. 4.3.1). Der Boden und die eingebrachte schallharte Wand (vgl. Kap.2.1.2) entsprechen hinsichtlich Größe und Absorptionseigenschaft den Normen. Um sicherzustellen, dass die schallharte Wand während der Messung nicht wesentlich zum Schwingen angeregt wird und es dadurch möglicherweise zu einer Schallabsorption bzw. zu einer Schallabstrahlung kommt, wurden 3 Beschleunigungssensoren an 3 Positionen an der Wand angebracht und das Schwingungsverhalten während der Messung mit der RSS untersucht (Abb. 2.3).

Es wurde festgestellt, dass die Wand eine Beschleunigung erfährt bzw. angeregt wird. Jedoch sind die Bedingungen bei der Messung mit RSS gravierend unterschiedlich zu jenen bei der Messung der zu untersuchenden Geräte. Die abgestrahlten Schalleistungspegel sind für diese Geräte um bis zu 60dB geringer. Zudem erfährt die schallharte Wand beim Betrieb der RSS in 1,5cm Abstand eine Kraft durch die Luftströmung des Lüfters (vgl. Kap. 4). Diese Luftströmung tritt bei den zu untersuchenden Geräten nicht auf.

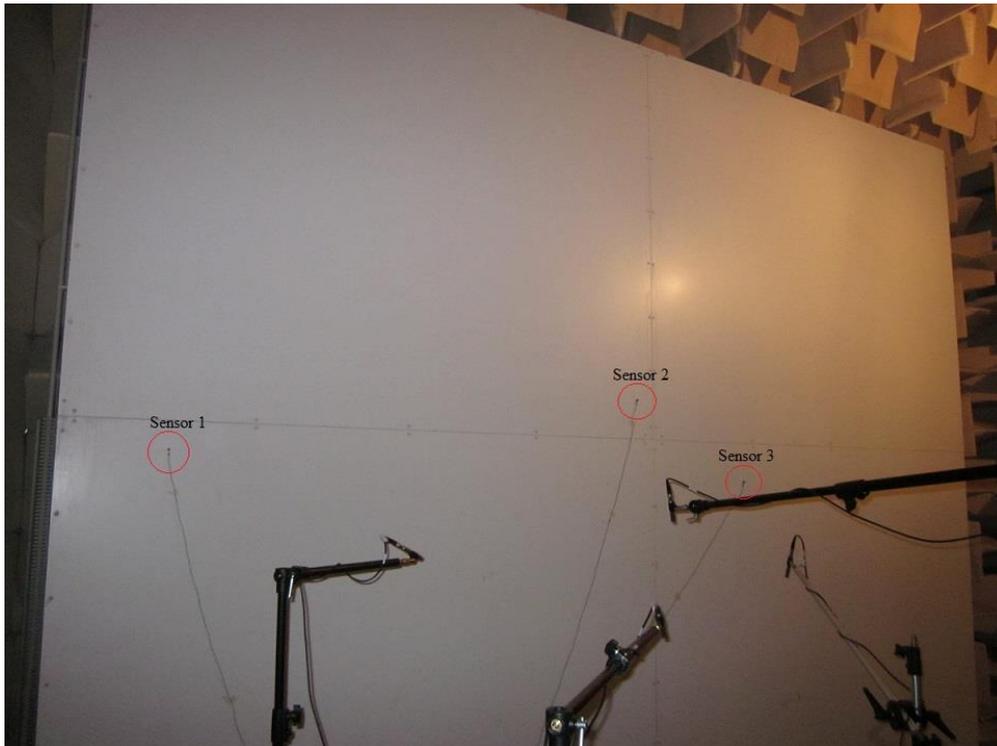


Abb. 2.3: Beschleunigungssensoren an der schallharten Wand

Fremdgeräusch

Der gemittelte Wert über alle an den Mikrofonpositionen auf der Messfläche gemessenen zeitlich gemittelten Schalldruckpegel des Fremdgeräusches muss mindestens 6dB und sollte vorzugsweise mehr als 15dB unter dem entsprechenden unkorrigierten zeitlich gemittelten Schalldruckpegel der zu untersuchenden Geräuschquelle liegen, wenn deren Pegel in Anwesenheit dieses Fremdgeräusches gemessen wird. Bei Messungen in Frequenzbändern muss diese Forderung in jedem Frequenzband im interessierenden Frequenzbereich erfüllt sein ([ISO 3744] Kap. 4.2.1).

Der LE-Freifeldraum wurde aus damaliger Sicht der Norm entsprechend gebaut. Die Umgebung um den Messraum hat sich jedoch seit der Inbetriebnahme 1991 stark verändert. Hochregale mit Gitterrostböden wurden in kleinem Abstand zum Freifeldraum errichtet, die beim Befahren mit den Transportkarren ein lautes breitbandiges Geräusch erzeugen. Der LKW-Verkehr unmittelbar vor dem Messlabor hat sich um ein Vielfaches gesteigert, da nun eine neue Straße vor dem Labor vorbei führt. Deshalb wurde das Fremdgeräusch im Zuge der Arbeit erneut untersucht (siehe Kap.5.5).

K2-Umgebungskorrektur

Die Eignung der akustischen Umgebung, sprich die Umgebungseinflüsse werden mit Hilfe der K2-Umgebungskorrektur bewertet ([ISO 3744] Kap. 4.3.2). Das übliche Verfahren zur Ermittlung dieser Korrektur ist die Absolutvergleichsmessung. Ein weiteres Verfahren erfordert die Ermittlung der äquivalenten Absorptionsfläche A_α des Messraumes. Generell gilt, wenn die Umgebungskorrektur für A-bewertete Summenpegel $K_{2A} \leq 4\text{dB}$ ist, dürfen Messungen nach der Norm in Frequenzbändern (Terz- oder Oktavbänder) oder breitbandig (A-bewertet) durchgeführt werden.

Absolutvergleichsmessung

Es ist eine Vergleichsschallquelle zu verwenden die im Wesentlichen gleich aufzustellen ist wie das zu untersuchende Gerät. Ebenso ist die gleiche Messfläche wie bei den Messungen an dem zu untersuchenden Gerät zu verwenden. Der Schalleistungspegel der Vergleichsquelle ist nach dem in Abschnitt 8 der Norm angegebenen Verfahren ohne K_2 -Umgebungskorrektur zu ermitteln.

Die Umgebungskorrektur beträgt dann:

$$K_2 = L_{W,ref atm}^* - L_{W(RSS)} \quad (2.1)$$

Dabei ist $L_{W,ref atm}^*$ der gemessene Schalleistungspegel der RSS ohne Umgebungskorrektur unter meteorologischen Referenzbedingungen und $L_{W(RSS)}$ der bekannte Schalleistungspegel der kalibrierten Vergleichsschallquelle unter meteorologischen Referenzbedingungen.

Auf die Aufstellungsorte der Vergleichsschallquelle in der Messumgebung wird in Kapitel 4 eingegangen. Das Verfahren kann auf gemessene A-bewertete Summenpegel, aber auch auf Pegel in Terz- oder Oktav-Frequenzbändern angewendet werden. Wenn sich das Spektrum der zu untersuchenden Geräuschquelle wesentlich von dem der Vergleichsquelle unterscheidet, ist K_{2A} aus Pegeln in Terzbändern oder Oktavbändern zu ermitteln. Die Kühlgeräte die bei der Firma Liebherr vermessen werden, weisen ein wesentlich anderes Spektrum als die breitbandige Vergleichsquelle auf. K_{2A} sollte deshalb aus den gemessenen Terzbandpegeln bestimmt werden.

Tab. 2.1 zeigt die aktuelle K_2 -Umgebungskorrektur für die Terzbandpegel und K_{2A} für die Summenpegel, jeweils für die 6-Mikrofonmessung und die 10-Mikrofonmessung.

Die Forderung nach $K_{2A} \leq 4\text{dB}$ wird für die Summenpegel eingehalten und sogar für die Terzbandpegel gilt $|K_2| < 4\text{dB}$. Die internationale Norm ISO 3744 kann also angewendet werden.

Klimabedingungen

Hier gelten die Bedingungen laut Gerätenorm DIN EN 60704-2-14:

Umgebungstemperatur: $\Theta = (23 \pm 3)^\circ\text{C}$

Relative Luftfeuchte: $RH = (50 \pm 20)\%$

Luftdruck: $p_s = (96 \pm 10)\text{kPa}$

In der Rahmennorm werden keine genauen Angaben hinsichtlich der Klimabedingungen gemacht. Im Messraum liegen die Temperaturen zwischen 19°C und 25°C . Bei extremen Außentemperaturen im Winter kann die Norm auch unterschritten werden. RH wird bei den Messungen der Firma Liebherr nicht kontrolliert bzw. mitprotokolliert, bei den ersten Messungen zu dieser Masterarbeit lag RH zwischen 45 und 55%.

f [Hz]	$L_{W(RSS)}$		6-Mik		10-Mik	
	[dB]	[dB(A)]	$L^*_{W,ref atm}$ [dB(A)]	K_2 [dB]	$L^*_{W,ref atm}$ [dB(A)]	K_2 [dB]
100	77,3	58,2	57,8	-0,4	59,1	0,9
125	76,6	60,5	61,1	0,6	62,1	1,6
160	77,1	63,7	63,5	-0,2	64,6	0,9
200	77,6	66,7	65,4	-1,3	66,7	0,0
250	77,4	68,8	66,1	-2,7	67,7	-1,1
315	77,5	70,9	68,3	-2,6	70,2	-0,7
400	77,6	72,8	70,3	-2,5	72,2	-0,6
500	77,9	74,7	72,4	-2,3	73,5	-1,2
630	78,4	76,5	75,0	-1,5	75,8	-0,7
800	79,9	79,1	78,7	-0,4	79,2	0,1
1000	80,9	80,9	81,1	0,2	81,8	0,9
1250	82,4	83,0	83,4	0,4	84,2	1,2
1600	82,9	83,9	84,2	0,3	84,4	0,5
2000	83,4	84,6	85,4	0,8	86,2	1,6
2500	81,3	82,6	82,2	-0,4	84,0	1,4
3150	80,5	81,7	81,4	-0,3	82,3	0,6
4000	80,6	81,6	81,6	0,0	82,4	0,8
5000	79,6	80,1	80,1	0,0	81,1	1,0
6300	78,6	78,5	77,8	-0,7	78,9	0,4
8000	76,7	75,6	75,3	-0,3	76,2	0,6
10000	74,5	72,0	71,5	-0,5	72,7	0,7
Summenpegel	92,8	92,5	92,5	0,0	93,4	0,9

Tab. 2.1: K_2 -Umgebungskorrektur für die Terzbandpegel und K_{2A} für die Summenpegel für die 6- und die 10-Mikrofonmessung im LE-FFR

2.1.4 Messsystem

Für die Messungen wird ein PULSE System von Brüel & Kjaer verwendet. Implementiert und installiert wurde das System von der Firma AEL.

Hardware

Für die Schalleistungsmessungen werden für das Freifeld optimierte B&K Typ 4955 „Low Noise“ Mikrofone mit ½ Zoll Kapseln verwendet. Als PULSE Frontend dient ein B&K Typ 3560-D.

Am Front End sind folgende Komponenten angebracht:

- 1 Stk. 5/1-ch Input/Output Controller Module (Lan Interface Modul) Type 7537 an dessen Inputs 3 Schwingungssensoren, das Außengeräuschmikrofon und der Temperatursensor anliegen.
- 1 Stk. Power Supply Module Type 2826, das die 200V Konstant-Spannungsversorgung für die Sensoren liefert.
- 2 Stk. 6/1-ch Input/Output Module Type 303 an dem die 6 bzw. 10 Messmikrofone und das „Schallaufzeichnungsmikrofon“ anliegen.

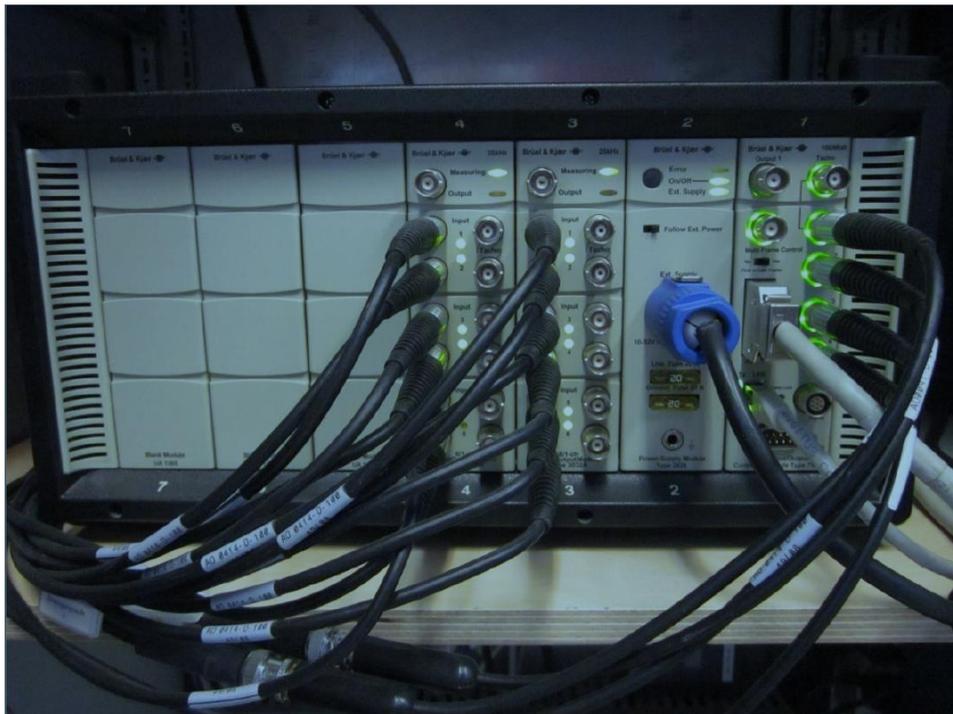


Abb. 2.4: LE-FFR Pulse Frontend. V.r n.l. Controller Modul, Power Supply, 2Stk. In/Out Module

Software

Die Datenverarbeitung erfolgt in PULSE LabShop 16.1 auf dem das Schalleistungsprogramm der Firma „Akustik Engineering Luckinger“, im weiteren AEL genannt, aufgesetzt wurde. Die Berechnung wird derzeit noch nicht vollständig normgerecht durchgeführt. Es wird keine Fremdgeräuschkorrektur verwendet und die Schalleistung wird nicht auf meteorologische Referenzbedingungen bezogen.



Abb. 2.6: QM-Sonderhallraum

2.2.1 Außenhülle

Der Sonderhallraum wurde aus Verbundelementen gebaut, die den Abbau und Wiederaufbau ermöglichen sollen.

Boden

Der Boden ist eine Schwingbodenkonstruktion, bestehend aus einer Stahlbetonplatte mit einem Gewicht von ca. 44480kg die auf 18 Federelementen gelagert wird. Innen wurde der Betonboden sichtseitig versiegelt, um optimale Reflexion zu gewährleisten. Zudem ist am Aufstellungsort der Geräte eine Harzschicht für zusätzliche Reflexion aufgetragen (Abb. 2.7).



Abb. 2.7: Harzschicht für optimale Reflexion am Aufstellungsort

Wände & Decke

Die Wand- und Deckenelemente sind als 2·0,25m breite Passelemente ausgelegt. Es handelt sich hier um doppelwandige Elemente bestehend aus Glattblech in verzinkter und sichtseitig farbbeschichteter Ausführung, mit zusätzlicher Schalldämm-Einlage und hochabsorbierender nicht brennbarer Mineralwollfüllung. Die Elementverbindung erfolgt schalldicht durch Abdeckleisten. Die gesamten Wandelemente sind körperschallgedämmt auf Bodenschienen aufmontiert.

Tür

In der Außenschale nach außen öffnend, in der Innenschale nach innen öffnend mit Sichtverglasung. Schalldämmmaß je Tür ca. 48dB.

2.2.2 Raumauskleidung

Um ein möglichst diffuses Schallfeld zu gewährleisten, sind vor allem im tieferen Frequenzbereich Maßnahmen gegen störende Raummoden notwendig. Dazu werden geeignete Absorber in den Raum eingebracht. Im QM-Sonderhallraum werden zwei Absorbertypen verwendet.

Lochplattenabsorber

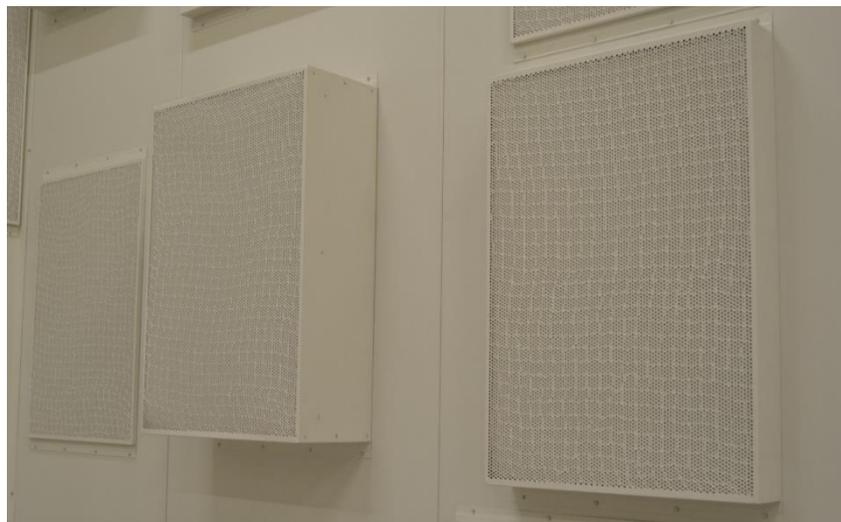


Abb. 2.8: 3 Typen von Lochplattenabsorbern

Dieser Typ wird in drei unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt.

Außenmaße [cm]		Dicke [cm]			Anzahl		
Breite	Höhe	A	B	C	A	B	C
60	90	25,7	10,7	1,7	9	35	36

Tab. 2.2: Maße und Anzahl der verbauten Lochplattenabsorber

Insgesamt sind 80 dieser Absorber im Raum verteilt angebracht (Abb. 2.6). In Tab. 2.2 sind die Maße und die genaue Anzahl der jeweiligen Ausführung angegeben.

Der grundlegende Aufbau besteht aus einer Hülle aus Lochblech und einer Füllung mit schalldämmendem Material. Leider wurden von Seiten der Firma G&H keine genaueren Angaben zum Aufbau der Absorber gemacht, da dies dem Betriebsgeheimnis unterliegt.

Membranabsorber



Abb. 2.9: Draufsicht, Membranabsorber

Die Membranabsorber gibt es nur in einer Ausführung (Abb. 2.9). In Tab. 2.3 sind die Maße und die Anzahl dieses Typs angegeben.

Außenmaße [cm]			Anzahl
Breite	Höhe	Dicke	
90	110	5,2	20

Tab. 2.3: Maße und Anzahl der Membranabsorber

Die Hülle besteht aus Glattblech. Zum genauen Aufbau, die Abstimmfrequenzen und das Füllmaterial konnten auch hier von Seiten der Firma G&H keine Angaben gemacht werden.

Insgesamt wurden somit 100 Absorber in den Raum eingebracht, um die Nachhallzeit zu optimieren. Das entspricht einer Oberfläche von 63m², die an Absorbern in den Sonderhallraum eingebracht wurde.

Äquivalente Absorptionsfläche

Damit dieser Unterpunkt komplett ist, fehlt noch die Angabe der Absorptionsgrade oder einer gesamten in den Raum eingebrachten äquivalenten Absorptionsfläche. Da von Seiten der Firma G&H keine näheren Angaben zu den Absorbern gemacht werden, wurde die äquivalente Absorptionsfläche aus der gemessenen Nachhallzeit der Abnahmemessung der Firma AEL nach folgender Gleichung berechnet ([RA] Kap. 3.1.3):

$$A_{\alpha} = 0,161 \cdot \frac{V}{T(f)} \quad (2.2)$$

Für $T(f)$ wird die frequenzabhängige gemessene Nachhallzeit eingesetzt. Das ergibt eine frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche in Terzbandauflösung (Tab. 2.4).

f [Hz]	T [s]	A_α [m ²]	f [Hz]	T [s]	A_α [m ²]
100	1,29	31,2			
125	1,20	33,5	1250	0,88	45,7
160	1,17	34,4	1600	0,86	46,7
200	1,03	39,0	2000	0,90	44,7
250	1,01	39,8	2500	0,93	43,2
315	1,11	36,2	3150	1,00	40,2
400	1,06	37,9	4000	1,02	39,4
500	1,01	39,8	5000	0,98	41,0
630	0,94	42,8	6300	0,90	44,7
800	0,93	43,2	8000	0,90	44,7
1000	0,87	46,2	10000	0,90	44,7

Tab. 2.4: frequenzabhängige äquivalente Absorptionsfläche

Hallradius

Der Hallradius r_H kennzeichnet jene Entfernung von der Quelle, in der die Direkt-schall-Energiedichte E_{dir} den gleichen Wert hat wie die stationäre Energiedichte E_{st} , die sich bei gleicher abgestrahlter Schallleistung in einem Raum mit der äquivalenten Absorptionsfläche A_α einstellt ([RA] Kap.3.1.5). Er kann nach Gl.(2.3) berechnet werden.

$$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T_{\min}}} \quad (2.3)$$

Für die Messung im Hallraum oder Sonderhallraum ist es wichtig, dass sich die Mikrofone außerhalb des Hallradius befinden, d.h. als Grenzwert dient der Hallradius für die kürzeste Nachhallzeit T_{\min} . Das ergibt für den hier betrachteten Sonderhallraum mit einem Volumen von ca. 250m³ und einer Nachhallzeit von 0,86s einen Hallradius von $r_H = 0,97\text{m}$.

2.2.3 Normanforderungen

Im Sonder-Hallraum werden Messungen nach:

DIN EN ISO 3743-2 „Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen. Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern - Teil 2: Verfahren für Sonder-Hallräume“

Und nach:

Din EN 60704-2-14 „Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Prüfvorschrift für die Bestimmung der Luftschallemission - Teil 2-14: Besondere Anforderungen an Kühlgeräte, Tiefkühlgeräte und Gefriergeräte“

durchgeführt. Dazu muss der Raum bestimmten Anforderungen genügen.

Volumen des Prüfraums

Der interessierende Frequenzbereich liegt bei $100\text{Hz} < f < 10\text{kHz}$. Das heißt, laut ISO 3743-2 muss das Volumen mindestens 70m^3 betragen und darf 300m^3 nicht überschreiten. Das Volumen des QM-Sonderhallraums liegt bei ca. 250m^3 und somit im Normbereich.

Nachhallzeit des Prüfraums

Für die Berechnung der Schalleistungspegel aus gemessenen Schalldruckpegeln ist ein Ausgleich für die frequenzabhängige Konzentration der Schallenergie in der Nähe der Wände des Prüfraums notwendig [Waterhouse-Korrektur (vgl. Kap. 5.2)]. Um das zu erreichen, sollte die Nachhallzeit T für niedrige Frequenzen etwas höher sein. In der Norm werden deshalb bestimmte Grenzkurven für die Nachhallzeit definiert ([ISO 3743-2] Kap. 4.3):

$$0,9 \cdot R \cdot T_{nom} < T < 1,1 \cdot R \cdot T_{nom} \quad (2.4)$$

Dabei ist R der Nachhallzeitparameter und kann für allgemeine Raumformen nach Gl.(2.5) berechnet werden.

$$R = 1 + \frac{S \cdot c}{8 \cdot V \cdot f} \quad (2.5)$$

T_{nom} ist die so genannte Nenn-Nachhallzeit und sie wird laut ([ISO 3743-2] Anhang B) durch Einmitten der gemessenen Werte für T (normiert auf die Nachhallzeit bei 1000Hz) bestimmt. Dabei gilt, dass $0,5\text{s} < T_{nom} < 1\text{s}$. Um das zu gewährleisten, wurden von der Firma G&H wie in Kap.2.2.2 beschrieben, Absorber in den Raum eingebracht und die Nachhallzeit so schrittweise optimiert. T/T_{1000} eingemittelt ist in Abb. 2.10 dargestellt.

Die Nennnachhallzeit kann über folgende Beziehung bestimmt werden:

$$\frac{T/T_{1000}}{T/T_{nom}} = \frac{1}{1,01} \quad (2.6)$$

Mit einer von G&H gemessenen Nachhallzeit bei 1000Hz von $T_{1000} = 0,8\text{s}$ ergibt sich für T_{nom} :

$$T_{nom} = \frac{0,8}{1,01} = 0,79\text{s} \quad (2.7)$$

Es ist anzumerken, dass diese Nachhallzeitmessungen vor der Inbetriebnahme des Raumes durchgeführt wurden. Die Luft war eher kalt und trocken und der Boden war nicht versiegelt, also sichtbar Beton.

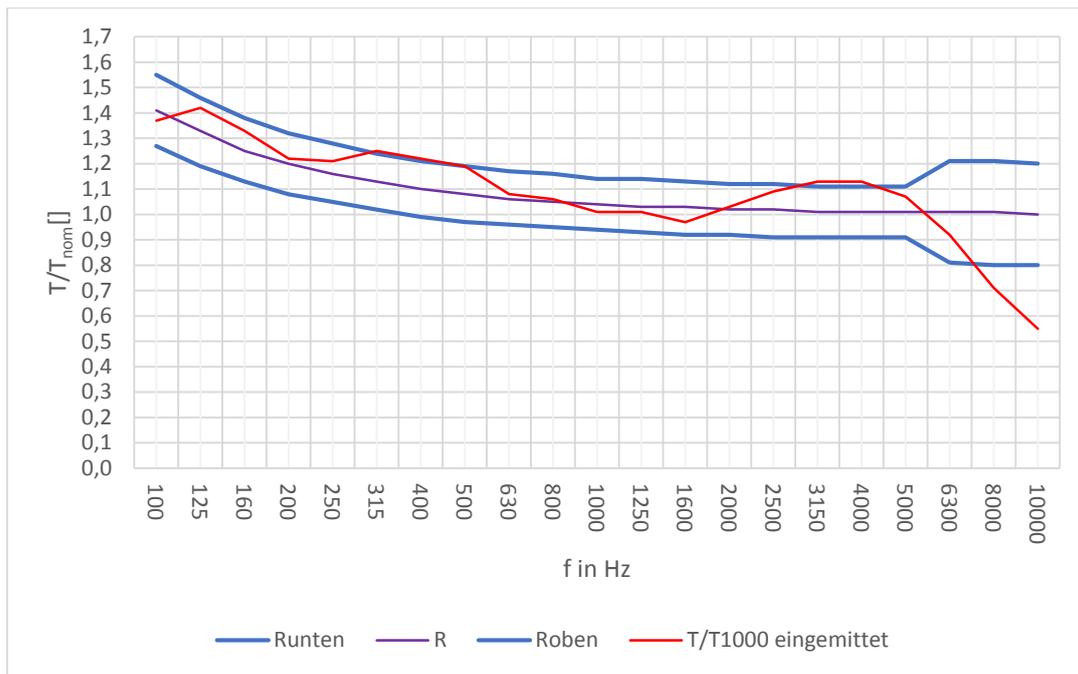


Abb. 2.10: T/T_{1000} eingemittet bzw. T/T_{nom} (Abnahmemessung der Firma G&H)

Von der Firma AEL wurde eine Abnahmemessung inklusive Nachhallzeitmessung nach Inbetriebnahme des Raumes durchgeführt. Anhand der gemessenen Werte für die Nachhallzeit T_{gem} wurde daraus die Nenn-Nachhallzeit laut ([ISO 3743-2], Anhang B) für den Sonderhallraum nach der Inbetriebnahme bestimmt. Abb. 2.11 zeigt nun den von der Norm vorgegebenen Toleranzschlauch (Blau), die gemessene Nachhallzeit (Orange), die auf T_{1000} normierte Nachhallzeit (Grün) und schließlich die eingemittete normierte Nachhallzeit (Rot). In Violett ist noch das laut Norm ideale Verhältnis R eingezeichnet.

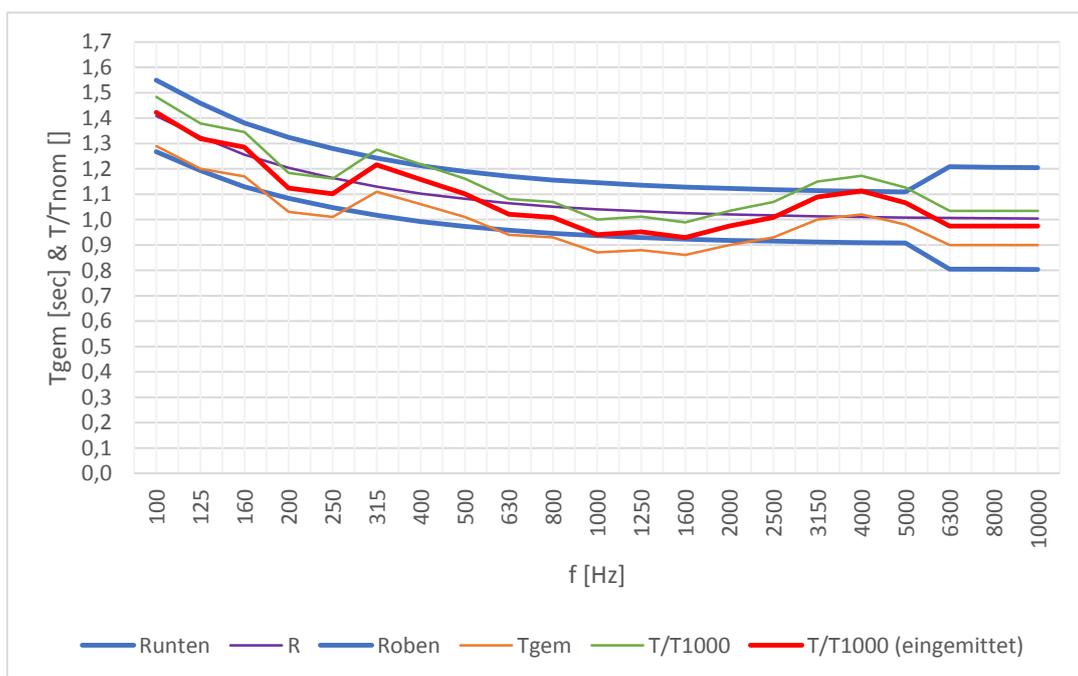


Abb. 2.11: Bestimmung der Nenn-Nachhallzeit (Abnahmemessung der Firma AEL)

Nach Gl.(2.7) ergibt sich eine Nenn-Nachhallzeit von 0,93s. Dieser Wert ist höher als der von der Firma G&H bestimmte, jedoch immer noch im Normbereich. Erfahrungsgemäß ist eine längere Nachhallzeit (innerhalb eines gewissen Bereiches) sogar wünschenswert. Gegenüber der Abnahmemessung durch die G&H hat sich der Nachhallzeitverlauf verbessert. Der Abfall zu 10kHz hin ist nicht mehr vorhanden und die Kurve lässt sich einmitten. Die Nachhallzeit erfüllt also die Norm.

Oberflächen des Prüfraums

Laut Norm muss der Boden reflektierend sein und einen Schallabsorptionsgrad $\alpha < 0,06$ besitzen. Von den restlichen Oberflächen, dürfen keine Absorptionseigenschaften aufweisen, die signifikant von denen der anderen abweichen. Im QM-Sonderhallraum besteht der Boden aus Beton, der an der Oberfläche versiegelt wurde. Die restlichen Oberflächen sind sämtlich in Glattblech ausgeführt, auf denen statistisch Absorber verteilt wurden. Es ist davon auszugehen, dass die Oberflächen die Norm-Anforderungen erfüllen.

Kriterium für das Fremdgeräusch

Laut ([ISO 3743-2] Kap. 4.5) muss an jeder Mikrofonposition der Schalldruckpegel des Fremdgeräusches mindestens 4dB und idealerweise 10dB unter dem A-bewerteten Schalldruck-Summenpegel oder unter den Band-Schalldruckpegeln, die von der Quelle erzeugt werden, liegen. Bei der Abnahmemessung der Firma AEL wurde auch das Fremdgeräusch bestimmt. In Abb. 2.12 ist der zeitlich und örtlich gemittelte Fremdgeräuschpegel für 2 Messungen dargestellt. Daraus wurde eine Grenze festgelegt, deren Unterschreitung (durch den Schalldruckpegel des zu untersuchenden Gerätes) eine Fremdgeräuschkorrektur notwendig macht. Solange sich der gemessene Schalldruckpegel über dieser Grenze befindet, ist keine Fremdgeräuschkorrektur notwendig. Ausgehend von dieser Messung, wurde im Messprogramm keine Fremdgeräuschkorrektur vorgesehen. Außen am Messraum ist ein zusätzliches Mikrofon angebracht, um abschätzen zu können, wann auffällige Pegelüberhöhungen in der Messung durch ein Fremdgeräusch von außen verursacht wurden.

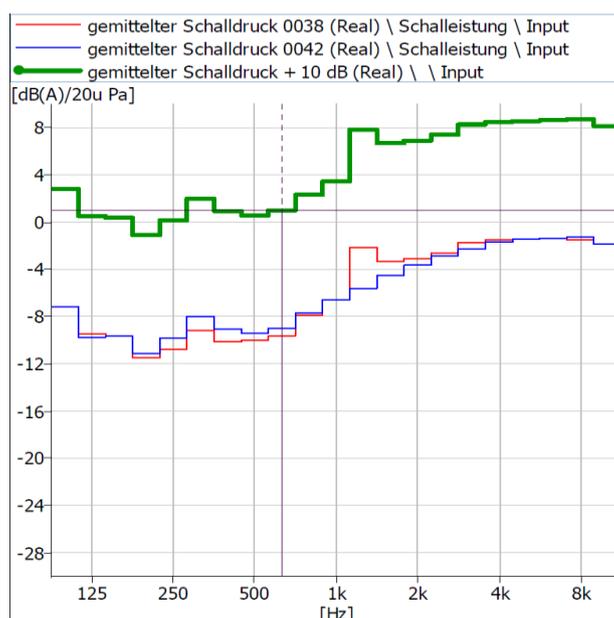


Abb. 2.12: gemittelter Fremdgeräuschpegel und +10dB-Grenze laut Norm

Im Zuge der Masterarbeit wurden die Kriterien für das Fremdgeräusch erneut überprüft (Kap.5.5).

Klimabedingungen

Laut Gerätenorm DIN EN 60704-2-14:

Umgebungstemperatur: $\Theta = (23 \pm 3)^\circ\text{C}$

Relative Luftfeuchte: $RH = (50 \pm 20)\%$

Luftdruck: $P_s = (96 \pm 10)\text{kPa}$

Laut der Norm 3743-2:

Da sich die Luftabsorption im Hallraum mit der Temperatur und Luftfeuchte ändert, sind diese während der Messung zu überwachen. Es gilt das Produkt $RH \cdot (\Theta + 5^\circ\text{C})$ darf nicht mehr als $\pm 10\%$ von dem Wert des Produktes, der bei der Messung der Nachhallzeit des Prüfraumes bestimmt wurde, abweichen. Von der Abnahmemessung der Firma AEL sind leider generell keine Angaben zu den klimatischen Bedingungen bekannt. Bei der Abnahmemessung der Firma G&H wird die Luft als kalt und trocken beschrieben, da der Raum noch nicht in Betrieb war. Genaue Angaben sind hier auch nicht bekannt. Die Temperatur wird bei jeder Messung mitprotokolliert und liegt zwischen 21°C und 26°C . Die relative Luftfeuchte RH wird für die Messungen noch nicht mitprotokolliert. Der stationäre Luftdruck beträgt in Lienz zwischen 90kPa und 105kPa . Die relative Luftfeuchte im Messraum liegt zwischen 40% und 50% . Die klimatischen Bedingungen laut Gerätenorm werden also eingehalten.

Eignungsprüfung des Prüfraums

Das bildet den letzten Punkt zu den Anforderungen des Sonderhallraums laut ([ISO 3743-2] Kap. 4.7). Von einer Vergleichsschallquelle die nach ([ISO 6926]) kalibriert wurde, sind die Terzband-Schalleistungspegel zu bestimmen. Dann ist in jedem Terzband die Differenz zwischen dem so bestimmten Schalleistungspegel und dem aus der Kalibrierung bekannten Schalleistungspegel zu bilden. Die Differenzen dürfen die Toleranzen aus ([ISO 3743-2] Tab. 2) nicht überschreiten. Anhand der Schalldruckpegel der Abnahmemessung durch AEL wurden die Schalleistungs-Terzbandpegel im Direktverfahren nach Gl.(5.18) berechnet (Tab. 2.5).

Tab. 2.5 zeigt nun auch die berechneten und laut Norm zugelassenen Differenzen. Das 10kHz-Terzband überschreitet die erlaubte Toleranz. Laut Norm ist aber die Prüfung der Oktavbänder ausreichend. Die Messungen wurden mit einem Terzbandanalysator durchgeführt weshalb die Eignungsprüfung auch in Terzbändern erfolgte, die Einhaltung der Toleranzen ist jedoch für die Oktavbänder ausreichend.

f [Hz]	T_{gem} [s]	\bar{L}_p [dB(A)]	$L_{W(RSS)}$ [dB(A)]	$L_{W(RSS),ref}$ <i>atm</i> [dB(A)]	ΔL [dB]	Toleranz [dB]
100	1,29	45,2	56,3	58,2	1,9	+/-5
125	1,20	51,3	62,4	60,5	-1,9	+/-5
160	1,17	54,9	66,1	63,7	-2,4	+/-5
200	1,03	56,1	67,3	66,7	-0,6	+/-3
250	1,01	57,9	69,1	68,8	-0,3	+/-3
315	1,11	60,8	72,0	70,9	-1,1	+/-3
400	1,06	62,3	73,5	72,8	-0,7	+/-3
500	1,01	64,4	75,6	74,7	-0,9	+/-3
630	0,94	66,1	77,3	76,5	-0,8	+/-3
800	0,93	69,3	80,4	79,1	-1,3	+/-3
1000	0,87	71,3	82,5	80,9	-1,6	+/-3
1250	0,88	72,8	84,0	83,0	-1,0	+/-3
1600	0,86	73,8	85,0	83,9	-1,1	+/-3
2000	0,90	74,7	85,9	84,6	-1,3	+/-3
2500	0,93	73,0	84,6	82,6	-2,0	+/-3
3150	1,00	72,0	83,2	81,7	-1,5	+/-3
4000	1,02	71,3	82,5	81,6	-0,9	+/-3
5000	0,98	68,8	80,0	80,1	0,1	+/-3
6300	0,90	66,2	77,4	78,5	1,1	+/-4
8000	0,90	61,8	73,0	75,6	2,6	+/-4
10000	0,90	56,2	67,4	72,0	4,6	+/-4

Tab. 2.5: Eignungsprüfung des Prüfraums

2.2.4 Messsystem

Dabei handelt es sich im Grunde um dasselbe System der Firma Brüel und Kjaer, das auch im Freifeldraum verwendet wird. Hier werden wiederum lediglich die für die Arbeit interessanten Komponenten aufgelistet.

Hardware

Im QM-Sonderhallraum werden 3 fix über Stative an die Decke montierte Mikrofone vom Typ 4955 verwendet. Als Front End dient das neuere PULSE Empty C-Size Front End – Dyn-X.

Hier sind folgende Komponenten angebracht:

- 1 Stk. 5/1-ch Input/Output Controller Module (Lan Interface Modul) vom Typ 7538, an dessen Inputs die 3 Messmikrofone, das Außengeräuschkraftmikrofon, ein Beschleunigungssensor und der Temperatursensor anliegen.
- 1 Stk. Controller Modul in dem das Power Supply für die 200V Konstant-Spannungsversorgung der Mikrofone integriert ist (Abb. 2.13).

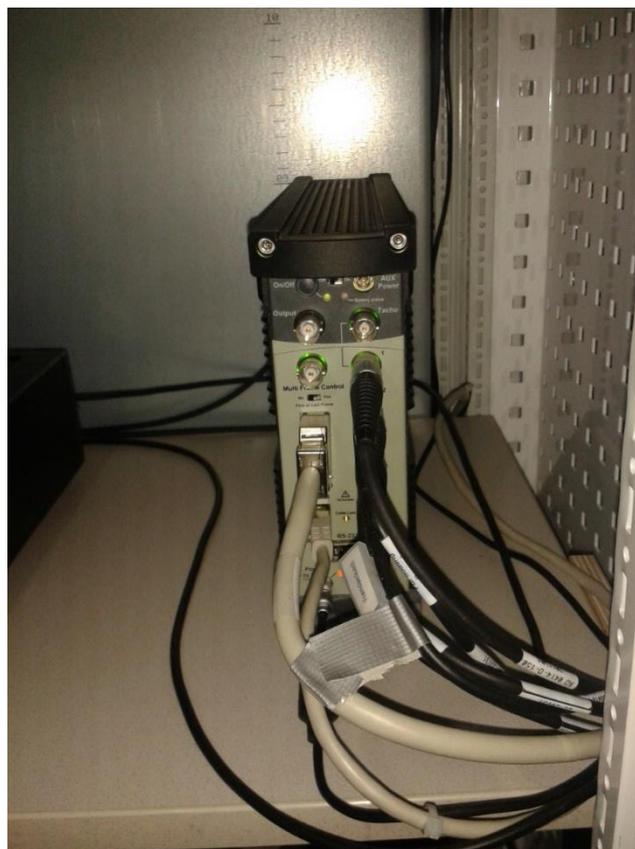


Abb. 2.13: QM-SHR PULSE Front End

Software

Die Datenverarbeitung erfolgt auch hier in PULSE LabShop 16.1, auf dem das Schalleistungsprogramm der Firma AEL aufgesetzt wurde. Abb. 2.14 zeigt die Messkette inklusive Datenbankanbindung im QM-SHR.

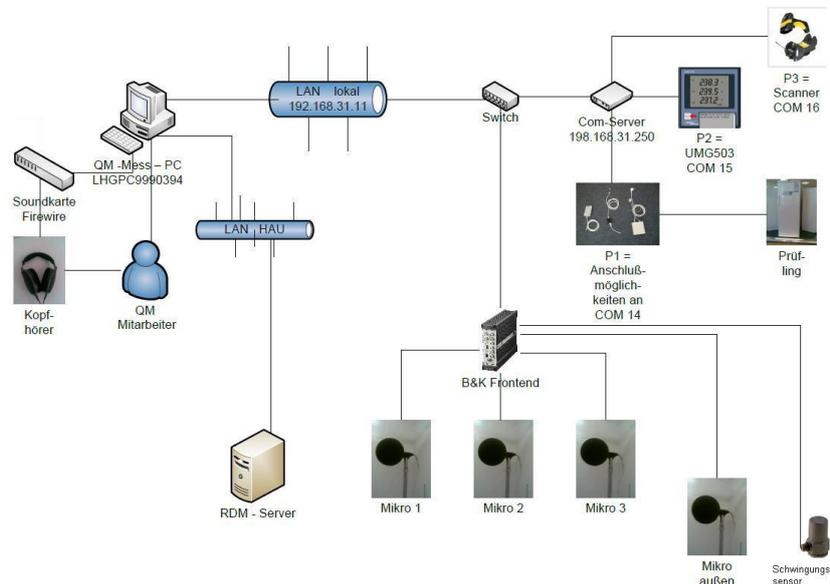


Abb. 2.14: Messkette im QM-Sonderhallraum

Die Berechnung der Schalleistungspegel entspricht im Wesentlichen dem Vergleichsverfahren laut ([ISO 3743-2]). Es wird jedoch keine Fremdgeräuschkorrektur angewendet und die Schalleistung wird nicht auf meteorologische Referenzbedingungen bezogen.

2.3 Zusammenfassung

In Kapitel 1 wurde eine Bestandsaufnahme zur Messumgebung gemacht. Es wurde gezeigt, dass beide Räume aus bauakustischer und raumakustischer Sicht den Norm-Anforderungen entsprechen.

Das Messsystem wurde protokolliert und die Berechnungsalgorithmen wurden auf Richtigkeit geprüft.

Außerdem wurden die Abnahmemessungen der Firma AEL und der Firma G&H überprüft und alle Unklarheiten soweit geklärt, dass diese Messungen als Vergleich in der Arbeit dienen können.

Eine Übersicht der Anforderungen laut den aktuellen Normen ist in Tab. 2.6 zu sehen.

	Gerätenorm	Gerätenorm	Genauigkeitsklasse 2	Genauigkeitsklasse 2
Normen	DIN EN 60704-1 (2010)	DIN EN 60704-2-14 (2013)	DIN EN ISO 3743-2 (2009)	DIN EN ISO 3744 (2010)
Messumgebung	im Freifeld oder Diffusfeld	im Freifeld oder Diffusfeld	Sonder-Hallraum	freies Schallfeld über reflektierender Ebene
Volumen des Prüfraums	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	$70\text{m}^3 < V < 300\text{m}^3$ (für Vergleichsverfahren kann V auch größer sein)	Mindestgröße durch zu untersuchende Quelle und Messfläche vorgegeben.
Kriterium für die Eignung der Messumgebung	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	$0,5\text{s} < T_{\text{nom}} < 1\text{s}$	$K_{2A} \leq 4\text{dB}$
Direktverfahren	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	$L_W = \bar{L}_p - 10 \cdot \log\left(\frac{T_{\text{nom}}}{T_0}\right) + 10 \cdot \log\frac{V}{V_0} - 13\text{dB}$	$L_W = \bar{L}_p + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right)$ (K2 wird aus der Absorptionsfläche des Raumes bestimmt und die äquivalente Absorptionsfläche über die Nachhallzeit)
Vergleichsverfahren	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	$L_W = \bar{L}_p + (L_{W(RSS)} - L_{p(RSS)})$	$L_W = \bar{L}_p + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right)$ (K2 wird über die Absolutvergleichsmessung bestimmt)
Präzision des Verfahrens zur Bestimmung von $L_{W,A}$, ausgedrückt als Vergleichsstandardabweichung	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	$\sigma_R \leq 0,7$ [dB]	$\sigma_{R0} \leq 2$ [dB] (gilt für Geräuschquellen die im Bereich 100Hz bis 10kHz Schall mit relativ flachem Spektrum abstrahlen)	$\sigma_{R0} \leq 1,5$ [dB] (gilt für Geräuschquellen die im Bereich 100Hz bis 10kHz Schall mit relativ flachem Spektrum abstrahlen)
Volumen der Schallquelle	keine Beschränkung	keine Beschränkung	$V \leq 1\%$ des Prüfraumvolumens, falls das Prüfraumvolumen nur 70m^3 beträgt, sollte das Quellenvolumen $\leq 0,7\text{m}^3$ sein.	keine Beschränkung; eingeschränkt nur durch die verfügbare Messumgebung
Begrenzung des Fremdgeräusches	$\Delta L_p \geq 6\text{dB}$ (möglichst $> 15\text{dB}$); $K1 \leq 1,3\text{dB}$ (im Freifeld über reflektierender Ebene)	siehe DIN EN 60704-1	$\Delta L \geq 4\text{dB}$ (möglichst $> 10\text{dB}$); $K1 \leq 2\text{dB}$ (Wenn nicht erfüllt, muss das im Ergebnisbericht angegeben werden)	$\Delta L \geq 6\text{dB}$ (möglichst $> 15\text{dB}$); $K1 \leq 1,3\text{dB}$; Absolutkriterien zum Fremdgeräuschpegel laut Tabelle 1
Klimabedingungen	$\Theta = (23 \pm 5)^\circ\text{C}$; $\text{RH} = (50 \pm 20)\%$; $P_s = (96 \pm 10)\text{kPa}$;	$\Theta = (23 \pm 3)^\circ\text{C}$; $\text{RH} = (50 \pm 20)\%$; $P_s = (96 \pm 10)\text{kPa}$	Das Produkt $[\text{RH} * (\Theta + 5^\circ\text{C})]$ darf nicht mehr als $\pm 10\%$ von dem Wert des Produktes abweichen, das bei der Nachhallzeitmessung des Prüfraumes bestimmt wurde.	siehe DIN EN 60704-2-14
Schalleistung bei meteorologischen Bezugsbedingungen	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	$L_{W,\text{ref,atm}} = L_W + C_1 + C_2$	$L_{W,\text{ref,atm}} = L_W + C_1 + C_2$
Messfläche	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	nicht definiert	Halbkugel, Viertelkugel, Achtelkugel, Quader, Zylinderförmig (informativ)
Eigenschaften des Geräusches	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	siehe ISO 3743-2 bzw. ISO 3744	stationär	keine Beschränkung
Anzahl der Messpunkte	im Freifeld je nach Messfläche und Gerät 5 bis 10 Mikrofone; im SHR $N = 6$ oder siehe ISO 3743-2	siehe EN 60704-1	generell $N \geq 6$; Abhängig von der geschätzten Standardabweichung s_M sind auch weniger oder mehr Messpositionen möglich.	Abhängig von der Geräuschart und der Messfläche gilt $6 \leq N \leq 20$

Tab. 2.6: Anforderungen laut der Geräte- und Rahmennormen

3 Basismessungen

In diesem Kapitel wird anhand von 5 Messobjekten der Ist-Zustand bei den Messungen erhoben. Dazu werden in Kapitel 3.1 zunächst 5 Geräte aus der derzeitigen Serienproduktion ausgewählt und als Messobjekte definiert.

In Kapitel 3.2 wird das Messprogramm für die Geräte festgelegt, das dann im LE-FFR und im QM-SHR gleichermaßen durchlaufen wird.

In Kapitel 3.3 werden die Ergebnisse dann verglichen. So soll gezeigt werden, für welche Betriebszustände die Unterschiede zwischen beiden Räumen auftreten und wo sie am gravierendsten sind. Den Abschluss bildet Kapitel 3.4 mit einer kurzen Zusammenfassung.

3.1 Messobjekte

Tab. 3.1 zeigt die für die Masterarbeit ausgewählten Messobjekte. Dabei wurde versucht, die gesamte Geräuschspanne so weit wie möglich abzudecken und sowohl kleine als auch große Geräte zu berücksichtigen. Alle Messobjekte werden ohne Schubladen oder sonstige Innenausstattung gemessen. Dieser Umstand muss bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, da dadurch für Geräte wie z.B. den CBNP 5167 (Abb. 3.2), die über verschiedene Fächer bzw. Klimazonen verfügen, bestimmte Betriebsfälle nicht mehr vergleichbar sind. Durch die fehlende Innenausstattung, wie z.B. die Lade für das variable Biofresh-Fach im CBNP 5167, funktioniert die Regelung dieser Klimazone im Gerät nicht mehr, und das System läuft in einem undefinierten Zustand. Für Geräte mit nur einem Fach, wie z.B. den GNP 3666 oder den GKPv 6520 (Abb. 3.1) ist der Umstand, dass ohne Schubladen gemessen wird, unwichtig.

Die Geräte verfügen, je nach Komplexität, über unterschiedliche Komponenten. Die wichtigsten sind in Tab. 3.1 angegeben. Für den Vergleich eignen sich von den Einzelkomponenten nur die Kompressoren und Ventilatoren.

Wenn nicht anders angegeben, handelt es sich bei den Ventilatoren um Axial-Lüfter. Dieser Typ gilt als Standard für Haushalts-Kühlgeräte. Für Gewerbegeräte (und vereinzelt in Haushaltsgeräten) werden auch Radial-Lüfter eingesetzt. Dieser Lüfter-Typ wird jedoch gegebenenfalls extra benannt (z.B. GNP 3666).

Bei den Kompressoren wird zwischen jenen mit fixer Drehzahl und jenen mit variabler Drehzahl (Drehzahl gesteuert) unterschieden. Um welchen Typ es sich handelt wird jeweils in Klammern angegeben.

Gerätetyp	Anmerkung	Messfläche [m ²]	Mik-Anzahl
GNP 3666	Gefriergerät; frei stehend; HAU Referenzgerät; 1 Kompressor (variabel); 1 Innenventilator (radial); 1 Kältemittelmagnetventil; 1 Klimazone, 1 Verdampfer	21,8	6
UWTes 1672 (Gaggenau)	Weintemperierschrank; Unterbaugerät, 1 Kompressor (variabel); 2 Innenventilatoren; 1 Sockelventilator; 2 Kältemittelmagnetventile; 2 Klimazonen, 2 Verdampfer	14,7	6
FKv 500	Kühlgerät; frei stehend; kleinstes, leisestes Gerät; 1 Kompressor (fix); 1 Klimazone, 1 Verdampfer	12,1	6
CBNP 5167	Kühl-Gefrierkombination; frei stehend; 2 Kompressoren (variabel); 2 Innenventilatoren; 3 Luftklappen; 4 Klimazonen, 2 Verdampfer	22,6	10
GKPV 6520	Gewerbekühlschrank, frei stehend; größtes Gerät; 1 Kompressor (fix, Deckenaggregat); 2 Deckenventilatoren; 1 Klimazone, 1 Verdampfer	24,6	10

Tab. 3.1: Messobjekte inkl. verbauter Komponenten



Abb. 3.1: links GNP 3666; rechts GKPV 6520



Abb. 3.2: links CBNP 5167; rechts UWTes 1672



Abb. 3.3: FKv 500

3.2 Messprogramm

Anhand der in Kapitel 3.1 angegebenen Messobjekte wurde schließlich das Messprogramm für die Basismessungen und für die finale Bewertung der Ergebnisse festgelegt (Tab. 3.2). Dabei werden jene Komponenten und Betriebszustände verwendet, die möglichst konstant und somit vergleichbar sind. Im Sequenz-Betrieb (von 30s bis 60s) werden einzelne Komponenten angesteuert und in der vorgegebenen Parametrisierung betrieben. Der Zyklus-Betrieb zeigt den Normalbetrieb des gesamten Gerätes (oder einzelner Klimazonen). Dabei sind sämtliche Sensoren im Gerät aktiv und die Einzelkomponenten werden je nach Bedarf vom Gerät gestartet und gestoppt. Dieser Betrieb kann zwischen 1 und 45min dauern.

Wegen der langen Messzeit beim Zyklusbetrieb wurde der sogenannte Regulär-Betrieb definiert. Hier wird versucht, einen Zyklus in so kurzer Zeit wie möglich (max. 5min) zu simulieren. Sämtliche Temperaturfühler werden dabei ignoriert und bestimmte Komponenten (wie sie im Zyklus auch vorkommen) gezielt angesteuert. Im System entstehen dabei unvorhersehbare und nicht reproduzierbare Druck- und Temperaturverhältnisse, weshalb der Regulär-Betrieb nicht für Vergleichsmessungen geeignet ist.

	FKv 500	GKpv 6520	CBNP 5167	GNP 3666	UWTes 1672
Sequenzen	n.v.	n.v.	Venti. GT	Venti. rad. l	Venti. W1 (1000rpm)
			Venti. BF h	Venti. rad h	Venti. W2 (1000rpm)
			Kompr. GT (1600rpm)	Kompr. (1600rpm)	Sockelventi. (1080rpm)
			Kompr. GT (3000rpm)	Kompr. (3000rpm)	Sockelventi. (1425rpm)
			Kompr. KT (1300rpm)		Sockelventi. (2040rpm)
			Kompr. KT (2000rpm)		
Zyklen	3	5	4 (nur GT)	3	2 (MV1) & 1 (MV2)

Tab. 3.2: Messprogramm für die Masterarbeit

Der konstanteste Betriebsfall ist der Sequenzbetrieb. Deshalb werden hier auch mehrere Komponenten untersucht. Für das kleinste (FKv 500) und das größte Gerät (GKpv 6520) gibt es keine Möglichkeit Sequenzmessungen durchzuführen, sondern es gibt hier nur Zyklusbetriebe. Da diese Geräte nur über ein Fach und eben diesen Betriebszustand verfügen, ist das auch ausreichend.

Für den CBNP 5167 werden nur die Zyklen für den Gefrierfachbetrieb als Vergleich herangezogen. Dieses Gerät verfügt im Kühlteil über mehrere Klimazonen (Fächer), wie zum Beispiel das variable Biofresh-Fach. Da die Messungen jedoch ohne Schubladen und sonstige Einbauten erfolgen, läuft das Kühlfach-System in einem undefinierten, nicht vergleichbaren Zustand.

Für den UWTes 1672 ist der Kompressorbetrieb sehr unterschiedlich und somit nicht für Vergleichsmessungen geeignet. Dieses Weingerät verfügt über zwei Klimazonen (Weinfach 1, Weinfach 2), die über einen gemeinsamen Kompressor versorgt werden. Für den Vergleich der Zyklusmessungen ist es somit wichtig, dass über die Kühlgeräteparameter der Zustand der Magnetventile ausgelesen wird, um festzustellen, welches Weinfach im jeweiligen Zyklus gekühlt wurde. Es sollten nur Zyklen verglichen werden, in denen dasselbe Fach in Betrieb war. Der GNP 3666 ist das HAU-Referenzgerät. Es ist ein Gefrierschrank mit einem Fach, einem

Kompressor und einem Innenventilator. Die Sequenzen und Zyklen laufen relativ konstant und können somit beide für den Vergleich herangezogen werden.

Nach ([EN 60704-2-14] Kap. 7) müssen jeweils 3 aufeinanderfolgende Messungen durchgeführt werden. Das Endergebnis ist dann der logarithmische Mittelwert dieser 3 Messungen. Falls der Unterschied zwischen zwei dieser Messungen 2dB(A) überschreitet, müssen 3 zusätzliche Messungen durchgeführt werden und das Endergebnis ist dann der logarithmische Mittelwert dieser 6 Messungen. Dieser Forderung wird in der Firma Liebherr derzeit nicht nachgekommen, da dieser Schritt im Messsystem nicht implementiert ist. Für die Basismessungen werden mehrere Zyklen gemessen (siehe Tab. 3.2) und dann der (physikalisch relevantere) energetische Mittelwert daraus gebildet.

3.3 LE-FFR & QM-SHR im Vergleich

Für alle 5 Messobjekte wurde das Messprogramm in beiden Räumen durchlaufen. Nun wird versucht die Unterschiede zwischen den Räumen anhand der Messergebnisse aufzuzeigen.

Zyklusbetrieb – Summenpegel

Abb. 3.4 zeigt die Differenz der gemessenen Summen-Schallleistungspegel für den Zyklusbetrieb der Geräte. Dabei gilt $\Delta L_W = L_{W(LE-FFR)} - L_{W(QM-SHR)}$:

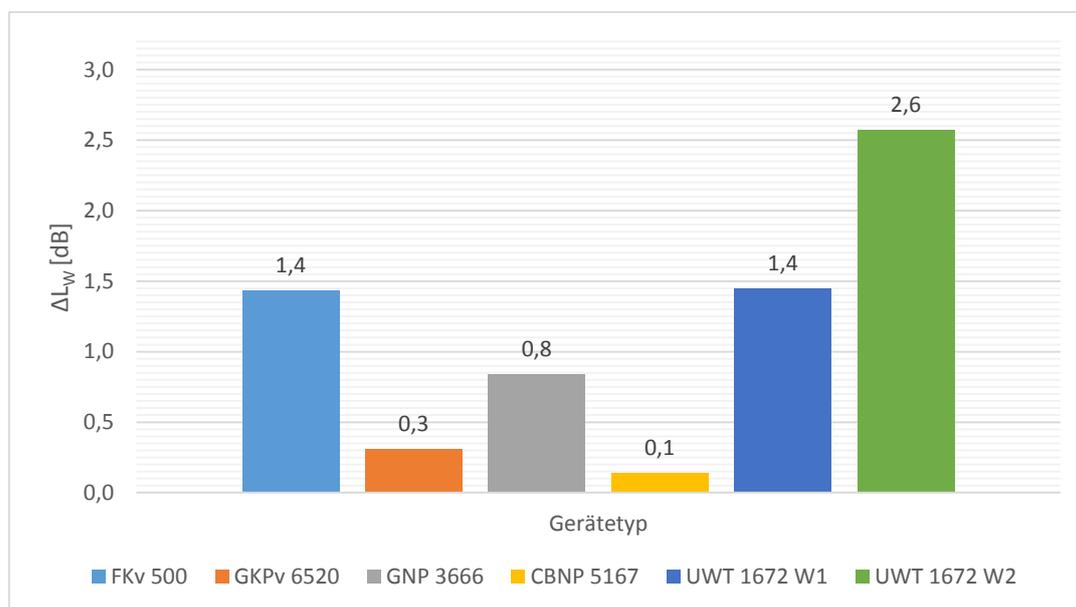


Abb. 3.4: Differenz ΔL_W [dB] zwischen LE-FFR und QM-SHR für die Zyklusbetriebe der Geräte

Wie bereits erwähnt, wurden jeweils mehrere Zyklen gemessen und dann der logarithmische Mittelwert als Ergebnis herangezogen. Es ist zu erkennen, dass der gemessene Schallleistungs-Summenpegel im LE-FFR für alle Geräte höher ist. Zusätzlich zeigt sich auch, dass die Unterschiede für die beiden Geräte, die im LE-FFR mit 10 Mikrofonen (GKPv, CBNP) vermessen wurden, geringer sind.

	L_W [dB(A)]		ΔL_W [dB]
	LE-FFR	QM-SHR	
FKv 500	28,5	27,1	1,4
GKpv 6520	57,7	57,4	0,3
GNP 3666	37,6	36,8	0,8
CBNP 5167	39,2	39,1	0,1
UWTes 1672 W1	37,2	35,8	1,4
UWTes 1672 W2	38,6	36,0	2,6

Tab. 3.3: Schallleistung-Summenpegel im Zyklusbetrieb

Sequenzbetrieb – Summenpegel

Nun werden für jedes Gerät die Schallleistungs-Summenpegel aus verschiedenen Sequenzbetrieben verglichen. Dafür wird wiederum ΔL_W herangezogen.

GNP 3666

Abb. 3.5 zeigt die Differenzen für 4 Sequenzen für das HAU-Referenzgerät GNP 3666.

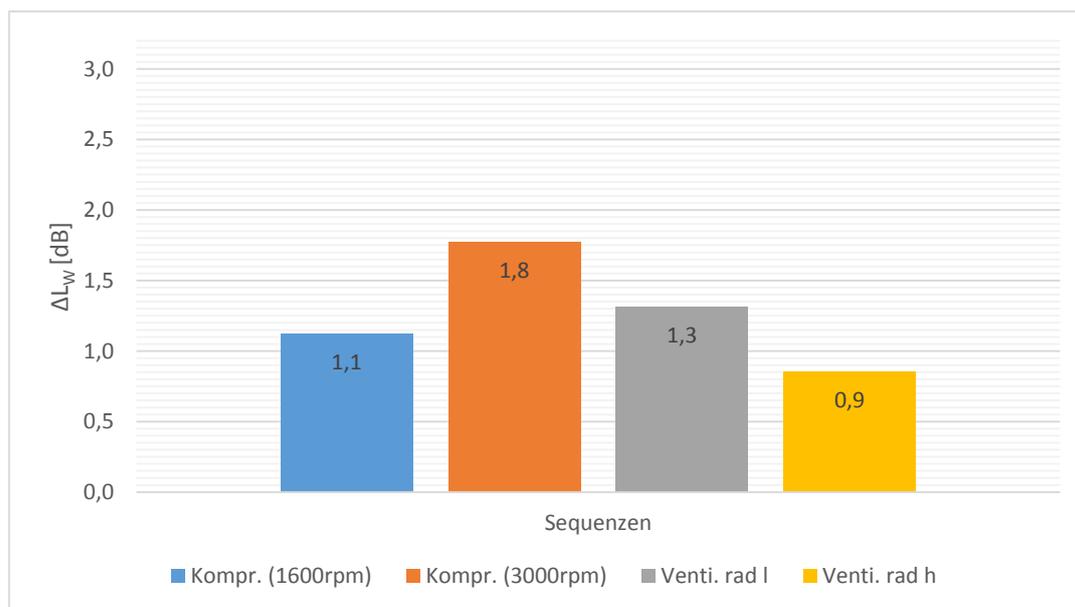


Abb. 3.5: Sequenzen im Vergleich für den GNP 3666

	L_W [dB(A)]		ΔL_W [dB]
	LE-FFR	QM-SHR	
Kompr. (1600rpm)	32,3	31,2	1,1
Kompr. (3000rpm)	36,7	34,9	1,8
Venti. rad l	29,6	28,3	1,3
Venti. rad h	35,1	34,2	0,9

Tab. 3.4: Schallleistungs-Summenpegel für den GNP 3666 im Sequenzbetrieb

Dieses Gerät wurde im LE-FFR mit 6 Mikrofonen gemessen. Der größte Unterschied zwischen beiden Räumen beträgt 1,8dB und wird für einen Kompressor-Betrieb erreicht. Es kann festgehalten werden, dass für alle 4 Sequenzen im LE-FFR die gemessenen Summen-Schallleistungspegel höher sind.

CBNP 5167

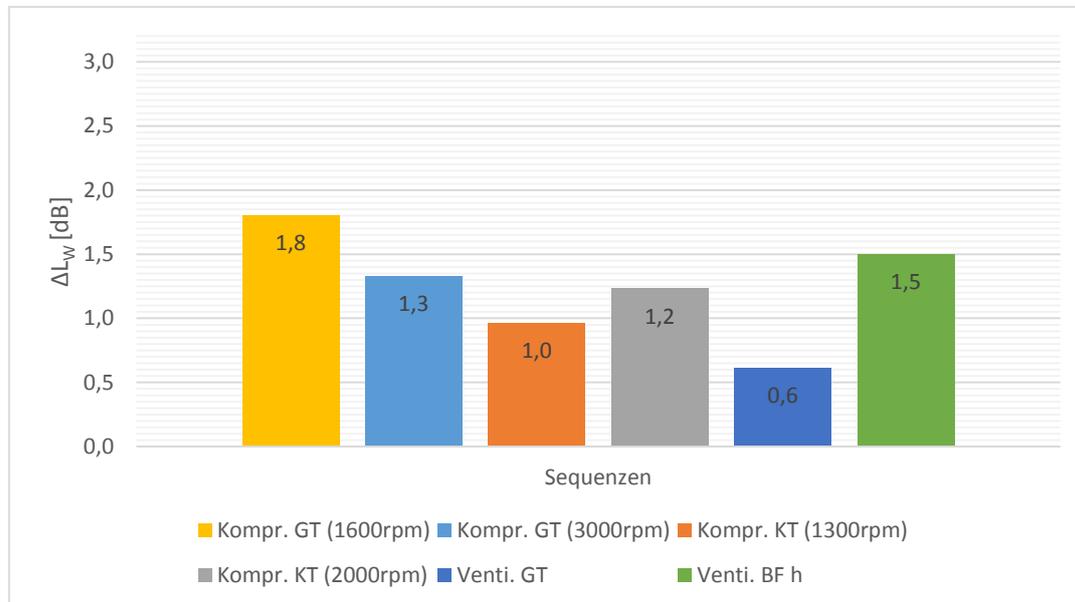


Abb. 3.6: Sequenzen im Vergleich für den CBNP 5167

	L_w [dB(A)]		ΔL_w [dB]
	LE-FFR	QM-SHR	
Kompr. GT (1600rpm)	28,2	26,4	1,8
Kompr. GT (3000rpm)	29,7	28,4	1,3
Kompr. KT (1300rpm)	30,8	29,8	1,0
Kompr. KT (2000rpm)	31,4	30,2	1,2
Venti. GT	37,9	37,3	0,6
Venti. BF h	39,9	38,4	1,5

Tab. 3.5: Schallleistungs-Summenpegel für den CBNP 5167 im Sequenzbetrieb

Abb. 3.6 zeigt das Ergebnis für den CBNP 5167. Diese Kühl-Gefrierkombination hat sehr viele Einzelkomponenten, von denen aus Gründen der Vergleichbarkeit nur einige herangezogen werden können. Es ist ein großes Gerät und wurde im LE-FFR mit 10-Mikrofonen gemessen. Auch hier sieht man, dass im LE-FFR generell höhere Pegel gemessen werden. Der maximale Unterschied von 1,8dB wird gleich wie beim GNP 3666 für einen Kompressor-Betrieb erreicht.

UWTes 1672

Für dieses Gerät wurden mit 3,1dB die größten Unterschiede zwischen beiden Messräumen gemessen. Der UWTes 1672 ist ein relativ kleines, aber sehr komplexes Gerät mit sehr vielen Einzelkomponenten und wurde im LE-FFR mit 6 Mikrofonen gemessen. Der größte Unterschied ergibt sich für den Sockelventilator bei 1080rpm. Die Kompressor-Betriebe wurden für dieses Gerät nicht für den Vergleich verwendet.

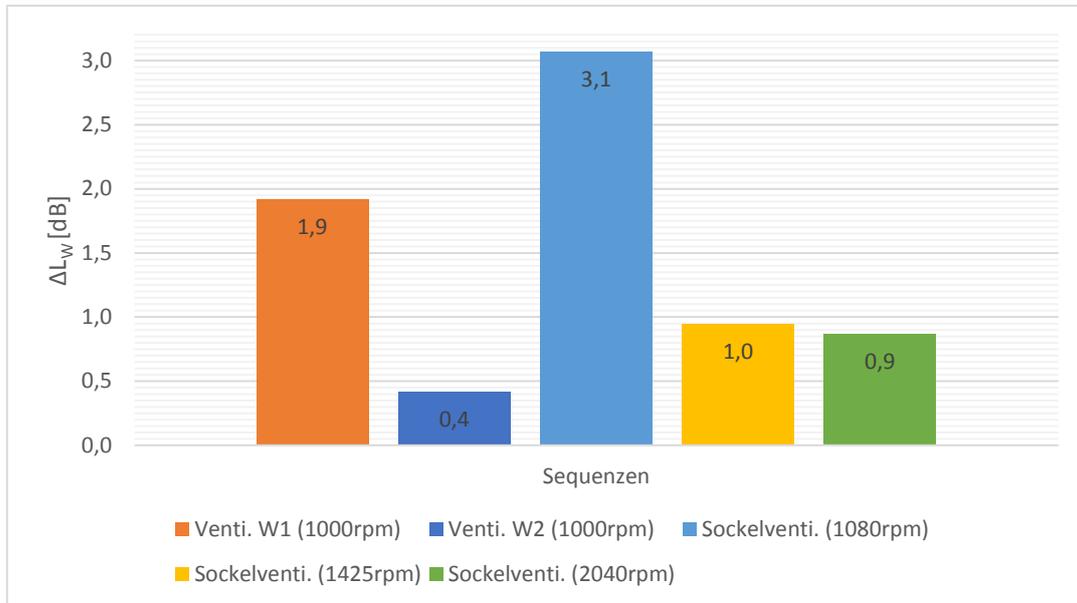


Abb. 3.7: Sequenzen im Vergleich für den UWTes 1672

	L_w [dB(A)]		ΔL_w [dB]
	LE-FFR	QM-SHR	
Venti. W1 (1000rpm)	23,6	21,7	1,9
Venti. W2 (1000rpm)	23,1	22,7	0,4
Sockelventi. (1080rpm)	36,5	33,4	3,1
Sockelventi. (1425rpm)	39,1	38,1	1,0
Sockelventi. (2040rpm)	46,5	45,6	0,9

Tab. 3.6: Schalleistungs-Summenpegel für den UWTes 1672 im Sequenz-Betrieb

3.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden sämtliche Basismessungen durchgeführt und ausgewertet. Dafür wurden zunächst die Messobjekte definiert und ausgehend davon das Messprogramm festgelegt. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass die gemessenen Summen-Pegel im LE-FFR für sämtliche Messungen größer sind als im QM-SHR.

Die zusätzliche Analyse der Terzband-Pegel (siehe Anhang A, s.107) hat gezeigt, dass hauptsächlich die Pegel aus dem unteren Messfrequenzbereich bis ca. 800Hz verantwortlich für die Differenzen sind.

4 Referenzschallquelle

Nach der genauen Erhebung des „Ist-Zustandes“ und nach Ausschluss grundlegender Fehler im Bereich der Hardware und der Berechnungsalgorithmen kann nun mit den raumakustischen Untersuchungen zum Raumabgleich begonnen werden. Für die normgerechte Bestimmung der Schallleistungspegel sind Referenzmessungen notwendig. Zum einen zur Bestimmung der K2-Umgebungskorrektur im Freifeld mit Hilfe der „Absoluten Vergleichsmessung“ und zum anderen zur Berechnung des Schallleistungspegels nach dem Vergleichsverfahren im Sonderhallraum. Deshalb ist es wichtig, die Referenzquelle genau zu kennen und die Referenzmessungen genau zu definieren. Die Referenzschallquelle oder Reference Sound Source wird im Folgenden mit RSS bezeichnet.

Kapitel 4.1 beschreibt die RSS und den Kalibriervorgang. In Kap. 4.2 wird die Abhängigkeit der abgestrahlten Schallleistung vom Abstand zur Wand in beiden Räumen untersucht.

Den Abschluss bildet wiederum die Zusammenfassung in Kapitel 4.3.

4.1 RSS

Als Vergleichsschallquelle dient in der Firma Liebherr ein aerodynamischer Lüfter der Firma Brüel & Kjaer Type 4204. Diese Quelle erfüllt die Anforderungen nach ISO 6926 für kalibrierte Schallleistungsquellen.

Arbeitsbereich

Der Arbeits-Frequenzbereich der RSS reicht von 100Hz bis 20kHz und sie liefert eine Breitband-Ausgangsleistung von ca. 91dB(A). Im Bereich von 100Hz bis 10kHz beträgt die Ausgangsleistung in jedem Terzband über 70dB. Der praktische Temperaturbereich reicht von -10°C bis +50°C.

Kalibrierung

Jede Quelle wird mit einem individuellen Kalibrierprotokoll ausgeliefert. Da die meteorologischen Parameter wie Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte das Schallfeld direkt beeinträchtigen, ist es wichtig, diese Einflüsse für die Messung entsprechend zu korrigieren, da dort meist andere Bedingungen als am Ort der Kalibrierung vorherrschen. Die meteorologischen Bezugsbedingungen für die Berechnung des Schallleistungspegels bei einer Bezugs-Schallkennimpedanz der Luft von $\rho \cdot c = 411,5 \text{Ns/m}^3$ sind ([ISO 6926] Kap. 8.4):

Lufttemperatur: $\theta_0 = 23^\circ\text{C}$

Statischer Luftdruck: $p_{s,0} = 101,325\text{kPa}$

Relative Luftfeuchte: $RH = 50\%$

Die Schallleistungs-Terzbandpegel unter meteorologischen Referenzbedingungen werden dann nach Gl.(5.5) berechnet (siehe Kap.5.2).

4.2 RSS-Schalleistung als Funktion des Wandabstandes

Die Aufstellung der RSS ist ein wichtiger Punkt, den es zu klären gilt. Bei zu naher Aufstellung an der Wand kann es zu Luftturbulenzen kommen, die zu ungünstiger Schallabstrahlung führen können. Es wird nun also ein Aufstellungsort gesucht, an dem die abgestrahlte Schalleistung unabhängig vom Wandabstand wird. Also soll die durch Messungen bestimmte Schalleistung bei Änderung des Wandabstandes der Quelle konstant bleiben.

4.2.1 LE-Freifeldraum

Für die Messung des Schalleistungspegels nach ([ISO 3744] Kap. 8.2) ist die Bestimmung der K2-Umgebungskorrektur nach ([ISO 3744] Kap. A.2) notwendig. Dazu ist eine Vergleichsschallquelle, die den Forderungen nach ([ISO 6926] Anhang A.2) entspricht, zu verwenden. Für den FFR wird dieselbe RSS wie im SHR verwendet. Die Aufstellungsorte der RSS in der Messumgebung sind in ([ISO 3744] Anhang A.2.2) angegeben.

Bei kleinen und mittelgroßen Geräten $l_1, l_2, l_3 \leq 2\text{m}$, oder bei denen das Verhältnis von Länge zu Breite kleiner als 2 ist, reicht ein Aufstellungsort für die RSS aus. Sie ist dann an einer im Wesentlichen gleichen Position wie die zu untersuchende Quelle aufzustellen, was im Fall der Kühlgeräte einer Aufstellung in der Nähe der schallharten Wand entspricht.

Bei Geräten mit einer größeren Grundfläche oder bei denen das Verhältnis von Länge zu Breite größer als 2 ist, muss die Vergleichsschallquelle am Boden an vier Punkten in Betrieb genommen werden. Diese Punkte befinden sich an den Mittelpunkten der Seiten des Rechtecks, das durch die Projektion der zu untersuchenden Quelle auf dem Boden entsteht. Zur Ermittlung von L_W ist der Messflächen-Schalldruckpegel $\overline{L_p}$ zu berechnen, der sich ergibt, wenn die Vergleichsschallquelle an jedem der vier Punkte am Boden aufgestellt wird. Es sind also für jeden Punkt der Messfläche die Schalldruckpegel von den vier Quellenorten energetisch zu mitteln. Für die Messobjekte ist das Verhältnis von Länge zu Breite nie größer als 2 und es reicht somit eine Quellenposition aus.

Da für die kleinen Geräte mit 6 Mikrofonen gemessen wird und für die großen Geräte mit 10 Mikrofonen, werden die Untersuchungen des Wandabstandes für die 6- und für die 10-Mikrofonmessung durchgeführt.

Ausgehend von den Messobjekten in Tab. 3.1, die für die Masterarbeit definiert wurden, konnten die Messflächen laut ([EN 60704-1]) bestimmt werden. Für die 6-Mikrofonmessung wird nun die Hüllfläche für das kleinste Gerät (FKv 500) verwendet und für die 10-Mikrofonmessung die Hüllfläche für das größte Gerät (GKpv 6520). Das ergibt die Mikrofonpositionen aus Tab. 4.1. Diese Positionen bilden somit die quaderförmige Messfläche um das zu untersuchende Gerät.

Nr.	x [m]	y [m]	z [m]	Nr.	x [m]	y [m]	z [m]
1	1,432	0,000	0,806	1	0,915	-1,383	0,755
2	0,716	1,213	0,806	2	1,830	0,000	0,755
3	0,716	-1,213	0,806	3	0,915	1,383	0,755
4	1,432	1,213	1,612	4	1,830	-1,383	1,510
5	1,432	-1,213	1,612	5	1,830	1,383	1,510
6	0,716	0,000	1,612	6	0,915	-1,383	2,265
				7	1,830	0,000	2,265
				8	0,915	1,383	2,265
				9	1,830	-1,383	3,115
				10	1,830	1,383	3,115

Tab. 4.1: Mikrofonpositionen für das kleinste Gerät (6-Mikrofonmessung) und für das größte Gerät (10-Mikrofonmessung)

Die Messfläche und die Mikrofonpositionen für die 6-Mikrofonmessung sind in Abb. 4.1 dargestellt.

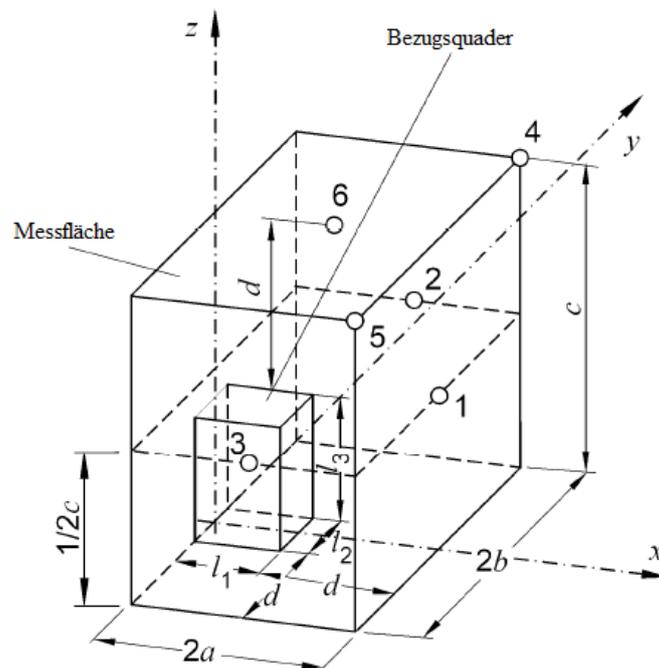


Abb. 4.1: Hüllfläche für das kleinste Gerät; 6-Mikrofonmessung

Die Messfläche und die Mikrofonpositionen für die 10-Mikrofonmessung sind in Abb. 4.2 dargestellt.

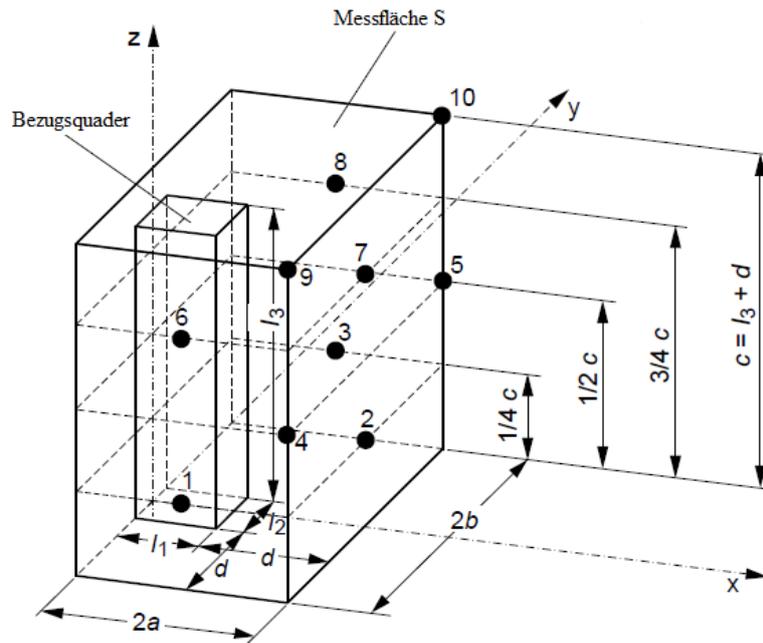


Abb. 4.2: Messfläche für das größte Gerät; 10-Mikrofonmessung

Die Messfläche S kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$S = 2 \cdot (2ac + 2ab + bc) \quad (4.1)$$

Sie beträgt für die 6-Mikrofonmessung (kleinstes Gerät) $S = 12,1\text{m}^2$ und für die 10-Mikrofonmessung (größtes Gerät) $S = 24,6\text{m}^2$. Als Referenzquelle dient für beide Messungen die Referenzschallquelle.

Der Abstand der RSS zur Wand wird jeweils um 10 cm erhöht, bis sich der Mittelpunkt der Quelle schließlich auf einer Höhe mit der vorderen Messfläche befindet.

Abb. 4.3 zeigt die Schalldruck-Summenpegel für die 6-Mikrofonmessung. Die Unterschiede im Summenpegel bewegen sich hier in einem Bereich von maximal 0,4dB. Es fällt auf, dass der Summenpegel des Schalldruckes direkt an der Wand und auf Höhe der Messfläche am geringsten ist. Im Abstand von 20 cm verläuft der Summenpegel bereits relativ konstant und fällt im Abstand von 70 cm, also ca. ab dem Mittelpunkt zwischen vorderer Messfläche und schallharter Wand, relativ linear ab. Laut den ersten Ergebnissen ist also eine Aufstellung zwischen 20 cm und 70 cm von der Wand empfehlenswert.

Es werden nun noch die Schalldruck-Terzbandpegel (Abb. 4.4) für einige Quellenpositionen untersucht. Für die Terzbandpegel betragen die Unterschiede bis zu 5dB. An der letzten Position auf Höhe der Hüllfläche befindet sich das Mikrofon Nr. 1 für diese Messung bereits im Nahfeld, was außer bei Messungen mit der Intensitätssonde generell vermieden werden sollte. Normativ gilt, wie bereits erwähnt, die Forderung, die RSS möglichst gleich zu platzieren wie das zu untersuchende Gerät.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Aufstellung der RSS in der Mitte der Messflächenbodenprojektion gut geeignet ist.

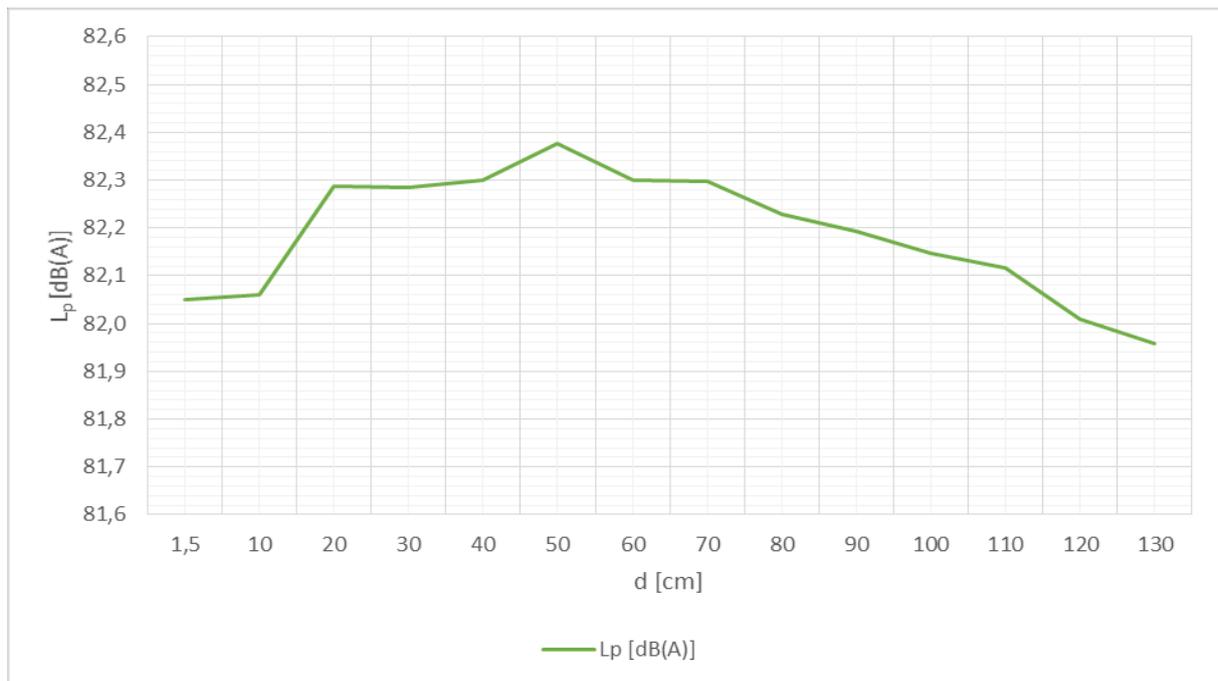


Abb. 4.3: Summenpegel des gemessenen Schalldruckes als Funktion des Wandabstandes für die 6-Mikrofonmessung

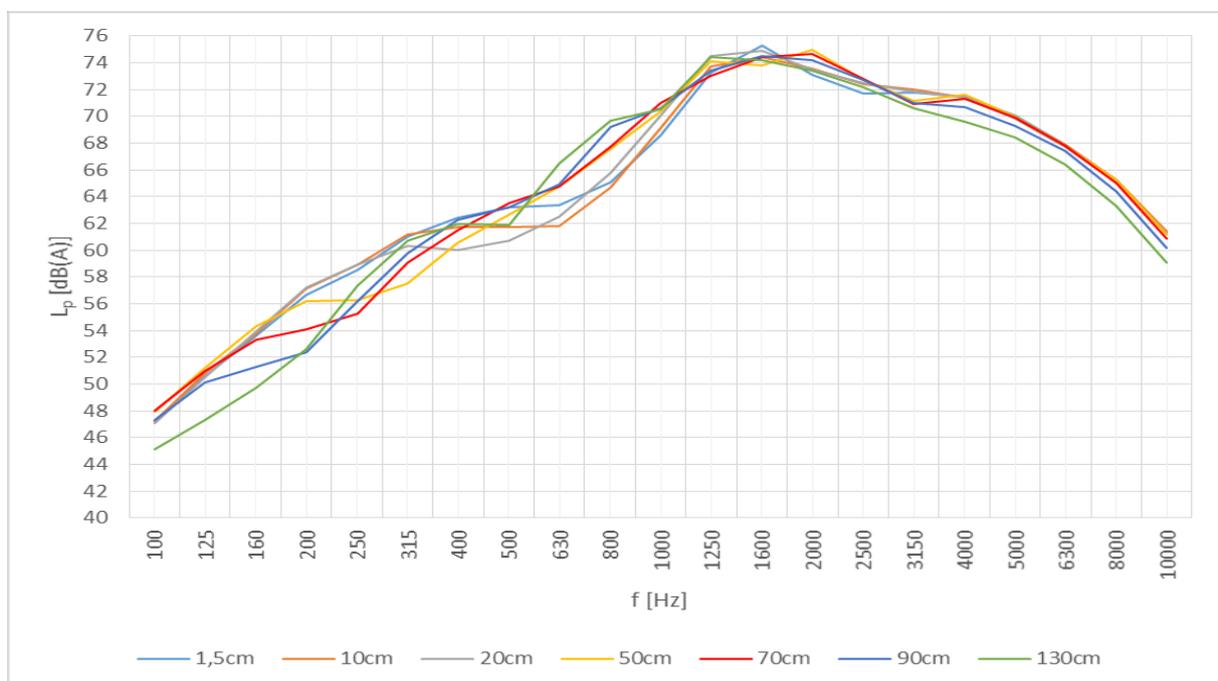


Abb. 4.4: Terzband-Schalldruckpegel als Funktion der Frequenz mit dem Parameter Wandabstand für die 6-Mikrofonmessung

Abb. 4.5 zeigt die Ergebnisse für die 10-Mikrofonmessung. Die Unterschiede für die Summenpegel haben sich verringert und betragen nun ca. 0,2dB. Dabei ist der Verlauf des Schalldruck-Summenpegels ab einem Abstand von 50cm relativ konstant und fällt ab 150cm bis auf Höhe der vorderen Messfläche wieder leicht ab.



Abb. 4.5: Summenpegel des gemessenen Schalldruckes als Funktion des Wandabstandes für die 10-Mikrofonmessung

Die Messungen zeigen somit, dass die Schwankungen im Summenpegel vor allem im Bereich zwischen 1,5cm und 30cm auftreten. Die RSS sollte deshalb nicht in diesem Bereich platziert werden.

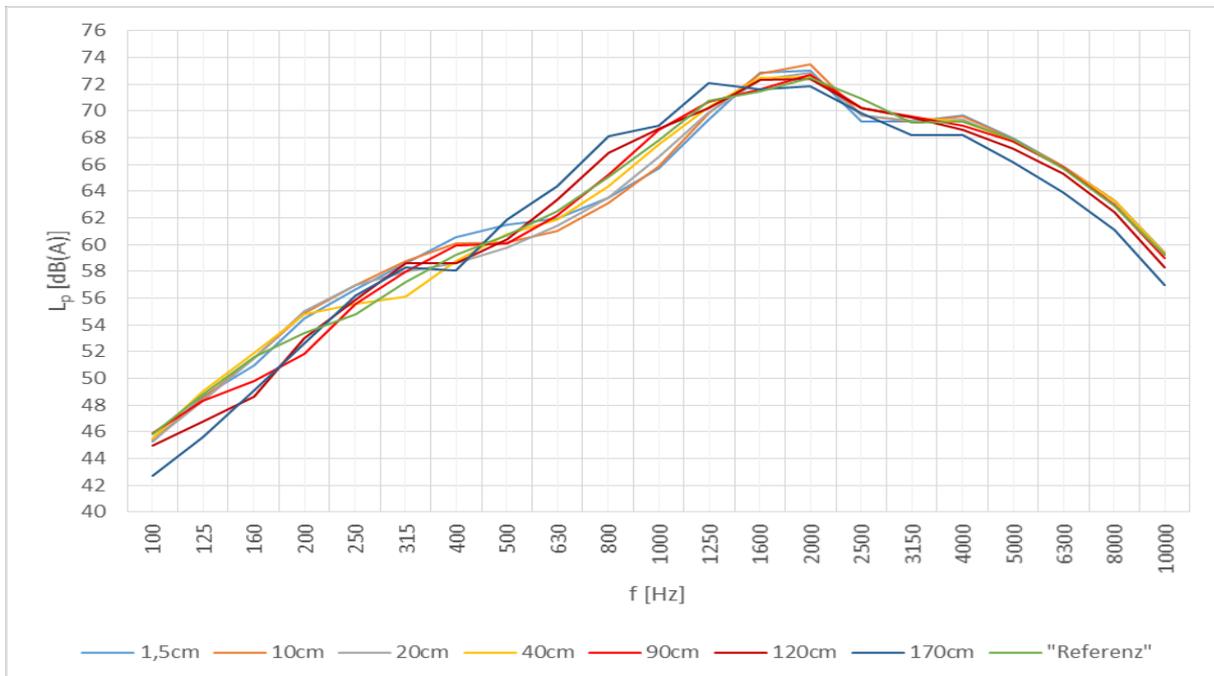


Abb. 4.6: Terzband-Schalldruckpegel als Funktion der Frequenz mit dem Parameter Wandabstand für die 10-Mikrofonmessung

Nun werden noch die Schalldruck-Terzbandpegel (Abb. 4.6) untersucht und um die bisherige Referenz-Position (Abb. 4.9) erweitert. Die Verläufe der Terzband-Schalldruckpegel sind hier

etwas konstanter als bei der 6-Mikrofonmessung, aber die max. Unterschiede betragen hier ebenfalls bis zu 5dB. Die von AEL ermittelte Referenz-Position weist eine etwas geringere Welligkeit auf. Das ergibt sich durch die Verschiebung der Quelle aus der Mittelachse der Messfläche.

Die Messungen zeigen auch für die 10-Mikrofonmessung, dass eine Platzierung der RSS in der Mitte der Messflächenbodenprojektion zu empfehlen ist.

Anzahl der Mikrofonpositionen

Die Anzahl und Aufstellungsorte der Mikrofone sind abhängig von den Abmessungen des Bezugsquaders und vom Messabstand. Je nach Art des Messobjektes gibt es unterschiedliche Bedingungen unter denen zusätzliche Mikrofonpositionen notwendig werden. Für die Messung der RSS gilt:

- a) Wenn die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen A-bewerteten Summen-Schalldruckpegel die Anzahl der Mikrofonpositionen übersteigt, sind zusätzliche Mikrofonpositionen notwendig.

Für jeden Wandabstand wird die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen A-bewerteten Schalldruck-Summenpegel gebildet. Dieses Ergebnis dient als zusätzliches Kriterium für die Wahl des günstigsten Wandabstandes.



Abb. 4.7: Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen A-bewerteten Schalldruck-Summenpegel als Funktion des Wandabstandes für die 6-Mik.-Messung; die Norm-Grenze liegt bei 6dB

Für die 6-Mikrofonmessung (Abb. 4.7) treten die größten Differenzen zwischen den Mikrofonpositionen Nr. 5 und Nr. 1 auf (vgl. Abb. 4.1). Die Grenze für ΔL_p von 6dB wird jedoch erst

für einen Wandabstand von 130cm überschritten. Für die Mitte der Messflächen-Bodenprojektion (60cm bis 80cm) liegt ΔL_p bei ca. 5dB und somit sind die 6 Mikrofonpositionen ausreichend.

Für die 10-Mikrofonmessung (Abb. 4.8) treten die größten Differenzen zwischen den Mikrofonpositionen Nr. 2 und Nr. 4 auf (Abb. 4.2). Die Grenze für ΔL_p von 10dB wird auch hier erst für Abstände von 130cm überschritten. Damit scheidet alle Positionen mit Wandabständen ab 130cm für die RSS aus. Für die Mitte der Messflächen-Bodenprojektion (80cm bis 100cm) liegt ΔL_p bei ca. 9dB und somit sind die 10 Mikrofonpositionen ausreichend.

Abb. 4.7 und Abb. 4.8 zeigen ΔL_p für die Messung mit der RSS, also mit einer omnidirektional abstrahlenden Quelle. Für die Messobjekte wurde ΔL_p gesondert überprüft (siehe Kap.5.4).

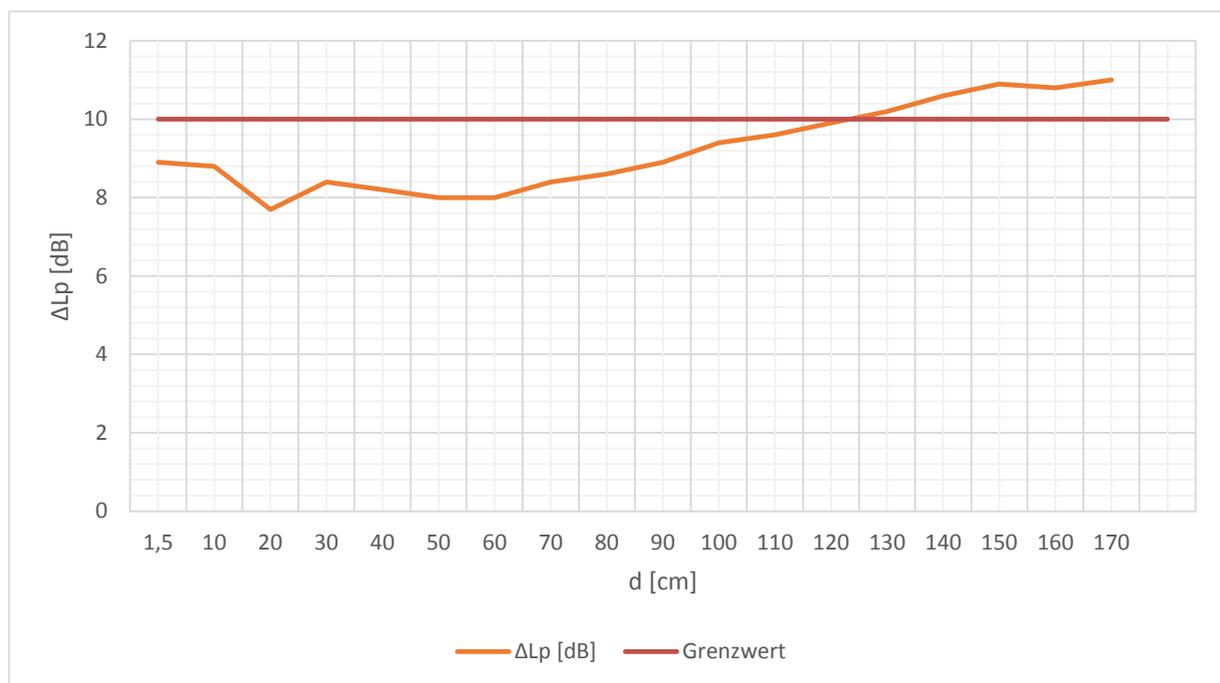


Abb. 4.8: Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen A-bewerteten Schalldruck-Summenpegel als Funktion des Wandabstandes für die 10-Mik.-Messung; die Norm-Grenze liegt bei 10dB

4.2.2 QM-Sonderhallraum

Für die Bestimmung der Bandschalleistungspegel mit Hilfe des Vergleichsverfahrens nach ([ISO 3743-2] Kap.8.3) wird eine entsprechende Vergleichsquelle benötigt. Diese muss den Anforderungen im Anhang A der entsprechenden Norm genügen.

Laut Norm muss die RSS am Boden und mindestens 1,5m von jeder reflektierenden Fläche entfernt aufgestellt sein. Der Mindestabstand zwischen der Quelle und einem Mikrofon beträgt $d_{\min} = 1,9\text{m}$.

Von der Firma AEL wurde im Zuge der Abnahmemessung bereits eine „ideale Position“ für die RSS bestimmt (Abb. 4.9). Das Kriterium für die Wahl dieser Position war, dass sich die über eine Intensitätssonde bestimmte Schalleistung bei Vergrößerung des Abstandes zur Wand nicht mehr ändern darf. Diese Position erfüllt jedoch nicht den in der Norm geforderten Mindestabstand von 1,5m zur Wand.



Abb. 4.9: „Referenz-Position“ für die RSS

Um nun auch für den QM-SHR die Abhängigkeit der Schallabstrahlung der RSS vom Abstand zur Wand zu ermitteln, wurde der Wandabstand jeweils um 10cm vergrößert und für jede Quellenposition der Schalldruck-Summenpegel bestimmt. Das Ergebnis ist in Abb. 4.10 zu sehen.

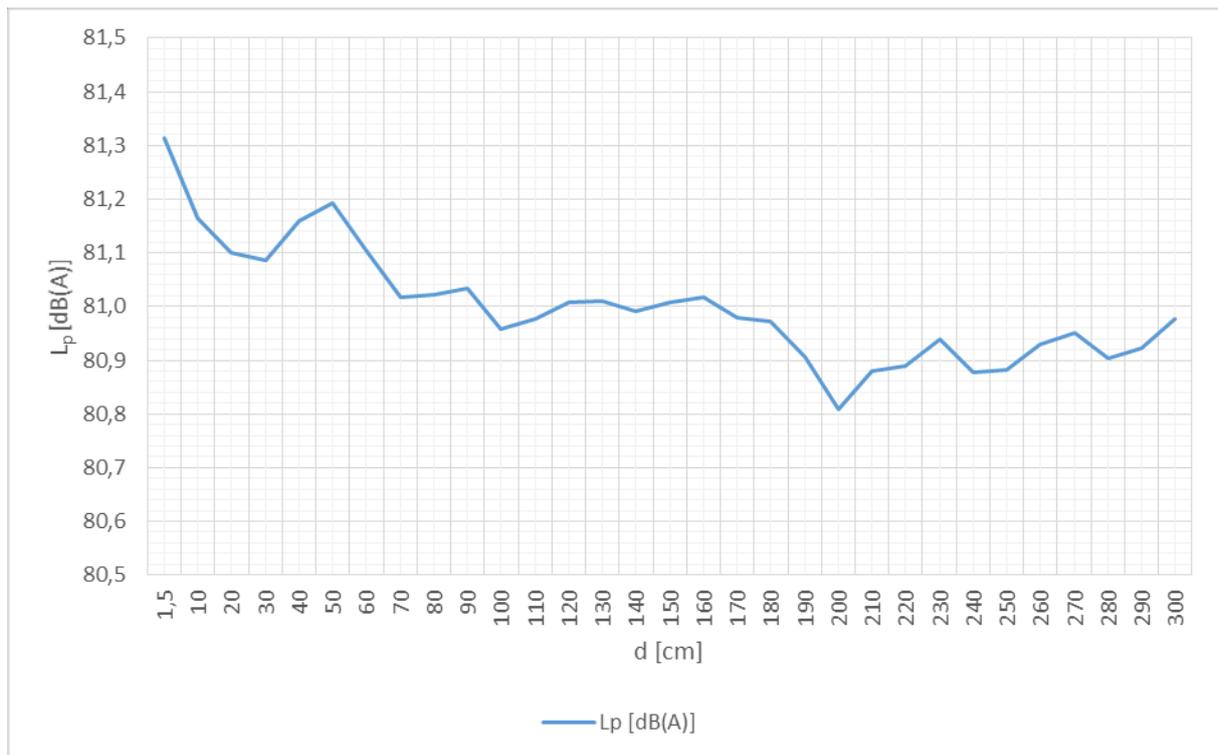


Abb. 4.10: Summenpegel des gemessenen Schalldruckes als Funktion des Wandabstandes im QM-SHR

Die Unterschiede für die Summenpegel bewegen sich in einem Bereich von 0,5dB. Am höchsten ist der Schalldruck-Summenpegel direkt an der schallharten Wand (1,5cm). Er fällt dann bis zum Abstand von 30cm relativ steil ab und hat dann nochmals eine kleine Überhöhung bis in 70cm Abstand. Ab hier ist der Abstand größer als der zweifache Quellendurchmesser (30cm). Von 70cm bis 170cm ist der Verlauf dann relativ konstant, hat dann nochmals einen Einbruch bei 200cm und bleibt dann wieder relativ konstant bis zum Abstand von 300cm. Es kann somit beobachtet werden, dass der gemessene Schalldruck-Summenpegel für Abstände kleiner 70cm um 0,3dB variiert, was auch Auswirkungen auf die Berechnung des Schalleistungspegels im Vergleichsverfahren hat. Da nicht davon auszugehen ist, dass sich die Luftturbulenzen an der Wand immer gleich verhalten, sind diese zu vermeiden und somit ein Abstand größer 70cm zu wählen. Für den in der Norm geforderten Abstand von 150cm wurde ein Schalldruck-Summenpegel von ca. 81dB(A) gemessen. Dieser Wert entspricht in etwa dem arithmetischen Mittel des Bereichs, in dem sich die Abweichungen bewegen.

Um zu erkennen, ob es abhängig vom Wandabstand zu einer Erhöhung in bestimmten Frequenzbereichen kommt, werden nun noch für einige Abstände die Schalldruck-Terzbandpegel (100Hz bis 10kHz) verglichen. Dabei wurde auch die Referenz-Position gemessen (Abb. 4.11).

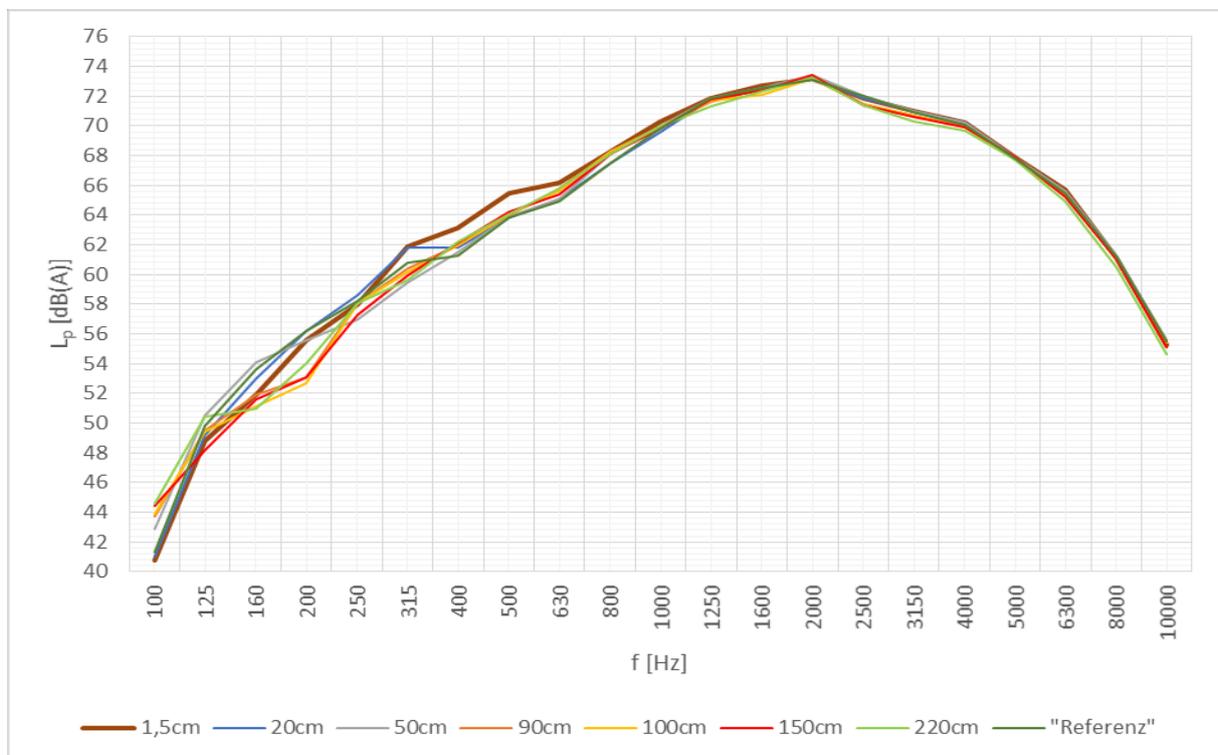


Abb. 4.11: Terzband-Schalldruckpegel als Funktion der Frequenz mit dem Parameter Wandabstand

Die max. Unterschiede für die Schalldruck-Terzbandpegel liegen in einem Bereich von ca. 3,3dB. Ab einer Frequenz von 400Hz sind die Verläufe größtenteils gleich. Lediglich für die Position direkt an der Wand (1,5cm) zeigt sich noch eine Pegelüberhöhung bis ca. 700Hz. Unter 400Hz zeigen sich Unterschiede zwischen den verschiedenen Quellenpositionen.

Ausgehend von der Annahme, dass es sich bei der RSS um eine ideale Rauschquelle handelt, und sich die Unterschiede in den Messungen durch die Störung der Schallabstrahlung in der Nähe der Wand ergeben, besteht die Forderung, dass die RSS für die Vergleichsmessung in einem Bereich platziert wird, in dem die Schallabstrahlung weitestgehend unabhängig vom Wandabstand ist. Die Ergebnisse zeigen, dass der Abstand der RSS zur Wand nur im tieferen Mess-Frequenzbereich Auswirkungen hat. Um auch das zu vermeiden, sollte ein Abstand von mindestens 100cm gewählt werden, denn darüber bleibt der Schalldruckpegelverlauf auch für einen größeren Wandabstand relativ konstant. In den Messungen zeigt sich auch, dass der in der Norm geforderte Mindestabstand von der Wand von 150cm gut als Referenzposition geeignet ist.

4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die RSS der Firma Liebherr genau dokumentiert und eine Referenzposition für die Vergleichsmessungen für beide Räume ermittelt.

Im LE-FFR sollte die RSS jeweils in der Mitte der Messflächenbodenprojektion platziert werden. Im QM-SHR sollte sie in 1,5m Abstand zur Wand aufgestellt werden.

Abb. 4.12 zeigt den Vergleich der Schalleistungs-Summenpegel der 3 Messungen. Im Vergleichsverfahren im Diffusfeld wird die Schalleistung einer unbekanntem Quelle bestimmt, indem die gemessenen Schalldrücke dieser unbekanntem Quelle mit den gemessenen Schalldrücken der RSS mit bekannter Schalleistung verglichen werden Gl.(5.17). Da für diese Messung die RSS nun sowohl die unbekanntem Quelle als auch die bekannte Quelle darstellen würde, wurde für diese Betrachtungen die Schalleistung im QM-SHR im Direktverfahren berechnet. Dafür wurde die in Kapitel 2.2.3 bestimmte Nenn-Nachhallzeit T_{nom} aus der Abnahmemessung der Firma AEL verwendet. Die Berechnung erfolgte ohne K1-Fremdgeräuschkorrektur und ohne den Bezug auf meteorologische Referenzbedingungen (C_1 , C_2).

Im LE-FFR wurde die Schalleistung über das Vergleichsverfahren berechnet. Auch hier erfolgte die Berechnung ohne K1-Fremdgeräuschkorrektur und ohne den Bezug auf meteorologische Referenzbedingungen (C_1 , C_2). Für die Bestimmung der K2-Umgebungskorrektur wurde das Kalibrierzeugnis der RSS (letzte Kalibrierung durch B&K in Schweden) verwendet.

Daraus ergibt sich das Ergebnis in Abb. 4.12. Im Bereich zwischen 1,5cm und 170cm Wandabstand bewegen sich die Unterschiede im Summenpegel der Schalleistung in einem Bereich von ca. 0,7dB. Wird im QM-SHR der Wandabstand über 180cm vergrößert, können die Differenzen noch leicht steigen auf bis zu 0,9dB.

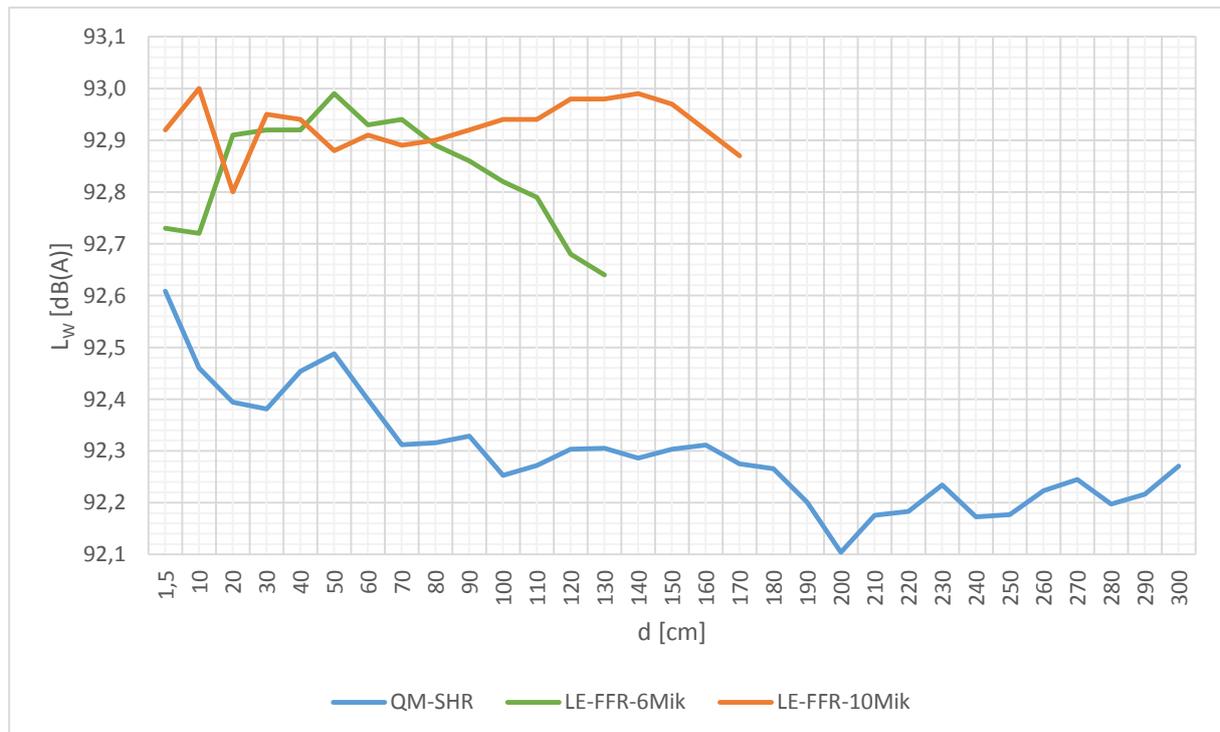


Abb. 4.12: Vergleich der Schalleistungs-Summenpegel der 3 Messungen vor der Optimierung

5 Optimierung

Dieses Kapitel widmet sich den Optimierungen, die zur Steigerung der Messgenauigkeit beitragen bzw. zum Raumabgleich führen sollen.

Kap. 5.1 beschäftigt sich mit der Grenzfrequenzabschätzung für den Sonderhallraum, Kap. 5.2 betrifft die Schalleistungsberechnung in beiden Schallfeldern. Hier werden sämtliche Berechnungen nach Genauigkeitsklasse 1 und 2 und eine quantitative Abschätzung der jeweiligen Korrekturfaktoren angegeben.

Kapitel 4.3 enthält Abnahmemessungen zum QM-SHR, in Kapitel 4.4 folgen die Abnahmemessungen zum LE-FFR.

Kapitel 5.5 enthält eine genaue Analyse des Fremdgeräusches in beiden Messräumen, in Kap. 5.6 wird die Erstellung eines eigenen, auf die Messung in einer Raumkante angepassten Kalibrierzeugnisses beschrieben.

Kapitel 5.7 zeigt die Verwendung der Frequenzgangkorrektur für die Mikrofone.

Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung in Kapitel 5.8.

5.1 Eigenmoden und Grenzfrequenzen im QM-SHR

In einem Raum können bestimmte diskrete Frequenzen durch Resonanz hervorgehoben werden. Diese sogenannten Eigenmoden können in der Messtechnik zu fehlerhaften Ergebnissen führen. In größeren Räumen oder in speziellen Messräumen (Hallräume) liegen ab einer bestimmten Grenzfrequenz in jedem Frequenzintervall so viele Eigenmoden mit sich überlappenden Resonanzkurven, dass es nicht mehr zu einer störenden Hervorhebung von diskreten Frequenzen kommt, sondern zu einer gleichmäßigen Anhebung des Schallfeldes (Diffusfeld). Es gibt verschiedene Diffusitäts-Grenzfrequenz-Abschätzungen ab denen obige Voraussetzungen als näherungsweise erfüllt gelten.

Wählt man, ausgehend von einem rein technischen Ansatz, als Anforderung für ausreichende Diffusität mind. 1 schräge Eigenmode je 1Hz Absolutbandbreite, so ergibt das die erste Grenzfrequenz-Abschätzung ([AMT] Kap. 6.2):

$$f_{g1} \approx \frac{1800}{\sqrt{V}} = 114 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

Wählt man einen gehörangepassten Ansatz, also eine Anforderung in Verbindung mit einer relativen Bandbreite, ergibt das eine zweite Grenzfrequenzabschätzung für ausreichende Diffusität ([AMT] Kap. 6.2). Für 20 schräge Eigenmoden je Halbtonintervall gilt:

$$f_{g2} \approx \frac{1000}{\sqrt[3]{V}} = 159 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

Wird nun zusätzlich die Güte der Resonanzen betrachtet, also die Eigenheit der Modenüberlappung oder der „modal overlap“ M , ergeben sich weitere Grenzfrequenzabschätzungen.

Wählt man als Anforderung für ausreichende Diffusität eine Modenüberlappung $M = 1$, also mindestens 1 schräge Eigenmode je 3dB-Halbwertsbreite, so ergibt sich die Grenzfrequenzabschätzung f_{g3} ([AMT] Kap. 6.2).

f_{g3} entspricht jener Frequenz, für die folgende Beziehung gilt:

$$f_0 \approx 1000 \cdot \sqrt{\frac{T(f_0)}{V}} \Rightarrow f_{g3} < 100 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

Wählt man den Ansatz gemäß Schröder (Schröderfrequenz), also eine Modenüberlappung von mindestens $M = 3$, d.h. mindestens 3 schräge Eigenmoden je 3dB-Halbwertsbreite, ergibt sich die Grenzfrequenzabschätzung f_{g4} ([AMT] Kap. 6.2).

f_{g4} entspricht jener Frequenz, für die folgende Beziehung gilt:

$$f_0 \approx 2000 \cdot \sqrt{\frac{T(f_0)}{V}} \Rightarrow f_{g4} \approx 140 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

Mit Hilfe einer Matlab Simulation werden nun für das 100Hz-Terzband, das 125Hz-Terzband und das 160Hz-Terzband die Eigenmoden für den QM-SHR bestimmt.

Frequenzbereich [Hz]	Anzahl der Eigenmoden je Terzband		
	Axial	Tangential	Schräg
89 < (100) < 112	3	12	10
112 < (125) < 141	3	18	22
141 < (160) < 179	3	33	51

Tab. 5.1: Anzahl der Eigenmoden für 3 Terzbänder im QM-SHR

Werden zur stärkeren Überdeckung der Moden unterhalb der Grenzfrequenz Tiefenabsorber in den Raum eingebracht, werden für die Beschränkung der Nachhallzeit Grenzen laut Abb. 5.1 empfohlen. Dabei ist nach Schrödinger eine stärkere Bedämpfung der störenden Moden gefordert, was gleichzeitig zu einer höheren Modenkopplung führt. Diese Empfehlungen für die Nachhallzeit kommen somit erst für tiefe Frequenzen ($< f_g$) zum Tragen. Über die Schnittpunkte zwischen der gemessenen Nachhallzeit und den empfohlenen Nachhallzeiten kann somit die Grenzfrequenzabschätzung für f_{g3} (laut ISO 3741) bzw. f_{g4} (laut Schrödinger) erfolgen.

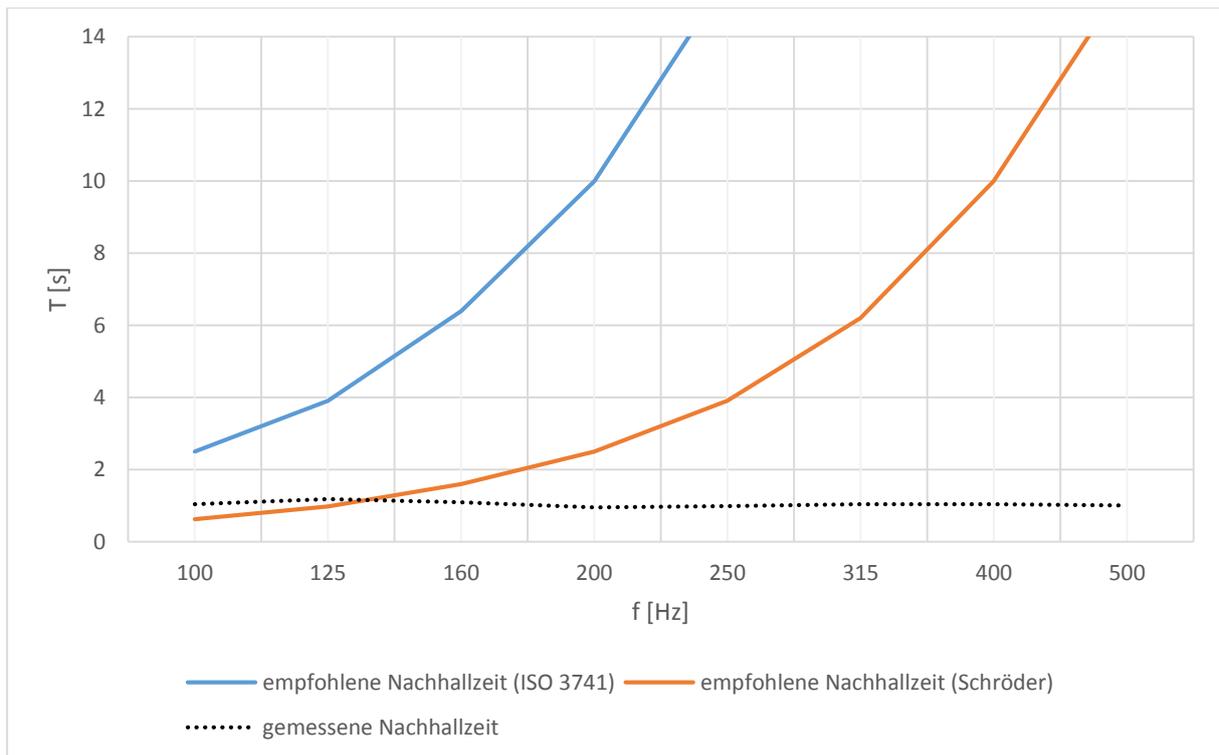


Abb. 5.1: Bereich der empfohlenen Nachhallzeiten verglichen mit den gemessenen Werten

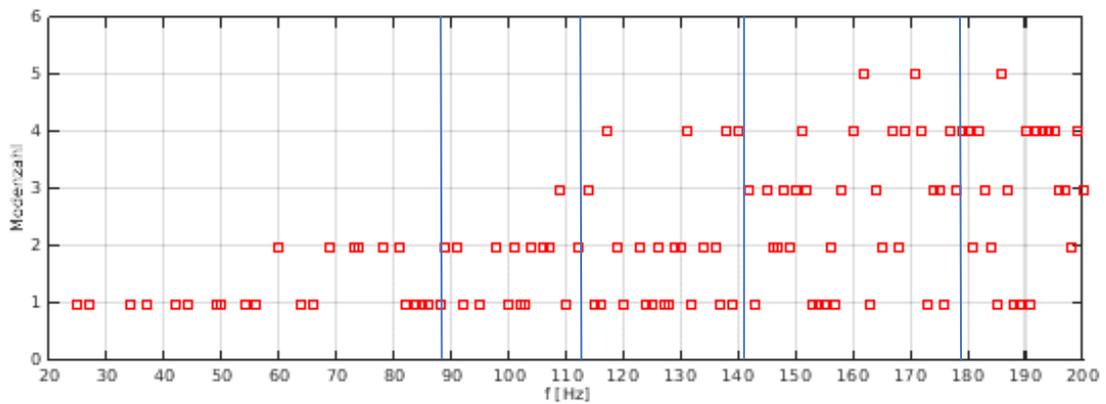


Abb. 5.2: Eigenmodendichte bis 200Hz und Darstellung der Mehrfachmoden bei einer Frequenzauflösung von 1Hz (247 Moden: 129 schräge, 98 tangentiale, 20 axiale)

100Hz-Terz			125Hz-Terz			160Hz-Terz									
f [Hz]	Eigenmode			f [Hz]	Eigenmode			f [Hz]	Eigenmode			f [Hz]	Eigenmode		
89	3	0	1	114	0	2	3	142	1	1	4	162	3	5	2
89	1	2	2	114	4	0	1	142	0	4	3	163	6	0	0
91	2	1	2	114	2	3	2	142	5	1	1	164	3	4	3
91	2	3	0	115	3	3	1	143	1	5	2	164	4	5	0
92	3	1	1	116	2	0	3	145	5	2	0	164	1	6	2
95	3	2	0	117	4	1	1	145	1	4	3	165	2	3	4
98	2	3	1	117	1	2	3	145	3	4	2	165	6	1	0
98	0	4	0	117	2	4	1	146	0	2	4	167	4	3	3
100	2	2	2	117	3	2	2	146	4	4	0	167	6	0	1
101	0	3	2	119	2	1	3	147	0	6	0	167	3	2	4
101	3	2	1	119	4	2	0	147	3	5	0	167	4	5	1
102	1	4	0	120	0	4	2	148	2	0	4	168	5	4	0
103	0	0	3	122	0	5	0	148	4	3	2	168	3	6	0
104	0	4	1	123	1	4	2	148	1	2	4	169	0	4	4
104	1	3	2	124	4	2	1	149	5	2	1	169	6	1	1
106	0	1	3	125	1	5	0	149	1	6	0	169	2	5	3
106	1	0	3	126	2	2	3	150	2	1	4	169	5	3	2
107	3	0	2	126	0	3	3	150	4	0	3	171	6	2	0
107	1	4	1	127	0	5	1	150	4	4	1	171	5	0	3
109	4	0	0	128	3	4	0	151	3	3	3	171	1	4	4
109	1	1	3	129	4	0	2	151	2	5	2	171	2	6	2
109	3	1	2	129	1	3	3	151	0	6	1	171	5	4	1
110	3	3	0	130	3	3	2	151	3	5	1	172	0	7	0
112	4	1	0	130	1	5	1	152	4	1	3	172	0	0	5
112	2	4	0	131	4	1	2	152	2	4	3	172	3	6	1
				131	3	0	3	152	5	0	2	172	5	1	3
				131	4	3	0	153	1	6	1	173	0	1	5
				131	2	4	2	154	5	1	2	174	1	0	5
				132	3	4	1	155	5	3	0	174	1	7	0
				134	3	1	3	156	2	2	4	174	6	2	1
				134	2	5	0	156	0	3	4	175	0	7	1
				136	4	3	1	157	2	6	0	175	4	0	4
				136	5	0	0	158	4	2	3	175	1	1	5
				137	0	0	4	158	1	3	4	176	3	3	4
				138	2	3	3	158	5	3	1	177	4	1	4
				138	4	2	2	160	3	0	4	177	1	7	1
				138	5	1	0	160	0	5	3	177	6	0	2
				138	2	5	1	160	5	2	2	177	2	4	4
				139	0	1	4	160	2	6	1	178	5	2	3
				140	1	0	4	162	3	1	4	178	4	5	2
				140	3	2	3	162	4	4	2	178	0	2	5
				140	5	0	1	162	0	6	2	179	6	1	2
				140	0	5	2	162	1	5	3	179	4	4	3
												179	6	3	0
												179	0	6	3

Tab. 5.2: sämtliche Eigenmoden der 100Hz-, der 125Hz- und der 160Hz-Terz

Der Gleichungsapparat zur Grenzfrequenzabschätzung berücksichtigt lediglich die schrägen Moden. Wie jedoch in Tab. 4.2 zu sehen, ist die Anzahl der axialen und besonders die Anzahl der tangentialen Moden für die ersten 3 Terzen keineswegs vernachlässigbar. Im tiefen Messfrequenzbereich kommt deshalb die Gesamtanzahl der Moden für die Grenzfrequenzabschätzung zu tragen.

Für die 100Hz-Terz ergibt sich ein Frequenzintervall von $\Delta f = 23\text{Hz}$. Nach Tab. 5.1 bzw. Tab. 5.2 werden die Kriterien für die Anzahl der schrägen Moden für keine der Grenzfrequenzabschätzungen erfüllt, wird jedoch die Gesamtanzahl von 25 Moden betrachtet, ergibt das 1 Mode je Hz was zumindest die Grenzfrequenzabschätzung nach f_{g1} und f_{g3} erfüllt.

Für die 125Hz-Terz erfüllt die Anzahl an schrägen Moden lediglich die Kriterien nach f_{g3} . Werden jedoch wiederum alle Moden betrachtet, ergibt das ca. 1,5 Moden je 1Hz, was die Kriterien nach f_{g1} , f_{g3} und f_{g4} erfüllt.

Für die 160Hz-Terz kann die Anzahl an schrägen Moden das Kriterium nach f_{g2} immer noch nicht vollständig erfüllen. Bei Betrachtung sämtlicher Moden werden hier aber alle Kriterien erfüllt.

Bis zum 125Hz-Terzband hinunter sollte somit die Anzahl an Moden groß genug für ein ausreichend diffuses Schallfeld sein. Durch die große Absorberfläche im Sonderhallraum von ca. 1m^2 je 4m^3 Raumvolumen ist die Modenkopplung sehr hoch, was eine Verschiebung der Grenzfrequenz nach unten zusätzlich begünstigt.

5.2 Berechnung der Schalleistung

In diesem Kapitel werden die Schalleistungsberechnungen nach Genauigkeitsklasse 1 und 2 im freien Schallfeld und im Diffusfeld laut der jeweiligen Norm aufgeführt und es wird eine quantitative Abschätzung der Korrekturfaktoren gegeben.

Freifeld

Genauigkeitsklasse 1

Die gültige Norm ist EN ISO 3745 von 2012. Der Schalleistungspegel unter meteorologischen Referenzbedingungen (vgl. Kap. 4.1) berechnet sich über folgende Gleichung (Direktverfahren):

$$L_W = \bar{L}_p + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) + C_1 + C_2 + C_3 \quad (5.5)$$

Dabei ist im Halbfreifeld $S = 2\pi r^2$ die Oberfläche der halbkugelförmigen Messfläche mit Radius r und $S_0 = 1\text{m}^2$. \bar{L}_p ist der zeitlich gemittelte Messflächenschalldruckpegel (siehe Anhang B) auf der halbkugelförmigen Messfläche in dB und berechnet sich für Messflächen mit Teilflächen gleichen Flächeninhalts über:

$$\bar{L}_p = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 \cdot L_{pi}}\right) \quad (5.6)$$

$$L_{pi} = L'_{pi(ST)} - K_{1i} \quad (5.7)$$

$L'_{pi(ST)}$ ist der gemessene zeitlich gemittelte Terzband-Schalldruckpegel des zu untersuchenden Geräts an der i -ten Mikrofonposition; N_M ist die Anzahl der Mikrofonpositionen. Die Werte des Messflächenschalldruckpegels \bar{L}_p können mit einem Bewertungsfilter (z.B. A-bewertet), breitbandig oder mit Terzfiltern ermittelt werden. Die Fremdgeräuschkorrektur K_{1i} ist für jede Mikrofonposition nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$K_{1i} = -10 \cdot \log\left(1 - 10^{-0,1 \Delta L_{pi}}\right) \quad (5.8)$$

Dabei ist $\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}$, also der in dB angegebene, zeitlich gemittelte Terzband-Schalldruckpegel des zu untersuchenden Geräts (ST), gemessen an der i -ten Mikrofonposition minus des in dB angegebenen zeitlich gemittelten Schalldruck-Terzbandpegels des Fremdgeräusches (B) gemessen an der i -ten Mikrofonposition. Wenn die über alle Mikrofonpositionen gemittelte Differenz zwischen dem Pegel des Fremdgeräusches und dem der zu untersuchenden Geräuschquelle in allen Frequenzbändern mindestens 6dB und für Terzbänder mit Mittenfrequenzen zwischen 250Hz und 5000Hz mindestens 10dB beträgt, ist eine Korrektur laut Gl.(5.7) durchzuführen. Ist dies nicht erfüllt, wird $K_1 = 1,3\text{dB}$ gesetzt und die Kriterien für das Fremdgeräusch nach dieser Norm gelten als nicht erfüllt.

C_1 ist die in dB angegebene Korrektur zur Berücksichtigung des meteorologischen Einflusses auf die Schallkennimpedanz von Luft ([AMT] Kap. 6.4):

$$C_1 = -10 \cdot \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 5 \cdot \log \left[\frac{273 + \Theta}{\Theta_0} \right] \quad (5.9)$$

C_2 ist die in dB angegebene Korrektur des meteorologischen Einflusses auf die abgestrahlte Schallleistung. Die meteorologischen Umstände beeinflussen die Leistung, die von einer Quelle abgestrahlt wird und es ist deshalb notwendig, alle gemessenen Schallleistungen, auf meteorologische Bezugsbedingungen umzurechnen. Der Wert ist der maschinenspezifischen Geräuschmessnorm (DIN EN 60704-1 bzw. 60704-2-14) zu entnehmen. Ist dort keiner angegeben gilt folgende Gleichung:

$$C_2 = -10 \cdot \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 15 \cdot \log \left[\frac{273 + \Theta}{\Theta_1} \right] \quad (5.10)$$

Sie gilt für Kugelstrahler 0. Ordnung bei $k \cdot r < 1$ und liefert eine gute Näherung für andere Strahlertypen. In der Geräuschmessnorm DIN EN 60704-1 bzw. 60704-2-14 werden keine Angaben zu C_2 gemacht und es ist somit Gl.(5.10) anzuwenden. Dabei ist p_s der statische Luftdruck zum Messzeitpunkt und am Messort und kann nach $p_s = p_{s,0} \cdot (1 - \alpha \cdot H_a)^b$ berechnet werden. H_a ist die Höhe des Messortes in m, $\alpha = 2,256 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $b = 5,2553$ und $p_{s,0}$ ist der Bezugswert des statischen Luftdrucks von 101,325kPa; Θ ist die Lufttemperatur in °C zum Messzeitpunkt und am Messort und $\Theta_0 = 314\text{K}$ die Temperatur bei der (bei $p_{s,0}$) die Schallintensität und der Schalldruck bei Messung in einer ebenen Welle identische dB-Werte aufweisen; $\Theta_1 = 296\text{K}$. Die Herleitung für C_1 und C_2 kann in ([AMT] Kap. 6.4) nachgelesen werden.

Im derzeitigen Messsystem wird nicht die Schallkennimpedanz der Luft unter den meteorologischen Bedingungen zum Messzeitpunkt und am Messort berücksichtigt, sondern es wird lediglich die charakteristische Schallkennimpedanz von $400 \text{ N}_s/\text{m}^3$ verwendet. Die Umrechnung auf meteorologische Bezugsgrößen ist nicht implementiert. Um die dadurch entstehende Ungenauigkeit abzuschätzen, wird zunächst der Temperaturbereich im Messraum ermittelt und daraus der Bereich der Korrektur bestimmt.

	Θ_{min} [°C]	Θ_{max} [°C]	p_s [kPa]	$p_{s,0}$ [kPa]	Θ_0 [K]	Θ_1 [K]
	19	24	102	101,325	314	296
C_1 [dB]	-0,19	-0,15				
C_2 [dB]	-0,06	0,05				

Tab. 5.3: Korrektur der meteorologischen Bedingungen im LE-FFR

Tab. 5.3 zeigt die Korrekturen C_1 und C_2 für die minimale und maximale Temperatur im Messraum. Da sich die Temperatur und der statische Luftdruck nicht massiv von den Referenzbedingungen unterscheiden, fallen die Korrekturen auch relativ gering aus.

C_3 ist die Korrektur bezüglich der Luftabsorption in dB.

$$C_3 = A_0 (1,0053 - 0,0012 \cdot A_0)^{1,6} \quad (5.11)$$

$A_0 = \alpha(f) \cdot r$ in dB, wobei $\alpha(f)$ der Dämpfungskoeffizient als Funktion der Frequenz für die spezifische Temperatur, die relative Luftfeuchte und den statischen Luftdruck angegeben in dB pro m und r der Messradius in m ist. $\alpha(f)$ kann nach den Gleichungen 3 bis 5 von ISO 9613-1:1993 oder nach ([TA] Kap. 1.4.2) berechnet werden.

Dieser Korrekturfaktor wird nur im Freifeld oder Halb-Freifeld nach Genauigkeitsklasse 1 berücksichtigt und wird hier für den LE-Viertel-Freifeldraum deshalb nur der Vollständigkeit halber für einen mittleren Mikrofonabstand von 2,3m bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 50% angegeben:

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	A_0 [dB]	C_3 [dB]
63	0,000	0,000
125	0,000	0,000
250	0,000	0,000
500	0,001	0,001
1000	0,003	0,003
2000	0,014	0,014
4000	0,054	0,055
8000	0,218	0,220

Tab. 5.4: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Luftabsorption

Genauigkeitsklasse 2

Die gültige Norm ist EN ISO 3744 von 2010. Der Schallleistungspegel unter meteorologischen Referenzbedingungen kann nach folgender Gleichung berechnet werden (Vergleichsverfahren):

$$L_W = \bar{L}'_{p(ST)} - K_1 - K_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) + C_1 + C_2 \quad (5.12)$$

Die Fremdgeräuschkorrektur berechnet sich aus:

$$K_1 = -10 \cdot \log\left(1 - 10^{-0,1\Delta L_p}\right) \quad (5.13)$$

Wobei $\Delta L_p = \bar{L}'_{p(ST)} - \bar{L}_{p(B)}$ der zeitlich und örtlich gemittelte Terzband-Schalldruckpegel des zu untersuchenden Geräts (ST) minus zeitlich und örtlich gemittelten Terzband-Schalldruckpegel des Fremdgeräusches (B) ist.

Abb. 5.3 zeigt eine quantitative Abschätzung für den „worst case“ dieses Korrekturfaktors für den LE-FFR. Als source under test (ST) dient der FKv 500. Es zeigt sich, dass beim Befahren des Hochregales im OG1 die Messung leiser Geräte nicht möglich ist. Hier übersteigt der Fremdgeräuschpegel fast über den gesamten Frequenzbereich den Gerätepegel. Für den Normalbetrieb ergeben sich auch erhebliche Korrekturen, vor allem im Bereich unter 400Hz und

ab 2500Hz. Solch leise Pegel sollten, wenn möglich, in der Nacht außerhalb der Betriebszeiten gemessen werden.

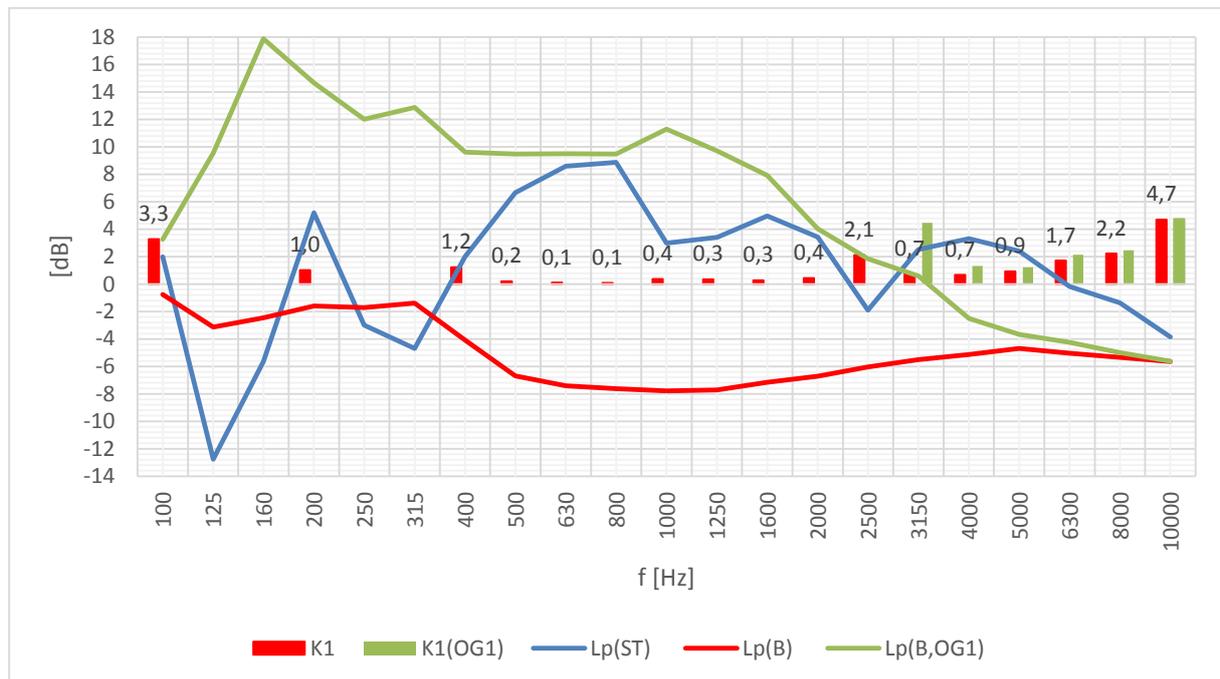


Abb. 5.3: Worst-Case sehr leises Gerät bei sehr lautem Fremdgeräusch LE-FFR

K_2 ist der Korrekturfaktor für die Raumerückwirkung (siehe Kap. 5.6.2) und kann nach der Absolutvergleichsmessung oder aus der Absorptionsfläche des Raumes bestimmt werden.

Diffusfeld

Genauigkeitsklasse 1

Die gültige Norm ist EN ISO 3741 von 2010. Der Schallleistungspegel anhand der äquivalenten Absorptionsfläche (Direktverfahren) ist unter meteorologischen Bezugsbedingungen nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$L_W = \bar{L}_p + \left\{ 10 \cdot \log \left(\frac{A}{A_0} \right) + 4,34 \cdot \left(\frac{A}{S} \right) + 10 \cdot \log \left(1 + \frac{S \cdot c}{8V \cdot f} \right) + C_1 + C_2 - 6dB \right\} \quad (5.14)$$

Wobei \bar{L}_p der örtliche Mittelwert der Fremdgeräusch-korrigierten und zeitlich gemittelten Terzband-Schalldruckpegel ist und über Gl.(5.6) bis Gl.(5.8) berechnet werden kann. Der zweite Korrekturterm $4,34 \cdot A/S$ beschreibt die Vorländer-Korrektur und der dritte Term die Waterhouse-Korrektur (siehe [AMT] Kap. 6.4).

A ist die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Raum und $A_0 = 1m^2$. A ist für jedes Terzband aus der Nachhallzeitgleichung nach Sabine zu berechnen:

$$A = 0,16 \cdot \left(\frac{V}{T} \right) \quad (5.15)$$

S ist die Gesamtoberfläche und V das Volumen des Hallraumes; T ist die Nachhallzeit des Hallraumes in Terzauflösung; c ist die Schallgeschwindigkeit bei der Messtemperatur Θ (in °C) und kann über $c = 20,05 \cdot \sqrt{273 + \Theta}$ berechnet werden; f ist die entsprechende Terzbandmittenfrequenz;

Die Korrekturen C_1 und C_2 können analog zum Freifeldraum nach Gl.(5.9) und Gl.(5.10) berechnet werden und betragen für den QM-SHR:

	Θ_{min} [°C]	Θ_{max} [°C]	p_s [kPa]	$p_{s,0}$ [kPa]	Θ_0 [K]	Θ_1 [K]
	21	26	102	101,325	314	296
C_1 [dB]	-0,17	-0,14				
C_2 [dB]	-0,02	0,09				

Tab. 5.5: Korrektur der meteorologischen Bedingungen im QM-SHR

Abb. 5.4 zeigt die Korrekturfaktoren nach ISO 3741 für den QM-SHR. Die blaue Kurve zeigt den Einfluss durch die Absorption im Raum. Die Absorptionsfläche steigt zunächst langsam mit der Frequenz an, ab ca. 5000Hz dann stärker, weil hier die Nachhallzeit durch den größeren Einfluss der Luftabsorption schneller abfällt. Die graue Kurve zeigt die Vorländerkorrektur. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass sich die dem Raum zugeführte Schallenergie erst nach kurzer Zeit annähernd diffus verhält. Im Sonderhallraum ist die Nachhallzeit bis ca. 5000Hz relativ konstant und somit auch die Vorländerkorrektur. R.V. Waterhouse zeigte, dass sich im diffusen Schallfeld mehr Energie befindet als in ausreichendem Abstand zu den Begrenzungsflächen gemessen wird (durch die Norm ist der Messabstand aber vorgegeben). Dieser Einfluss über die Wandflächen aufsummiert, wird durch die Waterhouse-Korrektur berücksichtigt und ist frequenzabhängig (gelb).

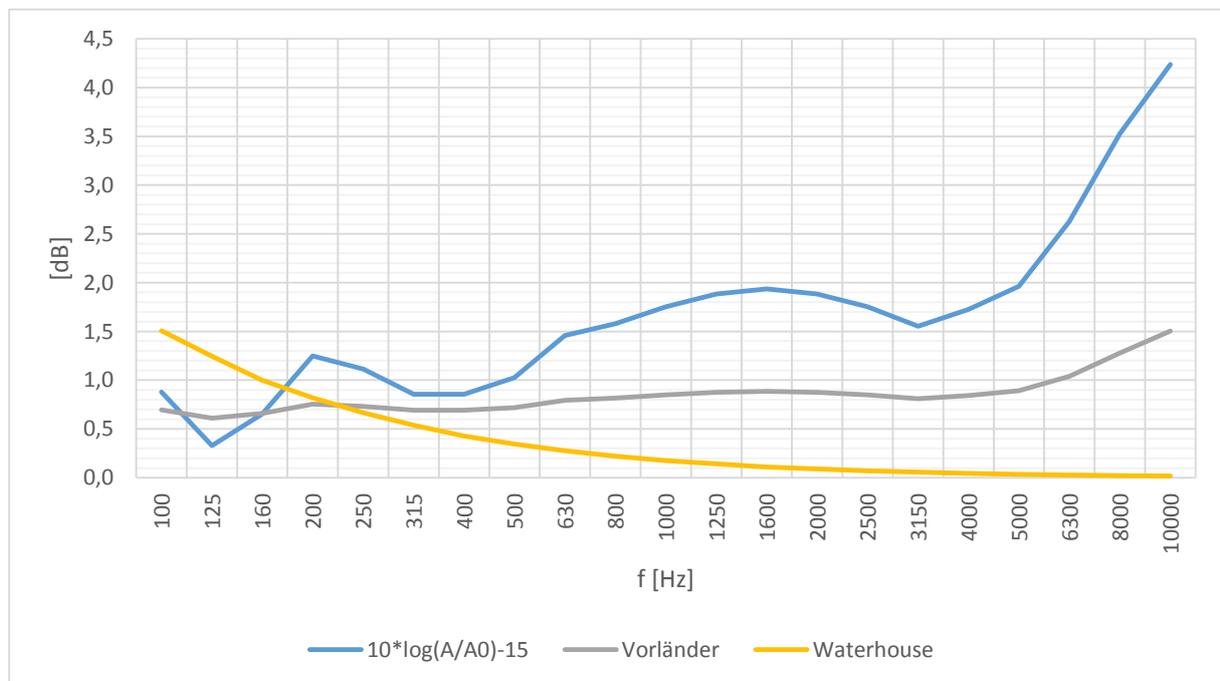


Abb. 5.4: Korrekturfaktoren nach ISO 3741

Der Schallleistungspegel unter Verwendung einer Vergleichsquelle bekannter Schallleistung (Vergleichsverfahren) ist nach Genauigkeitsklasse 1 über folgende Gleichung zu berechnen:

$$L_W = L_{W(RSS)} + [\bar{L}_p(ST) - \bar{L}_p(RSS)] + C_2 \quad (5.16)$$

Dabei ist $L_{W(RSS)}$ der kalibrierte Terzband-Schallleistungspegel der Vergleichsquelle unter den meteorologischen Referenzbedingungen; $\bar{L}_p(ST)$ ist der örtliche Mittelwert der zeitlich gemittelten und Fremdgeräusch-korrigierten Terzband-Schalldruckpegel des zu untersuchenden Gerätes und kann nach Gl. (5.6) bzw. (5.7) berechnet werden; $\bar{L}_p(RSS)$ ist der örtliche Mittelwert der bezüglich Fremdgeräusch korrigierten, zeitlich gemittelten Terzband-Schalldruckpegel der Vergleichsquelle im Prüfraum; C_2 kann nach Gl.(5.10) berechnet werden. C_1 fällt aus der Gleichung und muss nicht berücksichtigt werden.

Genauigkeitsklasse 2

Die gültigen Normen sind EN ISO 3743-1 von 2010 in Räumen mit schallharten Wänden und 3743-2 von 2009 in Sonderhallräumen.

Nach EN ISO 3743-1 ist der Schallleistungspegel in Oktavbändern nach folgender Gleichung zu bestimmen:

$$L_W = L_{W(RSS)} + [\bar{L}'_p(ST) - K_{1(ST)} - \bar{L}'_p(RSS) + K_{1(RSS)}] + C_2 \quad (5.17)$$

$L_{W(RSS)}$ ist der kalibrierte Oktavband-Schallleistungspegel der Vergleichsquelle; $\bar{L}'_p(RSS)$ ist der örtliche Mittelwert der zeitlich gemittelten unkorrigierten Oktavband-Schalldruckpegel der RSS im Prüfraum; $\bar{L}'_p(ST)$ ist der örtliche Mittelwert des zeitlich gemittelten Oktavband-Schalldruckpegels des zu untersuchenden Gerätes; $K_{1(ST)}$ ist die Fremdgeräuschkorrektur in dB und kann nach Gl.(5.13) berechnet werden. $K_{1(RSS)}$ ist die Fremdgeräuschkorrektur der RSS in dB und kann ebenfalls nach Gl.(5.13) berechnet werden; C_2 wird nach Gl. (5.10) berechnet.

Die Gleichung für die Berechnung nach ISO 3743-2 lässt sich aus jener nach ISO 3741 herleiten ([DAGA 2008]) und es folgt für die Schallleistungsberechnung (Direktverfahren):

$$L_W = \bar{L}_p - 10 \cdot \log\left(\frac{T_{nom}}{T_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{V}{V_0}\right) - 13dB + C_1 + C_2 \quad (5.18)$$

\bar{L}_p ist der örtliche Mittelwert der zeitlich gemittelten und Fremdgeräusch-korrigierten Oktavband-Schalldruckpegel des zu untersuchenden Geräts.

Die Korrektur hinsichtlich des Fremdgeräusches erfolgt anhand der Werte in Tab. 5.6, die von dem gemessenen örtlich und zeitlich gemittelten Summen-Schalldruckpegel bei Betrieb der Quelle abzuziehen sind. K_1 kann alternativ auch nach Gl. (5.13) berechnet werden.

ΔL_p [vgl. Gl.(5.13)] [dB]	K_I [dB]
4	2,0
5	2,0
6	1,0
7	1,0
8	1,0
9	0,5
10	0,5
>10	0,0

Tab. 5.6: Fremdgeräuschkorrekturen für die Schalldruckpegel (ISO 3743-2)

Abb. 5.5 zeigt eine quantitative Abschätzung des Fremdgeräusches für den Worst-Case. Für das leise Gerät (FKv 500) ergeben sich auch im QM-SHR erhebliche Korrekturfaktoren, die für solch leise Pegel keinesfalls vernachlässigt werden sollten.

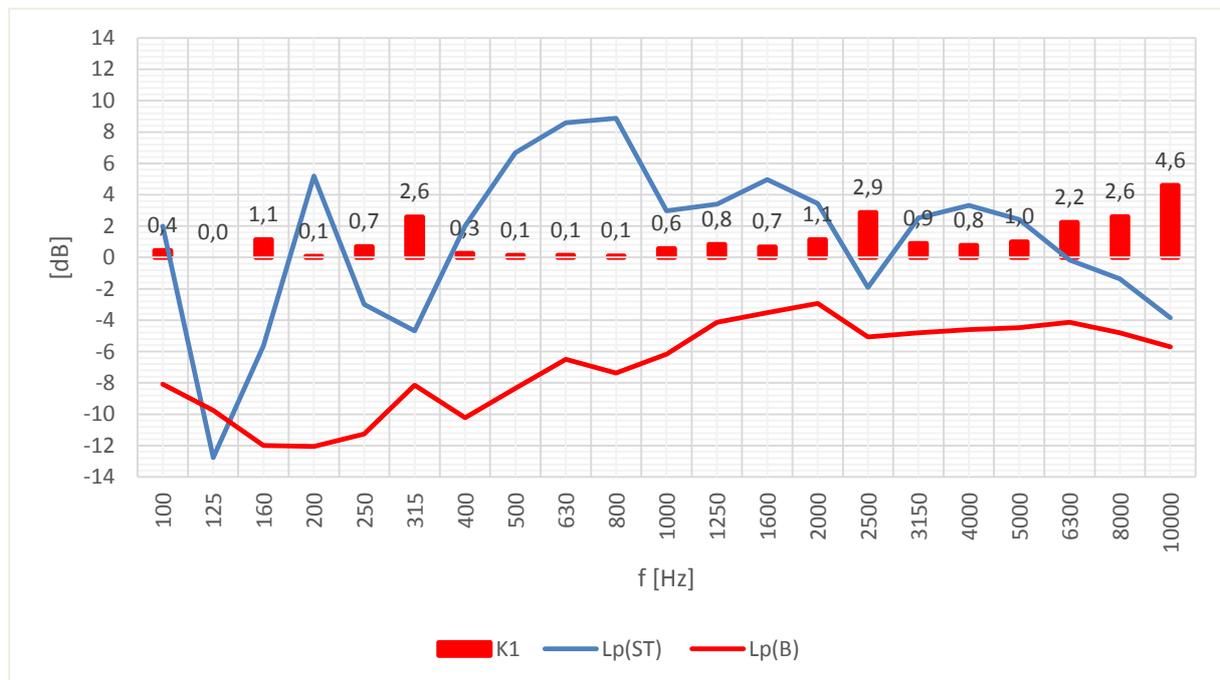


Abb. 5.5: Worst-Case sehr leises Gerät bei sehr lautem Fremdgeräusch QM-SHR

T_{nom} ist die frequenzunabhängige nominelle oder Nenn-Nachhallzeit (vgl. Kap. 2.2.3). Voraussetzung ist, dass das Nachhallzeitspektrum dem Nachhallparameter R folgt und somit die Waterhouse-Korrektur abgedeckt wird (vgl. Berechnung nach Genauigkeitsklasse 1); $T_0 = 1s$ und $V_0 = 1m^3$; V ist das Volumen des Prüfraumes;

Im Vergleichsverfahren wird der Schallleistungspegel analog zu 3743-1 nach Gl. (5.17) berechnet.

Diffusfeld – Direktverfahren vs. Vergleichsverfahren

Genauigkeitsklasse 1

Für diese Genauigkeitsklasse wird die Schalleistung im Direktverfahren nach Gl.(5.14) berechnet und im Vergleichsverfahren nach Gl.(5.16).

Eine Abschätzung der Waterhouse- und der Vorländer-Korrektur ist in Abb. 5.4 zu finden.

Für das Vergleichsverfahren wurde die RSS im Abstand von 150cm zur Wand platziert (siehe Kap. 4.2). Die Vergleichswerte der RSS stammen aus dem Kalibrierzeugnis vom Mai 2011.

Abb. 5.6 zeigt nun die Terzband-Schalleistungspegel beider Verfahren für den FKv 500 im Zyklusbetrieb. Dabei wurden die gemessenen Schalldruckpegel aus den Basismessungen verwendet. Die größten Unterschiede ergeben sich bis zum 200Hz-Terzband und ab dem 5000Hz-Terzband. In diesen Bereichen und für das 1600Hz-Terzband, liefert das Vergleichsverfahren höhere Pegel. Ab 8000Hz befindet sich auch jener Bereich, indem die Nachhallzeit für den Sonderhallraum nicht ideal eingestellt werden konnte (vgl. Abb. 5.17).

Tab. 5.7 zeigt noch die Differenz zwischen Direkt- und Vergleichsverfahren für einige Terzbänder. Für die Summenpegel ergibt sich eine Differenz von ca. 0,3dB.

f [Hz]	100	125	160	200	...	5000	6300	8000	10000
$L_{w,Dir} - L_{w,vergl}$ [dB]	-1,8	-1,0	-1,0	-1,9	...	-0,8	-0,8	-0,8	-2,3
Differenz der Summenpegel [dB]	-0,3								

Tab. 5.7: Differenzen zwischen Direktverfahren und Vergleichsverfahren (Genauigkeitsklasse 1)

Es zeigt sich somit, dass nach Genauigkeitsklasse 1 vor allem im hohen und im tiefen Messfrequenzbereich Unterschiede zwischen beiden Verfahren auftreten.

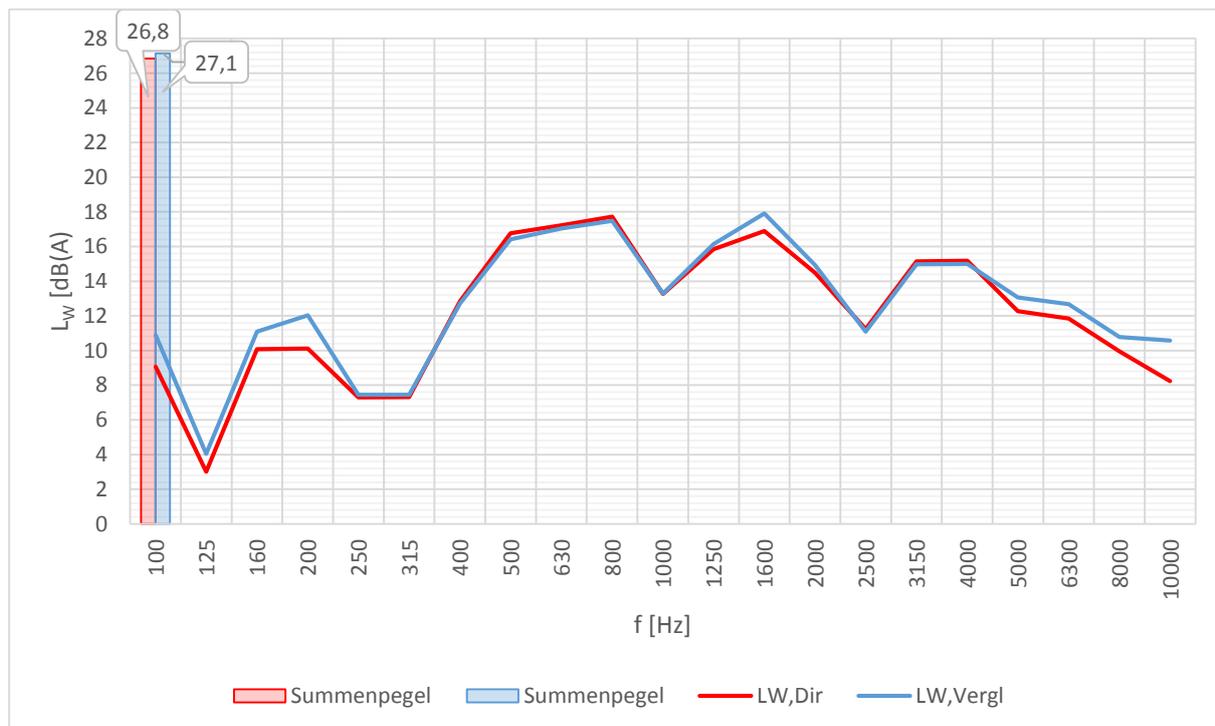


Abb. 5.6: Terzband-Schalleistungspegel FKv 500 Zyklusbetrieb im Vergleichs- und Direktverfahren (GK1)

Genauigkeitsklasse 2

Für diese Genauigkeitsklasse wird die Schallleistung im Vergleichsverfahren nach Gl.(5.17) und im Direktverfahren nach Gl.(5.18) berechnet.

Abb. 5.7 zeigt die Terzband-Schallleistungspegel beider Verfahren für den FKv 500 im Zyklusbetrieb.

Für die Berechnung im Direktverfahren wird die nominelle Nachhallzeit T_{nom} aus Tab. 5.11 verwendet.

Im Vergleichsverfahren wird die RSS wiederum im Abstand von 150cm zur Wand platziert und als Vergleichswert werden die Schallleistungswerte aus dem Kalibrierzeugnis von 2011 verwendet.

Die Unterschiede zeigen sich auch hier im Bereich bis 200Hz und ab 5000Hz. Im Summenpegel zeigt sich hier kein wesentlicher Unterschied.

f [Hz]	100	125	160	200	...	5000	6300	8000	10000
$L_{W,Dir} - L_{W,vergl}$ [dB]	-2,4	-0,9	-0,7	-2,2	...	-0,8	-1,9	-3,2	-5,5
Differenz der Summenpegel [dB]	-0,1								

Tab. 5.8: Differenzen zwischen Direktverfahren und Vergleichsverfahren (Genauigkeitsklasse 2)

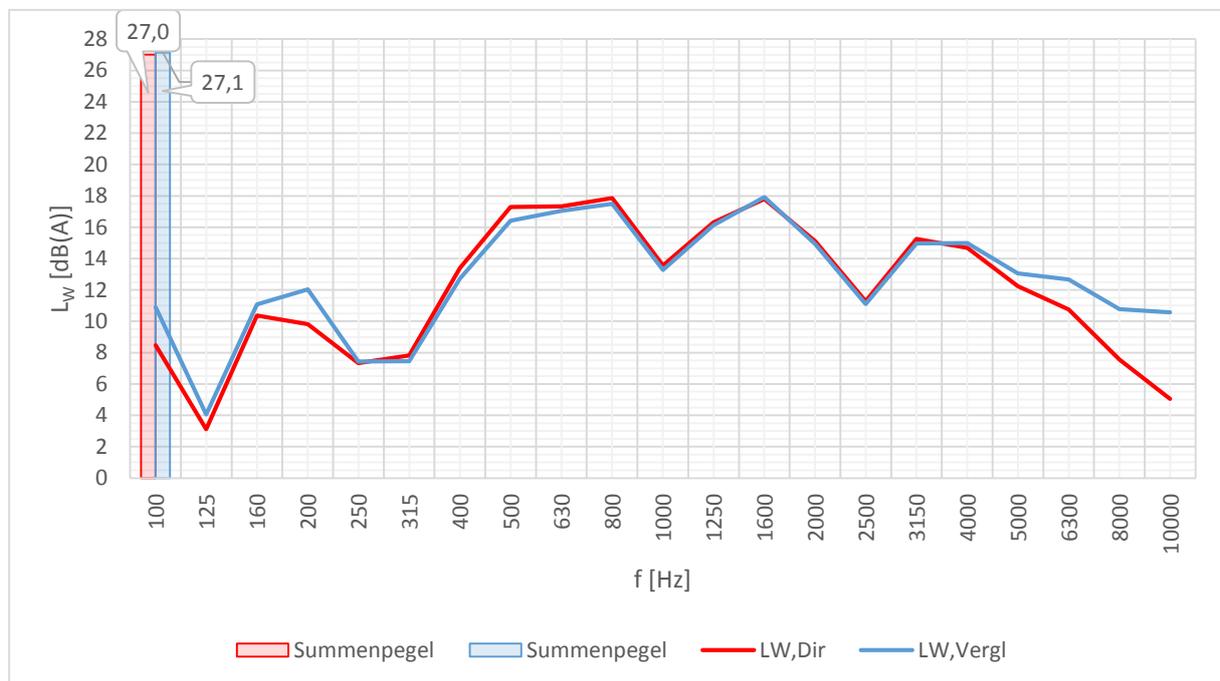


Abb. 5.7: Terzband-Schallleistungspegel FKv 500 Zyklusbetrieb im Vergleichs- und Direktverfahren (GK2)

5.3 Klassifizierungsmessungen

In diesem Kapitel werden die Klassifizierungsmessungen (PAK-System der TU-Graz) dokumentiert. Dabei werden zunächst Angaben zu den Messungen gemacht und anschließend die Ergebnisse gezeigt und diskutiert.

Zunächst wird der QM-SHR betrachtet. Es werden die Quellen und Mikrofonpositionen und die dazugehörigen Koordinaten aufgeführt. Anschließend folgen verschiedene Klassifizierungsmessungen für Diffusfelder und die Bestimmung der Nennnachhallzeit aus der Nachhallzeitmessung.

Aktor-/Sensor-Positionen im QM-SHR

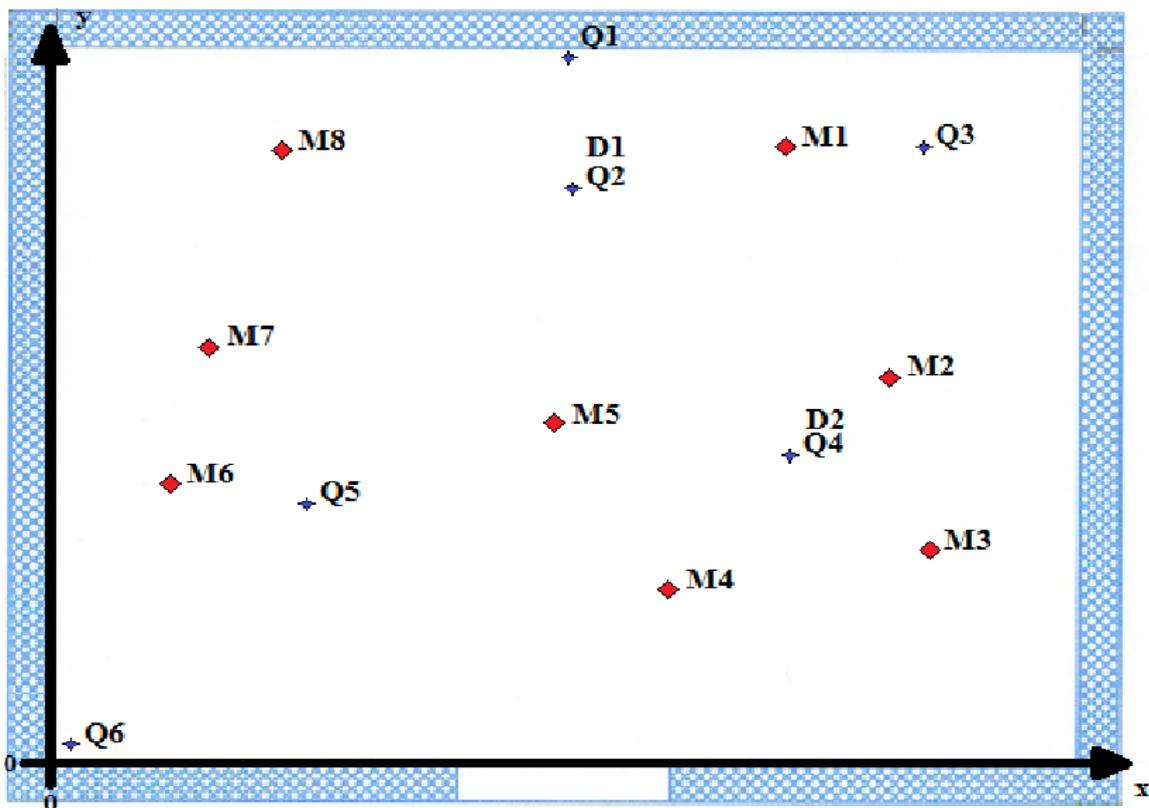


Abb. 5.8: Messpositionen im QM-SHR

Quellenpositionen				Mikrofonpositionen			
	x [m]	y [m]	z [m]		x [m]	y [m]	z [m]
Q1	3,9	6,2	0,3	M1	5,3	5,2	1,3
Q2/D1	3,9	4,5	0,3/1,0	M2 (Rechts)	6,2	3,3	2,5
Q3	6,9	5,2	0,3	M3	6,6	1,7	2,5
Q4/D2	5,3	2,7	0,3/1,0	M4	4,6	1,3	1,5
Q5	2,9	2	0,3	M5 (Mitte)	3,8	2,8	2,8
Q6	0,3	0,3	0,3	M6	1,1	2,2	1,3
				M7 (Links)	1,6	3,3	2,8
				M8	2,2	5,1	1,6

Tab. 5.9: Messpositionen im QM-SHR

Die z-Koordinate gibt die Höhe der Messposition an. Für die Quelle wurde hier die Höhe der RSS (30cm) bzw. die Höhe des Dodekaeders (1,0m) angegeben. Insgesamt wurden 6 Quellenpositionen (Aktor) und 8 Mikrofonpositionen (Sensor) verwendet. 3 Sensorpositionen bilden die derzeit in der Firma Liebherr Lienz verwendeten Mikrofonpositionen. Sie sind in der Tabelle mit Rechts, Mitte und Links gekennzeichnet. Die 6 Aktor-Positionen der RSS (Q1 bis Q6) wurden, soweit möglich, nach den Vorgaben der Eignungsprüfung zur Messung von Breitbandgeräuschen nach Anhang C in ISO 3741 gewählt. Dabei muss ein Mindestabstand von 1,5m zu einer Wand und mindestens ein Abstand von $\lambda/4$ (bei 100Hz = 0,9m) zwischen zwei Quellenpositionen eingehalten werden. Zudem soll eine Quellenposition in dem Bereich liegen, der für die Aufstellung der zu untersuchenden Geräuschquelle vorgesehen ist. Der Wandabstand von mindestens 1,5m wurde bewusst nicht für jede Position eingehalten, da auch die Ergebnisse bei Platzierung an der Wand oder in einer Raumecke von Interesse sind.

Die Mikrofonpositionen wurden nach Kap. 8.3 in ISO 3741 gewählt. Der Abstand zwischen zwei Mikrofonen muss mindestens $\lambda/2$ (bei 100Hz = 1,7m) sein. Der Abstand zu einer reflektierenden Ebene muss mindestens 1m betragen. Zur Quelle muss ein Mindestabstand d_{min} eingehalten werden. Dieser kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$d_{min} = 0,08 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \quad (5.19)$$

Da für diese Berechnung bereits die Kenntnis der Nachhallzeit nötig ist, wurde für eine Abschätzung d_{min} nach ISO 3743-2 (Kap. 7.3) berechnet:

$$d_{min} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{V} = 1,9m \quad (5.20)$$

Dieser Mindestabstand wird für alle Aktor-/Sensorpositionen eingehalten. Abb. 5.9 und Abb. 5.10 zeigen den Messaufbau im QM-SHR.



Abb. 5.9 FrontEnd PAK mobile MKII und Norsonic Messverstärker für den Dodekaederlautsprecher

Meteorologische Bedingungen bei der Messung:

Datum	RH [%]	θ [°C]	p_{st} [kPa]
11.12.2015	28	20	102



Abb. 5.10: Messaufbau im QM-SHR

Eignungsprüfung für Hallräume zur Messung von Breitbandgeräuschen (GK1)

Prüfverfahren für Hallräume der Genauigkeitsklasse 1 nach ([ISO 3741], Anhang C). Es sind sechs oder mehr Messungen der zeitlich gemittelten Terzband-Schalldruckpegel, jedes Mal mit einem anderen Aufstellungsort der Quelle durchzuführen. Für jedes Terzband ist dann die Standardabweichung nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$s_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_S} (L_{pi} - L_{pm})^2}{N_S - 1}} \quad (5.21)$$

L_{pi} ist der zeitlich gemittelte Terzband-Volumenschalldruckpegel² der i-ten Quellenposition, L_{pm} der arithmetische Mittelwert aus allen Quellenpositionen der zeitlich gemittelten Terzband-Volumenschalldruckpegel und N_S ist die Anzahl der Quellenpositionen. Diese Eignungsprüfung wurde im Sonderhallraum mit zwei Konfigurationen durchgeführt. Die Ergebnisse für 6 Quellenpositionen und 8 Mikrofonpositionen sind in Abb. 5.11 dargestellt, jene für 6 Quellenpositionen und den 3 fix im QM-SHR installierten Mikrofonpositionen in Abb. 5.12. Für die Oktavbänder fällt die Eignungsprüfung mit 6 Mikrofonpositionen positiv aus. Mit 3 Mikrofonpositionen ergibt sich eine kleine Überschreitung der Grenzwerte für das 250Hz-Oktavband.

² Erklärung siehe Anhang B

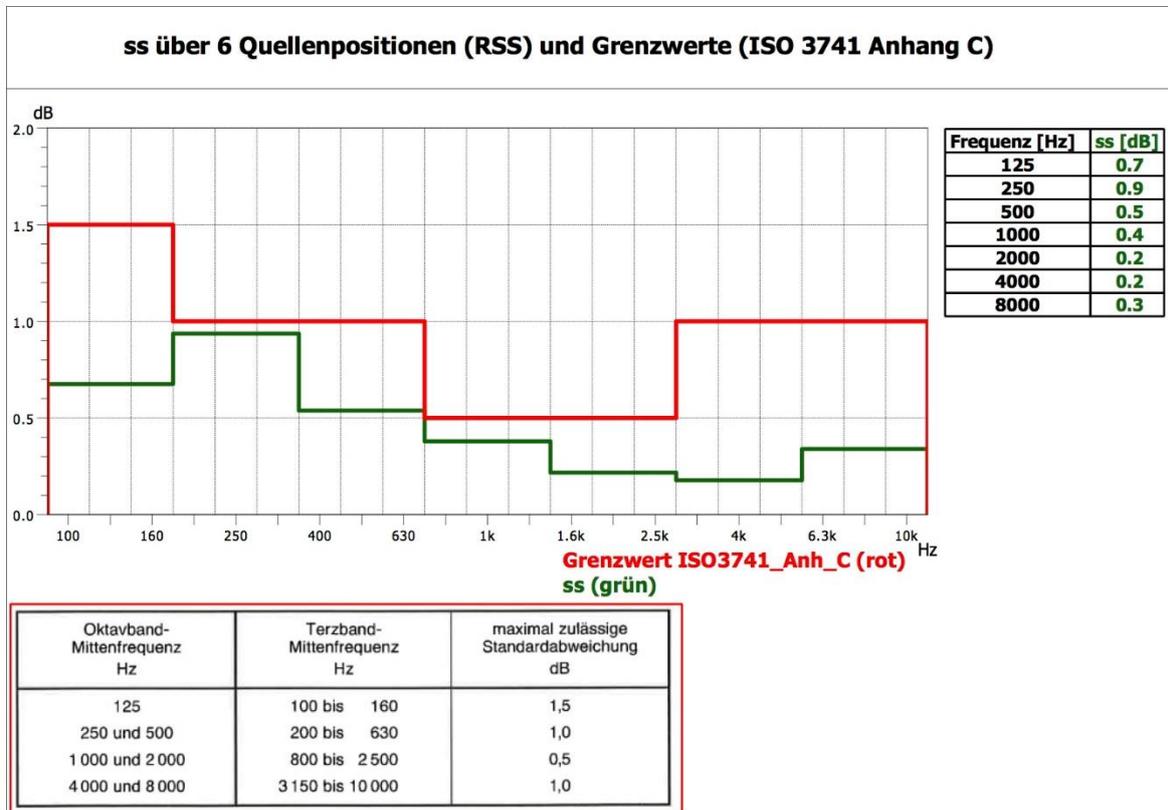
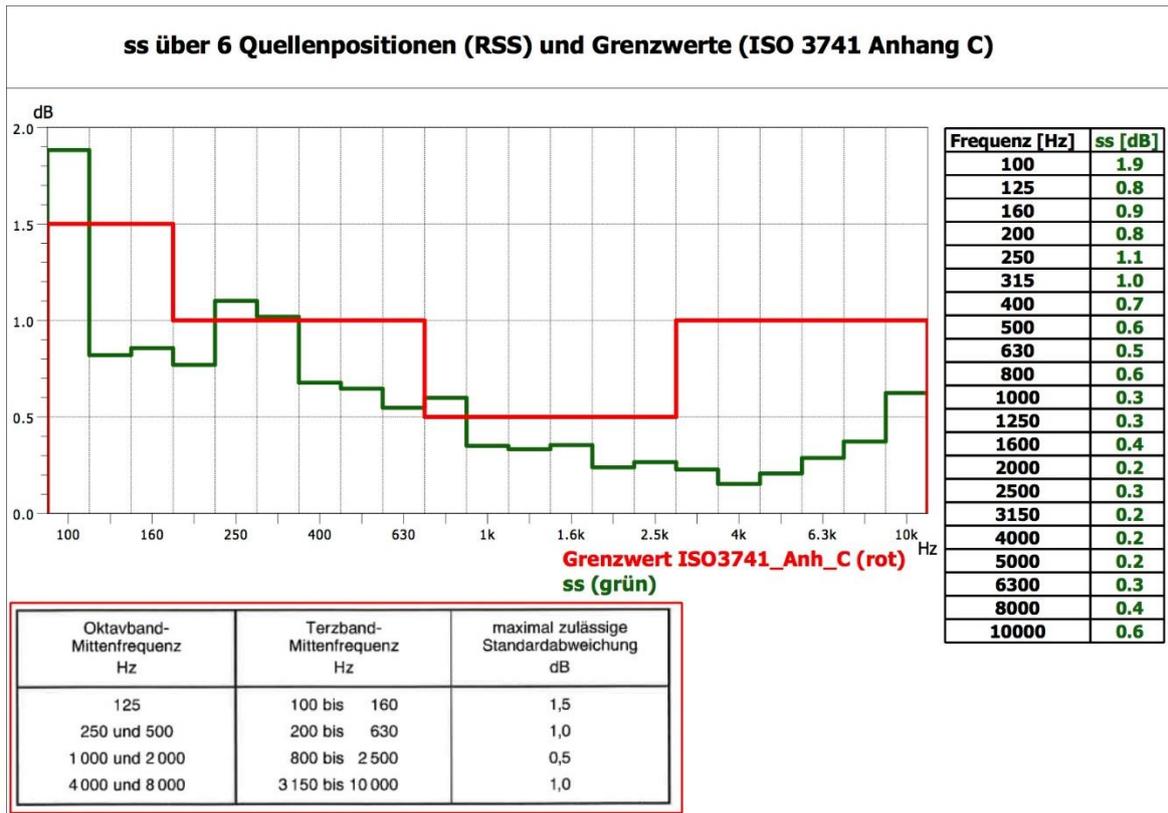


Abb. 5.11: Standardabweichung über 6 Quellenpositionen und 8 Mikrofonpositionen im QM-SHR (PAK)

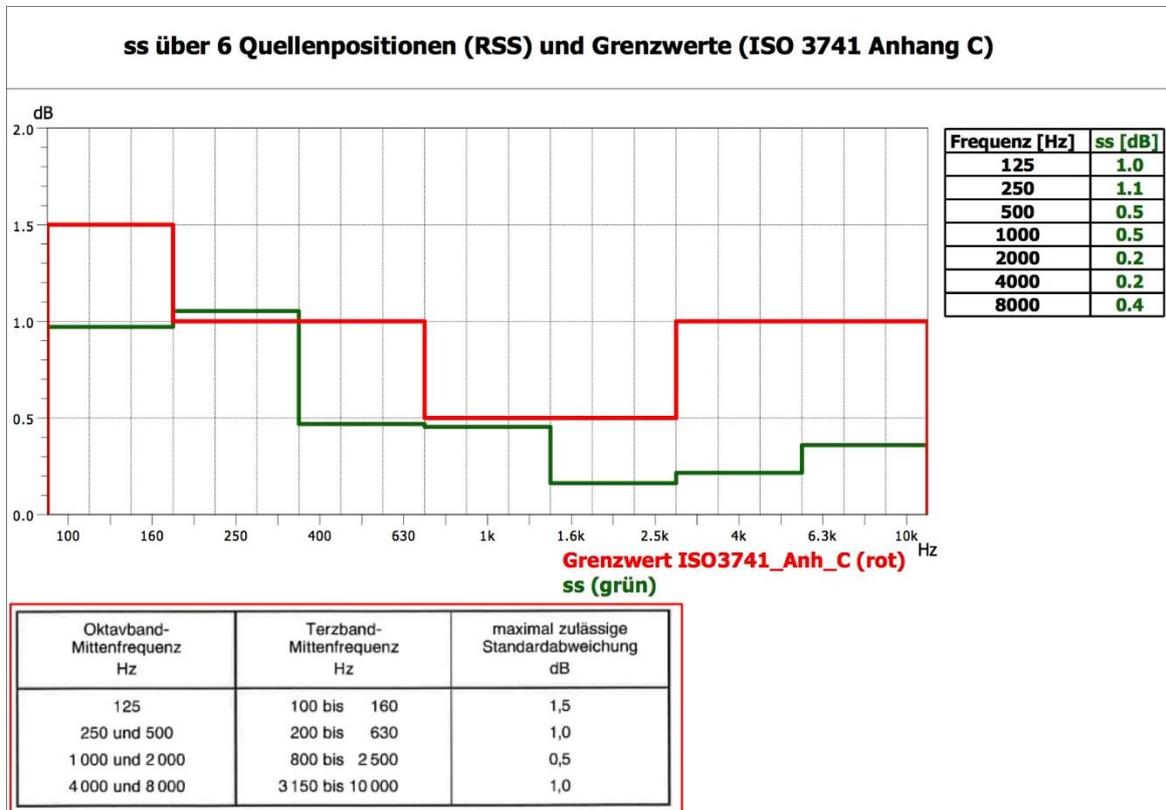
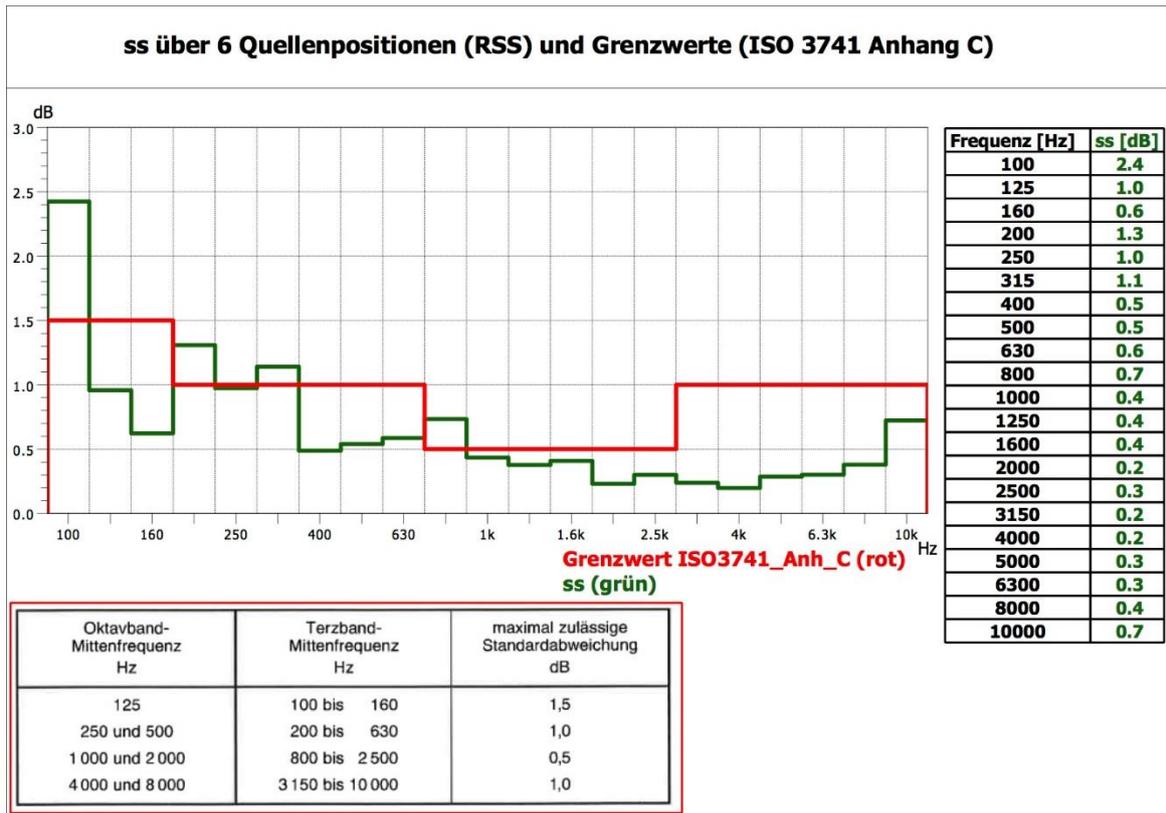


Abb. 5.12: Standardabweichung über 6 Quellenpositionen und 3 Mikrofonpositionen im QM-SHR (PAK)

Eignungsprüfung für Sonderhallräume (GK2)

Eignungsprüfung der Genauigkeitsklasse 2 nach ([ISO 3743-2] Kap. 4.7). Diese Eignungsprüfung wurde bereits in Kap. 2.2.3 beschrieben und deshalb werden hier lediglich die Ergebnisse gezeigt (Abb. 5.13). Die Differenzen laut Tab. 5.10 müssen für alle Oktavbänder eingehalten werden, damit der Raum für die Messung von Breitband-Schallquellen nach dieser Norm geeignet ist.

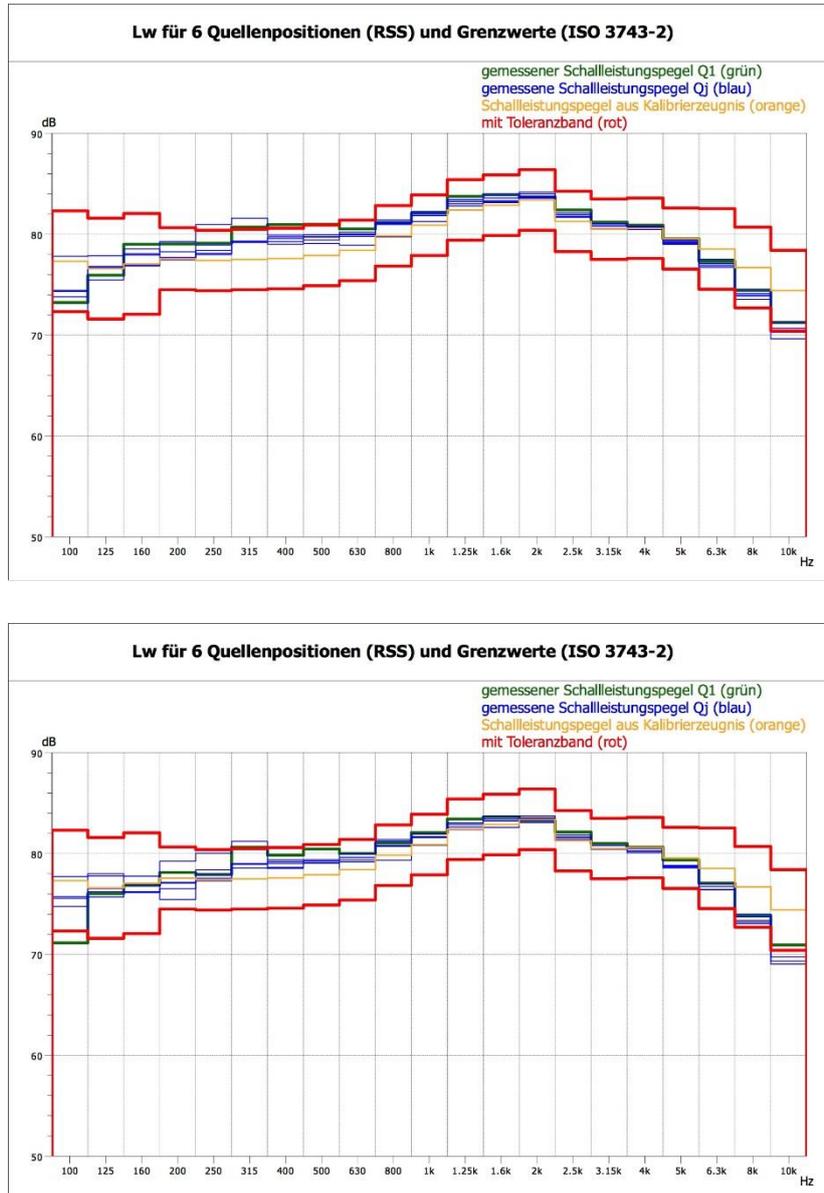


Abb. 5.13: Eignungsprüfung nach ISO 3743-2 für 6 Quellenpositionen und 8 (oben) bzw. 3 (unten) Mikrofonpositionen

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	Differenz der Schallleistungspegel [dB]
125	+/- 5
250 bis 4000	+/- 3
8000	+/- 4

Tab. 5.10: Zulässige Differenzen der Oktavband-Schallleistungspegel nach ISO 3743-2, Kap. 4.7

Anzahl der Aktor-/Sensorpositionen für Breitbandquellen (GK1 & GK2)

Prüfung nach ([ISO 3743-2] Kap. 7.4) bzw. nach ([ISO 3741] Kap. 8.4.2.3). In Kap. 5.4 wird die Überprüfung für die Messobjekte durchgeführt. Hier wird die Anzahl der Mikrofon- und Quellenpositionen für die RSS überprüft. Abb. 5.14 zeigt die Ergebnisse für 8 Mikrofonpositionen und Abb. 5.15 jene für 3 Mikrofonpositionen.

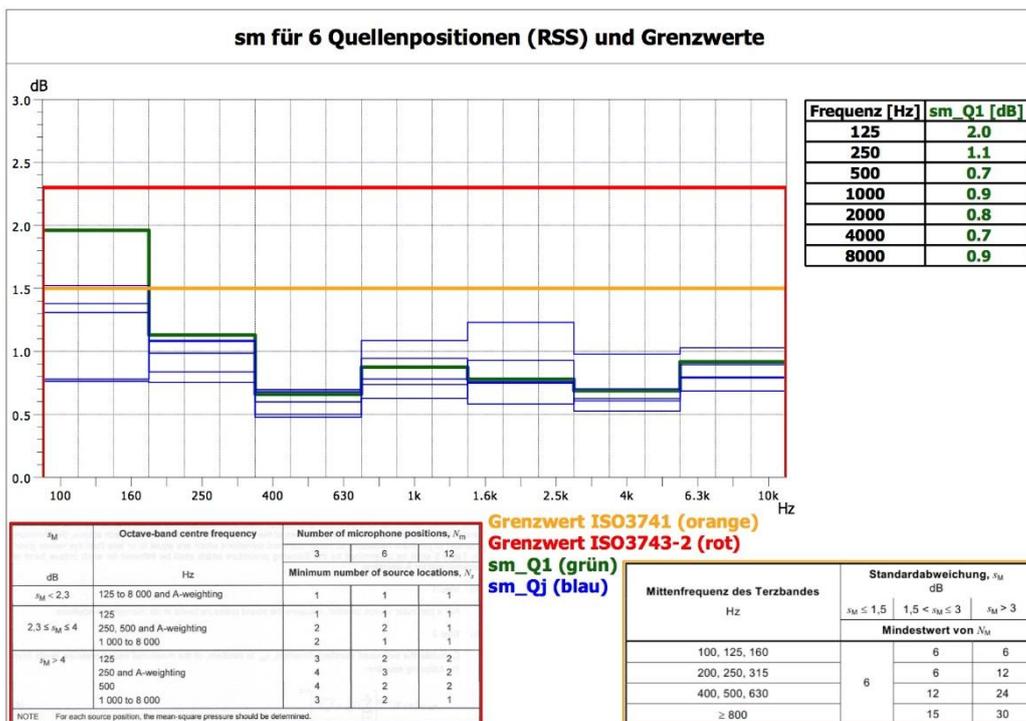
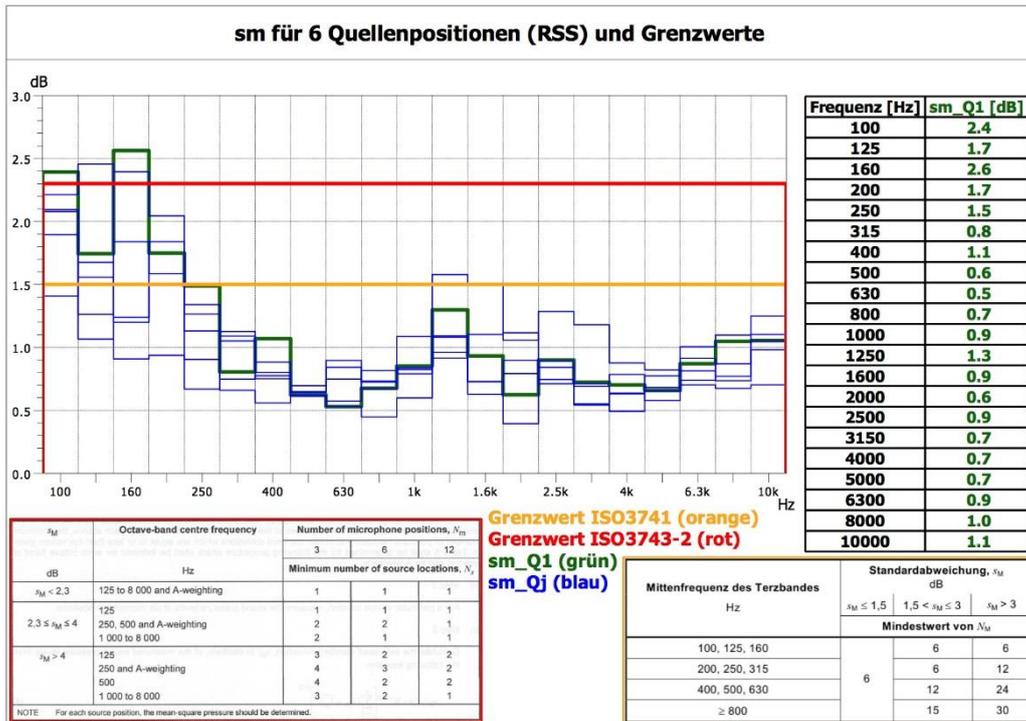


Abb. 5.14: Prüfung der Aktor-/Sensorpositionen für die RSS und 8 Mikrofone

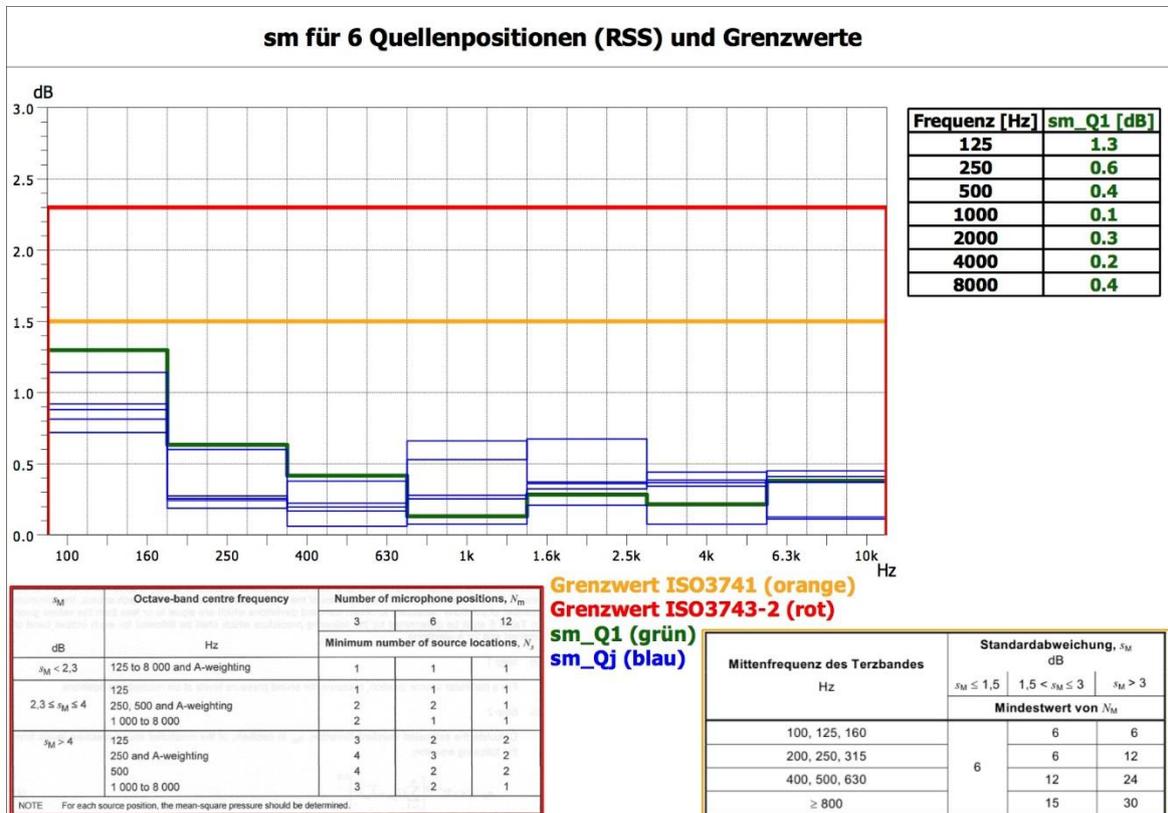
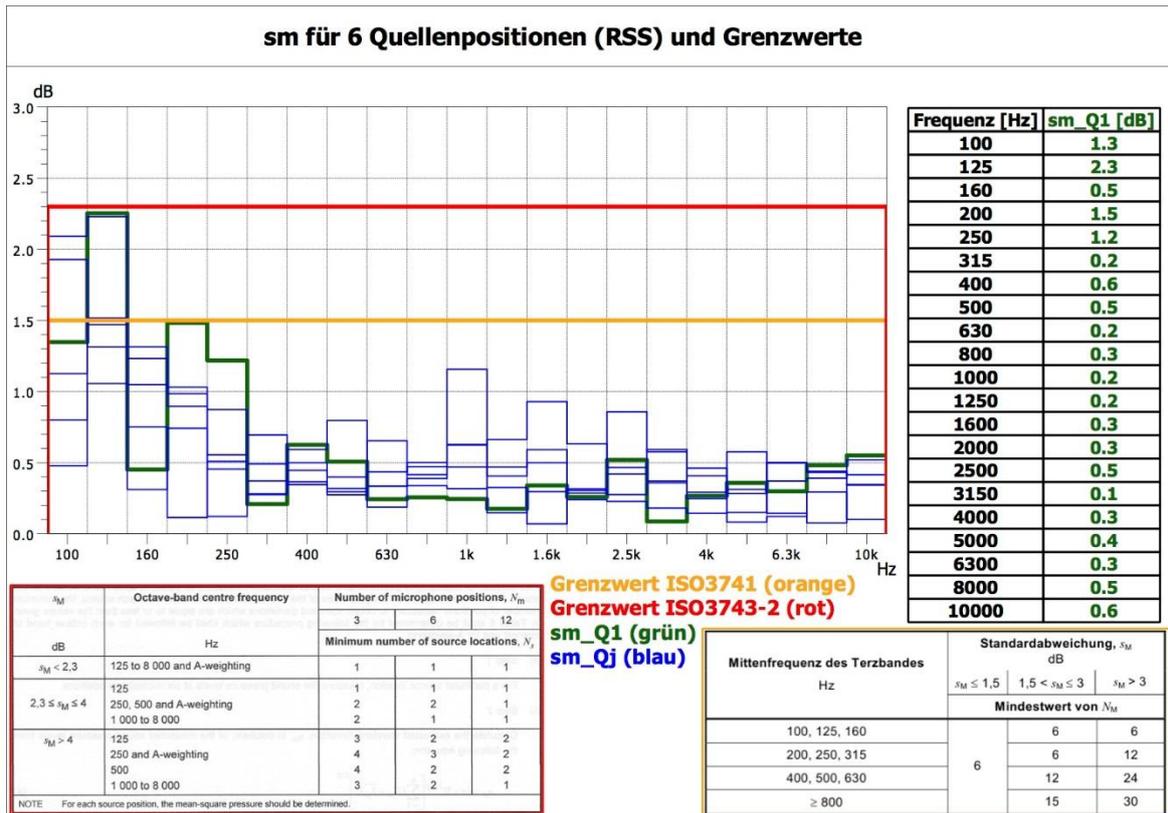


Abb. 5.15: Prüfung der Aktor-/Sensorpositionen für die RSS und 3 Mikrofone

Messung der Nachhallzeit und Bestimmung der Nennnachhallzeit

Für die Bestimmung der Nennnachhallzeit ist eine Messung der Nachhallzeit nach ISO 354 notwendig (Abb. 5.16). Als Messsignal dient ein kontinuierlicher Sinussweep, der über einen Dodekaeder eingespielt wird. Die Nachhallzeit wurde an zwei Quellenpositionen (D1 & D2 laut Tab. 5.9) gemessen und dann der Mittelwert daraus gebildet.

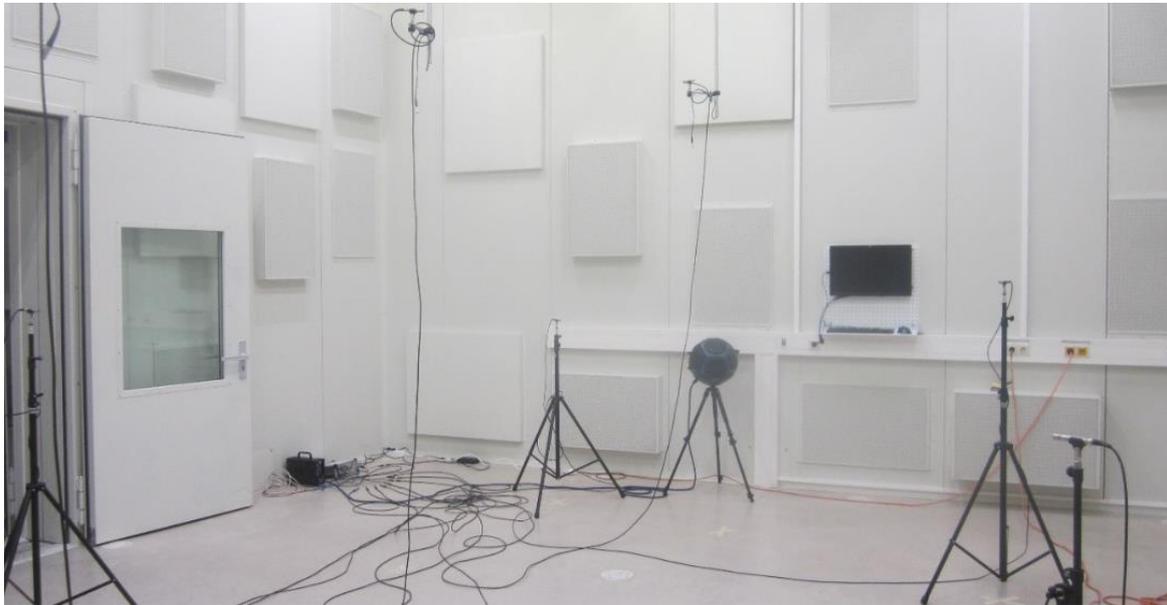


Abb. 5.16: Nachhallzeitmessung nach ISO 354

Aus der Messung ergeben sich die in Tab. 5.11 angegebenen Nachhallzeiten. Daraus konnte T_{nom} mit ca. 0,9s bestimmt werden.

Die relative Luftfeuchtigkeit war zum Messzeitpunkt mit ca. 28% eher niedrig. Hier wird auch die Gerätenorm nicht mehr ganz eingehalten (vgl. Kap. 2.2.3). Die Temperatur hingegen liegt mit 20°C noch im Normbereich. Diese geringen relativen Luftfeuchten ergeben sich nur in den sehr kalten Wintermonaten. Da sich die Luftabsorption mit der Temperatur und Luftfeuchte ändert, sind diese während der Messung zu überwachen. Es gilt, das Produkt $RH \cdot (\Theta + 5^\circ\text{C})$ darf nicht mehr als $\pm 10\%$ von dem Wert des Produktes der bei der Messung der Nachhallzeit bestimmt wurde, abweichen. Bei der Messung galt:

$$RH \cdot (\Theta + 5^\circ\text{C}) = 0,28 \cdot (20^\circ + 5^\circ) = 7$$

f [Hz]	R	T_{gem} [s]	T/T_{1000}	R_{unten}	R_{oben}	T/T_{1000} (eingemittelt)
100	1,41	1,04	1,22	1,27	1,55	1,19
125	1,33	1,18	1,39	1,19	1,46	1,36
160	1,26	1,10	1,29	1,13	1,38	1,26
200	1,20	0,96	1,12	1,08	1,32	1,09
250	1,16	0,99	1,16	1,05	1,28	1,13
315	1,13	0,99	1,23	1,02	1,24	1,20
400	1,10	1,05	1,23	0,99	1,21	1,20
500	1,08	1,01	1,18	0,97	1,19	1,15
630	1,06	0,91	1,07	0,96	1,17	1,04
800	1,05	0,89	1,04	0,95	1,16	1,01
1000	1,04	0,85	1,00	0,94	1,14	0,97
1250	1,03	0,83	0,97	0,93	1,14	0,94
1600	1,03	0,82	0,96	0,92	1,13	0,93
2000	1,02	0,83	0,97	0,92	1,12	0,94
2500	1,02	0,85	1,00	0,91	1,12	0,97
3150	1,01	0,89	1,05	0,91	1,11	1,02
4000	1,01	0,86	1,01	0,91	1,11	0,98
5000	1,01	0,81	0,95	0,91	1,11	0,92
6300	1,01	0,70	0,82	0,81	1,21	0,79
8000	1,01	0,57	0,66	0,80	1,21	0,63
10000	1,00	0,48	0,56	0,80	1,20	0,53
T_{nom} [s]	0,88					

Tab. 5.11: Bestimmung der Nennnachhallzeit T_{nom} im QM-SHR

Laut der Gerätenorm DIN EN 60704-2-14 sind relative Luftfeuchten von $RH = (50 \pm 20)\%$, und Temperaturen von $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ für Messungen nach ISO 3743-2 zulässig. Diese Grenzen werden im QM-SHR meistens eingehalten. Trotzdem ist es nicht möglich, die Grenzen für das oben genannte Produkt zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur einzuhalten. Dabei wirken sich Temperaturschwankungen weniger stark auf das Ergebnis aus, als die relative Luftfeuchte. Es sollte deshalb versucht werden, $RH \approx 50\%$ mehr oder weniger konstant zu halten.

Wie in Abb. 5.17 zu sehen, ist es schwer, die Nachhallzeit für Frequenzen über 6300Hz in den gewünschten Grenzen zu halten. Auch hier kann eine Verringerung der Luftabsorption, sprich eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte (mit Hilfe eines kleinen Luftbefeuchters) helfen.

Vergleicht man nun die 3 Abnahmemessungen der Firma G&H (Abb. 2.10), der Firma AEL (Abb. 2.11) und die der TU-Graz (Abb. 5.17), so fällt auf, dass sich die Nachhallzeitverläufe unterscheiden. Während die Nachhallzeit bei der Abnahmemessung durch die Firma G&H den Toleranzschlauch ebenso im Bereich über 6300Hz überschreitet, wird dieser bei der Abnahmemessung der Firma AEL (Abb. 2.11) über den gesamten Frequenzbereich eingehalten.

Falls es in Zukunft bei der Firma Liebherr zu einer Umstellung vom Vergleichsverfahren auf ein Direktverfahren kommt, sollte die Nennnachhallzeit (für die Berechnung der Schalleistung) für die extremen Außentemperaturen (und Klimaverhältnisse in den Messräumen) im Winter und im Hochsommer jeweils extra ermittelt werden.

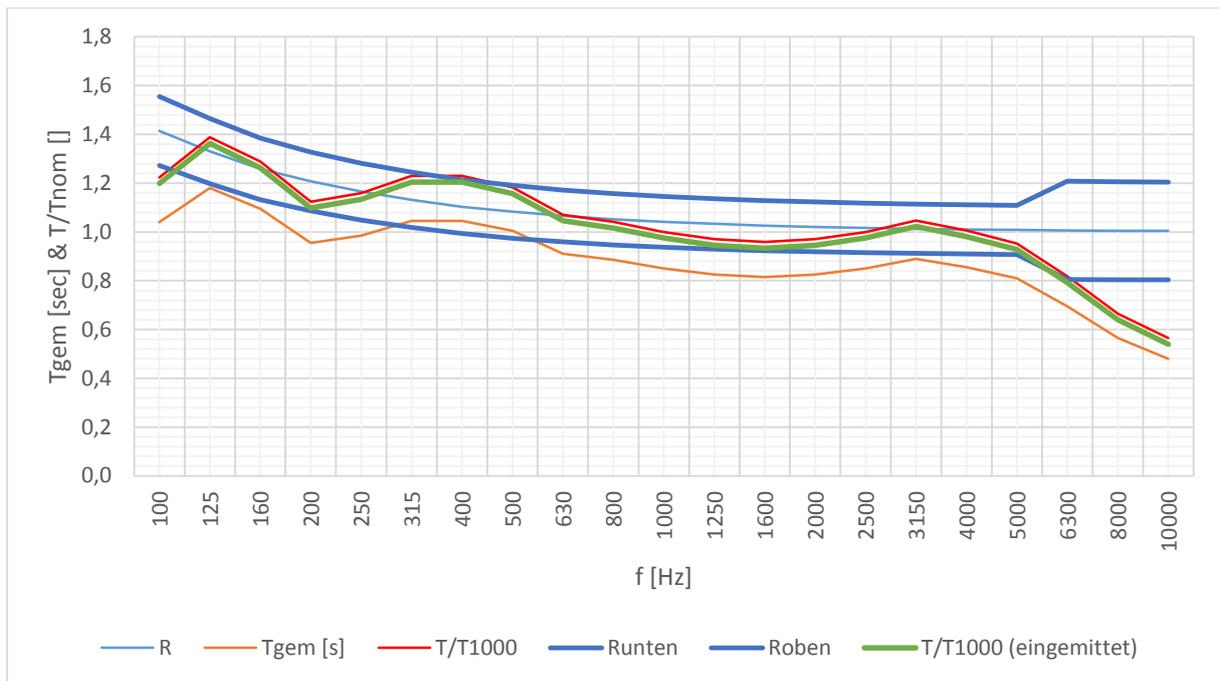


Abb. 5.17: Bestimmung der Nennnachhallzeit T_{nom} im QM-SHR (Abnahmemessung der TU-Graz)

Aktor-/Sensor-Positionen im LE-FFR

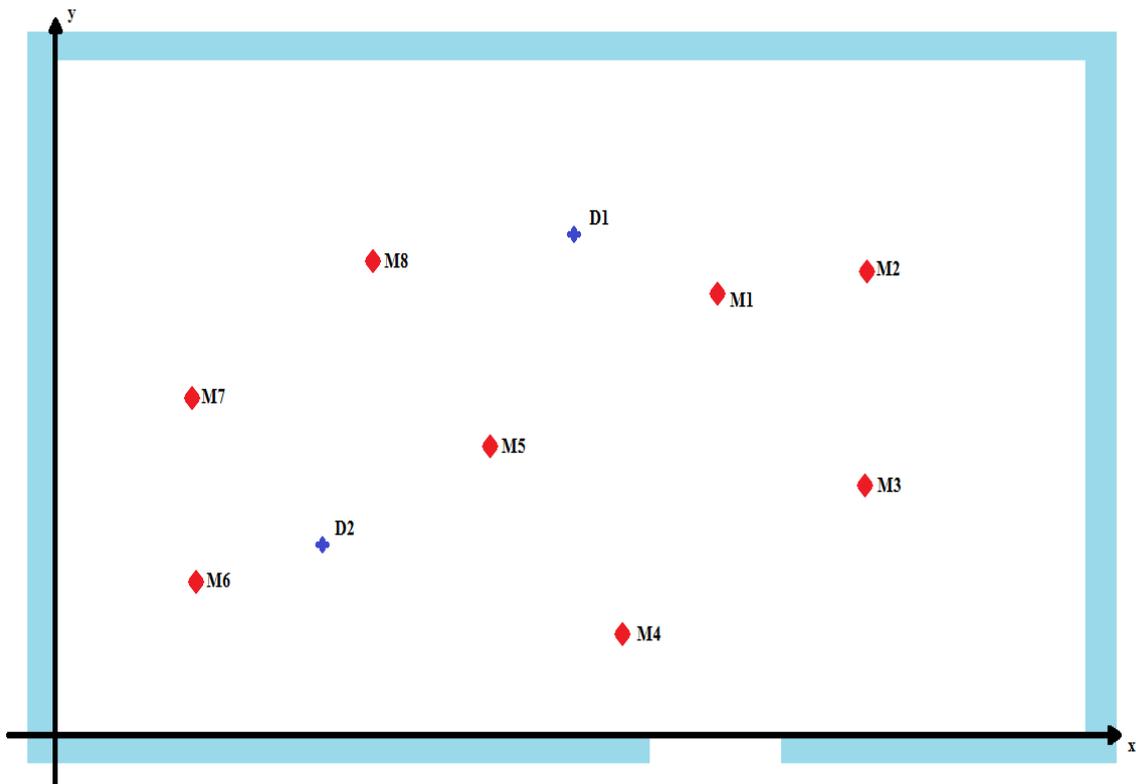


Abb. 5.18: Messpositionen im LE-FFR

Abb. 5.18 zeigt eine Skizze der Innenraumfläche mit den Messpositionen im LE-FFR. Die genauen Koordinaten sind in Tab. 5.12 angegeben.

Quellenpositionen				Mikrofonpositionen			
	x [m]	y [m]	z [m]		x [m]	y [m]	z [m]
D1	2,9	2,6	1,0	M1	3,4	2,3	1,8
D2	1,8	1	1,0	M2	4,5	2,4	3,0
				M3	4,4	1,5	1,3
				M4	3,0	0,8	1,8
				M5	2,4	1,6	3,0
				M6	0,9	0,8	1,6
				M7	0,9	1,8	2,9
				M8	1,9	2,4	1,9

Tab. 5.12: Messpositionen im LE-FFR

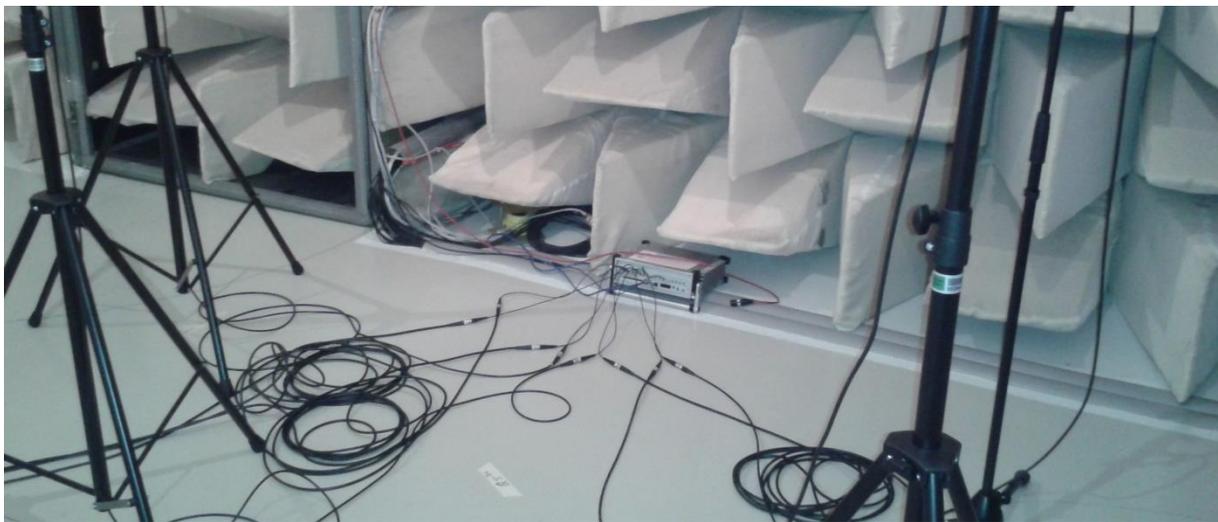


Abb. 5.19: FrontEnd PAK mobile MKII im LE-FFR

Meteorologische Bedingungen bei der Messung:

Datum	<i>RH</i> [%]	θ [°C]	p_{st} [kPa]
12.12.2015	35	20	102

Messung der Nachhallzeit im LE-FFR

Auch für den Viertel-Freifeldraum wurde die Nachhallzeit bestimmt. Die Messung wurde ebenfalls mit 2 Positionen des Dodekaeders (D1&D2) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tab. 5.13 bzw. Abb. 5.20 dargestellt.

f [Hz]	T [s]
100	0,40
125	0,33
160	0,24
200	0,20
250	0,16
315	0,14
400	0,10
500	0,08
630	0,07
800	0,06
1000	0,06
1250	0,08
1600	0,06
2000	0,06
2500	0,06
3150	0,06
4000	0,06
5000	0,06
6300	0,06
8000	0,05
10000	0,06

Tab. 5.13: gemessene Nachhallzeiten im LE-FFR

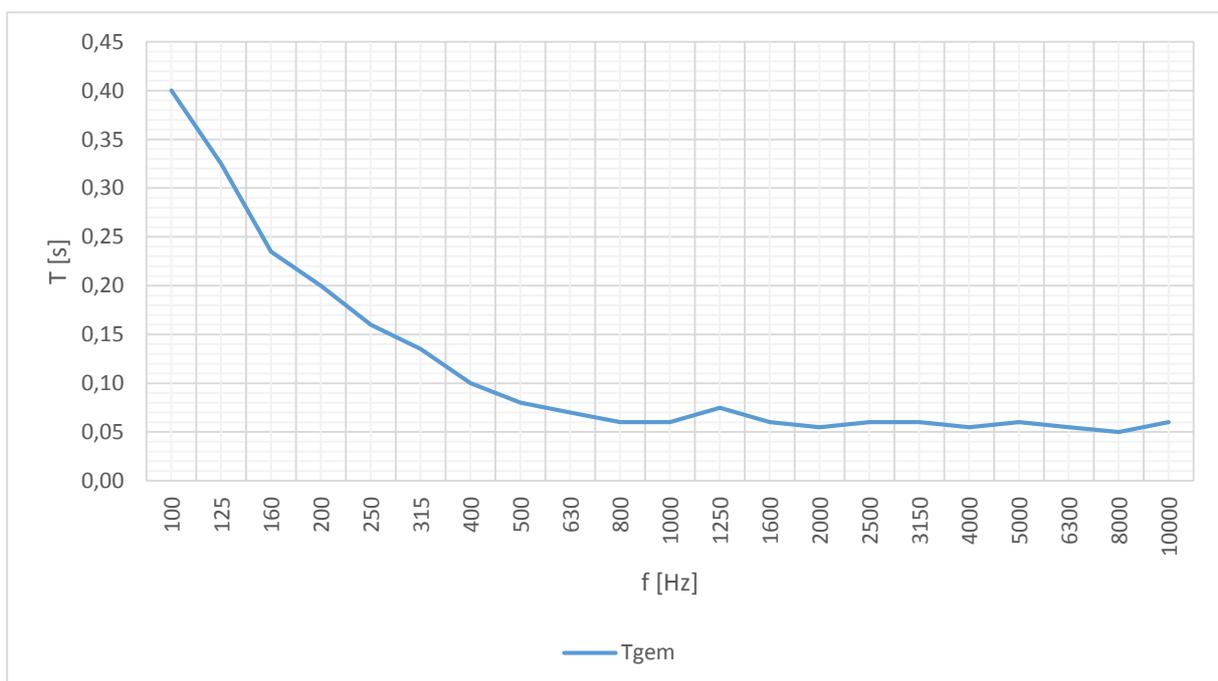


Abb. 5.20: gemessene Nachhallzeit im LE-FFR

Wie zu erwarten, ergeben sich sehr niedere Werte für die Nachhallzeit. Die Messung wurde durchgeführt, um mögliche Auffälligkeiten im Schallfeld (z.B. unnatürliche Nachhallzeitverlängerung durch Modenbildung) zu erkennen und um die äquivalente Absorptionsfläche für die K2-Berechnung in Kap. 5.6.2 zu bestimmen.

5.4 Anzahl der Aktor-/Sensorpositionen bei tonalen Anteilen

QM-SHR

Für den QM-Sonderhallraum wird die Mindestanzahl an Mikrofon- und Quellenpositionen über die Standardabweichung zwischen den Mikrofonpositionen bestimmt (siehe Tab. 5.14). Diese Standardabweichung muss für jede Quelle überprüft werden. Die Überprüfung der Oktavband-Schalldruckpegel wäre ausreichend, jedoch werden für die Masterarbeit auch die Terzband-Schalldruckpegel ausgewertet.

s_M	Oktavband-Mittelfrequenz	Anzahl der Mikrofonpositionen N_m		
		3	6	12
dB	Hz	Kleinste Anzahl der Quellenpositionen N_s		
$s_M < 2,3$	125 bis 8 000 und A-Bewertung	1	1	1
$2,3 \leq s_M \leq 4$	125	1	1	1
	250, 500 und A-Bewertung 1 000 bis 8 000	2	2	1
$s_M > 4$	125	3	2	2
	250 und A-Bewertung	4	3	2
	500	4	2	2
	1 000 bis 8 000	3	2	1

Tab. 5.14: Tabelle 4 aus ISO 3743-2 zur Abschätzung der benötigten Quellen- und Mikrofonpositionen

3 Mikrofonpositionen

Für eine Quellenposition sind die Schalldruckpegel an 6 Mikrofonpositionen zu messen. In der Firma Liebherr werden im QM-SHR im Moment lediglich 3 Mikrofonpositionen verwendet. Deshalb erfolgt die Überprüfung zunächst für 3 Mikrofonpositionen. Als nächster Schritt ist die geschätzte Standardabweichung zwischen den Mikrofonpositionen in dB nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$s_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_M} (L_{pi} - \bar{L}_p)^2}{N_M - 1}} \quad (5.22)$$

Wobei L_{pi} der Schalldruckpegel an der i -ten Mikrofonposition, \bar{L}_p der energetische Mittelwert aus L_{p1} bis L_{p3} und N_M die Anzahl der Mikrofonpositionen ist.

$$\bar{L}_p = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N_M} \cdot \sum_{i=1}^{N_M} \left(10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right) \right] \quad (5.23)$$

Für das Ergebnis von s_M ist dann aus Tab. 5.14 eine geeignete Kombination von Quellen und Mikrofonpositionen zu bestimmen.

In Abb. 5.21 bzw. Abb. 5.23 zeigt sich, dass die vorgegebene Grenze von $s_M < 2,3\text{dB}$ bei Beobachtung der Terzbänder zum Teil überschritten wird. Im tieffrequenten Bereich wird sogar die 4dB-Grenze für einzelne Betriebsfälle überschritten.

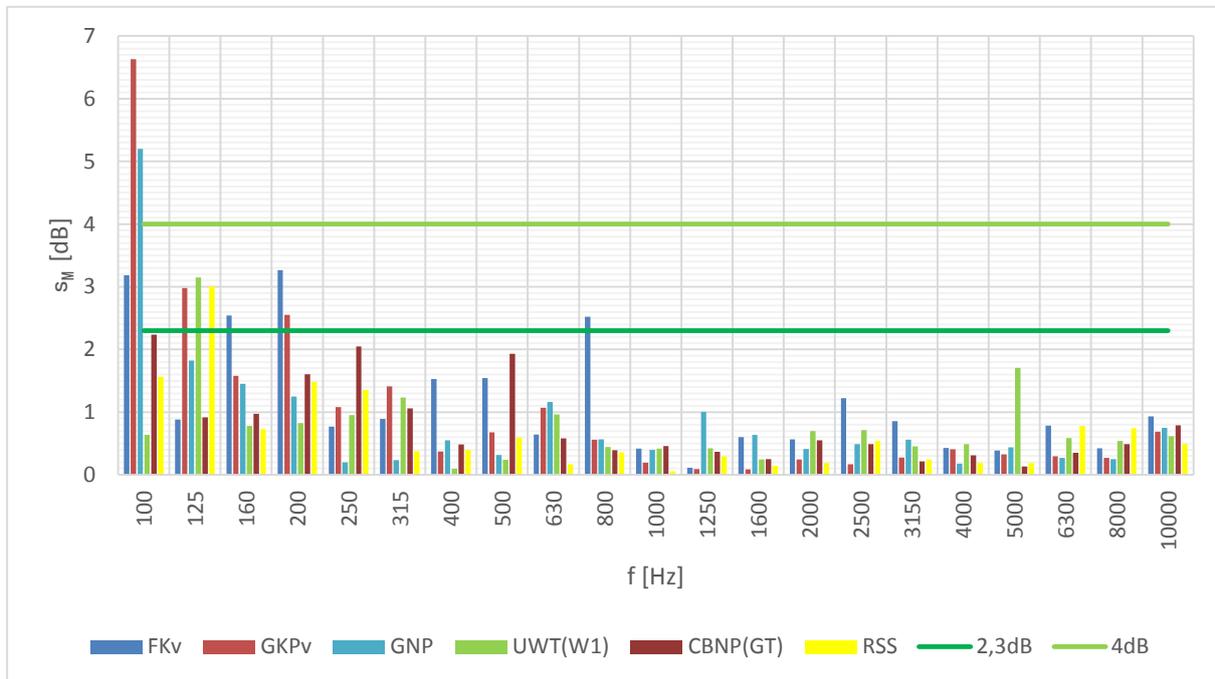


Abb. 5.21: s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen in Terzbändern für die Zyklusmessungen (Messung in KW44/2015)

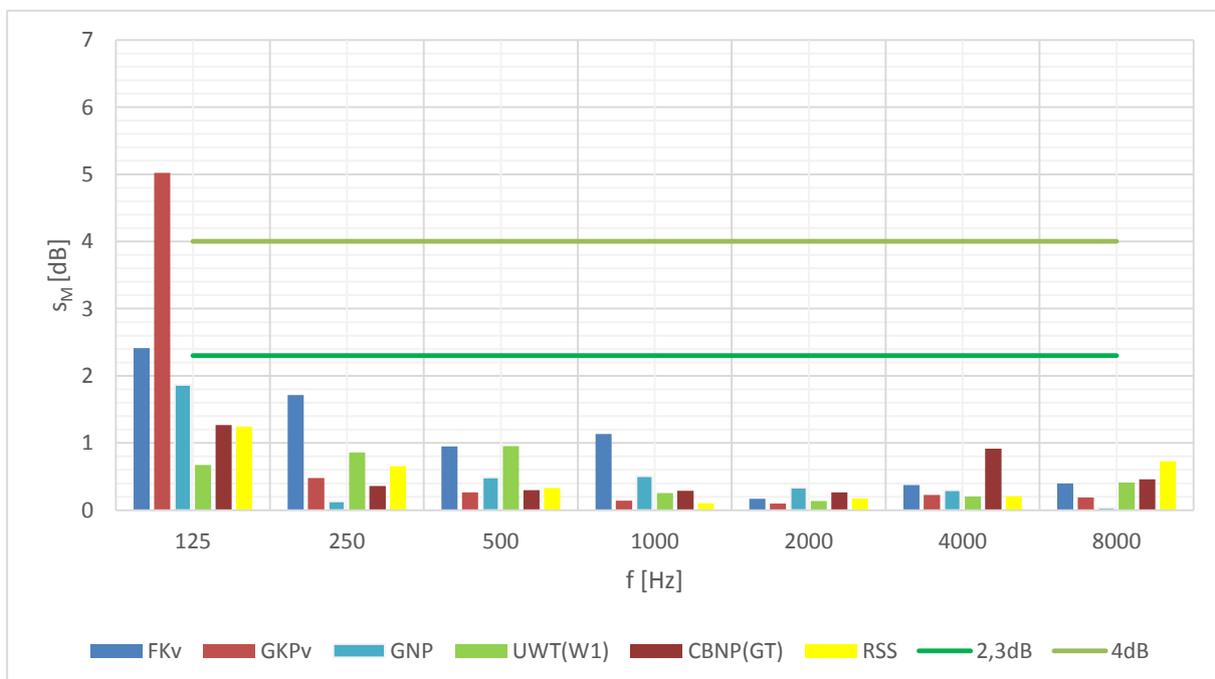


Abb. 5.22: s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen in Oktavbändern für die Zyklusmessungen (Messung in KW44/2015)

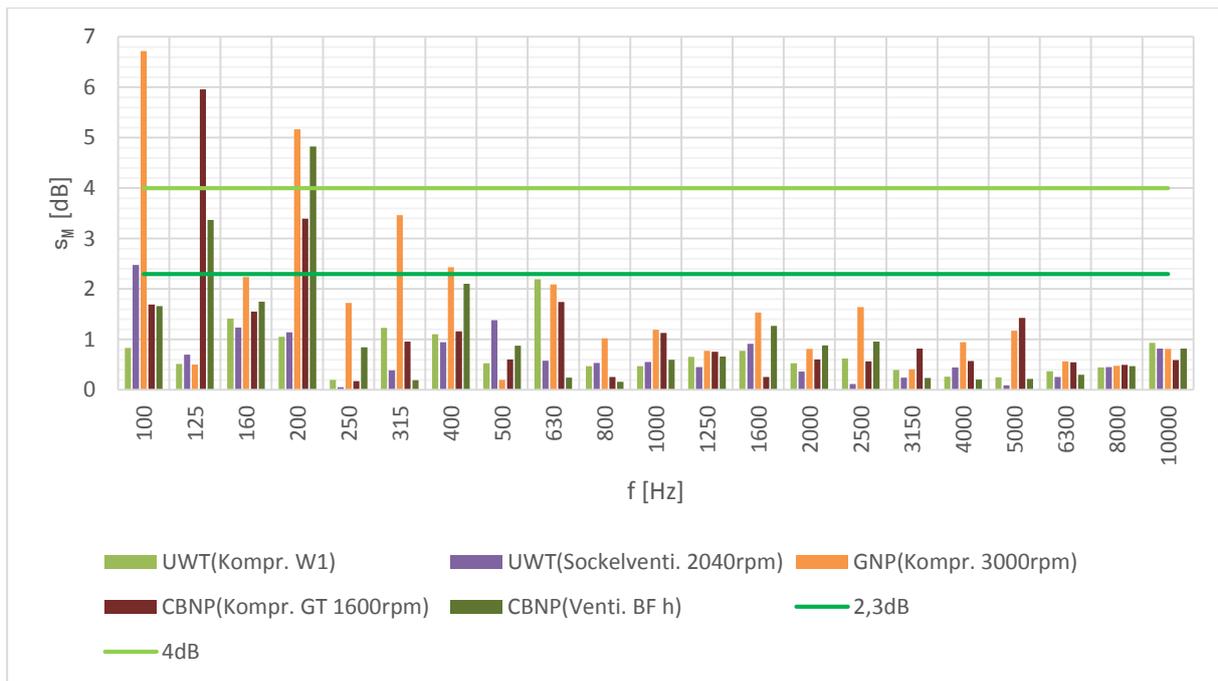


Abb. 5.23: s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen in Terzbändern für die Sequenz-Betriebe (Messung in KW44/2015)

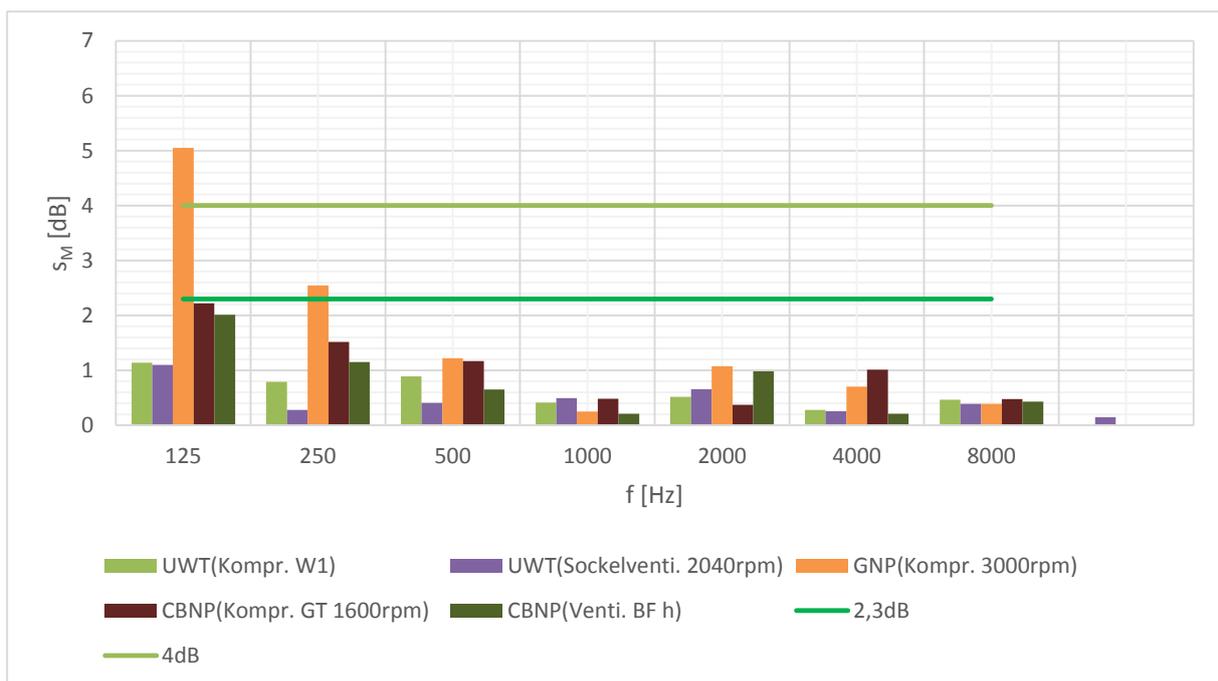


Abb. 5.24: s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen in Oktavbändern für die Sequenz-Betriebe (Messung in KW44/2015)

Abb. 5.22 und Abb. 5.24 zeigen die Überprüfung von s_M in Oktavbändern. Für die Zyklusbetriebe wird lediglich beim großen Gewerbegerät mit dem Deckenaggregat (GKPV) die Grenze $s_M \leq 4dB$ im 125Hz-Oktavband überschritten. Die Grenze $s_M \leq 2,3dB$ wird auch für die Zyklen des FKv im 125Hz-Oktavband überschritten. Bei den Sequenzbetrieben werden die Grenzen beim GNP 3666 zweimal überschritten, für das 250Hz-Oktavband die 2,3dB-Grenze

und für das 125Hz-Oktavband auch die 4dB-Grenze. Die großen Unterschiede treten hier jeweils zum Mikrofon an der Position „Mitte“ auf.

Laut Tab. 5.14 ist auch die Überprüfung der A-bewerteten Summenpegel notwendig (Abb. 5.25).

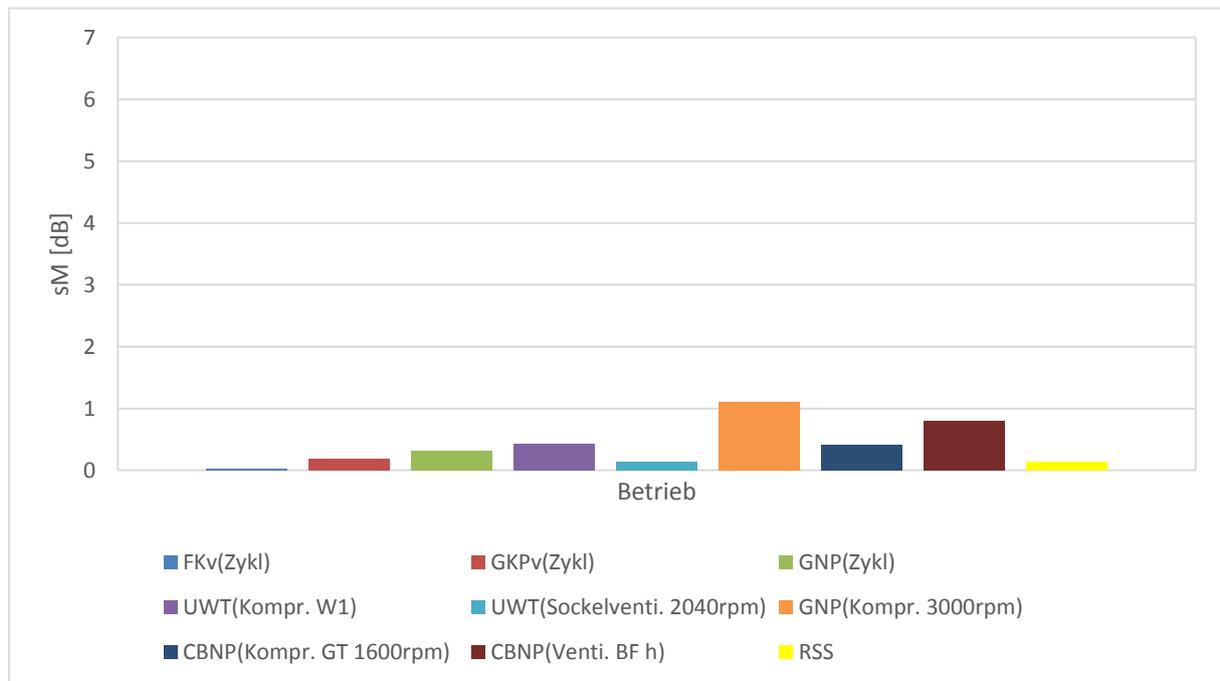


Abb. 5.25: Breitband- s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen (Messung in KW44/2015)

Hier wird keine Grenze für s_M überschritten. Anhand der Ergebnisse aus Abb. 5.22, Abb. 5.24 und Abb. 5.25 ist nun mit Hilfe von Tab. 5.14 eine geeignete Kombination aus Quellenpositionen und Mikrofonpositionen zu wählen. Laut Norm muss die Überprüfung für jedes zu untersuchende Gerät durchgeführt werden. Ausgehend von 3 Mikrofonen ergibt das für die hier untersuchten Messobjekte folgende Anzahl an Quellenpositionen:

	Quellenpositionen
FKv 500	1
GKPv 5167	3
GNP 3666	3
CBNP 6520	1
UWT 1672	1

Tab. 5.15: Anzahl der Quellenpositionen bei 3 Mikrofonen

Eine Messung mit mehreren Quellenpositionen ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchführbar, deshalb wird nun die Messung mit 6 Mikrofonen für dieselben Messobjekte und ausgewählte Betriebszustände wiederholt.

6 Mikrofonpositionen

Für die Messung werden zusätzlich zu den 3 Fixpositionen der Firma Liebherr noch 3 Mikrofone im Raum nach ([ISO 3743-2] Kap. 7.3) platziert. Es gilt einen Mindestabstand zu reflektierenden Flächen von 0,85m einzuhalten. Zwischen den Mikrofonpositionen gilt ein Mindestabstand von 1,7m und von jeder Mikrofonposition zur Oberfläche der Quelle muss mindestens ein Abstand von 1,8m eingehalten werden.

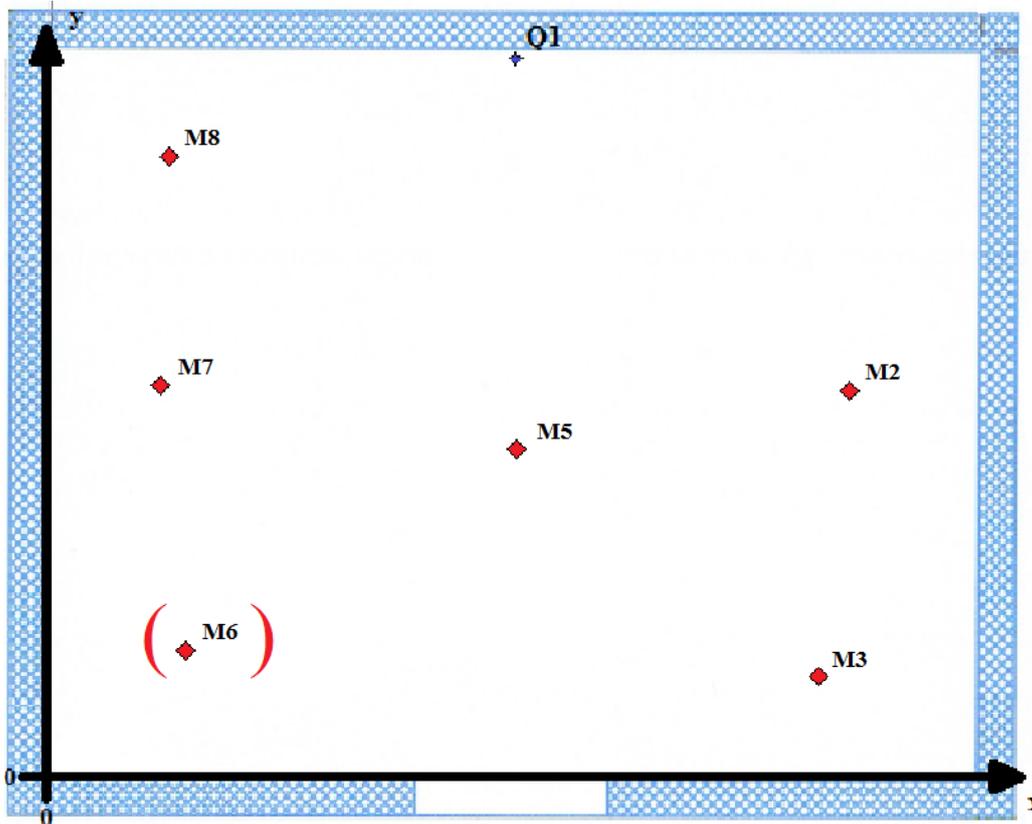


Abb. 5.26: Aktor-/Sensorpositionen der s_M -Prüfung mit 6 Mikrofonen

Die genauen Sensorpositionen sind in Abb. 5.26 bzw. Tab. 5.16 dargestellt. Die Positionsbezeichnungen sind dabei an jene aus Kap. 5.3 angelehnt.

Mikrofonpositionen			
	x [m]	y [m]	z [m]
M2 (Rechts)	6,2	3,3	2,5
M3	6,0	1,6	2,9
M5 (Mitte)	3,8	2,8	2,8
M6	1,8	1,8	1,4
M7 (Links)	1,6	3,3	2,8
M8	1,7	4,7	1,6

Tab. 5.16: Sensorpositionen der s_M -Prüfung mit 6 Mikrofonen

Um nun einen Vergleich der Standardabweichung zwischen 3 und 6 Mikrofonpositionen zu erhalten, wird s_M einmal für die 3 Liebherr-Positionen und dann für alle 6 Positionen bestimmt

und verglichen. Nach den ersten Auswertungen wurde schnell klar, dass das Mikrofon 6 sehr schlecht positioniert war. Deshalb wird dieses Mikrofon nicht für die Auswertung verwendet. Es folgt nun deshalb der Vergleich zwischen 3 und 5 Mikrofonen.

Abb. 5.27 und Abb. 5.28 zeigen das Ergebnis für die Zyklusmessungen aller 5 Geräte für die 3 und die 5 Mikrofonmessung. Für das UWT-Gerät wurden nur Zyklen für das Weinfach 1 verwendet und beim CBNP-Gerät nur die Gefrierteil-Zyklen. Es wurden immer mindestens zwei Zyklen gemessen und dann der energetische Mittelwert daraus gebildet. Zusätzlich zu den 5 Geräten wurde auch die RSS gemessen und ausgewertet.

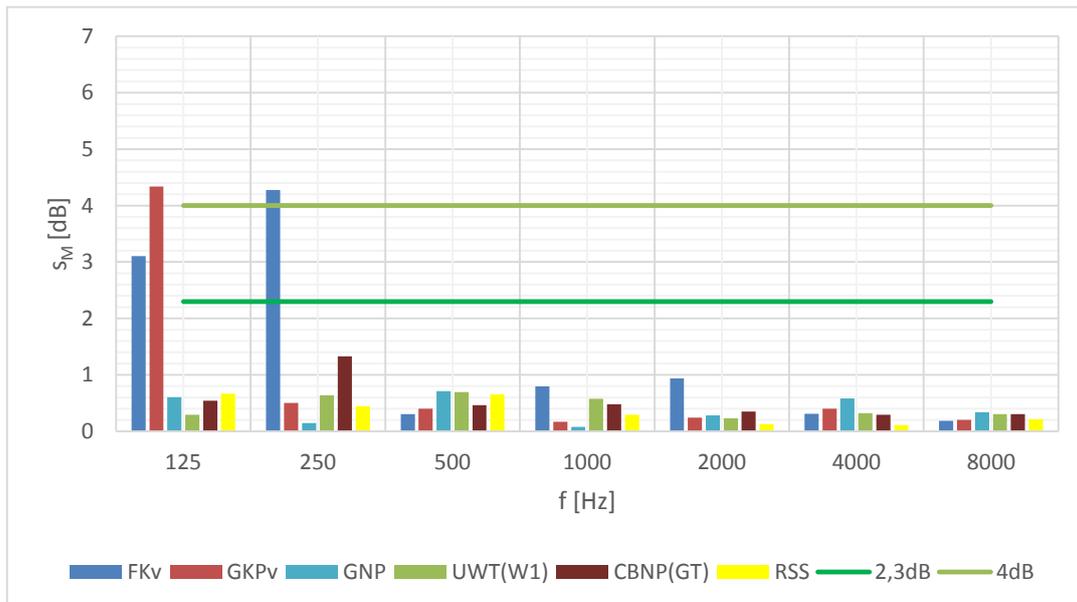


Abb. 5.27: s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen in Oktavbändern für die Zyklusmessungen (Messung in KW4/2016)

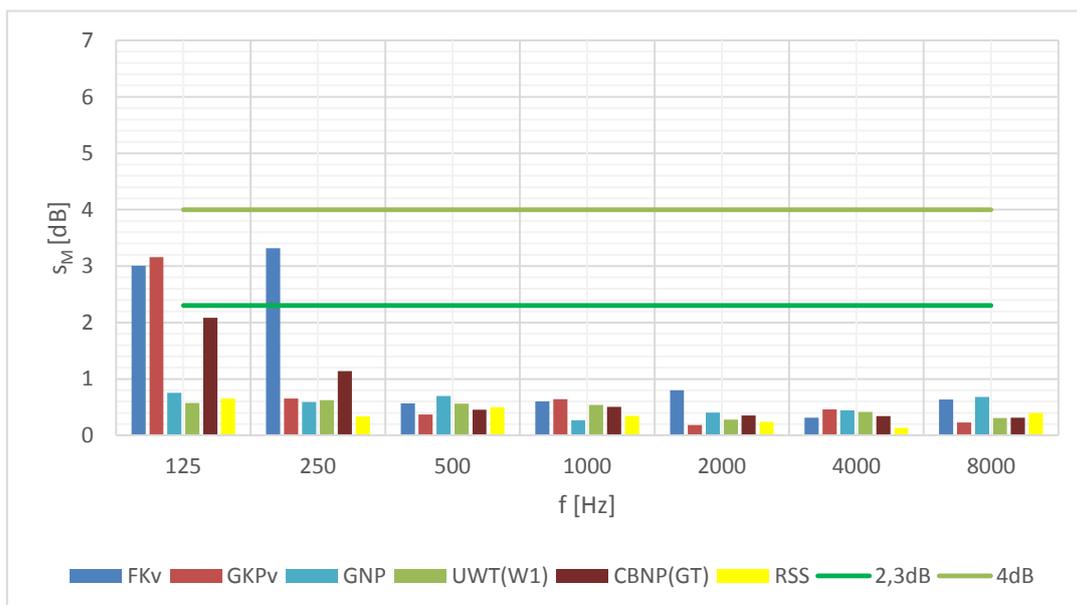


Abb. 5.28: s_M -Prüfung mit 5 Mikrofonen in Oktavbändern für die Zyklusmessungen (Messung in KW4/2016)

Für die 5-Mikrofonmessung wird die 4dB-Grenze nicht mehr überschritten. Das ist eine deutliche Verbesserung gegenüber der 3-Mikrofonmessung. Im Vergleich mit den Messungen aus KW44/2015 ist aufgefallen, dass die Messergebnisse teilweise starken Schwankungen unterliegen die auf das nicht konstante Betriebsverhalten der Geräte zurückzuführen sind.

Abb. 5.29 und Abb. 5.30 zeigen das Ergebnis für ausgewählte Sequenzbetriebe. Hier sind keine großen Unterschiede zwischen beiden Messungen zu erkennen. Auch hier ergeben sich Unterschiede aufgrund der Betriebsschwankungen im Vergleich zu Abb. 5.24.

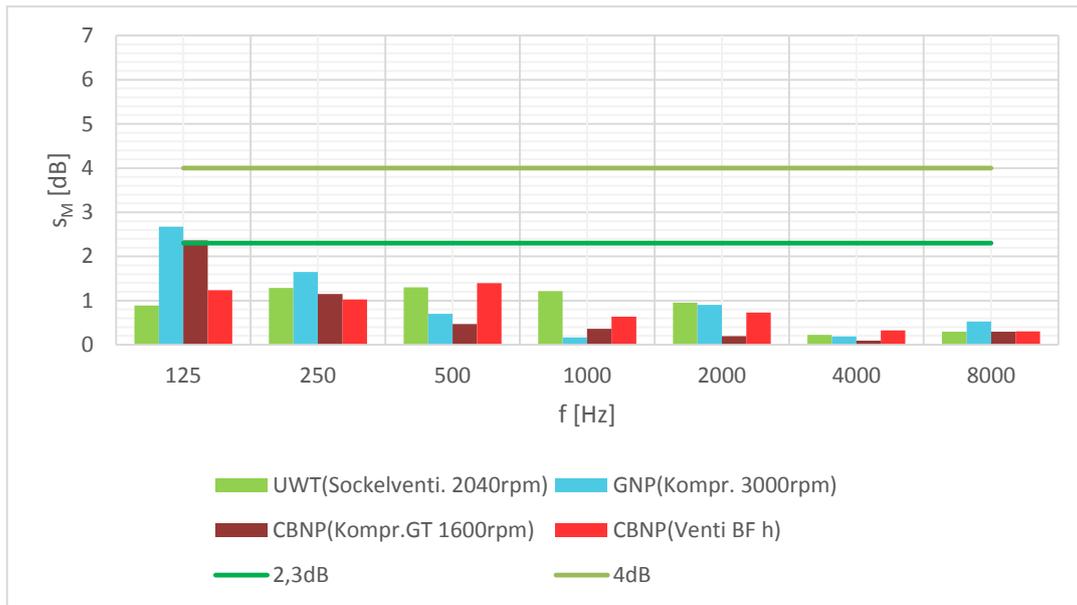


Abb. 5.29: s_M -Prüfung mit 3 Mikrofonen in Oktavbändern für die Sequenzmessungen (Messung in KW4/2016)

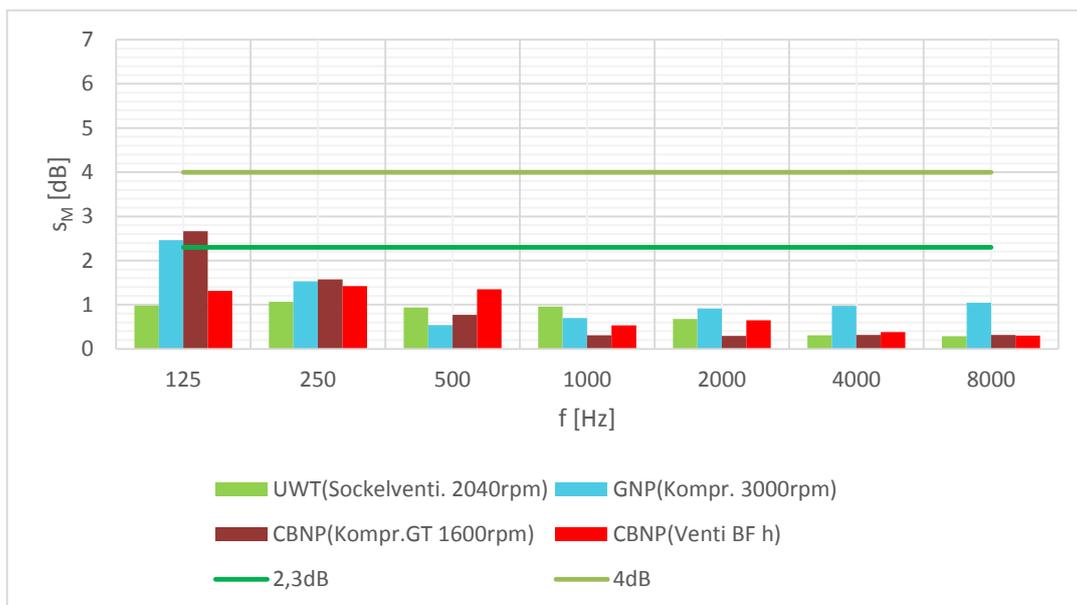


Abb. 5.30: s_M -Prüfung mit 5 Mikrofonen in Oktavbändern für die Sequenzmessungen (Messung in KW4/2016)

Anhand der Ergebnisse ergeben sich die Quellenpositionen laut Tab. 5.17.

	Quellenpositionen (3-Mik)	Quellenpositionen (5-Mik)
FKv 500	4	2
GKpv 5167	3	1
GNP 3666	1	1
CBNP 6520	1	1
UWT 1672	1	1

Tab. 5.17: Anzahl der Quellenpositionen (Messung in KW4/2016)

Bei der Auswertung hat sich gezeigt, dass je nach Messung unterschiedlich große Streuungen zwischen den Mikrofonen auftreten. Die 3 Liebherr-Positionen wurden im Hinblick auf eine möglichst kleine Standardabweichung ausgewählt. Werden nun im Vergleich dazu 2 oder 3 weitere Positionen *beliebig* gewählt, kann es auch passieren, dass die Standardabweichung zwischen den Sensorpositionen größer wird. Mit 5 oder 6 *eingemessenen* Sensorpositionen könnte das Ergebnis jedoch deutlich verbessert werden.

LE-FFR

In Kapitel 4.2.1 wird die Anzahl der Mikrofonpositionen für den LE-FFR für die Messung der RSS überprüft. Da die RSS als breitbandige Punktquelle mit annähernd kugelförmiger Schallabstrahlung angesehen werden kann, die Messobjekte dies jedoch keinesfalls sind, wird in diesem Kapitel die Anzahl der Mikrofonpositionen für die Messobjekte überprüft. Dazu wird für die Messobjekte und verschiedene Betriebszustände an den verschiedenen Mikrofonpositionen die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen Summen-Schalldruckpegel gebildet und überprüft, wann diese Differenz die Anzahl der Mikrofonpositionen übersteigt ([ISO 3744] Kap.8.1.2, a).

Tab. 5.18 zeigt nun das Ergebnis für die 6-Mikrofonmessung für einige Betriebszustände aus dem Messprogramm (siehe Tab. 3.2). Die Forderung nach einer Differenz kleiner 6dB zwischen den Messpositionen wird in den meisten Fällen eingehalten. Die höchsten Pegel treten abwechselnd an den Positionen 1, 2 und 3, also den 3 unteren Positionen der Hüllfläche auf (vgl. Abb. 4.1). Die niedrigsten Pegel treten immer an den Positionen 4 oder 5, also rechts bzw. links vorne oben auf (vgl. Abb. 4.1). Für das UWT-Gerät tritt zusätzlich ISO 3744 Kap. 8.1.2, c) in Kraft. Beim Betrieb des Sockelventilators wird das Geräusch einer großen Geräuschquelle nur von einem kleinen Teil der Quelle abgestrahlt. In diesem Fall sind das die Lüftungsöffnungen am unteren Teil des Gerätes. Es sind somit zusätzliche örtlich konzentrierte Messpositionen im Bereich der größten Abstrahlung notwendig, um einen Teil der Messfläche eingehender zu untersuchen. Die zusätzlichen Mikrofonpositionen sind anhand ISO 3744, Anhang C, Bild C.3 zu wählen. Der örtliche Mittelwert des Schalldruckpegels ist dann nach ISO 3744 Kap. 8.2.2.2 zu berechnen.

Tab. 5.19 zeigt das Ergebnis für die 10-Mikrofonmessung für einige Betriebszustände aus dem Messprogramm (siehe Tab. 3.2). Die Forderung für $\Delta L < 10\text{dB}$ wurde für alle Betriebsfälle eingehalten. Für das GKpv-Gerät, also das größte Gerät mit dem Deckenaggregat, ergeben sich die kleinsten Differenzen zwischen den Mikrofonpositionen.

Gerät	Betriebsart	L_p [dB(A)] am Messpunkt						ΔL [dB]
		1	2	3	4	5	6	
FKv 500	Zyklus	17,8	17,4	17,5	13,5	14,3	17,2	4,3
GNP 3666	Zyklus	21,7	24,2	24,1	19,8	19,4	23,1	4,8
GNP 3666	Venti. rad h	19,7	22,5	21,4	17,6	17,9	21,0	4,9
GNP 3666	Kompr.(1600rpm)	17,8	20,0	20,4	16,4	16,4	18,7	4,0
GNP 3666	Kompr.(3000rpm)	21,2	24,6	25,1	19,4	20,6	21,5	5,7
UWT 1672	Zyklus	27,2	27,0	26,4	23,8	22,9	24,8	4,3
UWT 1672	Sockelventi. (1080rpm)	25,2	23,4	22,6	22,8	20,8	20,3	4,9
UWT 1672	Sockelventi. (2040rpm)	36,4	34,0	32,9	30,8	29,9	31,0	6,5

Tab. 5.18: Überprüfung der Mikrofonanzahl für die 6-Mikrofonmessung

Gerät	Betrieb	L_p [dB(A)] am Messpunkt										ΔL [dB]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GKpv 6520	Zyklus	44,7	43,8	45,4	41,1	40,7	44,5	42,8	45,6	40,9	41,6	4,9
CBNP 5167	Zyklus GT	28,3	28,9	27,7	23,2	23,1	25,9	24,9	25,5	22,4	21,7	7,2
CBNP 5167	Venti. GT	26,6	26,7	26,4	21,6	22	25,1	23,3	25,0	21,3	21,0	5,7
CBNP 5167	Venti. BF h	29,3	26,1	28,8	25,4	24,1	26,5	25,7	25,8	22,0	21,0	8,3
CBNP 5167	Kompr. KT (1300rpm)	20,6	19,9	19,8	14,5	14,1	18,3	13,4	15,6	13,5	13,5	7,2

Tab. 5.19: Überprüfung der Mikrofonanzahl für die 10-Mikrofonmessung

5.5 Fremdgeräuschanalyse

Ein Trend, der sich in der Kühlgerätebranche abzeichnet, geht in Richtung immer leiserer Geräte für den Haus- und Hotelbereich. Die derzeit leisesten Geräte am Markt (laut Herstellerangaben), bewegen sich im Bereich um 25dB(A) Schallleistungs-Summenpegel. Das reproduzierbare Messen solcher Pegel stellt sehr hohe Anforderungen an die Messtechnik und an die Messumgebung. Mit der derzeit verwendeten Messhardware ist es möglich, Schallleistungs-Summenpegel bis ca. 22dB(A) normgerecht zu messen. Um die untere Messgrenze der Umgebung zu beurteilen, wurden über eine ganze Woche verteilt, Fremdgeräuschkmessungen durchgeführt.

QM-SHR

Durch den Doppelschichtbetrieb im QM-SHR war die Anzahl der Messungen beschränkt, trotzdem konnte eine repräsentative Wochenansicht des Fremdgeräusches erstellt werden.

Abb. 5.31 zeigt die Wochenansicht der Terzband-Volumenschalldruckpegel. Die ersten Messungen waren in der Früh kurz vor Schichtbeginn (vor 05.00 Uhr) und die letzten in der Nacht nach Schichtende (nach 23.00 Uhr). Daraus wurden dann ein minimaler und ein maximaler Fremdgeräusch-Volumenschalldruckpegel ermittelt. Für die A-bewerteten Summen-Volumenschalldruckpegel ergeben sich ein minimaler Wert von 4,3dB(A) und ein maximaler Wert von 7,1dB(A). Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Pegel im Raum ist somit mit knapp 3dB relativ gering und der Fremdgeräuschpegel über den Tages- und Wochenverlauf unterliegt keinen sehr großen Schwankungen.

Es hat sich gezeigt, dass im Sonderhallraum das Licht einen bemerkbaren Pegelanstieg oberhalb 2500Hz bewirkt, weshalb sämtliche Fremdgeräuschkmessungen ohne Licht durchgeführt wurden.

Was ist nun der kleinste mögliche Schallleistungspegel, der normgerecht gemessen werden kann?

Ausgehend von einem mittleren Fremdgeräusch-Summenpegel von $\overline{L_{p(B)}} = 6\text{dB(A)}$ liegt laut Norm der kleinste messbare Schalldruck-Summenpegel bei ca. 16dB(A) (vgl. Kap.2.2.3). Für die Schallleistungsberechnung im Direktverfahren wird zum Volumen-Schalldruckpegel eine Konstante von ca. 11dB dazu addiert (vgl. Kap. 5.2). Das heißt, der kleinste (ohne Fremdgeräuschkorrektur) messbare Schallleistungs-Summenpegel beträgt ca. 27dB(A). Mit einer geeigneten Fremdgeräuschkorrektur sind mit dem vorhandenen Messequipment sogar Schallleistungs-Summenpegel bis ca. 22dB(A) normgerecht messbar.

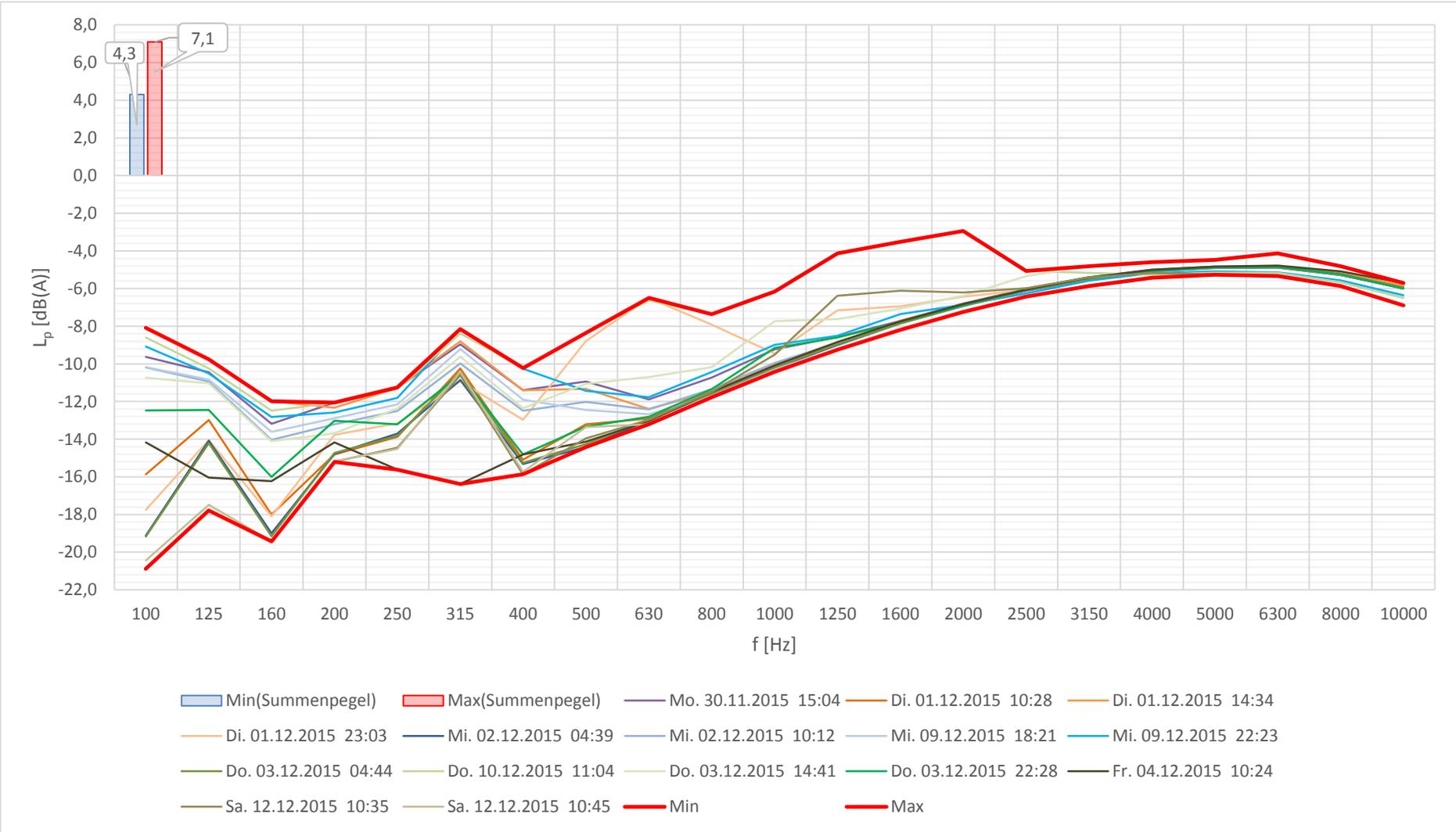


Abb. 5.31: Wochenansicht der Terzband-Volumenschalldruckpegel für das Fremdgeräusch, QM-SHR

LE-FFR

Auch für diesen Raum wurde versucht eine repräsentative Wochenansicht des Fremdgeräuschpegels zu erstellen. Dieser Raum war frei zugänglich und es wurde ein Strom-getriggertes Messsystem eingerichtet, das alle 2 Stunden eine 30-Sekunden-Messung startet. Der Fremdgeräuschpegel muss im Prinzip für jede Messfläche bestimmt werden, jedoch wurden für eine qualitative Abschätzung die Mikrofone statistisch im Raum verteilt und die Volumenschalldruckpegel bestimmt. Auch im Viertel-Freifeldraum war das Licht bei sämtlichen Messungen ausgeschaltet.

Abb. 5.32 zeigt die Wochenansicht der Volumen-Terzband-Schalldruckpegel. Für den Summenpegel ergibt sich minimal ein Wert von 4,7dB(A), der aber nur außerhalb der Betriebszeiten erreicht werden kann. Maximal wird ein Summenpegel von 23,2dB(A) erreicht. Diese hohen Pegel entstehen, wenn das Hochregal hinter dem Schallmessraum befahren wird. In diesem Raum streuen die Pegel stärker und es gibt massive Probleme durch bestimmte Geräusche von außen. Deshalb wurden am Freitag einige Situationen gezielt nachgespielt. Dazu gehören die Wickelmaschine und der Klammern-Schussapparat. Die größten Pegel werden aber beim Befahren des Hochregals im OG1 erreicht.

Wird vom wirklich massiv lauten Störgeräusch durch das Hochregal abgesehen, ergibt sich über die Woche verteilt ein mittlerer Fremdgeräuschpegel von ca. 8dB(A). Das heißt, es können Geräusche bis ca. 18dB(A) Summen-Schalldruckpegel bzw. ca. 30dB(A) Schalleistungs-Summenpegel (vgl. Kap. 5.2) ohne Fremdgeräuschkorrektur gemessen werden (vgl. Kap. 2.1.3). Mit Fremdgeräuschkorrektur sind auch hier Schalleistungs-Summenpegel bis ca. 22dB(A) messbar.

Wird jedoch das Hochregal befahren, liegen die kleinsten messbaren Summen-Schalleistungspegel bei ca. 45dB(A). Da dieses Störgeräusch nicht stationär und von begrenzter Dauer ist (ca. 20 bis 30s), kann es auch nicht über eine Fremdgeräuschkorrektur korrigiert werden.

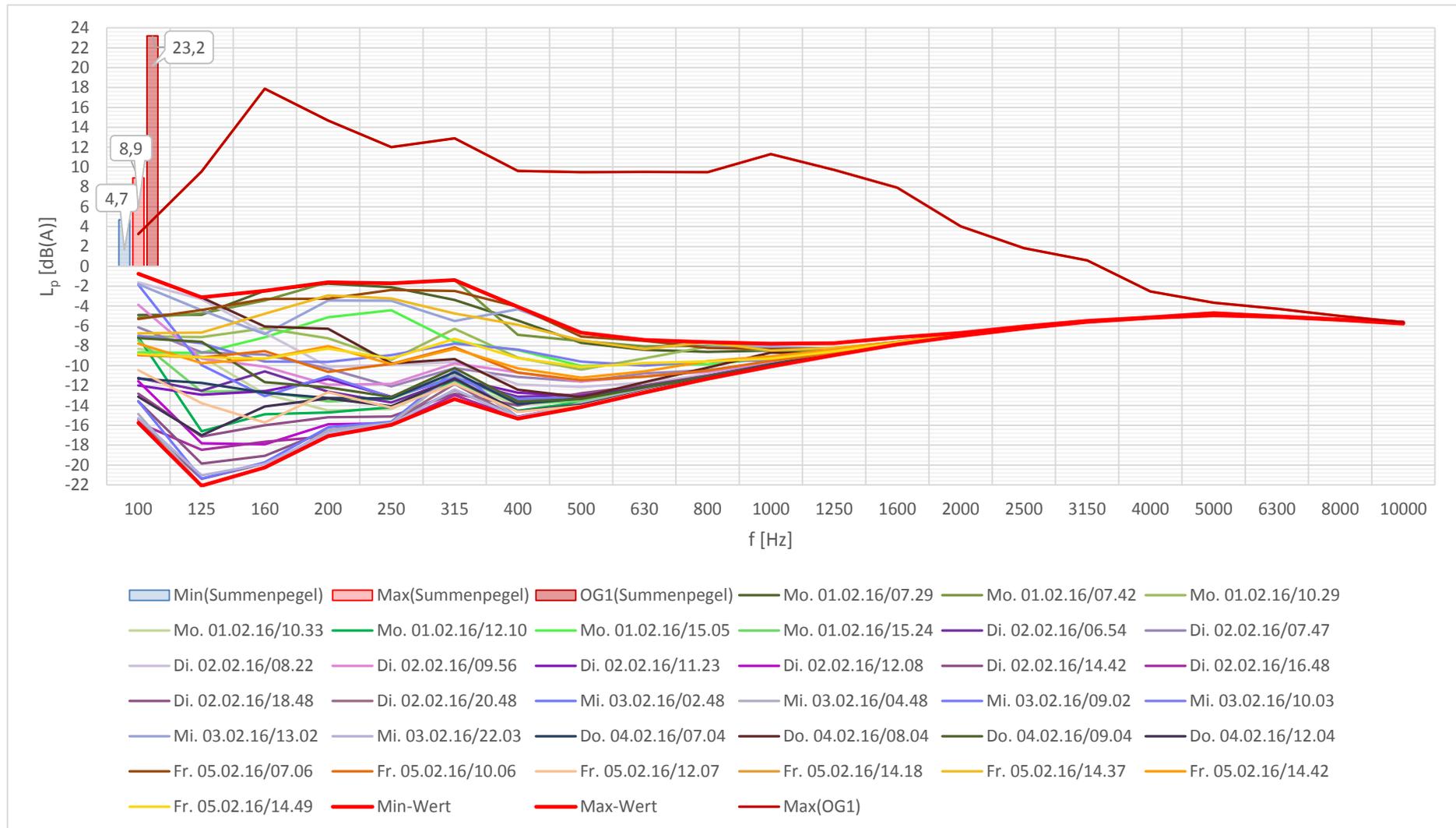


Abb. 5.32: Wochenansicht Fremdgeräusch- Volumenschalldruckpegel, LE-FFR

5.6 RSS-Kalibrierung im Viertel-Freifeld

Die Berechnung der K₂-Umgebungskorrektur weist sehr viele Ungenauigkeiten auf und führt immer wieder zu Diskussionen. Zu diesem Anlass hat die PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Untersuchungen zur Raumrückwirkung in hochabsorbierenden Halb- und Viertelräumen gemacht ([DAGA 2010]).

Die Messung in geschlossenen Räumen beruht auf der Annahme, dass sich das Schallfeld im zu untersuchenden Raum aus einem direkten und einem diffusen Anteil zusammensetzt. In einem Punkt lässt sich somit nur die Summe beider Schalldruckanteile messen. Die Schallleistung der Quelle ergibt sich also aus dem Volumenmittelwert des Diffusfeld-Schalldrucks, dem Absorptionsvermögen A und der Schallkennimpedanz der Luft $\rho \cdot c$ bzw. aus dem Hüllflächenmittelwert des Direktfeld-Schalldrucks und dem Hüllflächeninhalt S zu:

$$P = \frac{\overline{p_{\Sigma}^2}}{\rho \cdot c} \cdot S \cdot \frac{1}{1 + 4S/A} \quad (5.24)$$

Wird nun das Hüllflächenverfahren zur Schallleistungsbestimmung angewandt, lautet die Korrektur:

$$K_2 = 10 \cdot \log \left(1 + \frac{4S}{A} \right) \quad (5.25)$$

Diese K₂-Umgebungskorrektur kann, wie bereits beschrieben, ermittelt werden, indem eine bekannte Referenzquelle in den Raum eingespielt und auf einer Hüllfläche der Schalldruck gemessen wird. Die so ermittelte Schallleistung ist jedoch vom Messabstand, von der Hüllflächenform und von der Anordnung der Messpunkte abhängig. Die Kalibrierung erfolgt im Halb-Freifeld auf einer Halbkugel-Hüllfläche, die spiralförmig abgetastet wird. In der Firma Liebherr kommen jedoch lediglich quaderförmige Messflächen zum Einsatz. Die Anwendung des Kalibrierzeugnisses ist deshalb nicht optimal. Aus diesem Grund wird nun ein eigenes Kalibrierzeugnis erstellt, indem die Referenzquelle im Viertel-Freifeld vermessen wird. Aus einer zweiten Messung im reflexionsarmen Raum kann dann die Raumrückwirkung bzw. die optimierte K₂-Umgebungskorrektur bestimmt werden.

5.6.1 Messung der Schallleistung

Die Messung erfolgt nach ISO 6926, jedoch mit einer quaderförmigen Hüllfläche im Viertel-Freifeld. Dazu war ein ausreichend großes freies Gelände mit möglichst schallhartem Untergrund und einer schallharten, senkrechten, reflektierenden Ebene notwendig. Auf dem Firmengelände konnte eine annehmbare Näherung gefunden werden (Abb. 5.33). Der Untergrund ist asphaltiert, die senkrechte Ebene dahinter besteht aus Beton und darüber ab ca. 1,9m aus Glas. An der senkrechten Ebene ist in einer Höhe von 1,2m eine vorstehende 90° Kante von 6cm, rechtsseitig ist im Abstand von ca. 6m eine 90° Bruch-Kante, linksseitig kommen nach ca. 8m der Treppenaufgang und der überdachte Raucherplatz aus Glas. Sämtliche Rollläden wurden für die Messung geöffnet. Um das Umgebungsgeräusch so niedrig wie möglich zu halten, wurde die Messung nachts zwischen 03.00 und 06.00 Uhr durchgeführt.



Abb. 5.33: Messplatz im Freien

Insgesamt wurden 8 Messungen gemacht (+ 4 Fremdgeräuschmessungen). 2 Hüllflächen für die 6 Mikrofonmessung und 2 Hüllflächen für die 10 Mikrofonmessung und dazu für jede Hüllfläche jeweils 2 Quellenpositionen. Eine war direkt an der Wand und die zweite in der Mitte der jeweiligen Messflächenbodenprojektion. Als Hüllflächen dienten jene der Geräte aus den Basismessungen. Dabei wurde die kleinste und größte Hüllfläche der 6-Mikrofonmessung (Tab. 5.20) und die kleinste und größte Hüllfläche für die 10-Mikrofonmessung (Tab. 5.21) verwendet.

Nr.	x	y	z	Nr.	x	y	z
1	1,45	0,00	0,81	1	1,75	0,00	1,38
2	0,73	1,21	0,81	2	0,88	1,35	1,38
3	0,73	-1,21	0,81	3	0,88	-1,35	1,38
4	1,45	1,21	1,62	4	1,75	1,35	2,75
5	1,45	-1,21	1,62	5	1,75	-1,35	2,75
6	0,73	0,00	1,62	6	0,88	0,00	2,75
S [m²]	12,1			S [m²]	21,8		

Tab. 5.20: kleinste und größte Hüllfläche für die 6-Mikrofonmessung

Der Fremdgeräuschpegel wurde für jede Hüllfläche, also insgesamt viermal bestimmt.

Nr.	x	y	z	Nr.	x	y	z
1	0,82	-1,38	0,75	1	0,91	-1,35	0,78
2	1,63	0,00	0,75	2	1,82	0,00	0,78
3	0,82	1,38	0,75	3	0,91	1,35	0,78
4	1,63	-1,38	1,51	4	1,82	-1,35	1,56
5	1,63	1,38	1,51	5	1,82	1,35	1,56
6	0,82	-1,38	2,26	6	0,91	-1,35	2,34
7	1,63	0,00	2,26	7	1,82	0,00	2,34
8	0,82	1,38	2,26	8	0,91	1,35	2,34
9	1,63	-1,38	3,01	9	1,82	-1,35	3,12
10	1,63	1,38	3,01	10	1,82	1,35	3,12
S [m²]	22,6			S [m²]	24,6		

Tab. 5.21: kleinste und größte Hüllfläche für die 10-Mikrofonmessung



Abb. 5.34: Messaufbau für die 6-Mikrofonmessung (kleinste Hüllfläche)



Abb. 5.35: Messaufbau für die 10-Mikrofonmessung (größte Hüllfläche)

Meteorologische Bedingungen bei der Messung:

θ_{min} [°C]	θ_{max} [°C]	p_s [kPa]	RH [%]
-2	-1	102,3	81

Da die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit doch deutlich von den Referenzbedingungen abweichen, wurde die Schallleistung hinsichtlich C_1 , C_2 und C_3 nach ([ISO 6926] Kap. 8.4) korrigiert. Die Korrektur des meteorologischen Einflusses auf die abgestrahlte Schallleistung (C_2) ist abhängig von der Art der Quelle. Um nun den genauen Charakter des von der Quelle abgestrahlten Schalls zu bestimmen, sind umfangreiche Messungen notwendig, weshalb in den Normen, z.B. ([ISO 3745] Kap. 9.4.4), eine Näherung angegeben ist, die für Monopol-Quellen (Kugelstrahler 0. Ordnung im Bereich $k \cdot r < 1$) gültig ist und auch für andere Quellen einen guten Kompromiss darstellt [Gl.(5.10)].

Bei der Kalibrierung von Referenzquellen wird genauer zwischen den Quellentypen unterschieden ([ISO 6926] Anhang A.2). Für die RSS Type 4204 wurde bei der Kalibrierung C_2 nach folgender Gleichung korrigiert:

$$C_2 = -10 \cdot \log\left(\frac{p_s}{p_{s,0}}\right) + 5 \cdot \log\left(\frac{273 + \Theta}{\Theta_1}\right) \quad (5.26)$$

Dies entspricht der Korrektur für Kugelstrahler 0. Ordnung im Bereich $k \cdot r > 1$. Für den Fall von $k \cdot r > 1$ kann von einer ebenen Wellenausbreitung ausgegangen werden (Abstrahlgrad $\sigma \approx 1$). Dabei beschreibt r die Ausdehnung der Quelle. Die RSS ist 30cm hoch und hat einen Durchmesser von 30cm. Also gilt $r \approx 0,3m$. Bei einer Schallgeschwindigkeit von ca. 343m/s heißt das, dass für Frequenzen größer 180Hz, von ebener Wellenausbreitung ausgegangen werden kann. Wird nun die gemessene Schallleistung auf meteorologische Bezugsbedingungen bezogen, ergibt sich der Korrekturterm laut Gl.(5.26) ([AMT] Kap. 6.4).

Der Schallleistungspegel der RSS wird deshalb, gleich dem Kalibrierzeugnis aus Schweden, für diese Messung mit C_2 nach Gl.(5.26) korrigiert.

Für die Berechnung der Schallleistung wurde der energetische Mittelwert der Messflächen-Schalldruckpegel der kleinen und der großen Hüllfläche verwendet. Das ergibt schließlich als Ergebnis zwei Kalibrierzeugnisse für die 6-Mikrofonmessung (2 Quellenpositionen) und zwei Kalibrierzeugnisse für die 10-Mikrofonmessung.

Tab. 5.23 zeigt die Ergebnisse und in der letzten Spalte das Kalibrierzeugnis aus Schweden.

Abb. 5.36 zeigt das Ergebnis für die 6-Mikrofonmessung im Vergleich zum Kalibrierzeugnis aus Schweden. Die großen Unterschiede zwischen den zwei Messumgebungen treten bis zum 800Hz-Terzband auf, weshalb dieser Bereich rot markiert wurde (vgl. Kap.3.3). Für die 6-Mikrofonmessung zeigt sich, dass unterhalb des 800Hz-Terzbandes niedrigere Schallleistungspegel gemessen werden als im Kalibrierzeugnis angegeben. Der größte Pegelunterschied beträgt hier 3,5dB. Auch die Pegel aus den Messungen an der Wand und in der Mitte der Messfläche unterscheiden sich in dem Bereich am stärksten. Oberhalb 4kHz sind die gemessenen Pegel ca. 0,8dB niedriger als im Kalibrierzeugnis.

Für die 10-Mikrofonmessung (Abb. 5.37) treten die größten Unterschiede zwischen 1000Hz und 4000Hz auf. Dort sind die gemessenen Pegel um bis zu 3dB höher. Unterhalb des 800Hz-Terzbandes unterscheiden sich die Pegel aus der Messung an der Wand und in der Mitte der Messfläche stärker. Die Werte aus dem Kalibrierzeugnis bewegen sich dazwischen. Oberhalb 4kHz nähern sich die 3 Pegelverläufe an.

Für die Summenpegel sind die Unterschiede zwischen den gemessenen Pegeln und dem Kalibrierzeugnis aus Schweden mit maximal 0,1dB für die 6-Mikrofonmessung sehr gering. Für die 10-Mikrofonmessung beträgt die Differenz bereits 1,1dB (Tab. 5.22).

6-Mik		10-Mik		Kalibrierzeugnis
$L_{W, Wand}$ [dB]	$L_{W, Mitte}$ [dB]	$L_{W, Wand}$ [dB]	$L_{W, Mitte}$ [dB]	$L_{W(RSS)}$ [dB]
92,7	92,8	93,9	93,8	92,8

Tab. 5.22: Summen-Schallleistungspegel aus der Messung und aus dem Kalibrierzeugnis

RSS an der Wand		RSS Mitte Messfläche		Kalibrierzeugnis (2011)
$L_{W,6Mik}$ [dB]	$L_{W,10Mik}$ [dB]	$L_{W,6Mik}$ [dB]	$L_{W,10Mik}$ [dB]	$L_{W(RSS)}$ [dB]
76,3	78,0	76,3	78,3	77,3
76,8	77,8	76,5	78,1	76,6
77,1	78,6	76,2	76,7	77,1
77,5	77,5	75,4	76,0	77,6
76,5	78,2	73,9	76,4	77,4
76,7	78,6	75,2	77,9	77,5
76,8	78,5	75,9	77,3	77,6
75,6	78,0	76,5	77,2	77,9
76,3	77,6	77,2	78,3	78,4
78,2	78,9	79,8	80,2	79,9
80,8	80,4	82,2	82,1	80,9
83,2	83,2	83,1	84,2	82,4
83,7	86,3	84,1	84,6	82,9
83,2	85,1	84,2	84,9	83,4
81,5	81,7	81,6	82,7	81,3
81,3	82,2	80,7	82,1	80,5
80,4	81,8	80,4	81,1	80,6
79,1	80,5	79,2	80,4	79,6
78,0	79,3	77,8	79,1	78,6
75,9	77,2	75,8	77,0	76,7
73,5	74,6	73,2	74,2	74,5

Tab. 5.23: Gemessene Schallleistung der RSS im Freien

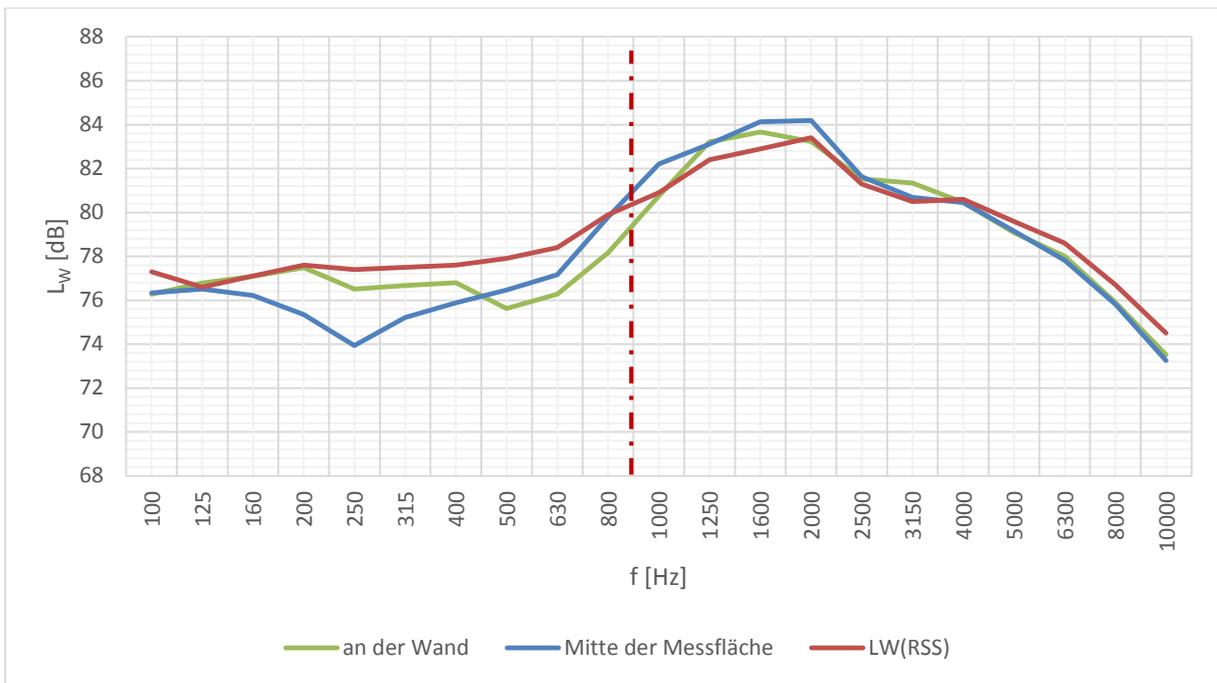


Abb. 5.36: gemessener Terz-Schallleistungspegel im Vergleich zum Kalibrierzeugnis (2011), 6-Mik.

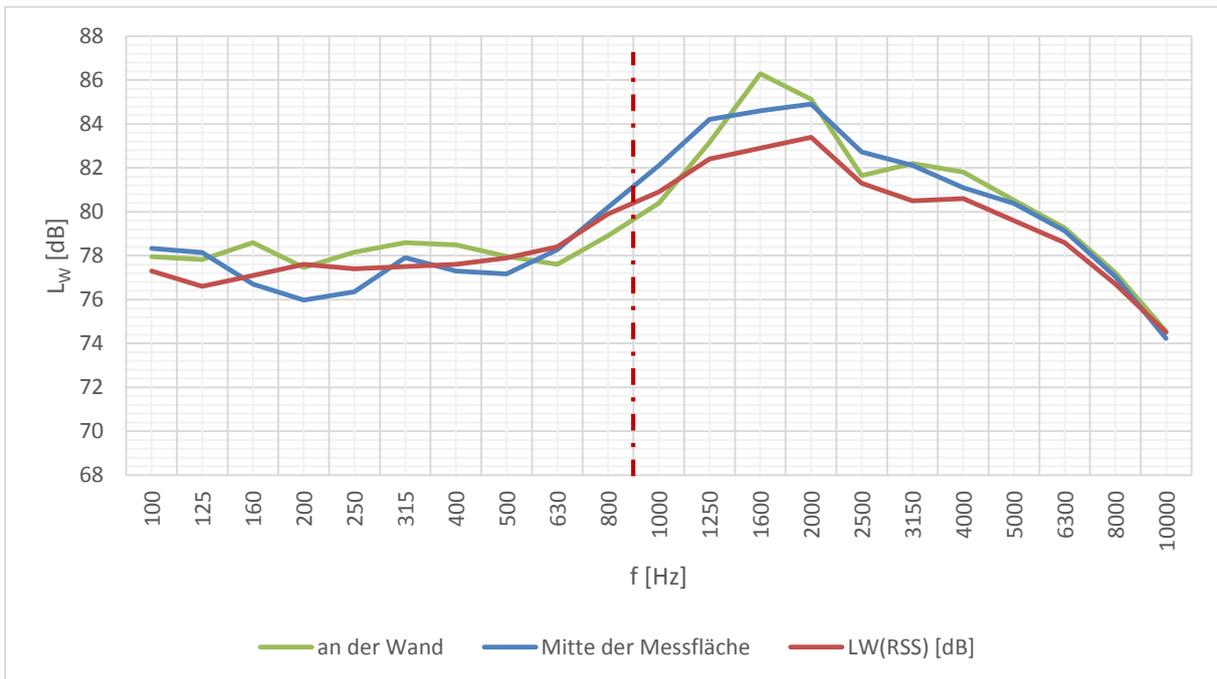


Abb. 5.37: gemessener Terz-Schallleistungspegel im Vergleich zum Kalibrierzeugnis (2011), 10-Mik.

5.6.2 K2-Umgebungskorrektur

Absolutvergleichsmessung

Anhand dieser Messergebnisse kann nun wiederum die K2-Umgebungskorrektur berechnet werden. Dazu werden die gemessenen Terz-Schalldruckpegel aus Kap. 4.2.1 verwendet. In diesem Kapitel hat sich gezeigt, dass eine Positionierung der RSS in der Mitte der Messflächenbodenprojektion zu bevorzugen ist, weshalb für die 6-Mikrofonmessung die Terzbandpegel der RSS in 70cm Abstand zur Wand verwendet werden und für die 10-Mikrofonmessung jene in 90cm Abstand zur Wand. Als Vergleichswerte dienen die gemessenen Schallleistungswerte jeweils in der Mitte der Messflächenbodenprojektion aus dem vorangehenden Kapitel.

Abb. 5.38 zeigt das Ergebnis der neuen K2-Umgebungskorrektur im Vergleich zur alten. Markiert wurde wieder der Bereich unterhalb des 800Hz-Terzbandes. Dort sind die Unterschiede am deutlichsten mit bis zu 3,7dB für die 6-Mikrofonmessung und bis zu 2,1dB für die 10-Mikrofonmessung. Ein großer Unterschied, der sich im Vergleich zu der alten Umgebungskorrektur auch zeigt, ist, dass sich die Anzahl und vor allem der Betrag der negativen Werte verringert. Auch liegen jetzt die Kurven der 6- und 10-Mikrofonmessung näher beieinander.

Durch die K2-Umgebungskorrektur wird beim Hüllflächenverfahren der Diffusfeldanteil im gemessenen Schalldruck berücksichtigt. Dieser Anteil kann aus mathematischer Sicht nicht negativ sein [siehe Gl.(5.25)]. Der Schalldruckpegel in einem Punkt ergibt sich aber aus dem direkten Schall und sehr wenigen, evtl. auch nur einer einzigen Reflexion. Die Schallanteile addieren sich je nach Phasenlage konstruktiv oder destruktiv und können somit zu einer Erhöhung oder einer Verringerung des Schalldruckpegels auf der Messfläche führen. Die Umgebungskorrektur kann somit aus physikalischer Sicht auch negative Werte annehmen, aber für die Schallleistungsbestimmung wird empfohlen, die negativen Werte auf 0 zu setzen ([DAGA 2010]).

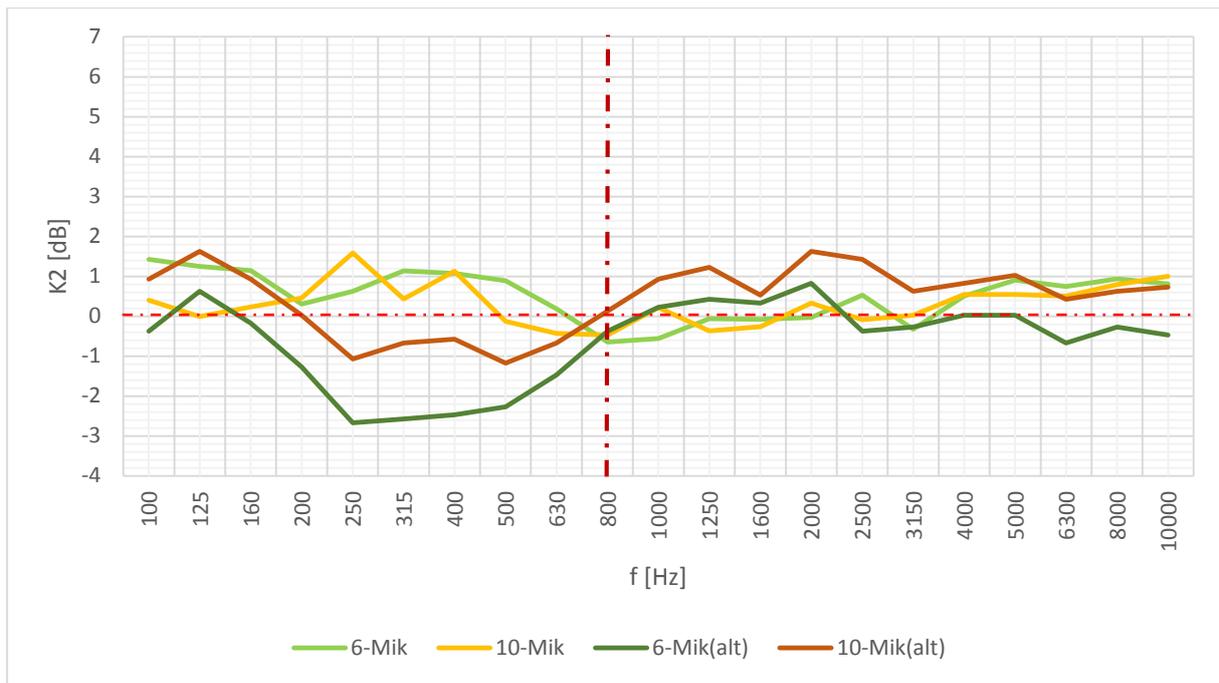


Abb. 5.38: Vergleich der neu bestimmten und der alten K2-Umgebungskorrektur (Absolutvergleichsmessung)

f [Hz]	K_2 [dB] (6Mik)	K_2 [dB] (10Mik)
100	1,4	0,4
125	1,3	0,0
160	1,1	0,2
200	0,3	0,5
250	0,6	1,6
315	1,1	0,4
400	1,1	1,1
500	0,9	-0,1
630	0,2	-0,4
800	-0,6	-0,5
1000	-0,6	0,2
1250	-0,1	-0,4
1600	-0,1	-0,3
2000	0,0	0,3
2500	0,5	-0,1
3150	-0,3	0,0
4000	0,5	0,5
5000	0,9	0,5
6300	0,7	0,5
8000	0,9	0,8
10000	0,8	1,0
K_{2A} [dB(A)]	0,1	0,1

Tab. 5.24: Bestimmung der K2-Umgebungskorrektur über die Absolutvergleichsmessung im LE-FFR

Für die Schalleistungsberechnung beliebiger Quellen im Viertelfreieid bewirkt diese K2-Umgebungskorrektur eine Verringerung der gemessenen Pegel (im Bereich unterhalb 800Hz), was den Raumabgleich begünstigt.

Aus der äquivalenten Absorptionsfläche

Für die Berechnung der K2-Umgebungskorrektur gibt es verschiedene Methoden. Im vorangehenden Unterpunkt wurde die Umgebungskorrektur über eine Absolutvergleichsmessung bestimmt. Ein weiteres mögliches Verfahren ist die Bestimmung der Umgebungskorrektur aus der äquivalenten Absorptionsfläche im Raum nach Gl. (5.25).

Nun gibt es wiederum unterschiedliche Verfahren die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes zu bestimmen. Da die Nachhallzeit auch für den Viertel-Freifeldraum gemessen wurde, kann die äquivalente Absorptionsfläche mit dem sogenannten Nachhallverfahren ([ISO 3744] Anhang A.3.2) bestimmt werden.

In der Norm wird vermerkt, dass dieses Verfahren nicht für reflexionsarme Messräume geeignet ist, da die Absorptionsfläche aus der Sabineschen Nachhallzeitgleichung [Gl.(5.15)] berechnet wird, die aber nur für ausreichend diffuse Schallfelder gilt.

Für den LE-FFR ergibt sich eine frequenzabhängige Absorptionsfläche bzw. eine K2-Umgebungskorrektur laut Tab. 5.25. Für die Berechnung von K_{2A} wird die Nachhallzeit bei 1000Hz verwendet.

f [Hz]	T_{gem} [s]	A [m ²]	K_2 [dB] (6Mik)	K_2 [dB] (10Mik)
100	0,40	32	4,0	6,2
125	0,33	39	3,5	5,5
160	0,24	54	2,8	4,6
200	0,20	63	2,5	4,1
250	0,16	79	2,1	3,6
315	0,14	94	1,8	3,2
400	0,10	126	1,4	2,5
500	0,08	158	1,2	2,1
630	0,07	181	1,0	1,9
800	0,06	211	0,9	1,7
1000	0,06	211	0,9	1,7
1250	0,08	169	1,1	2,0
1600	0,06	211	0,9	1,7
2000	0,06	230	0,8	1,6
2500	0,06	211	0,9	1,7
3150	0,06	211	0,9	1,7
4000	0,06	230	0,8	1,6
5000	0,06	211	0,9	1,7
6300	0,06	230	0,8	1,6
8000	0,05	253	0,8	1,5
10000	0,06	211	0,9	1,7
K_{2A} [dB(A)]	0,06	211	0,9	1,7

Tab. 5.25: Bestimmung der K2-Umgebungskorrektur über die Absorptionsfläche im LE-FFR

Abb. 5.39 zeigt das Ergebnis für die Umgebungskorrektur aus dem Nachhallverfahren, im Vergleich zu jener, die mit der Absolutvergleichsmessung (alt) ermittelt wurde. Ein wichtiger Punkt ist hier, dass nach Gl.(5.25) im Gegensatz zur Absolutvergleichsmessung, keine negativen Werte für die K2-Umgebungskorrektur möglich sind.

Vor allem im Bereich unter 800Hz zeigen sich große Unterschiede (bis zu 5dB) zwischen den zwei Verfahren. Über dieser Frequenz bleibt die Nachhallzeit dann annähernd konstant und die Unterschiede verringern sich auf maximal 1dB. Der hohe Anstieg der Umgebungskorrektur im tiefen Mess-Frequenzbereich ist auf die höhere Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen zurückzuführen.

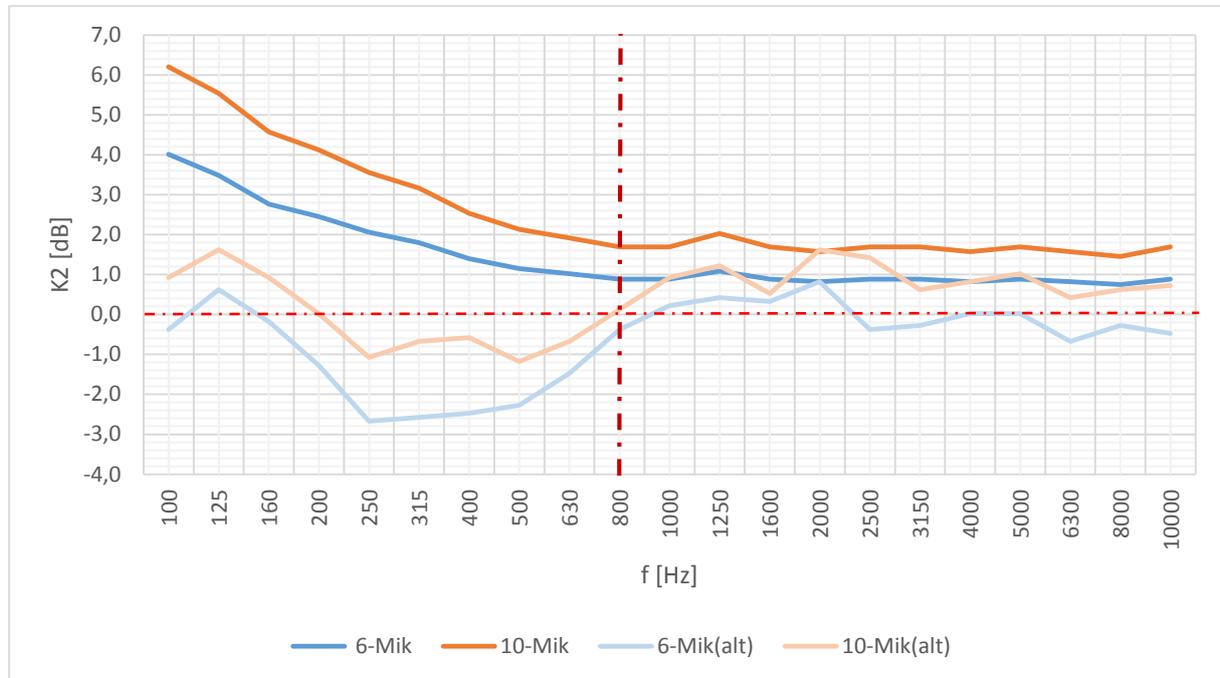


Abb. 5.39: K2-Umgebungskorrektur aus dem Nachhallverfahren im Vergleich zur alten K2-Umgebungskorrektur (Absolutvergleichsmessung)

Mit der in diesem Unterpunkt ermittelten K2-Umgebungskorrektur würden sich die Pegel aus dem Viertel-Freifeldraum im Bereich unter 800Hz stark (um bis zu 5dB) verringern.

Vergleicht man die Ergebnisse aus der Absolutvergleichsmessung mit jenen aus dem Nachhallverfahren, wird klar, dass das Nachhallverfahren vor allem im Bereich unter 800Hz zu hohe K2-Umgebungskorrekturen liefert. Es ist nicht verwunderlich, dass dieses Verfahren nicht für stark schallabsorbierende Räume geeignet ist, da die Berechnung auf der Nachhallzeitgleichung nach Sabine beruht, diese jedoch genügende Diffusität voraussetzt. Der LE-Viertelfreifeldraum weißt jedoch im hohen Frequenzbereich keine Diffusität und im tiefen Frequenzbereich höchstens einzelne Moden auf. Es ist deshalb unbedingt das Absolutvergleichsverfahren zu verwenden.

Der Vergleich zwischen dem aktuellen Kalibrierzeugnis aus Schweden und dem selbstständig erstellten Kalibrierzeugnis zeigt, dass sich für die selbst bestimmte K2-Korrektur weniger negative Pegel ergeben. Das stimmt besser mit der Theorie überein und auch auf den Raumabgleich sollte sich die neu bestimmte K2-Umgebungskorrektur positiv auswirken.

Deshalb lautet hier die Empfehlung, in Zukunft das selbst erstellte Kalibrierzeugnis und die Absolutvergleichsmessung mit Platzierung der RSS in der Mitte der Messflächenbodenprojektion für die Ermittlung der K2-Umgebungskorrektur im LE-FFR zu verwenden.

5.7 REq-X

Dieser Begriff steht für *Response Equalisation eXtreme* und beschreibt die Korrektur des Mikrofonfrequenzganges. Die Mikrofone werden mit einem individuellen Kalibrierzeugnis und einer Daten-CD, die die entsprechenden Korrekturen enthält, ausgeliefert. Korrekturen sind sowohl für das Freifeld für 0° Schalleinfallrichtung als auch für das Diffusfeld vorhanden.

In Tab. 5.26 ist die quantitative Abschätzung für die Diffusfeldkorrektur für ein Mikrofon dargestellt. Im QM-SHR werden zusätzlich die Windschutzbälle verwendet. Das hat vor allem historische Gründe, als die Mikrofone noch auf Stativen am Boden platziert wurden und so vor Beschädigungen beim Gerätewechsel geschützt sein sollten. Leider ist für die Mikrofone keine entsprechende Korrektur hinterlegt.

f [Hz]	Verstärkung [V]	Verstärkung [dB] ($V_0=1V$)
100-630	1,00	0,0
800-1250	1,01	0,1
1600	1,02	0,2
2000	1,03	0,3
2500	1,05	0,4
3150	1,07	0,6
4000	1,10	0,8
5000	1,14	1,1
6300	1,18	1,4
8000	1,26	2,0
10000	1,63	4,2

Tab. 5.26: quantitative Abschätzung der Diffusfeldkorrektur

Die Verwendung der Diffusfeldkorrektur für die Messungen im QM-SHR wird dringend empfohlen. Außerdem sollte auf die Windschutzbälle verzichtet werden, solange keine entsprechende Frequenzgangkorrektur dafür vorhanden ist. Im LE-FFR kann auf eine zusätzliche Korrektur des Frequenzganges verzichtet werden, da die Mikrofone bereits für das Freifeld optimiert sind und das Korrekturfilter dementsprechend wenig Einfluss auf das Messergebnis hat.

5.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zunächst die untere Grenzfrequenz für den QM-SHR bei ca. 114Hz ermittelt. Sämtliche für diese Arbeit notwendigen Schritte zur Berechnung der Schallleistung wurden aufgelistet und eine qualitative Abschätzung der Korrekturfaktoren gegeben.

In Kap. 5.3 wurden die Ergebnisse der Klassifizierungsmessungen gezeigt und diskutiert. Die Anzahl der Aktor-/Sensorpositionen wurde für beide Räume untersucht. Für den QM-SHR wurde die Verwendung zusätzlicher Sensoren zur Erhöhung der Genauigkeit empfohlen. Eine genaue Fremdgeräuschanalyse hat gezeigt, dass eine diesbezügliche Korrektur in beiden Räumen notwendig ist.

Die RSS wurde im Viertel-Freifeld vermessen und daraus ein neues Kalibrierzeugnis für die K2-Bestimmung im LE-FFR und für die Vergleichsmessung im QM-SHR erstellt.

Abschließend wurde noch die Verwendung einer Diffusfeldkorrektur für die Messungen im QM-SHR diskutiert.

6 Ergebnisse

Kapitel 6.1 zeigt eine Auflistung der Optimierungsvorschläge, die sich aus der Masterarbeit ergeben.

In Kapitel 6.2 werden die Ergebnisse des Raumabgleichs dargestellt und diskutiert. Den Abschluss bildet wiederum eine kurze Zusammenfassung des ganzen Kapitels.

6.1 Optimierungen

In Kapitel 4 wurden mögliche Optimierungen im Hinblick auf den Raumabgleich diskutiert. Daraus ergeben sich die folgenden Vorschläge für Optimierungsschritte in beiden Messräumen der Firma Liebherr.

QM-SHR

- Integration der REq-X Diffusfeldkorrektur in den Signalweg und Entfernung des Windschutzes von den Mikrofonen
- Verwendung einer Fremdgeräuschkorrektur K1
- Korrektur der Schallleistung auf meteorologische Bezugsbedingungen
- Neue Quellenposition der RSS (in 150cm Wandabstand)
- Verwendung des selbsterstellten Kalibrierzeugnisses für die Vergleichswerte
- Erweiterung auf 6 Messpositionen

LE-FFR

- Verwendung einer Fremdgeräuschkorrektur K1
- Korrektur der Schallleistung auf meteorologische Bezugsbedingungen
- Neue Position der RSS in der Mitte der Messflächenbodenprojektion (in 70cm bzw. 90cm Wandabstand) zur K2-Bestimmung
- Verwendung des selbst erstellten Kalibrierzeugnisses zur K2-Bestimmung

6.2 Ergebnisse

In Kapitel 3 wurden die Messobjekte für den Raumabgleich festgelegt und die Basismessungen durchgeführt. Anhand dieser gemessenen Schalldruckpegel werden nun die Schallleistungspegel inklusive der Optimierungsvorschläge aus Kap. 6.1 für beide Räume neu berechnet. Lediglich die Erweiterung auf 6 Messpositionen im QM-SHR konnte hier nicht berücksichtigt werden, da für den Zeitraum dieser Messungen (KW4/2016) keine Vergleichsmessungen im LE-FFR vorliegen.

Analog zu Kapitel 3.3 werden die Differenzen zwischen den Schallleistungs-Summenpegeln aus dem LE-FFR und dem QM-SHR für die Zyklusbetriebe und ausgewählte Sequenzbetriebe der Messobjekte bestimmt und diskutiert.

Im QM-SHR wird gleich wie im LE-FFR für die kleinen Geräte das selbsterstellte Kalibrierzeugnis der 6-Mikrofonmessung und für die großen Geräte jenes für die 10-Mikrofonmessung als Vergleichswert für die RSS verwendet.

Zyklusbetrieb – Summenpegel

Abb. 6.1 zeigt das Ergebnis der Optimierungen für die Zyklusbetriebe der Geräte. Ausgewiesen sind jeweils die Differenzen der Schallleistungs-Summenpegel aus dem LE-FFR und dem QM-SHR $\Delta L_W = L_{W(LE-FFR)} - L_{W(QM-SHR)}$. Für den leichteren Vergleich zwischen vorher und nachher sind jeweils auch die entsprechenden Werte aus den Basismessungen eingezeichnet.

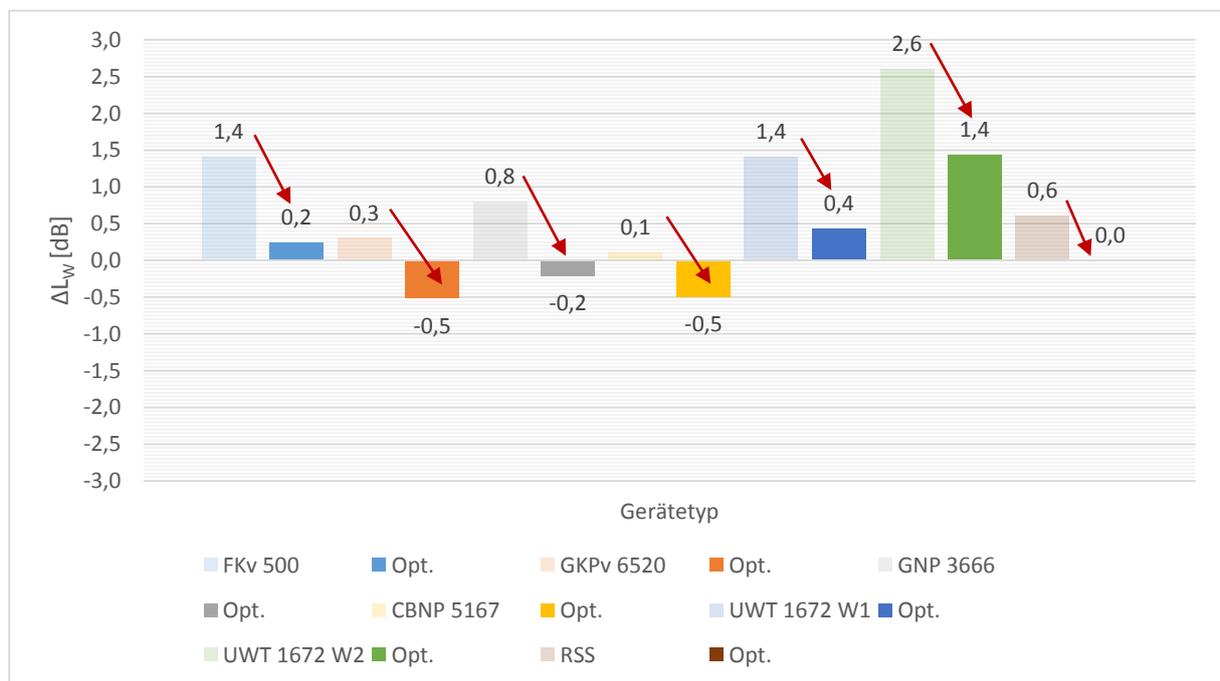


Abb. 6.1: Differenz zwischen LE-FFR und QM-SHR für die Zyklusbetriebe der Geräte vor und nach der Optimierung

Tab. 6.1 enthält die Schallleistungs-Summenpegel aus beiden Räumen und gibt in der 5. Spalte an, welches Kalibrierzeugnis der RSS für das jeweilige Gerät verwendet wurde.

Gerät	L _w [dB(A)]		Mik. Anzahl
	LE-FFR	QM-SHR	Kalibrierzeugnis
FKv 500	27,0	26,8	6
GKpv 6520	56,7	57,2	10
GNP 3666	35,4	35,6	6
CBNP 5167	39,3	39,8	10
UWTes 1672 W1	34,6	34,2	6
UWTes 1672 W2	35,9	34,5	6

Tab. 6.1: Schalleistungs-Summenpegel im Zyklusbetrieb nach der Optimierung

Im LE-FFR wurde die Schalleistung inklusive sämtlicher in Kap. 6.1 angegebener Optimierungsvorschläge neu berechnet. Tab. 6.2 zeigt die Summenpegel der Korrekturfaktoren für den Viertel-Freifeldraum.

$$L_W = \bar{L}'_{p(ST)} - K_1 - K_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) + C_1 + C_2$$

Gerät	L [dB(A)]			
	K ₁	K ₂	C ₁	C ₂
FKv 500	0,3	0,1	-0,17	0,00
GKpv 6520	0,0	0,1	-0,17	0,00
GNP 3666	0,1	0,1	-0,17	0,00
CBNP 5167	0,0	0,1	-0,17	0,00
UWTes 1672 W1	0,1	0,1	-0,17	0,00
UWTes 1672 W2	0,1	0,1	-0,17	0,00

Tab. 6.2: Summenpegel der Korrekturfaktoren für die Schalleistungsberechnung nach ISO 3744

Im QM-SHR konnte lediglich die Erweiterung auf 6 Messpositionen nicht für die Berechnung berücksichtigt werden. Diese Positionen müssten erst durch geeignete Messungen gefunden werden.

$$L_W = L_{W(RSS)} + \left[\bar{L}'_{p(ST)} - K_{1(ST)} - \bar{L}'_{p(RSS)} + K_{1(RSS)} \right] + C_2$$

Gerät	L [dB(A)]		
	K ₁	K _{1(RSS)}	C ₂
FKv 500	0,4	0,0	0,04
GKpv 6520	0,0	0,0	0,04
GNP 3666	0,0	0,0	0,04
CBNP 5167	0,0	0,0	0,04
UWTes 1672 W1	0,1	0,0	0,04
UWTes 1672 W2	0,0	0,0	0,04

Tab. 6.3: Summenpegel der Korrekturfaktoren für die Schalleistungsberechnung nach ISO 3743-2

Tab. 6.3 zeigt die Summenpegel der Korrekturfaktoren für den Sonderhallraum. Einen wesentlichen Einfluss hat hier auch noch die Berechnung mit Hilfe der neuen Referenzposition des neuen Kalibrierzeugnisses der RSS (Abb. 6.2). Zusätzlich wurde im Sonderhallraum auch die Diffusfeldkorrektur nach Tab. 5.26 mit einberechnet. Es ist hier anzumerken, dass sämtliche Berechnungen zur Schalleistung in Terzbändern durchgeführt wurden.

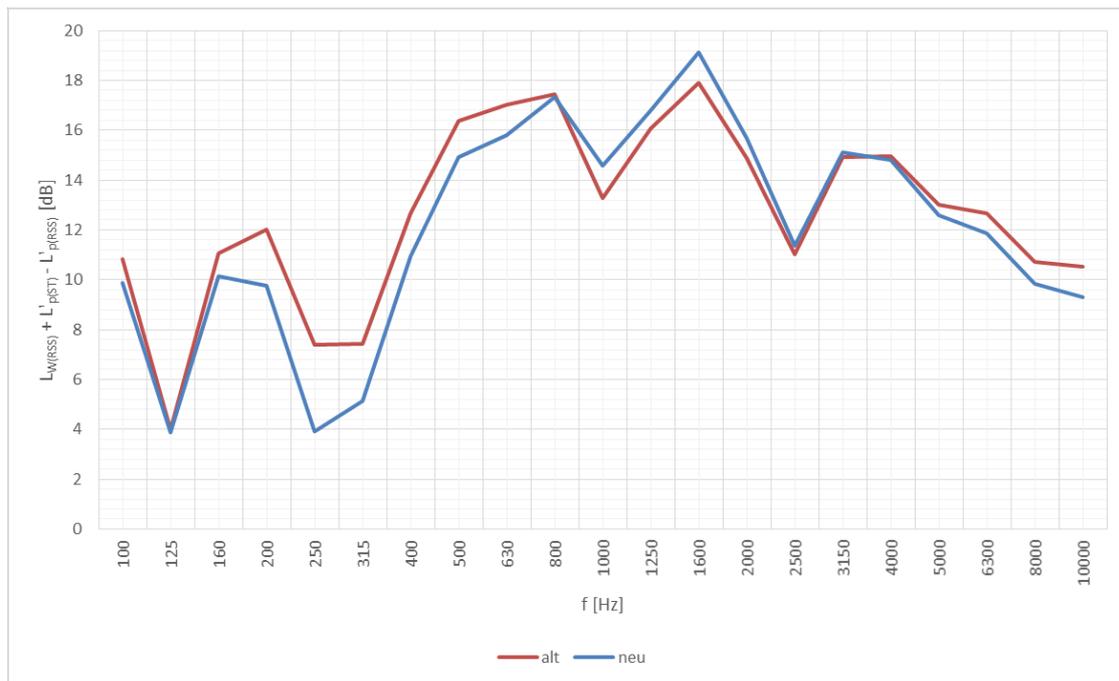


Abb. 6.2: Änderungen durch neue RSS-Position und neues Kalibrierzeugnis (FKv500)

Das Ergebnis zeigt eine deutliche Verbesserung zu den Basismessungen. Die Zielanforderung $|\Delta L_W| < 1\text{dB}$ wird für fast alle Geräte erreicht. Außerdem kommt es durch die Implementierung der Optimierungsschritte zu einer gleichmäßigen Verteilung positiver und negativer ΔL_W .

Lediglich die Messung des UWTe 1672 beim Betrieb des Weinfaches 2 liefert eine größere Differenz, die aber trotzdem eine deutliche Verbesserung zu jener aus den Basismessungen darstellt. Die Messung des Sockelventilators ist generell problematisch da hier die Schallabstrahlung nur von einem kleinen Teil des Gerätes erfolgt. Zudem kann der Einbau des Ventilators im Sockel des Gerätes, also sehr nahe über einer reflektierenden Ebene (vgl. Abb. 3.2 rechts), zu ungünstiger Schallabstrahlung führen. Wie in Kap. 5.4 beschrieben, sind hier für eine genauere und normgerechte Messung zusätzliche Messpositionen in diesem Bereich notwendig.

Für die Untersuchungen mit mehr als 3 Messpositionen im QM-SHR wurden die Messobjekte in diesem Raum 3 Monate später erneut gemessen. Dadurch bietet sich nun die Möglichkeit, eine quantitative Abschätzung der Abweichungen durchzuführen. Da die Geräte für die vorliegende Arbeit lediglich zweimal gemessen wurden, liegen nicht genug Werte vor, um die Standardabweichung σ_{omc} (operating and mounting conditions) zu berechnen ([AMT] Kap. 7). Es wird deshalb lediglich die Differenz zwischen den Messergebnissen aus KW44/2015 und KW4/2016 gebildet. Da die zweite Messung nur im QM-SHR durchgeführt wurde, kann die Prüfung auch nur für diesen Raum erfolgen. Für das UWT-Gerät haben sich bei dieser Untersuchung Differenzen um bis zu 6,8dB ergeben.

Empfehlung:

Für weitere Untersuchungen sollte die Standardabweichung σ_{omc} (operating and mounting conditions) für ausgewählte Messobjekte in beiden Messräumen der Firma Liebherr bestimmt werden.

Sequenzbetrieb – Summenpegel

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für ausgewählte Sequenzbetriebe der Geräte. Ausgewiesen wird wiederum die Differenz $\Delta L_W = L_{W(LE-FFR)} - L_{W(QM-SHR)}$. Die Werte aus den Basismessungen sind ebenfalls dargestellt.

GNP 3666

Abb. 6.3 zeigt die Ergebnisse für dieses Gerät. Mit den implementierten Optimierungen sind für alle untersuchten Sequenzbetriebe deutliche Verbesserungen zu erkennen. Die Zielanforderung $|\Delta L_W| < 1\text{dB}$ wird wiederum erreicht.

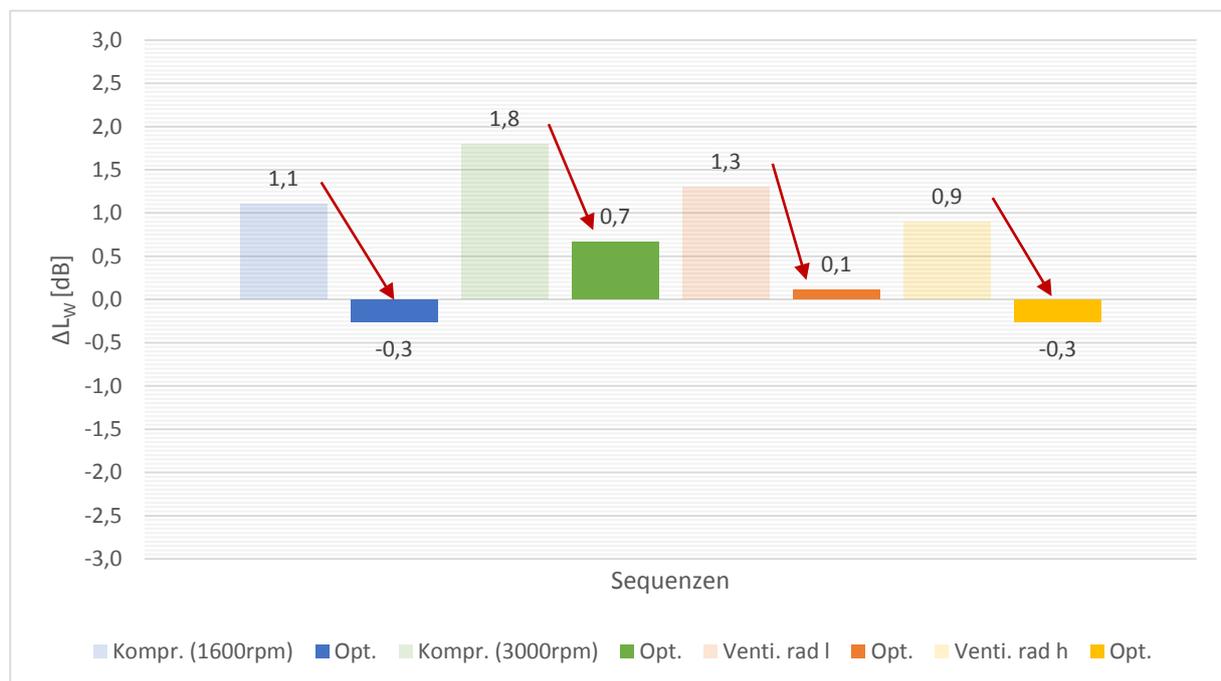


Abb. 6.3: Differenz zwischen LE-FFR und QM-SHR für verschiedene Sequenzbetriebe des GNP 3666 vor und nach der Optimierung

Sequenz	L _w [dB(A)]	
	LE-FFR	QM-SHR
Kompr. (1600rpm)	29,8	30,1
Kompr. (3000rpm)	34,4	33,7
Venti. rad l	27,1	27,0
Venti. rad h	33,0	33,3

Tab. 6.4: Schallleistungs-Summenpegel im Sequenzbetrieb nach der Optimierung

CBNP 5167

Dieses Gerät war im Zyklusbetrieb bei den Basismessungen unproblematisch, wies aber bei den Sequenzbetrieben doch deutliche Differenzen mit bis zu 1,8dB auf. Auch dieses Ergebnis konnte durch die verwendeten Optimierungsschritte verbessert werden, was in Abb. 6.4 ersichtlich wird. Die Zielanforderung $|\Delta L_W| < 1\text{dB}$ wird für alle Sequenzbetriebe eingehalten.

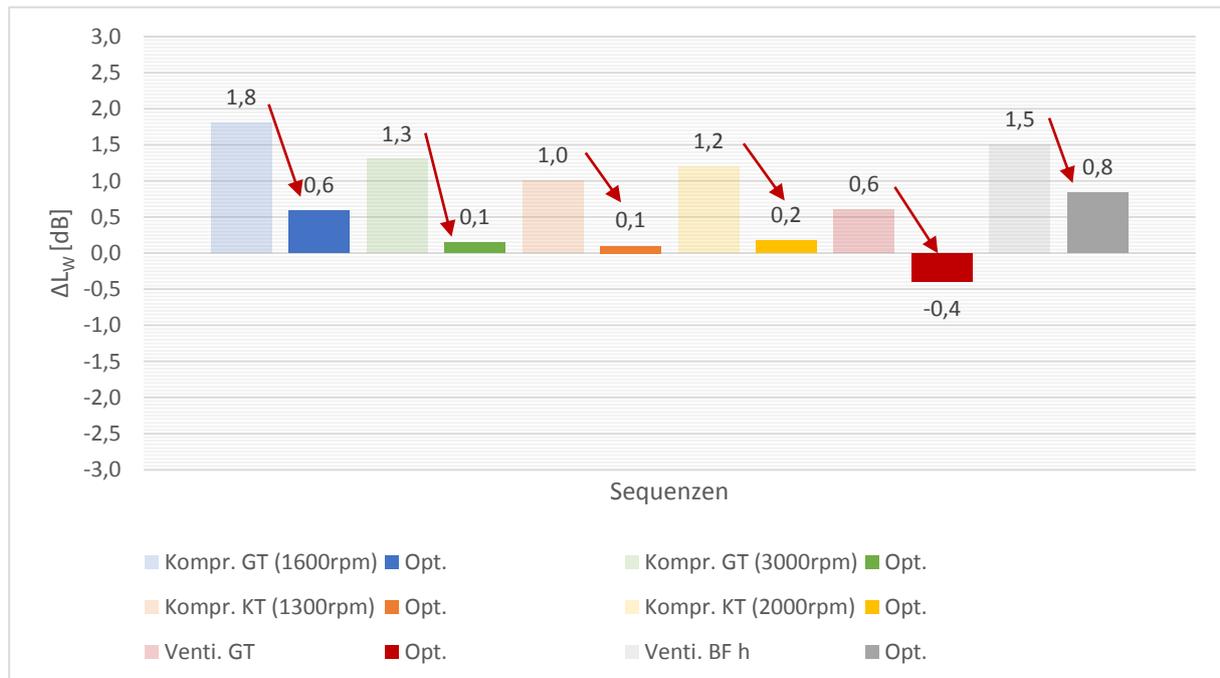


Abb. 6.4: Differenz zwischen LE-FFR und QM-SHR für verschiedene Sequenzbetriebe des CBNP 5167 vor und nach der Optimierung

Sequenz	L _w [dB(A)]	
	LE-FFR	QM-SHR
Kompr. GT (1600rpm)	27,5	26,9
Kompr. GT (3000rpm)	28,9	28,8
Kompr. KT (1300rpm)	30,1	30,0
Kompr. KT (2000rpm)	30,8	30,6
Venti. GT	37,2	37,6
Venti. BF h	38,8	38,0

Tab. 6.5: Schallleistungs-Summenpegel im Sequenzbetrieb nach der Optimierung

UWTes 1672

Für dieses Gerät ergeben sich auch nach den Optimierungen noch Differenzen bis zu 1,9dB (Abb. 6.5). Jedoch ist auch hier eine deutliche Verbesserung zu den Werten aus den Basismessungen zu erkennen. Die Zielanforderung $|\Delta L_W| < 1\text{dB}$ wird lediglich für einen Sequenzbetrieb des Sockelventilators nicht erreicht. Wie bereits bei den Ergebnissen der Zyklusmessungen erwähnt wurde, hat die Untersuchung der Abweichungen durch die Betriebs- und Aufstellungsbedingungen bei diesem Gerät teilweise große Differenzen ergeben. Das gilt auch besonders für den Sequenzbetrieb des Sockelventilators.

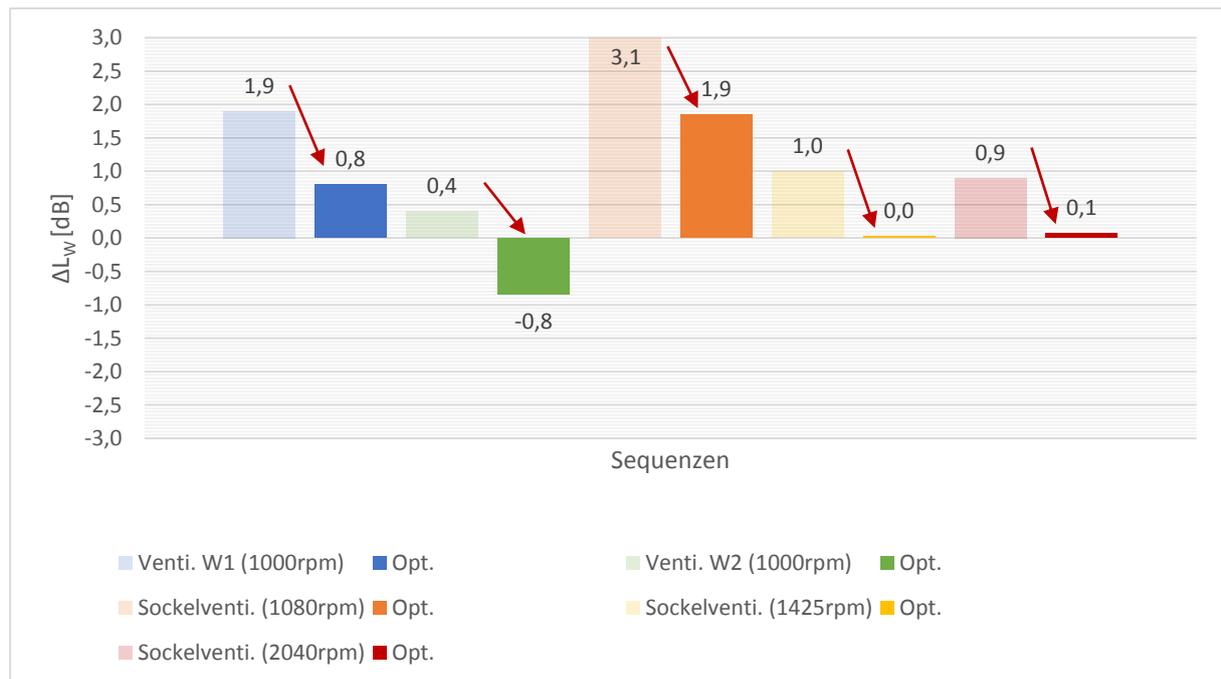


Abb. 6.5: Differenz zwischen LE-FFR und QM-SHR für verschiedene Sequenzbetriebe des UWTes 1672 vor und nach der Optimierung

Sequenz	L _w [dB(A)]	
	LE-FFR	QM-SHR
Venti. W1 (1000rpm)	20,0	19,2
Venti. W2 (1000rpm)	19,8	20,6
Sockelventi. (1080rpm)	33,3	31,4
Sockelventi. (1425rpm)	36,5	36,5
Sockelventi. (2040rpm)	43,9	43,8

Tab. 6.6: Schallleistungs-Summenpegel im Sequenzbetrieb nach der Optimierung

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Schalleistungs-Summenpegel anhand der Basismessungen aus Kapitel 3 inklusive der Optimierungsschritte aus Kapitel 5 neu berechnet. Daraus wurde dann wieder die Differenz zwischen LE-FFR und QM-SHR gebildet und mit den Ergebnissen vor der Optimierung (Kapitel 3) verglichen.

Die Ergebnisse zeigten, dass der gewünschte Raumabgleich für die Messobjekte erreicht werden konnte. Für den QM-SHR wurden zusätzlich die Differenzen zwischen den Messergebnissen aus KW44/2015 und aus KW4/2016 gebildet. Daran konnte erkannt werden, dass sich hier für einige Betriebsfälle große Unterschiede ergeben.

7 Fazit und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel wird die Arbeit kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Themen für zukünftige Arbeiten gegeben.

Die Aufgabenstellung war es, Schallfelduntersuchungen im Viertel-Freifeldraum und im Sonderhallraum durchzuführen, um die beiden Messumgebungen im Hinblick auf Schallleistungsmessungen abzugleichen. Davon ausgehend wurden in Kapitel 2 zunächst beide Messumgebungen genau untersucht und dokumentiert.

Um eine Grundlage zu schaffen, anhand derer die Qualität des Abgleichs am Schluss bewertet werden kann, wurden in Kapitel 3 geeignete Messobjekte und ein geeignetes Messprogramm ausgewählt und in beiden Räumen die Schallleistungen bestimmt.

Schnell wurde klar, dass die Referenzschallquelle eine wichtige Komponente bei der Messung der Schallleistung darstellt, weshalb sie in Kapitel 4 genauer untersucht wurde. Im speziellen ging es darum, die Abhängigkeit der abgestrahlten Schallleistung vom Wandabstand in beiden Räumen zu bestimmen. So konnte in beiden Messumgebungen eine neue Referenzposition für die RSS gefunden werden.

Kapitel 5 geht zunächst genauer auf den Sonderhallraum ein. Es konnte eine untere Grenzfrequenz von ca. 120Hz abgeschätzt werden. Der zweite Punkt behandelt alle in dieser Arbeit vorkommenden Schallleistungsberechnungen. Es wurden die Gleichungen analysiert und quantitative Abschätzungen zu den Korrekturfaktoren gegeben. Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Kapitel waren die Klassifizierungsmessungen die mit Hilfe des PAK-Systems der TU-Graz durchgeführt wurden. Da auch das Fremdgeräusch wesentlich zur Genauigkeit der Messung beiträgt, wurden im nächsten Unterpunkt diesbezüglich genaue Untersuchungen in beiden Räumen vorgenommen. Die Referenzschallquelle, die für die sogenannten Vergleichsverfahren verwendet wird, stellt immer eine gewisse Ungenauigkeit dar. Ausgehend von Empfehlung vom betreffenden Normengremium des DIN (NALS) und von Artikeln zu diesem Thema, wurde die bei Liebherr verwendete RSS für das Viertel-Freifeld kalibriert. Diesem Punkt widmet sich Kapitel 5.6. Abschließend wurde noch die Verwendung einer entsprechenden Diffusfeldkorrektur für die Messungen im Sonderhallraum diskutiert.

In Kapitel 6 wurde schließlich der Raumabgleich rechnerisch nachgewiesen. Dazu wurden, ausgehend von den gemessenen Schalldruckpegeln der Basismessungen aus Kapitel 3, die Schallleistungspegel inklusive der Optimierungsvorschläge aus Kapitel 5 neu berechnet. Das Ergebnis zeigt, dass der Raumabgleich mit den vorgeschlagenen Optimierungsschritten erreicht werden kann.

Die vorliegende Arbeit hat sich vor allem praktisch mit dem Thema Raumabgleich auseinandergesetzt. Über geeignete Messungen und deren Auswertung wurde sich Schritt für Schritt dem Thema genähert. Eine zentrale Rolle bei der Schalleistungsmessung über Vergleichsverfahren nimmt nach wie vor die Referenzschallquelle ein. Zukünftige Arbeiten könnten sich mit dem Thema der Vergleichsschallquellen und deren Kalibrierung für unterschiedliche Messumgebungen beschäftigen.

Ein weiteres wichtiges Thema das noch Fragen aufwirft, ist jenes der K2-Umgebungskorrektur in Freifeldräumen. Zurzeit gilt der Ansatz, dass die K2-Umgebungskorrektur keine Werte kleiner Null annehmen darf. Aus physikalischer Sicht sollten negative Werte jedoch durchaus zulässig sein.

Ein zusätzlicher Diskussionspunkt der sich im Zuge der Arbeit ergeben hat, ist jener nach der Daseinsberechtigung von Sonderhallräumen. Durch die doch sehr aufwendige und kostspielige Ausstattung dieser Räume mit Absorbern zur Einstellung der Nachhallzeit, relativiert sich größtenteils der Kostenfaktor. Warum werden diese Räume in der Industrie trotzdem immer noch verwendet, wo doch die Messung in einem Hallraum der Klasse 1 genauere Ergebnisse liefern sollte?

8 Literaturverzeichnis

[AMT] AKUSTISCHE MESSTECHNIK; Werner Weselak: Skript zur Vorlesung *Akustische Messtechnik*; Version 10.1, WS 2015/16

[RA] RAUMAKUSTIK; Gerhard Graber & Werner Weselak: Skript zur Vorlesung *Raumakustik*; Version 5.6, WS 2015/16

[EA] ELEKTROAKUSTIK; Gerhard Graber & Werner Weselak: Skript zur Vorlesung *Elektroakustik*; Version 8.56, SS 2016

[MÖSER] MÖSER Michael: *Messtechnik der Akustik*; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010

[ISO 6926] DIN EN ISO 6926: *Anforderungen an die Eigenschaften und die Kalibrierung von Vergleichsschallquellen für die Bestimmung von Schallleistungspegeln*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2014

[EN 60704-1] DIN EN 60704-1: *Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Prüfvorschrift für die Bestimmung der Luftschallemission – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2010

[EN 60704-2-14] DIN EN 60704-2-14: *Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Prüfvorschrift für die Bestimmung der Luftschallemission – Teil 2-14: Besondere Anforderungen an Kühlgeräte, Tiefkühlgeräte und Gefriergeräte*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2014

[ISO 3741] DIN EN ISO 3741: *Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2011

[ISO 3743-1] DIN EN ISO 3743-1: *Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern – Teil 1: Vergleichsverfahren in einem Prüfraum mit schallharten Wänden*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2011

[ISO 3743-2] DIN EN ISO 3743-2: *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern – Teil 2: Vergleichsverfahren für Sonderhallräume*; Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2009

[ISO 3744] EN ISO 3744: *Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene*; CEN, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Oktober 2010

[ISO 3745] DIN EN ISO 3745: *Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume*; CEN, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, (Schlussentwurf) Dezember 2011

[DAGA 2010] Christian Bethke, Volker Wittstock: *Erfahrungen mit der Raumrückwirkung in hochabsorbierenden Halb- und Viertel-Räumen*; DAGA, Berlin, 2010

[DAGA 2008] Hans-Joachim Milz: *Sonderhallräume nach DIN EN ISO 3743-2*; DAGA, Dresden, 2008

9 Anhang A

Zyklusbetrieb – Terzbandpegel

FKv 500

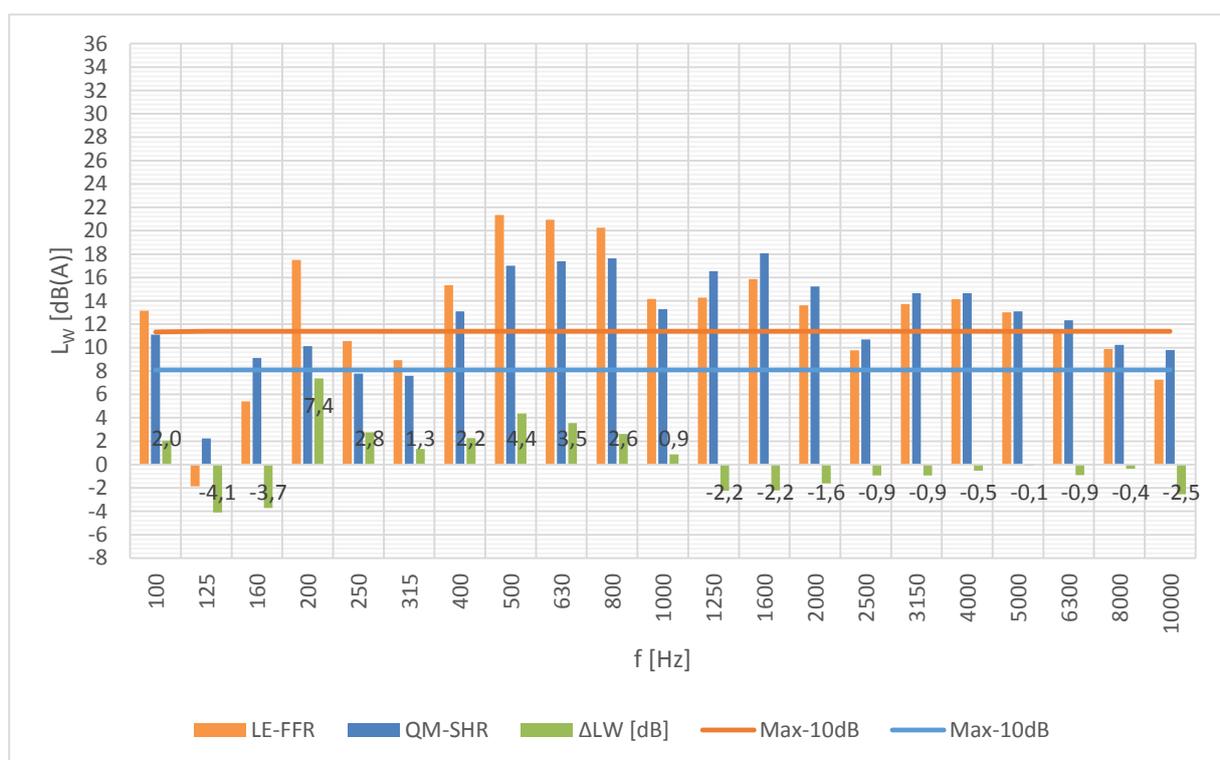


Abb. 9.1: Schallleistungs-Terzbandpegel für FKv 500 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W

Abb. 9.1 zeigt den Vergleich der Schallleistungs-Terzbandpegel für den Zyklus-Betrieb des kleinsten Messobjektes (FKv 500) aus beiden Messräumen. Es zeigt sich, dass das Ergebnis im LE-FFR (6 Mikrofone) keinesfalls über den gesamten Frequenzbereich höher ist, die Differenz in bestimmten Frequenzbereichen mit bis zu 7,4dB jedoch sehr groß ist. Der größte Unterschied ergibt sich für das 200Hz-Terzband. Größtenteils gilt, dass im Bereich bis zum 800Hz-Terzband im Freifeldraum die höheren Pegel gemessen werden. Darüber überwiegen die Pegel aus dem QM-SHR.

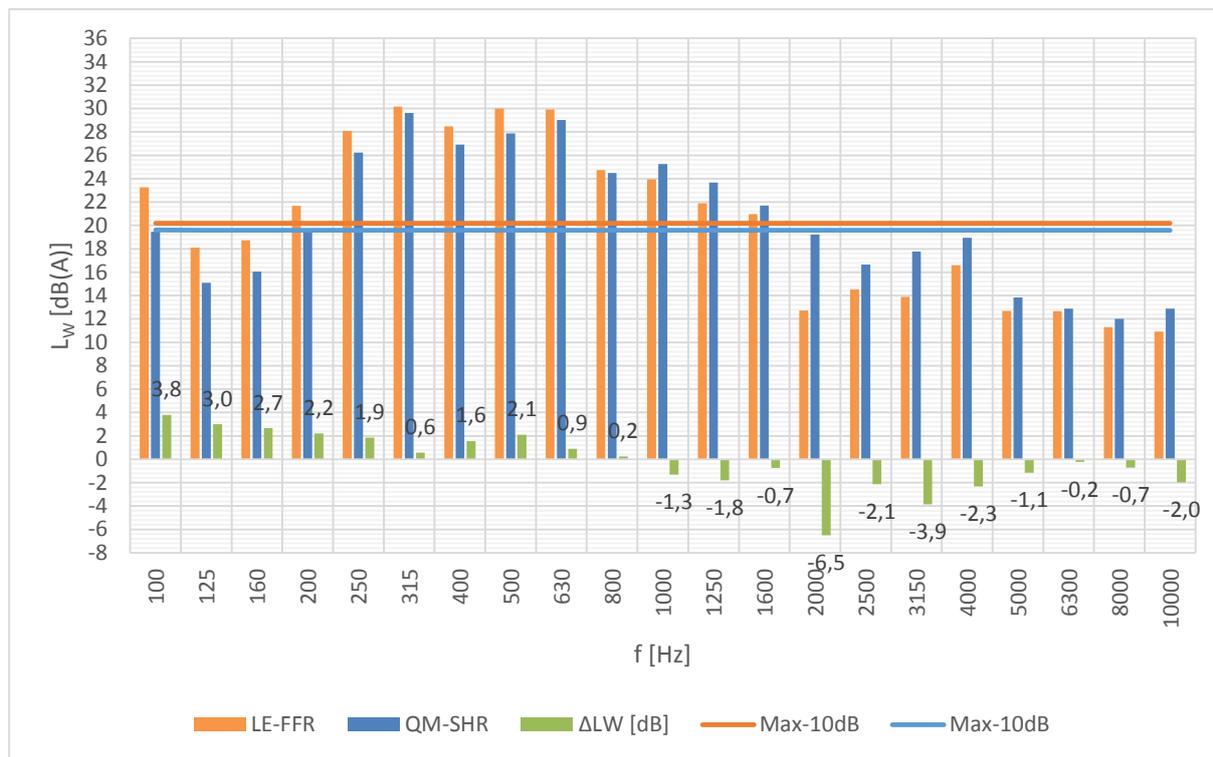
GNP 3666

Abb. 9.2: Schallleistungs-Terzbandpegel für GNP 3666 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W

Für den GNP 3666 (Abb. 9.2) sind die Unterschiede zwischen dem LE-FFR und dem QM-SHR nicht so groß wie für den FKv 500, jedoch zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Im Bereich bis ca. 800Hz sind die gemessenen Schallleistungs-Terzbandpegel aus dem LE-FFR höher und darüber jene aus dem QM-SHR. Die gemessenen Schallleistungspegel sind beim GNP 3666 ca. 10dB höher als beim FKv 500.

UWTes 1672

In Abb. 9.3 war das Magnetventil 1 offen. Das heißt, es wurde lediglich das Weinfach 1 betrieben. Hier zeigt sich wieder ein ähnliches Bild wie auch für andere Geräte, die im FFR mit 6 Mikrofonen gemessen wurden. Bis ca. 630Hz sind die gemessenen Terzband-Pegel im LE-FFR höher als im QM-SHR.

In Abb. 9.4 war das Magnetventil 2 offen und somit das Weinfach 2 aktiv. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild. Die größten Unterschiede ergeben sich für beide Magnetventilstellungen für das 400Hz-Terzband und sie betragen bis zu 5,4dB.

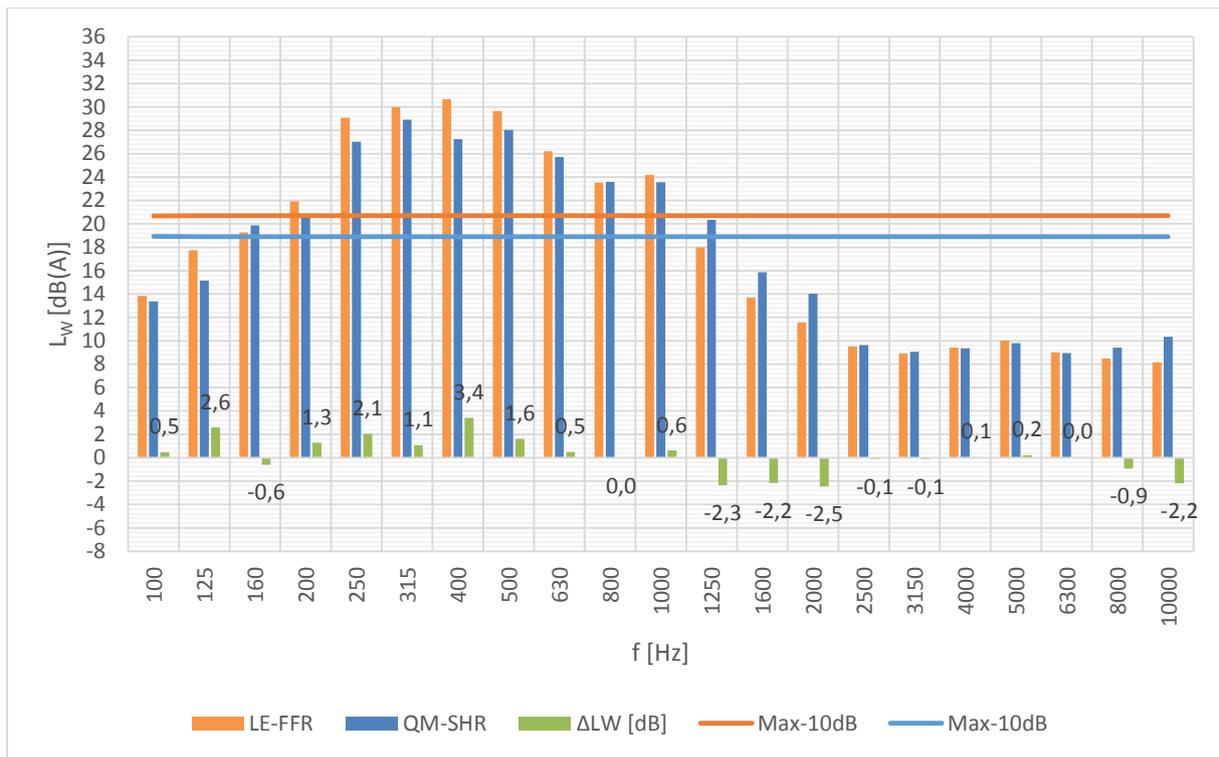


Abb. 9.3: Schalleistungs-Terzbandpegel für UWTes 1672 (W1) in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W

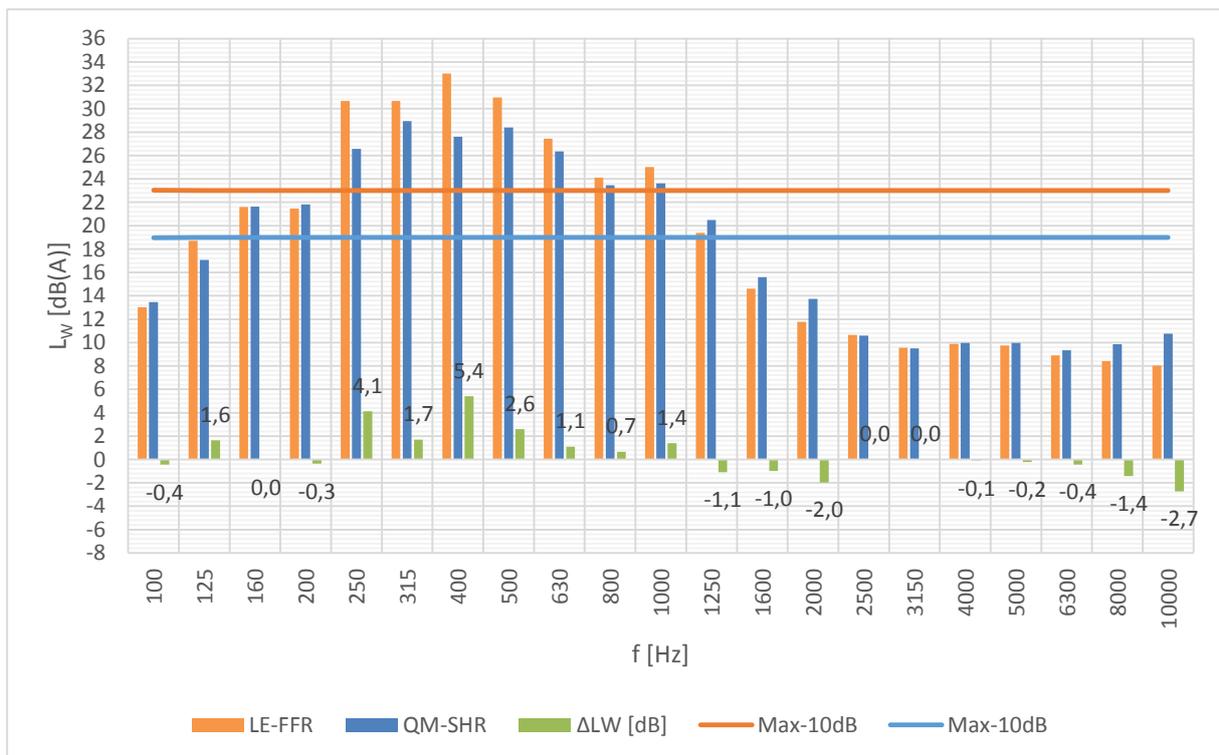


Abb. 9.4: Schalleistungs-Terzbandpegel für UWTes 1672 (W2) in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W

Sequenzbetrieb – Terzbandpegel

GNP 3666

Für den GNP 3666 werden, ausgehend von den ersten Ergebnissen, 2 Sequenzen genauer betrachtet. Das ist einmal der Kompressor bei 3000rpm und der radiale Ventilator im Betrieb „low“.

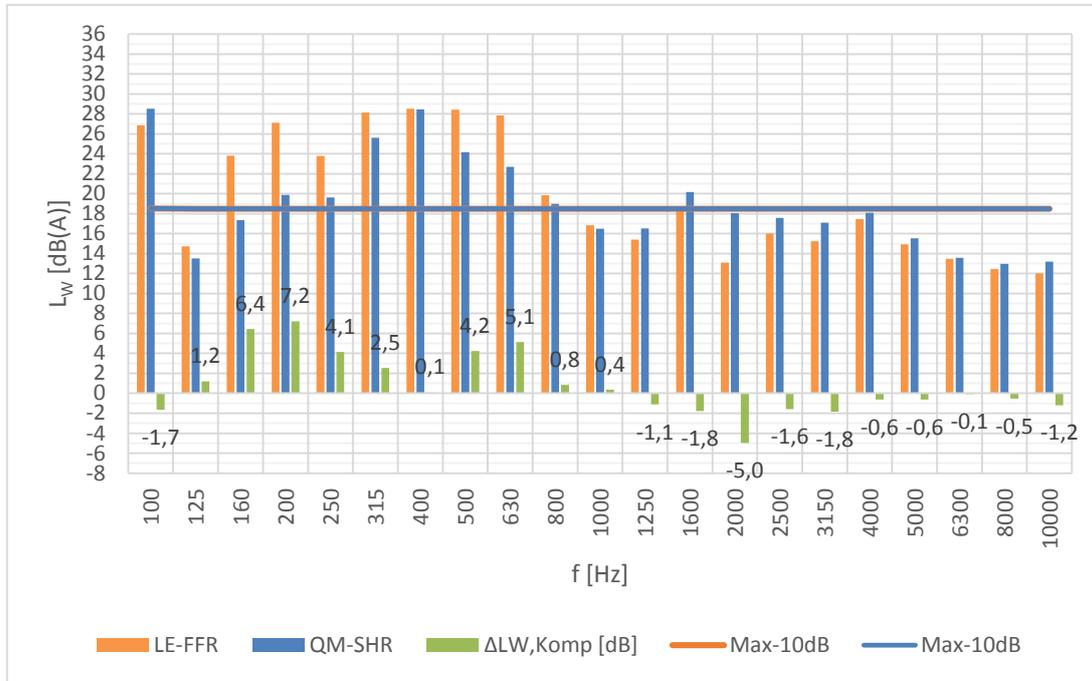


Abb. 9.5: Schallleistungs-Terzbandpegel für GNP 3666 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W für den Betrieb des Kompressors mit einer Drehzahl von 3000rpm

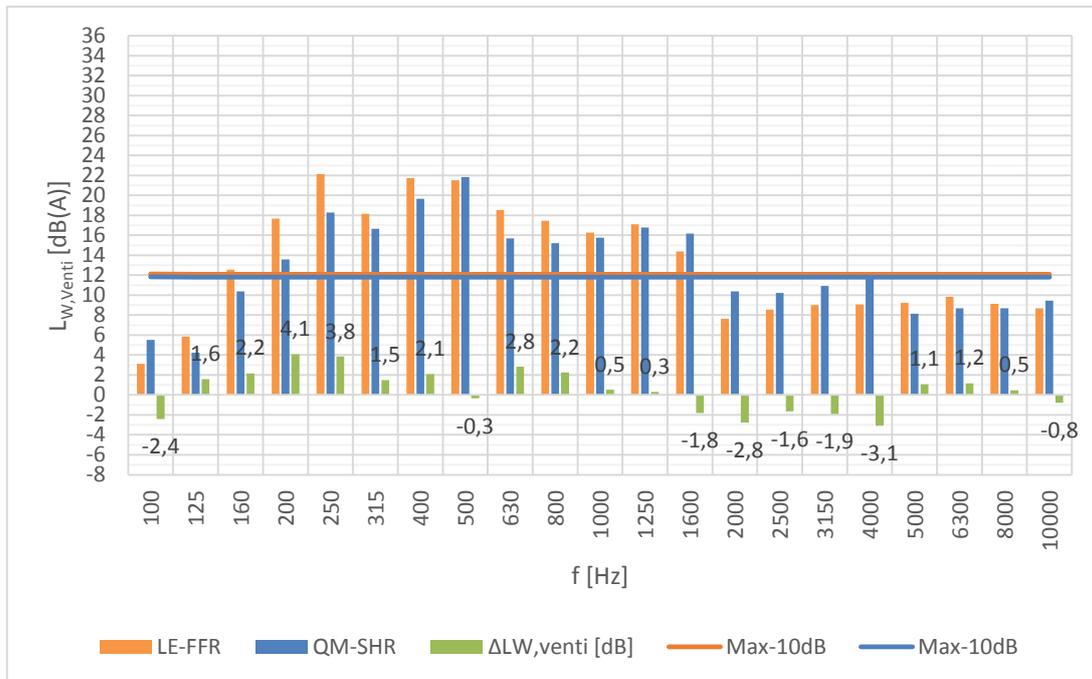


Abb. 9.6: Schallleistungs-Terzbandpegel für GNP 3666 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W für den Betrieb des Ventilators in „low“

In beiden Fällen zeigt sich, dass die gemessenen Terzband-Schallleistungspegel im Frequenzbereich bis ca. 800Hz im LE-FFR lauter sind als im QM-SHR.

CBNP 5167

Der CBNP wurde im LE-FFR mit 10 Mikrofonen gemessen. Für diese Messung ist das Ergebnis aus dem LE-FFR annähernd über den gesamten Messfrequenzbereich höher. Dasselbe lässt sich auch für den Betrieb des Biofresh-Ventilators beobachten.

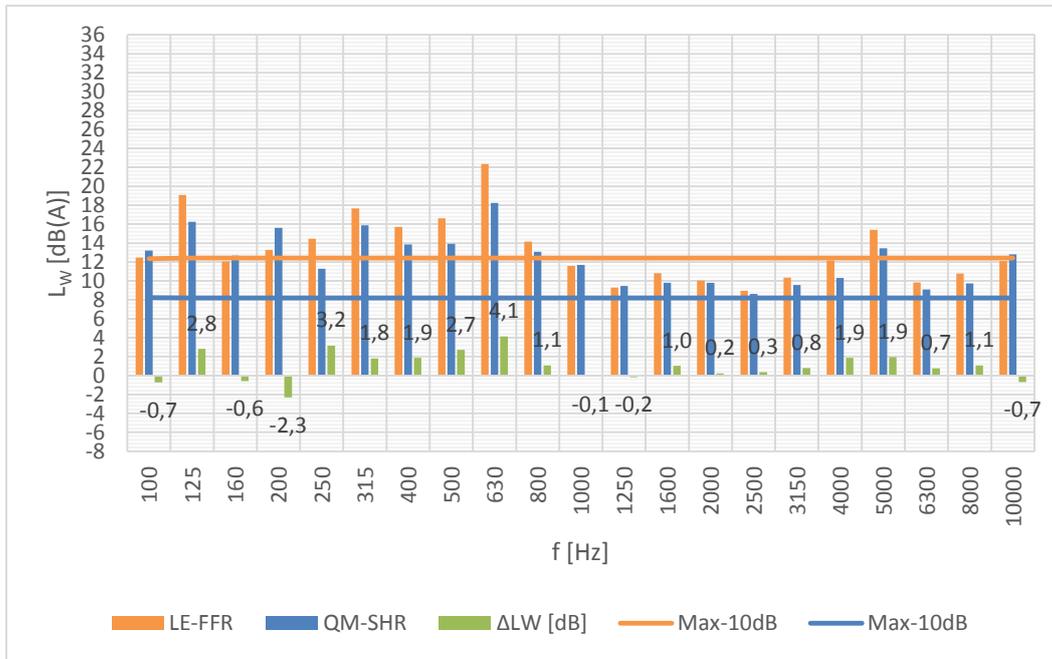


Abb. 9.7: Schalleistungs-Terzbandpegel für CBNP 5167 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W für den Betrieb des Gefrierteilkompressors bei 1600rpm

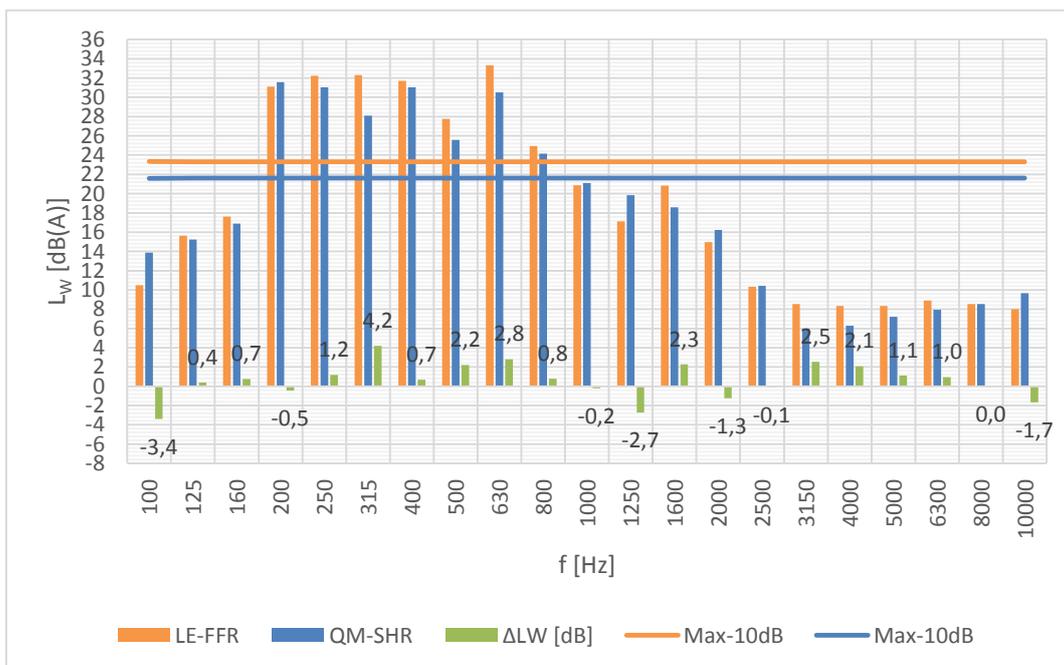


Abb. 9.8: Schalleistungs-Terzbandpegel für CBNP 5167 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W für den Betrieb des Biofresh-Ventilators in „high“

UWT 1672

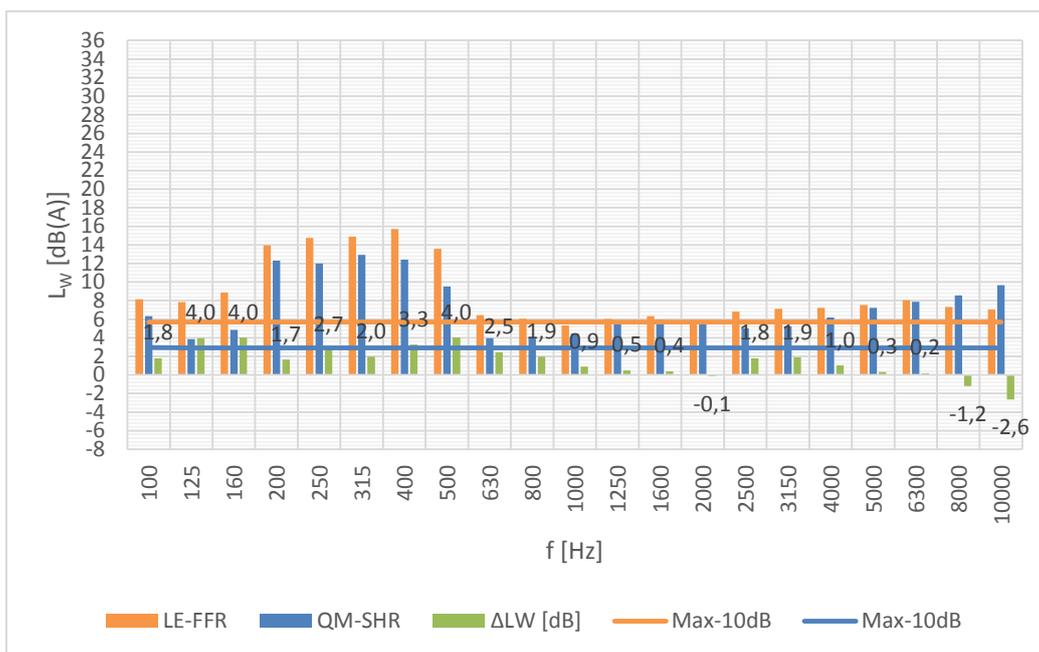


Abb. 9.9: Schalleistungs-Terzbandpegel für UWTes 1672 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W für den Betrieb des Ventilators „Wein 1“ mit einer Drehzahl von 1000rpm

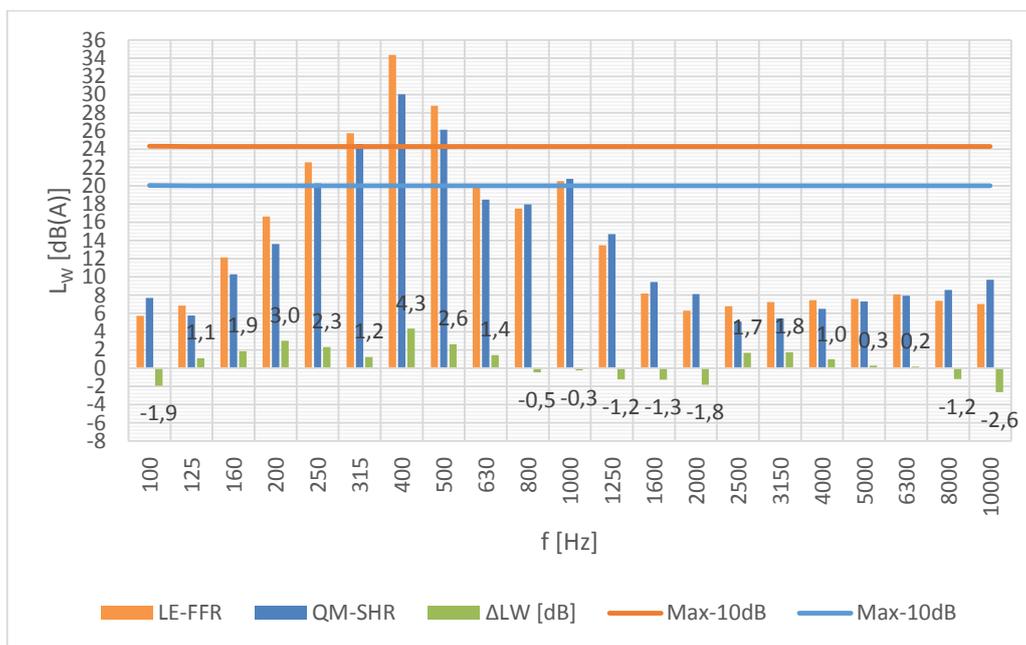


Abb. 9.10: Schalleistungs-Terzbandpegel für UWTes 1672 in beiden Messräumen und Differenz ΔL_W für den Betrieb des Sockel-Ventilators mit einer Drehzahl von 1080rpm

Abb. 9.9 und Abb. 9.10 zeigen die Schalleistungs-Terzbandpegel für zwei Ventilator-Betriebe für das Gerät UWTes 1672. Dabei ist einmal ein Innenventilator in Betrieb und für die zweite Abbildung der Sockelventilator. Das ist gut am Pegel zu erkennen, der für den Sockelventilator-Betrieb bis zu 20dB höher ist (Abb. 9.10). Für den Sockelventilator zeigt sich wiederum, dass im tieferen Messbereich (bis 630Hz) der LE-FFR überwiegt. Für den leisen Innenraumventilator (Abb. 9.9) überwiegt der im LE-FFR bestimmte Schalleistungs-Terzbandpegel über den gesamten Messbereich.

10 Anhang B

In diesem Anhang werden einige Abkürzungen, Formelzeichen und Begriffe die in der Arbeit verwendet werden aufgelistet und zum Teil erklärt. Es sind nur jene aufgelistet die an verschiedenen Stellen auftauchen aber vielleicht nicht an jeder Stelle ausreichend erklärt werden.

10.1 Begriffserklärungen

Abkürzungen

RSSvom englischen „reference sound source“ also Referenz- oder Vergleichsschallquelle

LE-FFRViertel-Freifeldraum im Bereich Labor & Entwicklung

QM-SHRSonderhallraum im Bereich Qualitätsmanagement

AELdie Firma „Akustik Engineering Luckinger“

G&Hdie Firma „G+H Isolierung“

Formelzeichen

σ_{omc} Standardabweichung bez. Instabilität der Betriebs- und Aufstellungsbedingungen

σ_{R0} Vergleichsstandardabweichung des Messverfahrens

σ_R Vergleichsstandardabweichung

Sämtliche Standardabweichungen können in ([AMT] Kap. 7) nachgelesen werden.

Begriffe

Messflächen-Schalldruckpegel: örtlich gemittelter Schalldruckpegel, wenn die Mikrofone auf einer definierten Messfläche angeordnet sind

Volumenschalldruckpegel: örtlich gemittelter Schalldruckpegel, wenn die Mikrofone beliebig im Raum verteilt sind