

Entwicklung eines statistischen Modells zur Evaluierung des Schallschutzes zwischen den Unterrichtsräumen einer Musikuniversität

Toningenieursprojekt

Francesca Tonetti, 01331650
Stefan Zieseimer, 01131279

Projektbetreuer: Prof. Dr. Robert Höldrich

Graz, 18. Juni 2020



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Zur Klassifizierung des Schallschutzes innerhalb von Gebäuden wird üblicherweise die nach [ÖNORM EN ISO 717-1 2013] definierte *bewertete Standard-Schallpegeldifferenz* $D_{nT,w}$ bzw. frequenzabhängig die *Standard-Schallpegeldifferenz* D_{nT} herangezogen. Obwohl diese Parameter primär für den Wohnbau konzipiert sind, finden sie sich auch in vielerlei anderen Anwendungsgebieten, etwa auch auf Musikuniversitäten. Dass diese Art der Anwendung jedoch nicht zielführend ist, belegen zahlreiche Erfahrungsberichte von ProfessorInnen und Studierenden, die in ihren Unterrichtsstunden regelmäßig durch Schall aus angrenzenden Räumen gestört werden. Diese Arbeit versucht nun, die Eignung des $D_{nT,w}$ bzw. D_{nT} für die Anwendung bei Gebäuden einer Musikuniversität anhand einer statistischen Modellierung auf der Datengrundlage von 14 Messungen zu untersuchen. Anschließend wird der Versuch unternommen, auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse Schallschutzempfehlungen auf Basis des konventionellen Parameters $D_{nT,w}$ aufzuzeigen.

Abstract

The classification of the airborne sound insulation inside buildings using the evaluated standard sound pressure difference $D_{nT,w}$ or the frequency-dependent standard sound pressure difference D_{nT} is defined in the Austrian standard [ÖNORM EN ISO 717-1 2013]. Within the standard, these two parameters are primarily defined with respect to sound pressure levels in living spaces, however they are also utilised for more specific applications such as universities of music. Subjective testimonials from users of spaces where the parameters have been applied have indicated that sound levels are unacceptably high and as such provided evidence that the parameters are not entirely accurate. This work attempts to evaluate the suitability of the two parameters for specific buildings through a statistic model based on 14 in-situ measurements. As an outcome of this work, recommendations are presented for more accurate airborne sound insulation parameterisation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Vermessung der Unterrichtssituationen	8
2.1	Vermessene Instrumente	8
2.2	Messaufbau	9
2.3	Aufgenommene Messdaten	10
2.4	Nachhallzeitmessung	10
3	Entwicklung eines statistischen Modells	12
3.1	Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung	12
3.2	Geforderte Standard-Schallpegeldifferenz	13
3.2.1	Ausgangsüberlegung	14
3.2.2	Einfluss des Bauteils	14
3.2.3	Einfluss der Maskierung	14
3.2.4	Keine Störung, geringe Störung	15
3.2.5	Einfluss der Raumakustik	15
3.3	Differenz der Verteilungen	16
3.4	Statistischer Zusammenhang der Pegel je Terzband	17
3.4.1	Korrelationsmatrix der Pegelverteilung je Terzband	17
3.5	Annäherung der Pegeldifferenz durch Normalverteilung je Terzband	18
3.5.1	Berechnung des Mittelwertes	19
3.5.2	Berechnung der Standardabweichung	19
3.5.3	Berechnung der Kovarianzmatrix	20
3.6	Anwendung der multivariaten Normalverteilung	21
3.7	Auswahl des Designparameters	21
3.7.1	Berücksichtigung der Bewertungskurve, Eingrenzung des Frequenzbereichs	22

<i>Evaluierung des Schallschutzes in einer Musikuniversität</i>	4
3.7.2 Argument der multivariaten Verteilung	24
3.8 Betrachtung mehrerer Senderäume	24
3.8.1 Kombination der verschiedenen Paarungen	24
3.8.2 Gesamtzahl der Besetzungsmöglichkeiten	25
4 Ergebnisse	26
4.1 Ergebnisse nach Fachbereich	26
4.1.1 Fachbereichenspezifisch	26
4.1.2 Institut 2 - Klavier	28
4.1.3 Institut 3 - Saiteninstrumente	30
4.1.4 Institut 4 - Blasinstrumente	32
4.1.5 Institut 15 - Alte Musik	34
4.2 Ergebnisse nach Anzahl der angrenzenden Senderäume	36
4.2.1 Vier angrenzende Senderäume	36
4.2.2 Drei angrenzende Senderäume	37
4.2.3 Zwei angrenzende Senderäume	38
4.2.4 Ein angrenzender Senderaum	38
4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	39
5 Klassifizierung	40
5.1 Herangezogenes statistisches Gütemaß	40
5.2 Wahl des Maskierabstandes	41
5.3 Wahl des zeitlichen Anteils	42
6 Schlussfolgerungen	46
6.1 Mögliche Lösungsansätze	46
6.2 Begriffsunschärfe „Störung“	47
6.3 Ausblick	47
Danksagung	48
Anhang	49
Aufbereitung der Nachhallzeit-Messungen	49
Literaturverzeichnis	51
Geräteverzeichnis	52

<i>Evaluierung des Schallschutzes in einer Musikuniversität</i>	5
Abbildungsverzeichnis	53
Tabellenverzeichnis	53

1 Einleitung

Die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ gemäß [ÖNORM EN ISO 717-1 2013] ist die Einzahlangabe für die frequenzabhängige Standard-Schallpegeldifferenz D_{nT} nach der [ÖNORM EN ISO 16283-1 2018]. In der Praxis ist dies oftmals der einzige gegebene Parameter der Schallschutzspezifikation.

Ermittelt wird er durch die Pegeldifferenz zweier angrenzender Räume, einem Sende- und einem Empfängerraum. Standardisiert wird diese Differenz durch einen Nachhallzeit-abhängigen Korrekturterm. Diese Vorberechnungen erfolgen zwar noch in Abhängigkeit der Frequenz, der von der BautechnikerIn angegebene Wert des $D_{nT,w}$ für den Schallschutz zwischen den Räumen beschränkt sich jedoch meist auf den ermittelten Einzahlwert.

Es gibt mehrere Gründe, weshalb diese Art der Schallschutzspezifikation vor allem beim Bau von Gebäuden, die spezielle, akustisch orientierte Funktionen erfüllen sollen, als nicht sehr akkurat gelten sollte. Zunächst geht die Art der Berechnung dieses Wertes historisch auf massive Bauteile zurück. Als die Standard-Schallpegeldifferenz 1952 in der DIN-52-210 eingeführt wurde, baute man vorwiegend mit massivem Ziegelmauerwerk. Erst um 1966 ging die Baubranche über auf Stahlbeton und führte noch später sogenannte Plattenbauten und mehrschalige Wände ein [Kürti 1971]. Die Schallschutzspezifikation ist trotz dieser Veränderungen dieselbe geblieben.

Problematisch scheint weiters, dass diese Art der Spezifikation, obwohl ursprünglich für den Wohnbau und dort charakteristisch auftretende Wohngeräusche der umliegenden Parteien wie Babygeschrei, Hundgebell, Fernseh-Ton, Radio-Musik und laute Gespräche konzipiert, auf vielerlei andere Gebäudearten angewendet wird. Zwar gibt es Vorschläge zur Optimierung der Schallschutzspezifikation ([Park, Bradley 2009], [Hongisto et al. 2014]), diese beziehen sich dabei jedoch eher auf den historischen Wandel der Wohngeräusche und deren psychologische Rezeption.

Bei der Klassifikation der Schallschutzspezifikation mittels der (bewerteten) Standard-Schallpegeldifferenz ergibt sich bei akustisch anspruchsvollen Anwendungen gegenüber dem Wohnbereich ein weiteres Problem: Für den Wohnbau gilt die Prämisse, dass die erwarteten Pegel im Senderaum eher moderat sind. Die bekannten Klassifizierungen wie in [ÖNORM B 8115-5 2012, Anhang A] (Abb. 1) oder [OIB 2019] scheinen daher kaum für Situationen geeignet, in denen auch im Empfängerraum hohe Pegel herrschen, da dort sogar in der bestmöglichen Klasse die musikbehafteten Schallquellen im Nachbarraum noch deutlich hörbar sind.

Klassifizierung des Luftschallschutzes zwischen Räumen							
Luftschalldämmung ^a	Klasse A	Klasse B	Klasse C _R	Klasse C	Klasse D	Klasse E	Zeile
	„hoher Komfort“	„Komfort“	„Standard Reihenhaus“ ^b	„Standard“ ^b	„gering“	„sehr gering“ oder „keine Leistung festgestellt“	
dB							
Luftschalldämmung zwischen Nutzungseinheiten bzw. zu Aufenthaltsräumen von Treppenhäusern, Aufzügen, Kellerräumen und Gemeinschaftsräumen	$D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 60$	$D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 55$	$D_{nT,w} \geq 60$	$D_{nT,w} \geq 55$	$D_{nT,w} \geq 50$	$D_{hT,w} < 50$	1
wie Zeile 1, jedoch mit Verbindung durch eine Türe, ein Fenster o. dgl. unmittelbar in Aufenthaltsräumen	$D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 50$	$D_{nT,w} + C \geq 50$	–	$D_{nT,w} \geq 50$	$D_{nT,w} \geq 45$	$D_{hT,w} < 45$	2
Luftschalldämmung zu Aufenthaltsräumen innerhalb von Nutzungseinheiten, auch im Einfamilienhaus ^c	$D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 45$ mit Türe: ≥ 35	$D_{nT,w} \geq 45$ mit Türe: ≥ 35	–	–	–	–	3
^a zu Nebenräumen gelten um 5 dB verminderte Anforderungen ^b entspricht den Mindestanforderungen gemäß ÖNORM B 8115-2 ^c Diese Räume sind gesondert festzulegen.							

Abbildung 1 – Klassifizierung des Luftschallschutzes im Gebäudeinneren aus [ÖNORM B 8115-5 2012, Anhang A]

Es existiert somit keine genaue Untersuchung der spezifischen Anforderung an den Schallschutz innerhalb eines Gebäudes im Musikbereich, bei der sowohl im Sende- als auch im Empfängerraum hohe Schallpegel erwartet werden. Diese Arbeit soll nun, anhand einer an der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz durchgeführten Messreihe und der Erarbeitung eines statistischen Modells, untersuchen, welche Anforderungen an den Schallschutz im Sinne des $D_{nT,w}$ notwendig wären und Möglichkeiten der Klassifizierung aufzeigen.

2 Vermessung der Unterrichtssituationen

Ziel dieser Arbeit ist es, eine statistische Aussage über den Schallschutz zu treffen. Die dafür notwendige Datengrundlage stammt aus einer Messreihe, die an der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz durchgeführt wurde. Die Messungen fanden an verschiedenen Instituten statt und enthalten damit verschiedene Informationen zu verschiedenen Instrumenten und deren Spektren.

Vermessen wurde der Lautstärkeverlauf typischer Unterrichtssituationen, wie sie tagtäglich an einer Kunstuniversität stattfinden. Die ProfessorInnen und Studierenden waren aufgefordert, ihre gewohnte Unterrichtsweise nicht von der (messbedingt notwendigen) Anwesenheit der Autorin bzw. des Autors beeinflussen zu lassen. Eine typische Unterrichtssituation bestand dabei zumeist in gleichen Teilen aus Spiel und Gespräch zwischen ProfessorIn und StudentIn.

Die Messungen fanden im Zeitraum zwischen 22.11.2019 und 27.01.2020 im Neubau der KUG, Brandhofgasse 21 sowie im Palais Meran, Leonhadstraße 15 (beides 8010 Graz) in verschiedenen Unterrichtsräumen statt.

2.1 Vermessene Instrumente

Insgesamt wurden 14 Unterrichtseinheiten aufgezeichnet. Die Auswahl der Instrumente sollte den Unterrichtsumfang an der Kunstuni Graz repräsentativ darstellen. Auch wenn dies aus organisatorischen Gründen nicht ganz erreicht werden konnte, sollten die Daten dennoch einen ausreichend repräsentativen Eindruck vermitteln.

Die vermessenen Unterrichtssituationen gliedern sich nach Institut. Sofern nicht anders vermerkt, wurde jeweils eine Unterrichtseinheit vermessen:

- Institut 2 - Klavier
 - Klavier
- Institut 3 - Saiteninstrumente
 - Violine
 - Streichensemble
 - Harfe
 - Kontrabass (zwei Einheiten)
- Institut 4 - Blasinstrumente
 - Basstuba
 - Klarinette
 - Querflöte
 - Trompete (zwei Einheiten)
 - Kammermusik- Ensemble (zwei Einheiten)
- Institut 15 - Alte Musik und Aufführungspraxis
 - Blockflöte

Die gemittelten Spektren je Fachbereich sind in Abb. 2 dargestellt. Die höchsten Pegel weist dabei das Institut 15 - Alte Musik auf, jedoch gilt es dabei zu bedenken, dass an

diesem Institut lediglich eine Messung vorgenommen wurde.

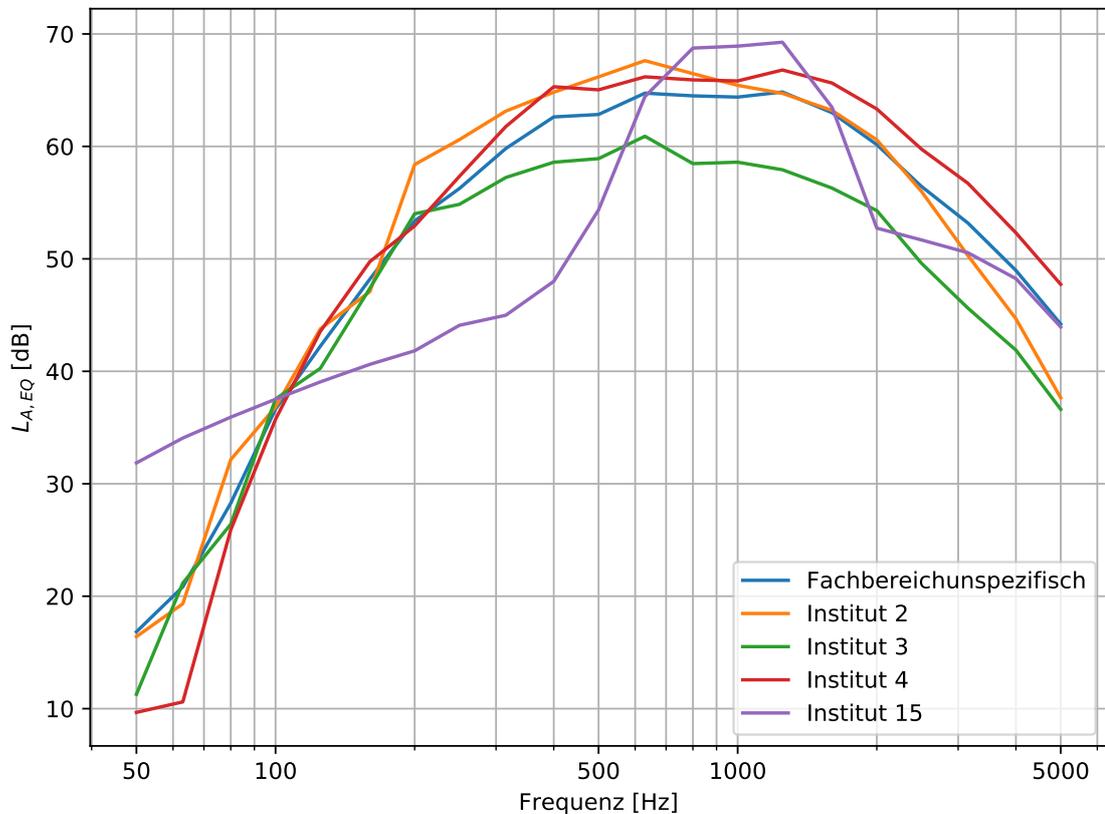


Abbildung 2 – Gemittelte Spektren je Fachbereich

2.2 Messaufbau

Die Messkette bestand aus einem Messmikrofon und einem Schallpegelmesser. Das Mikrofon wurde in einer Höhe von ungefähr $1,5m$ möglichst außerhalb des Direktschallfeldes des Instruments positioniert (siehe Abb. 3). Dafür wurden die Abstrahlcharakteristika der verschiedenen Instrumente berücksichtigt. Für eine genaue Auflistung des verwendeten Equipments siehe Abschnitt 6.3, Tabelle 3 im Anhang dieser Arbeit.



Abbildung 3 – Messaufbau für Streichensembel-Unterricht, Raum 03.06, Neubau

2.3 Aufgenommene Messdaten

Aufgenommen wurde der terzbandgefilterte, A-bewertete, energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}(f_n)$ bei einer Mittelungszeit von $\Delta t = 1s$ und als Log-Datei gespeichert. Eine parallele Aufnahme von Audiodaten fand aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht statt.

Der Frequenzbereich erstreckte sich von $6,3Hz$ bis $20kHz$, wobei für die weitere Verarbeitung nur die Terzbänder von $50Hz$ bis $5kHz$ berücksichtigt wurden (entspricht dem erweiterten Frequenzbereich für den Luftschallschutz in [ÖNORM EN ISO 717-1 2013]). Die Dauer der aufgezeichneten Einheiten variierte zwischen minimal $45min$ bis maximal $90min$ (Durchschnittlich $73:07min$ bei $16:35min$ Standardabweichung). Bei 14 vermessenen Situationen, 21 verwendeten Terzbändern und einer Gesamtdauer $17:04h$ ergeben sich insgesamt

$$\begin{aligned} N &= 14 \cdot 21 \cdot 17:04h \\ &= 18.056.598 \end{aligned} \tag{1}$$

Datenpunkte.

2.4 Nachhallzeitmessung

Die Nachhallzeitmessung in den unterschiedlichen Räumen wurde mit der integrierten Funktion des verwendeten *NTi XL2* durchgeführt werden. Anregungssignal war ein möglichst lautes Klatschen in vier bis fünf unterschiedlichen Orten im Raum, welche dann zu einem einzigen Wert pro Oktavband gemittelt wurden. Vor allem für die Anregung

der tiefen Frequenzen reichte der Signal-Rausch-Abstand des Klatschens meistens nicht aus und die Werte mussten aus der restlichen Kurve extrapoliert werden. Für weitere Informationen zur durchgeführten Datenaufbereitung siehe Aufbereitung der Nachhallzeit-Messungen im Anhang dieser Arbeit.

3 Entwicklung eines statistischen Modells

Zur Entwicklung eines statistischen Modells der „Störung“ sei die folgende Annahme getroffen: Es existieren zwei (oder mehrere) benachbarte Unterrichtsräume, in beiden findet Instrumentalunterricht (d.h. ein Schallereignis) statt. Es wird dabei unterschieden zwischen dem Empfangsraum (ER), der einer Störung von benachbarten Räumen ausgesetzt ist, und einem oder mehreren Senderäumen (SR), die diese Störung hervorrufen. Eine Störung tritt genau dann auf, wenn ein Schallpegel im Empfangsraum, der aus einem Schallereignis einer anderen Unterrichtssituation in einem der angrenzenden Senderäume resultiert (L_{SR}), über dem Pegel im Empfangsraum L_{ER} (bzw. über einem gewissen Abstand dazu, siehe Abschnitt 3.2) liegt.

Praktisch gesprochen liegt eine Störung vor, wenn im Empfangsraum ein Instrument aus einem benachbarten Senderraum trotz Pegelreduktion durch die Wand noch hörbar ist, und das obwohl im Empfangsraum selbst gerade gespielt wird. Dieses theoretische Szenario gilt es nun im statistischen Modell abzubilden.

3.1 Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung

Da für Evaluierung des Schallschutzes ein statistisches Modell erarbeitet werden soll, gilt es zunächst aus den empirischen, messtechnisch erfassten absoluten Daten eine relative Wahrscheinlichkeitsverteilung (Histogramm) zu berechnen. Diese ermittelten „Wahrscheinlichkeiten“ $p_{n,i}$ beschreiben den (prozentualen) Anteil $\in [0, 1]$ der Zeit, in der ein auftretender Lautstärkepegel $L_{A,EQ}$ innerhalb eines bestimmten Pegelbandes L_i bei einer Terzbandmittenfrequenz $n \in \{50Hz, 63Hz, 80Hz, 100Hz, \dots, 5000Hz\}$ während einer Unterrichtseinheit erwartet wird. Die Pegelbänder (auch „Bins“) L_i bezeichnen konstant breite Bereiche um einen Mittenpegel $i \in \{0dB(A), 1dB(A), 2dB(A), \dots, 100dB(A)\}$. Es ergeben sich je Unterrichtssituation also insgesamt 101 Pegelbänder bei jeweils 21 Terzbändern.

Sei X nun ein beliebiger Pegel in einem Terzband n . Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_n(x)$ ergibt sich dann zu

$$f_n(x) = \frac{h_{i,n}}{H_n \cdot b_i}$$

wobei $H_n \dots$ Anzahl der Messwerte je Terzband (2)

$h_{i,n} \dots$ Anzahl der Messwerte, die im Terzband f_n im Pegelband i liegen

$b_i \dots$ Breite des Pegelbandes i , hier: $b_i = 1dB \forall i, n$

Damit gilt

$$f_n(x) = \begin{cases} p_{n,i}, & \text{für } x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

Beispielhafte Histogramme finden sich für ausgewählte Instrumente in Abb. 4.

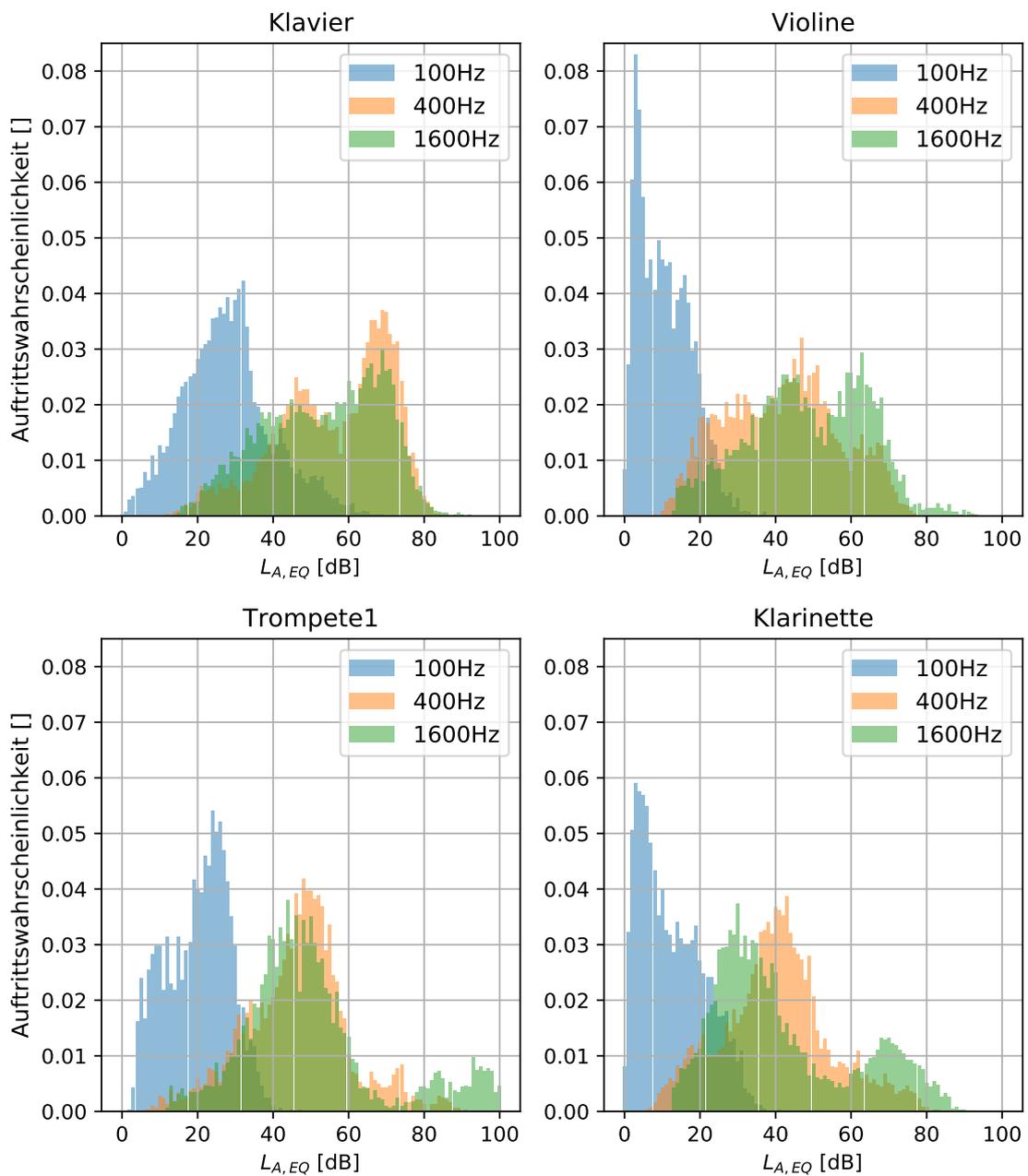


Abbildung 4 – Beispielhafte Histogramme verschiedener Instrumente in verschiedenen Terzbändern (Auswahl)

3.2 Geforderte Standard-Schallpegeldifferenz

Bei der Gebäudeplanung wird für die Vorgabe des zu erreichenden Schallschutzes meist die Standard-Schallpegeldifferenz D_{nT} (frequenzabhängig) bzw. die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ (einzahlige Angabe) verwendet. Im Folgenden soll nun die

Anforderung an $D_{nT}(f_n)$ in Abhängigkeit von Maskierung, Nachhallzeit des Empfangsraumes und Pegeldifferenz, der in zwei Räumen stattfindenden Schallereignisse, entwickelt werden.

3.2.1 Ausgangsüberlegung

Die Grundüberlegung des Modells beruht auf der Annahme, dass in einem Empfangsraum ER eine Unterrichtssituation stattfindet, die zu jedem Zeitpunkt Schall mit dem Pegel $L_{ER}(f_n)$ produziert, während vom benachbarten Senderaum SR gleichzeitig (Stör-)schall des Pegels $L_{SR}(f_n)$ einer anderen Unterrichtssituation ausgeht (vgl. Abschnitt 3). Der Differenzpegel ΔL der beiden Schallpegel sei

$$\Delta L(f_n) = L_{SR}(f_n) - L_{ER}(f_n) \quad (4)$$

bzw.

$$L_{SR}(f_n) = L_{ER}(f_n) + \Delta L(f_n) \quad (5)$$

3.2.2 Einfluss des Bauteils

Die bauliche Trennung zweier Räume führt dazu, dass idealerweise kein Schall, im Regelfall jedoch ein verminderter Anteil des Schalls aus dem Senderaum in den Empfangsraum gelangt. Der Pegel $L_{SR \rightarrow ER}(f_n)$, der sich im Empfangsraum, ausgelöst durch ein Schallereignis im Senderaum, einstellt, lässt sich durch die bauakustischen Eigenschaften der begrenzenden Bauteile mittels der Schallpegeldifferenz $D(f_n)$ bestimmen:

$$L_{SR \rightarrow ER}(f_n) = L_{SR}(f_n) - D(f_n) \quad (6)$$

3.2.3 Einfluss der Maskierung

Damit allgemein ein Schallereignis mit Pegel $L_1(f_n)$ die Wahrnehmung eines anderen, gleichzeitig stattfindendes Schallereignis mit Pegel $L_2(f_n)$ unterdrückt, muss zwischen den beiden Pegeln eine Minstdifferenz, der sog. Maskierabstand $M(f_n)$, bestehen:

$$L_1(f_n) - L_2(f_n) \geq M(f_n) \quad (7)$$

Dieses Phänomen wird als *Simultanverdeckung* bezeichnet [Fastl, Zwicker 2009]. Nach [Fastl, Zwicker 2009, S. 70, Fig. 4.2] liegt der Wert für $M(f_n)$ bei maximal $M_{max} \approx 10dB$ bei einer Maskierfrequenz von $f_M = 1kHz$ und abhängig vom Pegel des Maskierers sowie der Testtonfrequenz. Vereinfachend wurde für die Berechnungen angenommen, dass

$$M(f_n) = M = \text{const.} = 10\text{dB} \quad (8)$$

um eine vollständige Maskierung in jedem Fall zu gewährleisten.

Im vorliegenden Fall soll nun der aus dem Senderaum stammende Schall im Empfangsraum mit Pegel $L_{SR \rightarrow ER}(f_n)$ vom Schall des im Empfangsraum stattfindenden Ereignisses mit Pegel $L_{ER}(f_n)$ verdeckt werden, damit keine Störung durch $L_{SR \rightarrow ER}(f_n)$ vorliegt:

$$L_{ER}(f_n) - L_{SR \rightarrow ER}(f_n) \geq M(f_n) \quad (9)$$

Gl. 6 eingesetzt in Gl. 9 mit Gl. 5 ergibt die geforderte Schallpegeldifferenz $D(f_n)$:

$$\begin{aligned} L_{ER}(f_n) - (L_{SR}(f_n) - D(f_n)) &\geq M(f_n) \\ L_{ER}(f_n) - (L_{ER}(f_n) + \Delta L(f_n) - D(f_n)) &\geq M(f_n) \\ \cancel{L_{ER}(f_n)} - \cancel{L_{ER}(f_n)} - \Delta L(f_n) + D(f_n) &\geq M(f_n) \end{aligned} \quad (10)$$

$$D(f_n) \geq \Delta L(f_n) + M(f_n)$$

Bei vollständiger Maskierung ($M = 10\text{dB}$) gilt für die Pegeldifferenz $\Delta L(f_n)$:

$$\Delta L(f_n) \leq D(f_n) - 10\text{dB} \quad (11)$$

Die Differenz der Pegel zwischen Sende- und Empfangsraum darf also maximal die um 10dB verminderte, bauliche Schallpegeldifferenz $D(f_n)$ annehmen, damit gerade *keine* Störung im Empfangsraum durch ein Schallereignis im Senderaum vorliegt.

3.2.4 Keine Störung, geringe Störung

Um von der binären Einteilung in „keine Störung“ und „Störung“ abzukommen, wird für jene Fälle, in denen die Differenz $\Delta L(f_n)$ nur geringfügig überschritten wird, die Kategorie der „geringen Störung“ eingeführt. Der Unterschied in der Berechnung besteht gegenüber der Störung in Abschnitt 3.2.3, Gl. 8 darin, dass bei der geringen Störung gilt

$$M(f_n)_{\text{gering}} = M_{\text{gering}} = \text{const.} = 5\text{dB} \quad (12)$$

3.2.5 Einfluss der Raumakustik

Die gesuchte Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT}(f_n)$ bzw. die davon abgeleitete bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ unterscheidet sich nach [ÖNORMEN ISO 16283-1 2018, 3.12] von der Schallpegeldifferenz $D(f_n)$ durch einen Korrekturterm für die Nachhallzeit $T(f_n)$ des Empfangsraumes. Dies dient der Objektivierung bzw. der Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen raumakustischen Gegebenheiten:

$$\begin{aligned}
 D_{nT}(f_n) &= D(f_n) + 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0} \\
 \Leftrightarrow D(f_n) &= D_{nT}(f_n) - 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Dabei entspricht T_0 einer Standard-Nachhallzeit des jeweiligen Nutzungsszenarios ($T_0 = 0,5s$ nach [ÖNORMEN ISO 16283-1 2018, 3.13] sowie [ÖNORM B 8115-1 2011, 3.23] für das gesamte Spektrum).

Gl. 13 eingesetzt in Gl. 10 ergibt die geforderte Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT}(f_n)$:

$$\begin{aligned}
 D(f_n) &\geq \Delta L(f_n) + M(f_n) \\
 D_{nT}(f_n) - 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0} &\geq \Delta L(f_n) + M(f_n)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$D_{nT}(f_n) \geq \Delta L(f_n) + M(f_n) + 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0}$$

Für die Differenz zwischen dem Schallpegel im Sende- und Empfangsraum $\Delta L(f_n)$ gilt bei vollständiger Maskierung entsprechend

$$\Delta L(f_n) \leq D_{nT}(f_n) - 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0} - 10dB
 \tag{15}$$

Die Pegeldifferenz $\Delta L(f_n)$ stellt die Grenze dar, die zwischen Sende- und Empfangsraum auf Basis der bauakustischen Gegebenheiten nicht überschritten werden darf, damit im Empfangsraum keine Störung durch ein Schallereignis im Senderraum vorliegt. Sie lässt sich als Vektor anschreiben, dessen Zeilen das jeweilige Terzband repräsentieren:

$$\Delta \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \Delta L(50Hz) \\ \Delta L(63z) \\ \Delta L(80Hz) \\ \vdots \\ \Delta L(5k Hz) \end{bmatrix}
 \tag{16}$$

3.3 Differenz der Verteilungen

Gl. 15 besagt, dass keine Störung vorliegt, solange die Differenz $\Delta L(f_n)$ der Schallpegel zwischen Sende- und Empfangsraum unter der um den Maskierabstand $M(f_n)$ und den Korrekturterm der Nachhallzeit verminderten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT}(f_n)$ liegt. Sie berechnet sich nach Gl. 4.

Da die Schallereignisse im Sende- bzw. Empfangsraum von unterschiedlichen Quellen herrühren, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um stochastisch unabhängige Ereignisse handelt. Allgemein lässt sich dann die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Differenz der Pegel aus der Faltung der Verteilungen der jeweiligen Einzelereignisse bilden:

$$L_{SR}(f_n) - L_{ER}(f_n) \iff (f_{n,SR} * f_{n,ER})(x) = f_{n,diff}(x) \quad (17)$$

Da es sich um eine Differenz und nicht - wie allgemein definiert - um eine Summe handelt, ist die Faltung der Differenz $(f_{n,SR} * f_{n,ER})(x)$ in diesem Fall definiert zu:

$$(f_{n,SR} * f_{n,ER})(x) := \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f_{n,SR}(k) f_{n,ER}(k - x) \quad (18)$$

3.4 Statistischer Zusammenhang der Pegel je Terzband

Bisher wurden sämtliche Berechnungen nur für diskrete Terzbänder f_n angestellt. Zur Untersuchung des gesamten relevanten Frequenzbereichs von $50Hz$ bis $5kHz$ müssen zunächst einige Überlegungen zur Korrelation der Pegelvorkommnisse je Terzband angestellt werden, da die Schallereignisse je Terzband jeweils von derselben Quelle stammen und damit nicht als statistisch unabhängig betrachtet werden können.

3.4.1 Korrelationsmatrix der Pegelverteilung je Terzband

Ein Möglichkeit, um Aussagen über den statistischen Zusammenhang zweier Zufallsvariablen (hier: der Pegel bei zwei Terzband-Mittenfrequenzen) zu treffen, ist der *Pearson-Korrelationskoeffizient* $\rho(F_i, F_j)$. Er berechnet sich aus der Kovarianz der Pegel zweier Frequenzbänder F_i und F_j , normiert auf das Produkt ihrer Standardabweichung σ_{F_i} bzw. σ_{F_j} :

$$\rho(F_i, F_j) := \frac{Cov(F_i, F_j)}{\sigma_{F_i} \sigma_{F_j}} \quad (19)$$

Die Korrelationsmatrix **C** enthält nun alle Korrelationskoeffizienten $\rho(F_i, F_j)$ aus Gl. 19 für alle Terzbänder $i, j \in \{50Hz, 63Hz, \dots, 5kHz\}$:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \rho(F_{i=50Hz}, F_{j=50Hz}) & \rho(F_{50Hz}, F_{63Hz}) & \dots & \rho(F_{50Hz}, F_{5kHz}) \\ \rho(F_{63Hz}, F_{50Hz}) & \rho(F_{63Hz}, F_{63Hz}) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ \rho(F_{5kHz}, F_{50Hz}) & \dots & \dots & \rho(F_{5kHz}, F_{5kHz}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Abb. 5 zeigt die Korrelationsmatrix **C** für alle aufgenommenen, absoluten Messdaten aller Instrumente. Die verschiedenen Datensätze wurden dabei aneinander gereiht. Es ist

ersichtlich, dass zumindest zu zwei benachbarten Terzen eine hohe Korrelation von mindestens $\rho(F_N, F_{N+2}) \geq 0,6$ besteht. Dies ist in so fern erwartbar, als dass die internen Terzbandfilter des verwendeten Messgeräts nicht ideal steil abfallen.

Besonders der Bereich über 630 Hz weist jedoch eine ausgesprochen hohe Korrelation auf. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die meisten Instrumente im höheren Frequenzbereich viele geräuschhafte Anteile durch Anblasen, Anstreichen etc. produzieren, die sich durch ein breites Spektrum auszeichnen.

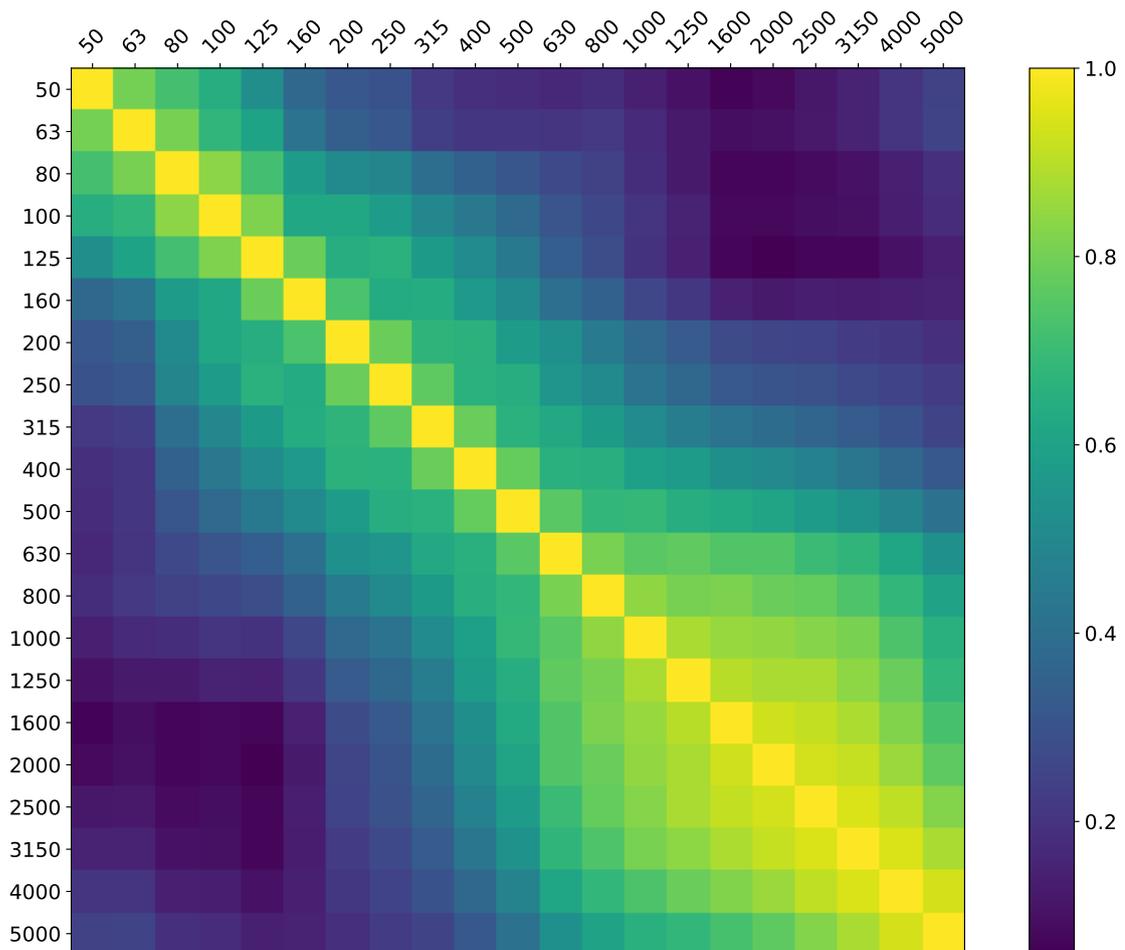


Abbildung 5 – Korrelationsmatrix über alle Messpunkte

3.5 Annäherung der Pegeldifferenz durch Normalverteilung je Terzband

Wegen der hohen Korrelation der Pegelverteilungen je Terzband wird deren gemeinsame Verteilung als Verbundwahrscheinlichkeit mit Hilfe der mehrdimensionalen Normalverteilung berechnet werden (siehe nächster Abschnitt 3.6).

Dafür ist es jedoch zunächst notwendig, die Verteilung der Pegeldifferenz je Terzband

aus Abschnitt 3.3 einer Normalverteilung anzunähern. Deren Mittelwert μ_n dient dann als Parameter einer multivariaten Verteilung. Mit Hilfe der Standardabweichung σ_n lässt sich - in Verbindung mit der bekannten Korrelationsmatrix \mathbf{C} - die Kovarianzmatrix Σ je Instrumentenpaar bestimmen.

3.5.1 Berechnung des Mittelwertes

Da die Verteilungen $f_{n,diff}(x)$ (aus Gl. 17, Seite 17) sowie der Wertebereich, den die Zufallsvariable X (die Differenz der Pegel im Sende- bzw. Empfangsraum) annehmen kann, bekannt sind, berechnet sich der Mittelwert μ_n zu:

$$\mu_n = \sum_{d=-100dB}^{100dB} f_{n,diff}(d) \cdot d \quad (21)$$

Für jedes Terzband ergibt sich der Vektor der Mittelwerte $\boldsymbol{\mu}$:

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_{50Hz} \\ \mu_{63Hz} \\ \vdots \\ \mu_{5kHz} \end{bmatrix} \quad (22)$$

3.5.2 Berechnung der Standardabweichung

Die Varianz - das Quadrat der Standardabweichung - berechnet sich allgemein zu

$$\sigma_n^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mathbb{E}(x))^2 \cdot f_{n,diff}(x) dx \quad (23)$$

Im vorliegenden Fall entspricht der Erwartungswert $\mathbb{E}(x)$ dem zuvor ermittelten Mittelwert μ_n , durch die diskreten Pegelstufen kann statt der Integration eine Summation über die Pegelstufen d vorgenommen werden:

$$\sigma_n^2 = \sum_{d=-100dB}^{100dB} (d - \mu_n)^2 \cdot f_{n,diff}(d) \quad (24)$$

$$\sigma_n = \pm \sqrt{\sum_{d=-100dB}^{100dB} (d - \mu_n)^2 \cdot f_{n,diff}(d)}$$

Wobei

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{50Hz} \\ \sigma_{63Hz} \\ \vdots \\ \sigma_{5kHz} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Abb. 6 zeigt die Pegelverteilung des Streichensembles (blau), einer Trompeteneinheit (orange), die Verteilung derer Differenz (grün), den Mittelwert μ_{400Hz} (rot) sowie die Standardabweichung σ_{400Hz} (magenta) einer angenommenen Normalverteilung der Pegeldifferenz im 400Hz-Terzband. Wichtig ist hierbei jedoch allein die Position der roten bzw. magentafarbenen Balken auf der Abszisse, der Auftrag auf der Ordinate dient nur zur visuellen Orientierung

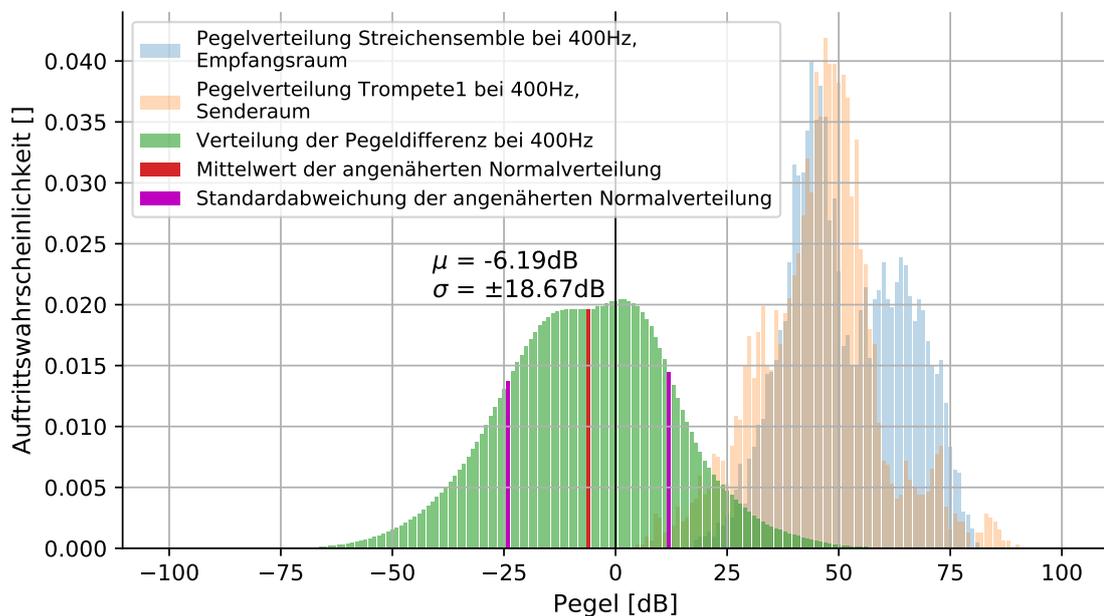


Abbildung 6 – Pegelverteilungen (blau, orange), Differenzverteilung (grün), Mittelwert (rot) sowie Standardabweichung (magenta) der angenommenen Normalverteilung

3.5.3 Berechnung der Kovarianzmatrix

Zur Berücksichtigung des Zusammenhangs verschiedener, korrelierter Verteilungen findet sich in der Berechnung der multivariaten Normalverteilung (Abschnitt 3.6) die Kovarianzmatrix Σ . Um diesen Zusammenhang spezifischer, d.h. individuell, je Terzband und Instrumentenpaar, angeben zu können, wird sie aus der Korrelationsmatrix C (Gl. 20; globaler Zusammenhang der Terzbänder über alle Messungen) und den jeweiligen Standardabweichungen σ (individuelle Form der Verteilung der Differenz) aus Gl. 19 sowie Gl. 20 berechnet:

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma)C \text{diag}(\sigma) \quad (26)$$

3.6 Anwendung der multivariaten Normalverteilung

Mit Hilfe der multivariaten Normalverteilung lässt sich die Verbundwahrscheinlichkeit beliebig vieler Normalverteilungen berechnen, wenn deren statistischer Zusammenhang über die Kovarianzmatrix Σ gegeben ist:

$$f_{MV}(\mathbf{x}) = \left(\frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p \det \Sigma}} \right)^g \quad (27)$$

$$\text{mit } g = -\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^\top \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})$$

Dabei ist $\boldsymbol{\mu}$ ein Vektor der Länge p , dessen Zeilen die einzelnen Terzband-Mittelwerte der angenommenen Normalverteilungen der Pegeldifferenz darstellen (Gl. 22). \mathbf{x} ist das Argument der Wahrscheinlichkeitsfunktion je Terzband:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{50Hz} \\ x_{63Hz} \\ \vdots \\ x_{5kHz} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Durch Integration von $f_{MV}(\mathbf{x})$ lässt sich nun die Verteilungsfunktion berechnen. Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Pegeldifferenz \mathbf{X} (bzw. die Pegeldifferenzen \mathbf{X} in allen Terzen) maximal den Wert x (bzw. \mathbf{x}) annimmt. Der Designparameter ist dabei $\Delta \mathbf{L}$:

$$P(\mathbf{X} \leq \Delta \mathbf{L}) = F(\Delta \mathbf{L}) = \int_{-\infty}^{\Delta \mathbf{L}} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (29)$$

Das Ergebnis dieser Berechnung stellt die Wahrscheinlichkeit dar, mit der die Pegeldifferenz zwischen einem Empfangs- und einem Senderraum unter Berücksichtigung aller Terzbänder unterhalb des Designparameters $\Delta L(f_n)$ liegt. Bezogen auf die konkret betrachtete Situation ist dies gleichbedeutend mit dem zeitlichen Anteil, in dem während einer Unterrichtseinheit in einem Empfängerraum keine Störung (für $M = 10dB$) durch einen angrenzenden Senderraum stattfindet.

3.7 Auswahl des Designparameters

Abhängig von einer gegebenen, bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ soll nun ermittelt werden, in welchem zeitlichen Anteil während einer Unterrichtseinheit eine Störung durch einen oder mehrere angrenzende Senderäume zu erwarten ist. Da die Berechnung - insbesondere von Gl. 29 - einen sehr hohen numerischen Rechenaufwand darstellt,

wurde für die Berechnung für alle Instrumentenpaare (jeweils Sender und Empfängerposition) eine Auswahl verschiedener Werte für den $D_{nT,w}$ getroffen, deren Ergebnisse dann zu einer Kurve linear interpoliert werden (vgl. Abschnitt 4). Als untere Grenze wurde ein Wert von $D_{nT,w} = 45dB$ gewählt, in $5dB$ -Schritten wird schließlich die obere Grenze bei $D_{nT,w} = 80dB$ erreicht.

3.7.1 Berücksichtigung der Bewertungskurve, Eingrenzung des Frequenzbereichs

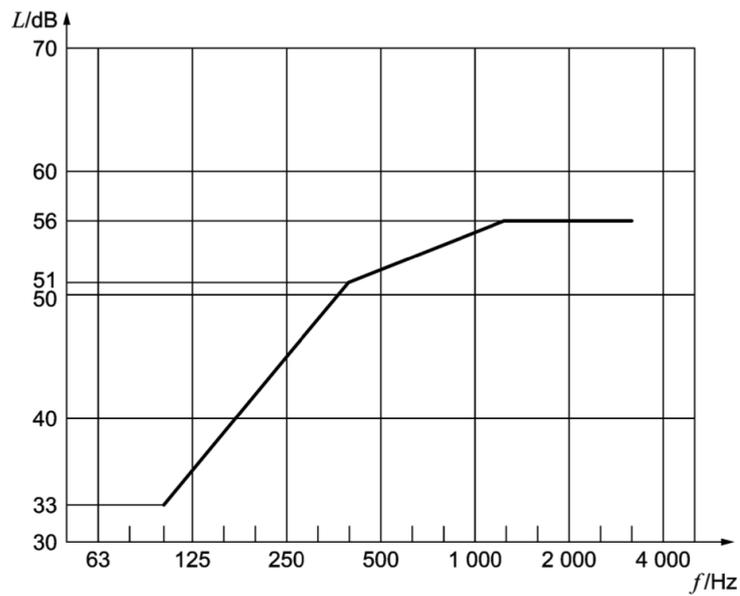
Um von den Werten für die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ auf die zugehörigen, frequenzabhängigen Werte für die Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT}(f_n)$ zu schließen, wird davon ausgegangen, dass der spektrale Verlauf der Schallpegelminde- rung durch die angrenzenden Bauteile qualitativ dem Verlauf der Bewertungskurve aus [ÖNORM EN ISO 717-1 2013] entspricht. Die Norm [ÖNORM EN ISO 717-1 2013] sieht jedoch vor, dass

Die zutreffende Bezugskurve ist in Schritten von 1 dB (...) in Richtung der Messwertkurve zu verschieben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich ist, jedoch nicht größer als 32,0 dB (Messung in 16 Terzbändern)(...).

[ÖNORM EN ISO 717-1 2013, S. 10]

Dies bedeutet, dass, bei 16 Terzen und einer maximalen Abweichung von in Summe $32dB$, der Wert für $D_{nT}(f_n)$ um $2dB$ unter dem Wert liegt, den die Bezugskurve (Abb. 7) bei der jeweiligen Terz annimmt. Die sich ergebenden Werte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Weiters wird der Frequenzbereich entsprechend der Definition in der Norm [ÖNORM EN ISO 717-1 2013] auf die Terzbänder von $100Hz$ bis $3150Hz$ eingegrenzt. Eine Erweiterung des Frequenzbereichs auf bis zu $50Hz$ würde nach [ÖNORM EN ISO 12354-1 2017] weitere Messungen an definierten Punkten im Raum erfordern, da in kleinen Räumen bei Frequenzen um $50Hz$ das Schallfeld nicht mehr als diffus angenommen werden kann.



Legende

L Bezugswert
f Frequenz

Abbildung 7 – Bewertungskurve aus [ÖNORM EN ISO 717-1 2013]

$D_{nT,w}$	45	50	55	60	65	70	75	80
$D_{nT}(100Hz)$	24	29	34	39	44	49	54	59
$D_{nT}(125Hz)$	27	32	37	42	47	52	57	62
$D_{nT}(160Hz)$	30	35	40	45	50	55	60	65
$D_{nT}(200Hz)$	33	38	43	48	53	58	63	68
$D_{nT}(250Hz)$	36	41	46	51	56	61	66	71
$D_{nT}(315Hz)$	39	44	49	54	59	64	69	74
$D_{nT}(400Hz)$	42	47	52	57	62	67	72	77
$D_{nT}(500Hz)$	43	48	53	58	63	68	73	78
$D_{nT}(630Hz)$	44	49	54	59	64	69	74	79
$D_{nT}(800Hz)$	45	50	55	60	65	70	75	80
$D_{nT}(1kHz)$	46	51	56	61	66	71	76	81
$D_{nT}(1,25kHz)$	47	52	57	62	67	72	77	82
$D_{nT}(1,6kHz)$	47	52	57	62	67	72	77	82
$D_{nT}(2,0kHz)$	47	52	57	62	67	72	77	82
$D_{nT}(2,5kHz)$	47	52	57	62	67	72	77	82
$D_{nT}(3,15kHz)$	47	52	57	62	67	72	77	82

Tabelle 1 – Gewählte Werte für $D_{nT,w}$ bzw. $D_{nT}(f_n)$

3.7.2 Argument der multivariaten Verteilung

Die geforderte Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT}(f_n)$ zum Erreichen eines bestimmten Schallschutzes ergibt sich nach Abschnitt 3.2, Gl. 14 zu

$$D_{nT}(f_n) \geq \Delta L(f_n) + M(f_n) + 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0} \quad (30)$$

Durch Umformung lässt sich der Designparameter $\Delta L(f_n)$ bei gegebener Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT}(f_n)$ und bekanntem Maskierabstand $M(f_n)$ sowie Nachhallzeit $T(f_n)$ bestimmen, welcher als Argument der multivariaten Verteilung (Gl. 29 bzw. 27) dient:

$$\Delta L(f_n) \leq D_{nT}(f_n) - M(f_n) - 10 \cdot \log \frac{T(f_n)}{T_0} \quad (31)$$

3.8 Betrachtung mehrerer Senderäume

In einem Gebäude, dessen Räume zum Großteil für Musikunterricht verschiedenster Instrumente und Stile genutzt werden (wie dies etwa bei der Kunstuniversität Graz der Fall ist), wird nicht nur durch *einen* benachbarten Senderraum eine Störung hervorgerufen, sondern üblicherweise durch mehrere angrenzende Räume. Ein typischer Unterrichtsraum besitzt eine Fensterfront nach außen sowie eine Zugangsseite zum Gang. Es gibt es also maximal $k = 4$ angrenzende Senderäume, die jeweils unabhängig voneinander potentiell eine Störung im mittig gelegenen Empfangsraum hervorrufen können.

3.8.1 Kombination der verschiedenen Paarungen

Durch mehrere angrenzende Räume verringert sich entsprechend auch der Zeitanteil, im Empfangsraum nicht gestört zu werden. Dieser Zeitanteil ist für ein Instrumentenpaar gegeben durch Gl. 29:

$$p_k := P(\mathbf{x} \leq \Delta \mathbf{L}) \quad (32)$$

Da das Pegelaufkommen in den verschiedenen Räumen als stochastisch unabhängig betrachtet werden kann, lässt sich der gesamte Anteil nicht gestört zu werden aus der Multiplikation der Einzelpaarungen aus einem Instrument im Empfangsraum und $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ (verschiedenen) Instrumenten im Senderraum berechnen:

$$p_{ges} = \prod_k p_k \quad (33)$$

3.8.2 Gesamtzahl der Besetzungsmöglichkeiten

Da der $D_{nT,w}$ den Schallschutz nicht für den einzelnen Bauteil, sondern die gesamte effektive Reduktion des Schalldruckpegels abbildet, wurde unabhängig von der Position der verschiedenen angenommenen Senderäume (seitlich, überhalb, unterhalb) derselbe Wert für $D_{nT,w}$ gewählt. Die Besetzungsreihenfolge der angrenzenden Senderäume ist damit irrelevant. Im Sinne der Kombinatorik handelt es sich damit um eine *Kombination mit Wiederholungen*, da Unterrichtssituationen des gleichen Instruments gleichzeitig in mehreren Senderäumen stattfinden können. Bei vierzehn vermessenen Instrumenten und $k = 4$ Senderäumen ergeben sich also maximal

$$N = \binom{14 + 4 - 1}{4} = 2380 \quad (34)$$

verschiedene Besetzungsmöglichkeiten der Senderäume je Besetzung des Empfangsraumes. Der Empfangsraum kann nun auch wiederum von 14 verschiedenen Instrumenten besetzt sein, es ergeben sich also

$$N = \binom{17 + 4 - 1}{4} \cdot 14 = 33320 \quad (35)$$

insgesamt mögliche Besetzungszustände bei einem Empfangsraum und vier Senderäumen. Diese verschiedenen Szenarien stellen die Basis für die im folgenden Abschnitt 4 vorgenommene Mittelung für den fachbereichenspezifischen Fall dar. Bei Wahl eines bestimmten Institutes verringert sich die Anzahl entsprechend der vorgenommenen Messungen (vgl. Abschnitt 2.1, S. 8: „Vermessene Instrumente“).

4 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der in Abschnitt 3 beschriebenen Berechnungen dargestellt, einerseits nach Fachbereich, andererseits nach Anzahl der angrenzenden Senderäume.

Die Berechnung erfolgte mittels *Python* in der Version 3.7 unter Verwendung der Bibliotheken *NumPy*, *SciPy*, *pandas* sowie *itertools*. Die grafische Darstellung erfolgte mittels dem *Pyplot*-Modul der *matplotlib*-Bibliothek, Version 3.1.3.

4.1 Ergebnisse nach Fachbereich

Die Ergebnisse nach Fachbereich zeigen die Berechnungsergebnisse der vermessenen Unterrichtssituationen je Institut. Die Datengrundlage des fachbereichenspezifischen Falls umfasst alle Messungen an allen Instituten.

4.1.1 Fachbereichenspezifisch

Abb. 8 zeigt den Verlauf der Kurven „nicht gestört“ bzw. „wenig gestört“. Grundsätzlich wäre eine asymptotisch Annäherung an die 100%-Marke zu erwarten, dieser Trend zeichnet sich im Rahmen der gewählten Werte für $D_{nT,w}$ von $45dB$ bis $80dB$ im Durchschnitt jedoch nur für die Fälle ab, in denen nur einer oder zwei angrenzende Senderäume angenommen werden.

Die eingefügte Referenzlinie orientiert sich an der im nachfolgenden Abschnitt 5 vorgenommenen Klassifizierung. Selbst für den höchsten Wert $D_{nT,w} = 80dB$ (nicht gestört) wird sie für vier Senderäume im Durchschnitt knapp verfehlt.

Durch die Berücksichtigung aller Instrumente ist die gesamte betrachtete Dynamik sehr hoch. Entsprechend groß ist die Streuung der Ergebnisse und damit auch die Standardabweichung - beinahe unabhängig von der Anzahl der angrenzenden Senderäume.

Da es sich im Fall "wenig gestört"(orange Kurven in Abb. 8) nur um eine Verschiebung der Kurve entlang der Abszisse handelt (siehe Abschnitt 3.2.4) verhält sich die Standardabweichung analog. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit ist sie nicht explizit dargestellt.

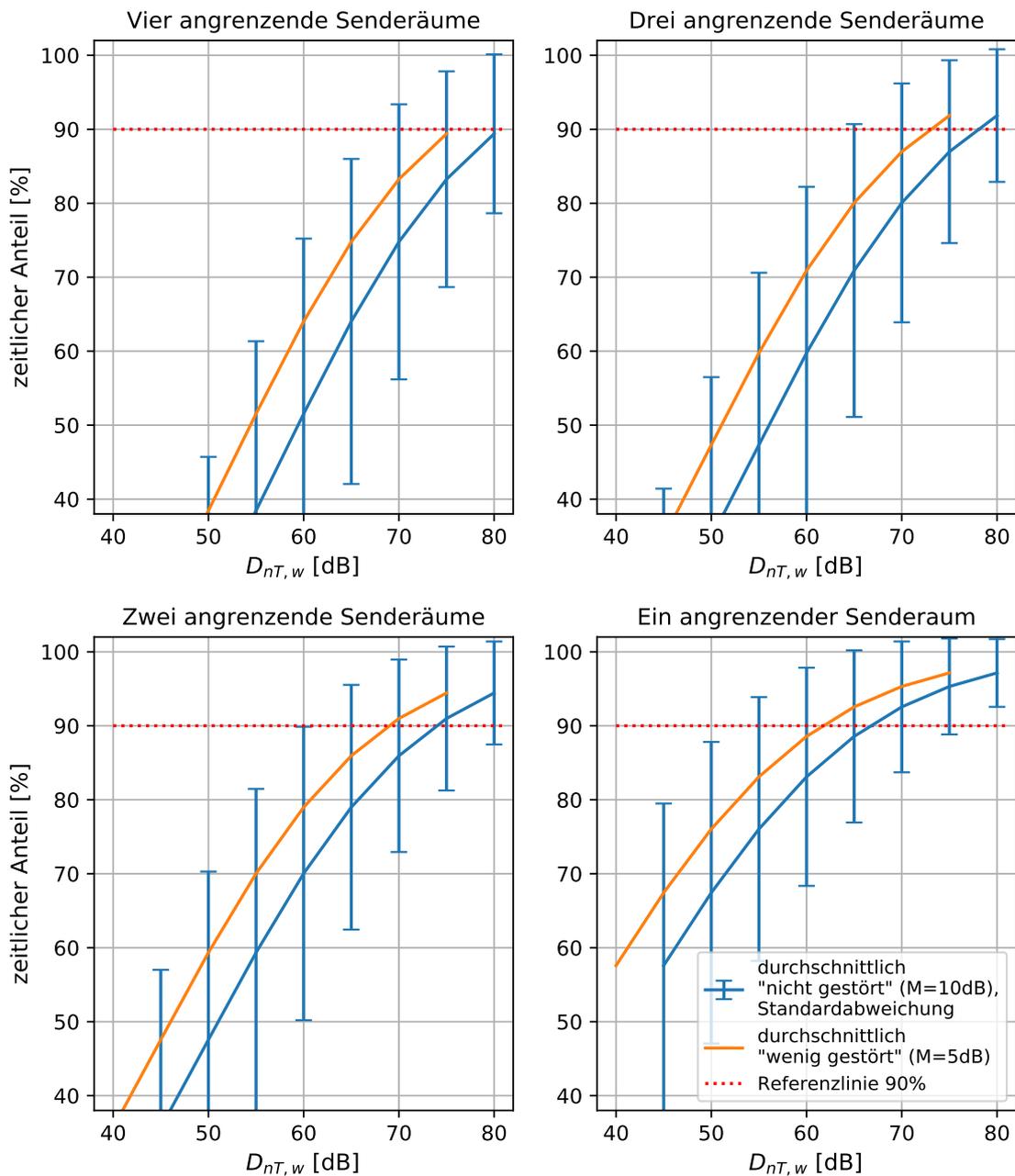


Abbildung 8 – Ergebnisse der Berechnungen, Fachbereichspezifisch

Den Vergleich über die unterschiedliche Anzahl angrenzender Senderräume zeigt Abb. 9 in einem zusammengeführten Detailausschnitt. Im Bereich unterhalb der 90% Referenzlinie, in denen die Kurven einen annähernd linearen Verlauf aufweisen, zeigt sich, dass für einen, zwei und vier angrenzende Senderräume ein horizontaler Kurvenabstand von ca. $6dB$ besteht. Dies deckt sich mit der Erwartung bei Verdopplung der Quellenanzahl.

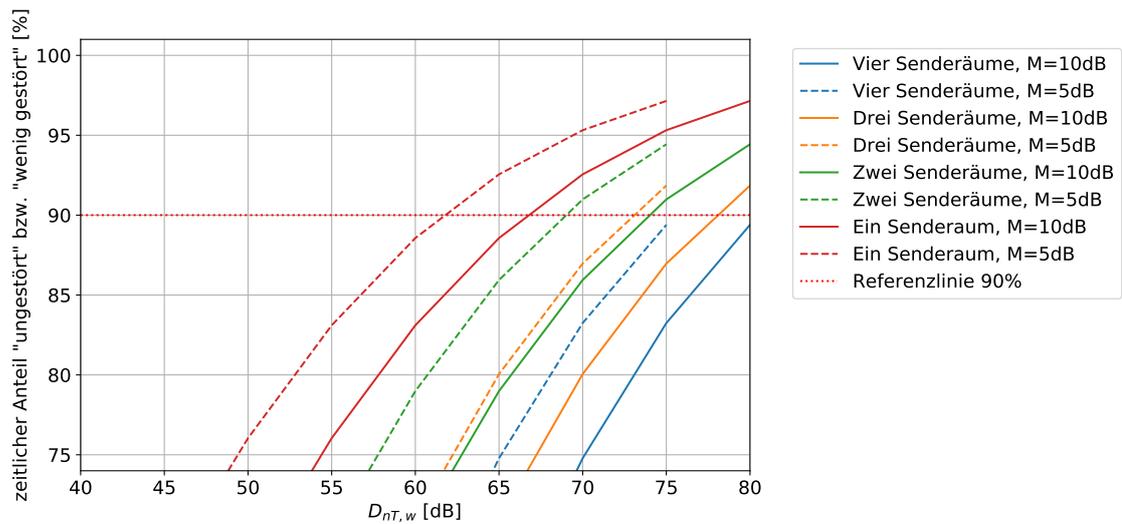


Abbildung 9 – Detailabbildung; fachbereichunspezifisch

4.1.2 Institut 2 - Klavier

Da am Institut 2 nur eine Messung durchgeführt wurde, ergibt sich die Berechnung des gesamten Störanteils bei $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ Senderäumen gegenüber Gl. 33 zu

$$p_{ges} = \prod_k p_k = p^k \quad (36)$$

Der Mittelwert über alle möglichen Raumbesetzungen ist damit $p_{MW} = p_{ges}$, die Standardabweichung entsprechend $\sigma = 0$.

Aufgrund der insgesamt reduzierten Dynamik bei nur einer Messung ist der Kurvenverlauf in Abb. 10 gegenüber Abb. 8 deutlich steiler. Durch die hohe Kovarianz bei gleichem Instrument kommt die Maskierung deutlich zum tragen, da immer spektral gleiche Anteile in Sende- und Empfangsraum auftreten.

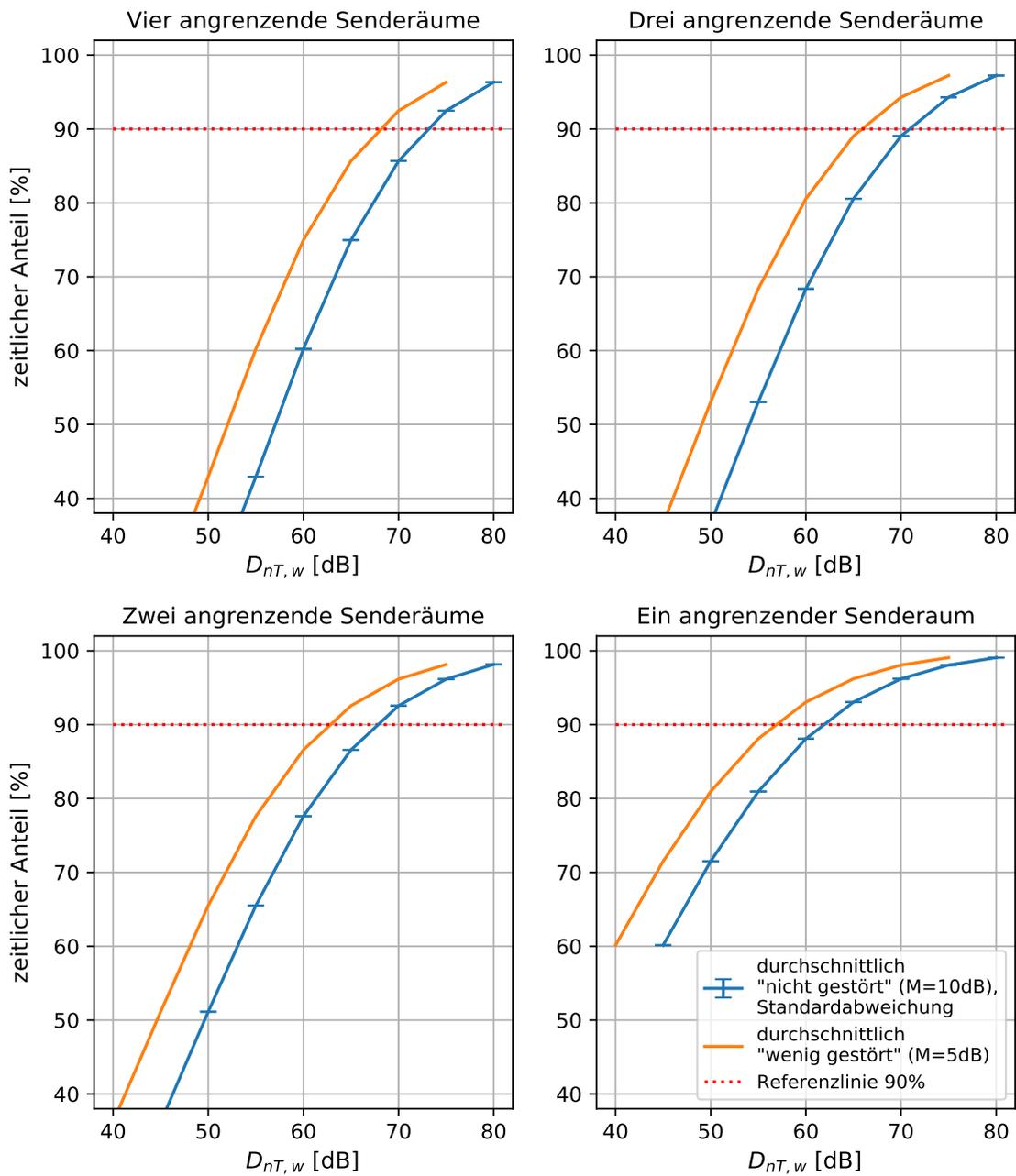


Abbildung 10 – Ergebnisse der Berechnungen, Institut 2 - Klavier

Die Detailabbildung 11 zeigt - wie Abb. 9 für den fachbereichspezifischen Fall zuvor auch - konstanten horizontalen Abstand der Kurven bei Verdopplung der Senderäume.

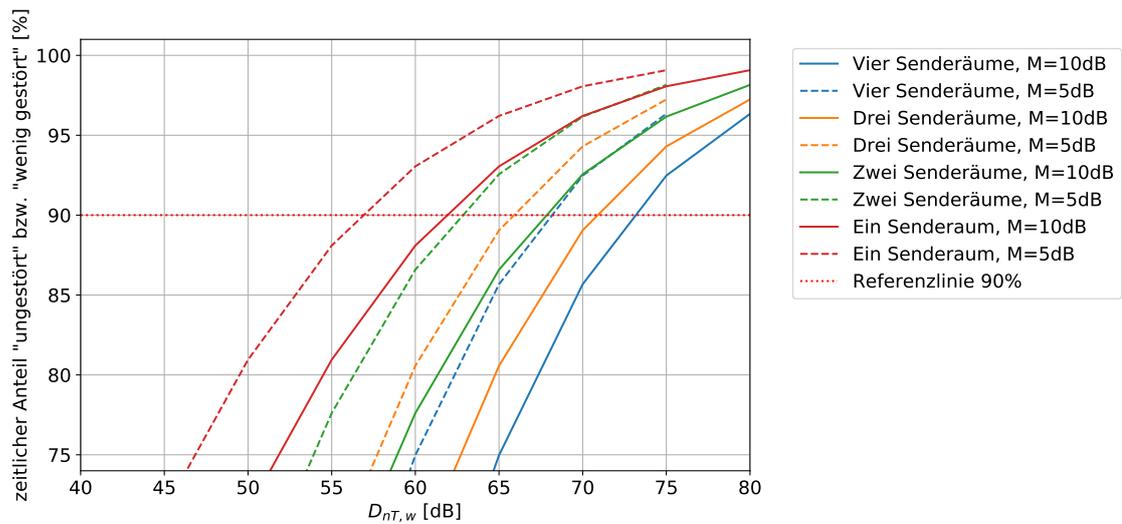


Abbildung 11 – Detailabbildung; Institut 2

4.1.3 Institut 3 - Saiteninstrumente

Gegenüber der im vorangehenden Abschnitt 4.1.2 ermittelten Situation am Institut 2, wurden am Institut 3 (Streichinstrumente) wieder mehrere verschiedene Situationen aufgezeichnet. Die Dynamik zwischen den Instrumenten ist hoch, was sich an der großen Standardabweichung in Abb. 12 zeigt. Die 90%-Referenzlinie wird für vier Senderäume im betrachteten Wertebereich für $D_{nT,w}$ knapp erreicht.

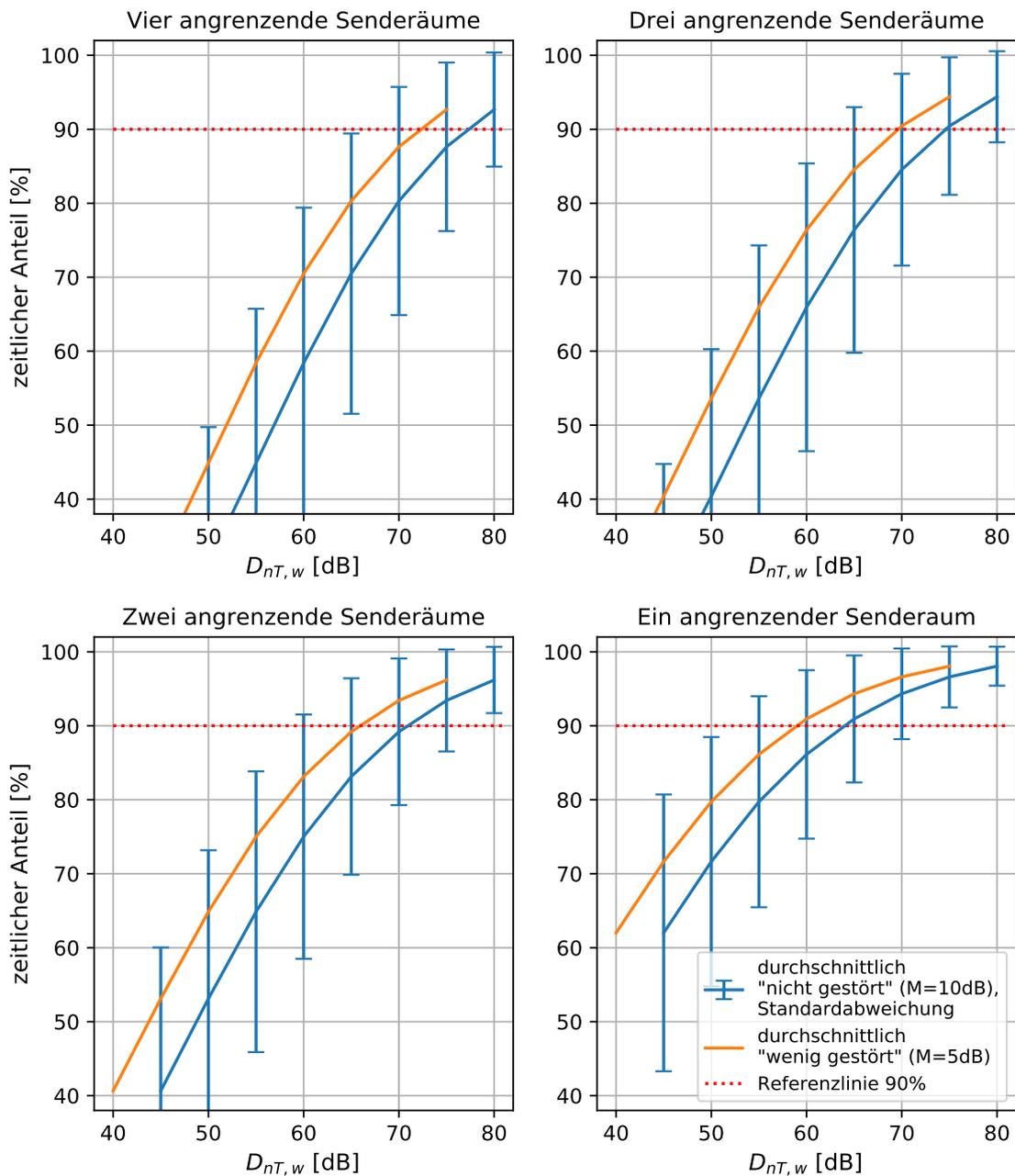


Abbildung 12 – Ergebnisse der Berechnungen, Institut 3 - Saiteninstrumente

Die erhöhte Dynamik zeigt sich entsprechend auch im Detailausschnitt: Während in Abb. 11 (Institut 2) die 90%-Referenzlinie für vier angrenzende Senderräume, „keine Störung“ bei $D_{nT,w} \approx 73dB$ geschnitten wird, ist dies für die Streichinstrumente in Abb. 13 erst bei $D_{nT,w} \approx 77dB$ der Fall.

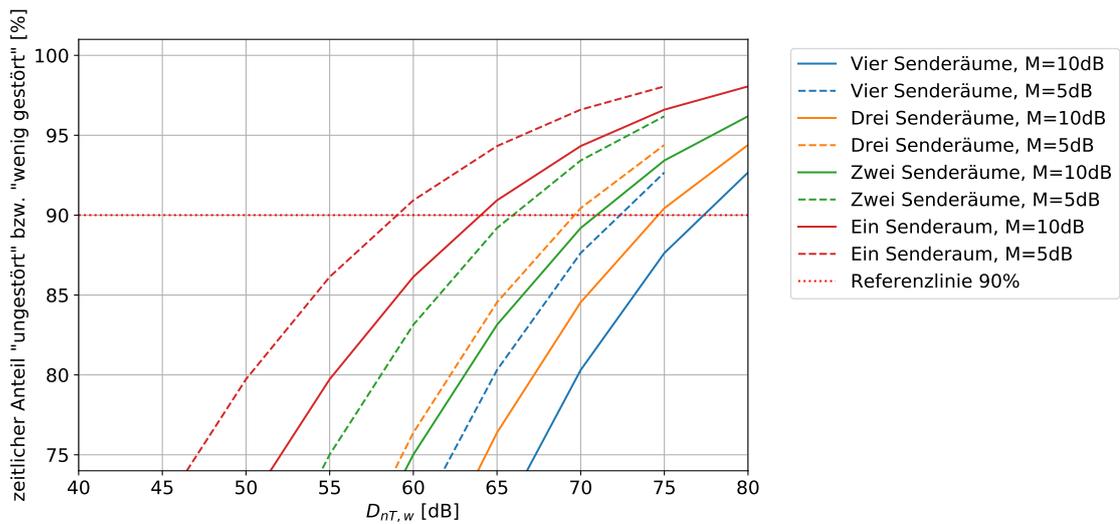


Abbildung 13 – Detailabbildung; Institut 3

4.1.4 Institut 4 - Blasinstrumente

Das Institut 4 (Blasinstrumente) stellt innerhalb der untersuchten Instrumentengattungen den Fachbereich mit dem höchsten Dynamikumfang dar. Darüber hinaus handelt es sich bei diesem Institut um dasjenige, dessen Instrumente auch absolut die höchsten Lautstärkepegel erreichen. Diese Tatsache spiegelt sich in den Berechnungsergebnissen in Abb. 14 in einer extrem hohen Standardabweichung sowie einem sehr hohen benötigten $D_{nT,w}$ -Wert zum Erreichen eines bestimmten zeitlichen Störanteils wieder. Die 90%-Referenzlinie wird im untersuchten Bereich des Schallschutzes erst für $k < 3$ Senderäume geschnitten.

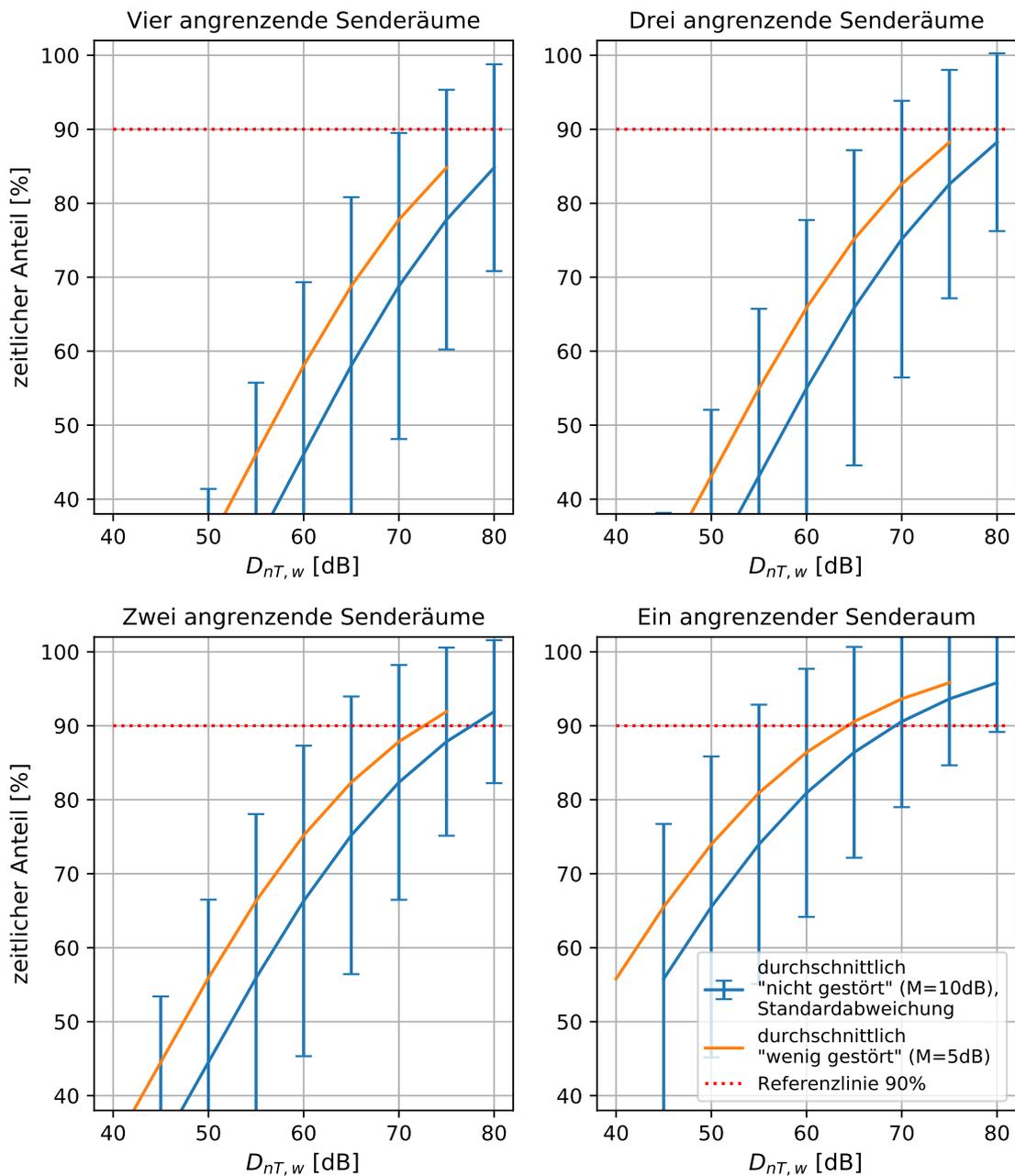


Abbildung 14 – Ergebnisse der Berechnungen, Institut 4 - Blasinstrumente

Der Verlauf der Kurven scheint darüber hinaus flacher als bei allen vorherigen Instituten zu sein, wie Abb. 15 nahelegt. Folglich wäre also für das Institut 4 gegenüber den anderen untersuchten Instituten ein deutlich höherer Zuwachs des $D_{nT,w}$ nötig, um dieselbe Verbesserung des Schallschutzes zu erreichen.

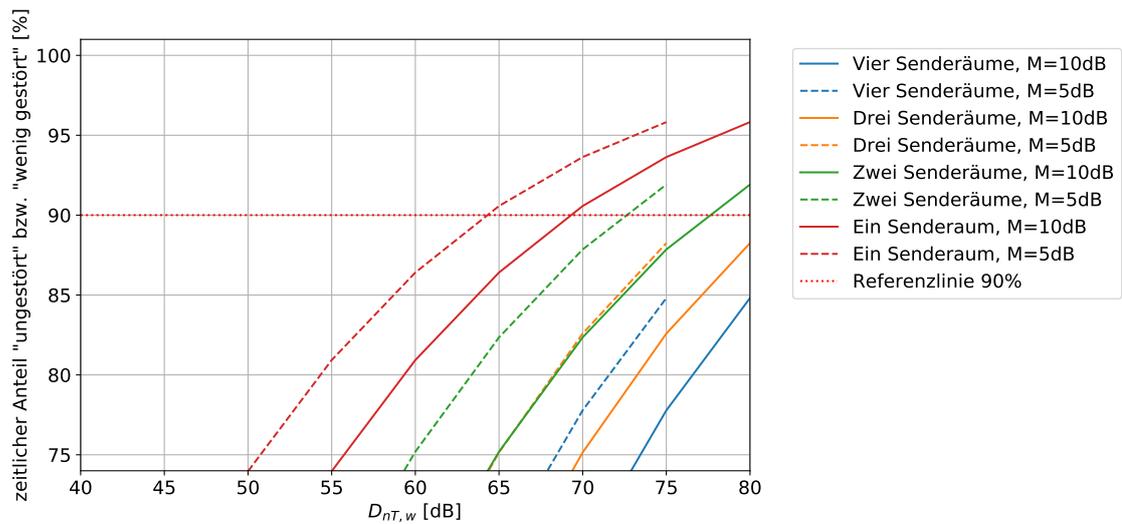


Abbildung 15 – Detailabbildung; Institut 4

4.1.5 Institut 15 - Alte Musik

Der letzte untersuchte Fachbereich stellt das Institut 15 (Alte Musik) dar. Wie bei Institut 2 im Abschnitt 4.1.2 konnte auch hier nur eine Unterrichtssituation vermessen werden; bei dem vermessenen Instrument handelt es sich um eine Blockflöte. Die Berechnung des zeitlichen Anteils für mehrere Senderäume entspricht gleichermaßen Gl. 36, das arithmetische Mittel ist damit ebenfalls $p_{MW} = p_{ges}$, die Standardabweichung $\sigma = 0$ wie in Abb. 16 ersichtlich.

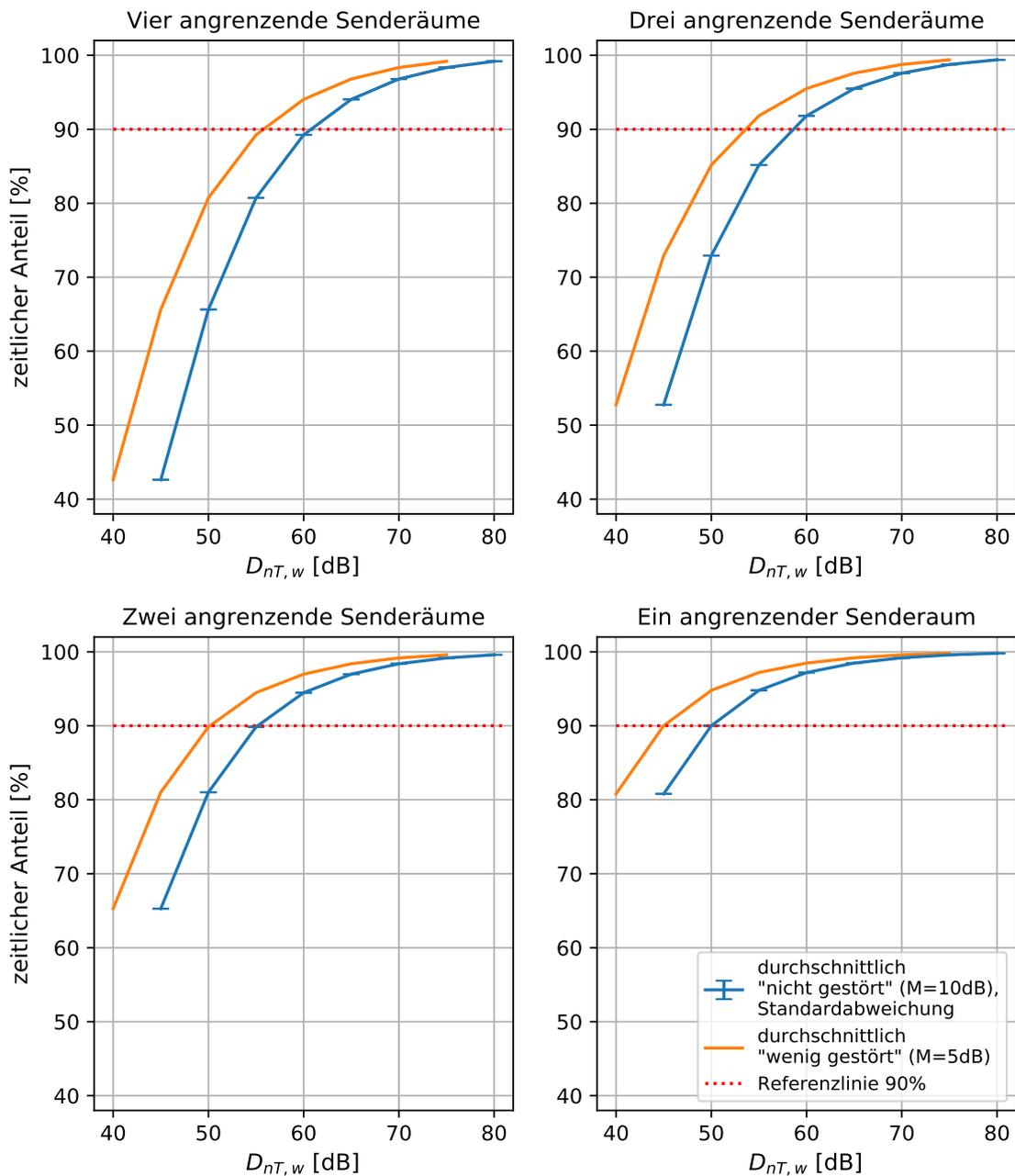


Abbildung 16 – Ergebnisse der Berechnungen, Institut 15 - Alte Musik

Für vier angrenzende Senderäume wird die 90%-Referenzlinie bei $D_{nT,w} \approx 61\text{dB}$ in Abb. 17 geschnitten, oberhalb von $D_{nT,w} = 65$ nähert sich der zeitliche Anteil „nicht gestört“ und „wenig gestört“ für alle möglichen Senderaumkonfigurationen stark den 100% an. Einerseits durch die erwähnte, niedrige Dynamik aufgrund eines einzigen vermessenen Instrumentes, andererseits durch die ohnehin moderate Lautstärke der Blockflöte, weisen die Ergebnisse des Instituts 15 die niedrigste Anforderung an den Schallschutz auf.

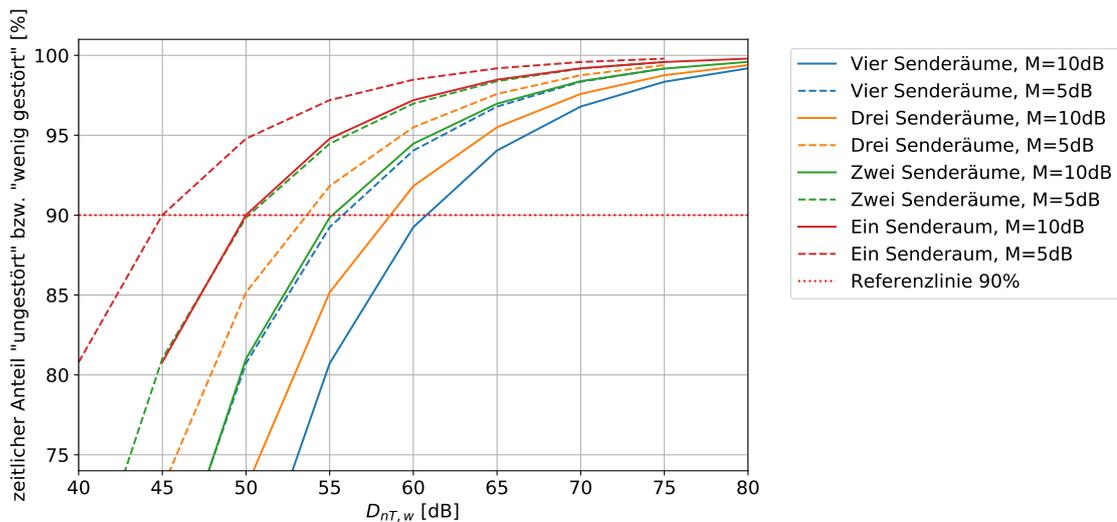


Abbildung 17 – Detailabbildung; Institut 15

4.2 Ergebnisse nach Anzahl der angrenzenden Senderäume

4.2.1 Vier angrenzende Senderäume

Der Vergleich der verschiedenen Institute je Senderaumanzahl zeigt in Abb. 18, was im vorigen Abschnitt 4.1 bereits abzusehen war: Unterrichtsszenarien des Instituts 4 (Blasinstrumente) stellen die höchsten Anforderungen an den Schallschutz. Dies liegt einerseits an den hohen, absolut erreichten Pegeln über das gesamte Spektrum (vgl. Abb. 2, S. 9, andererseits an der hohen Dynamik innerhalb des Instituts. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass das Institut 4 dasjenige Institut ist, an dem die meisten Messungen vorgenommen wurden und deren Daten entsprechend gewichtig in das Ergebnis in den fachbereichspezifischen Fall einfließen.

Für vier angrenzende Senderäume, dargestellt in Abb. 18, zeigt sich, dass die Kurven für alle Institute weit auseinander liegen und die die 90%-Linie - wenn überhaupt - in einem Bereich von $D_{nT,w} = 55dB$ bis weit über $D_{nT,w} > 80dB$ schneiden. Die Vorgabe eines Wertes für alle Institute scheint damit - sofern überhaupt umsetzbar - kaum sinnvoll. Besonders der steile Abfall der Kurven bei niedrigeren Werten für $D_{nT,w}$ macht es schwer, eine Kompromisslösung zu finden.

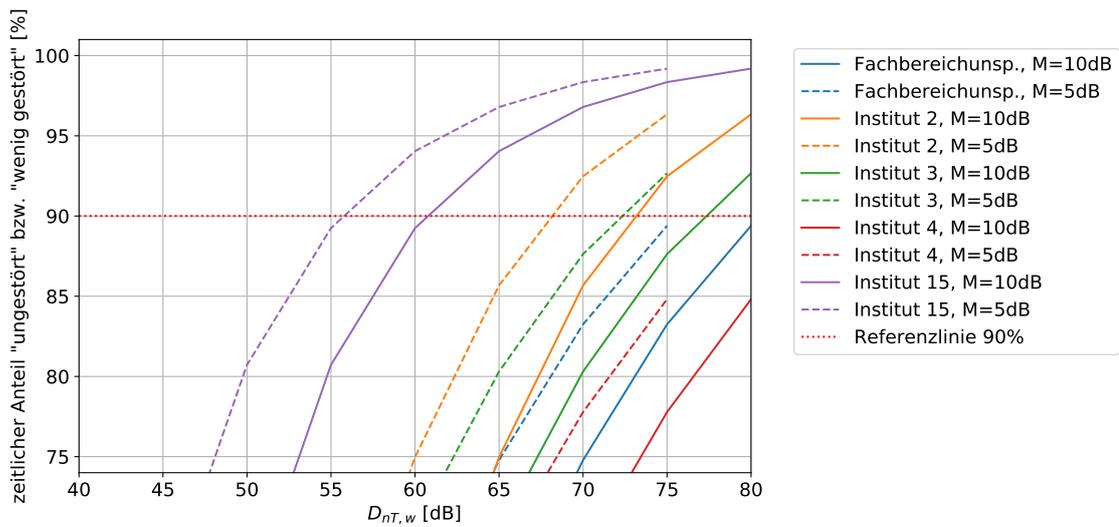


Abbildung 18 – Detailabbildung; vier angrenzende Senderäume

4.2.2 Drei angrenzende Senderäume

Wie in Abschnitt 4.1 ist auch in Abb. 19 gegenüber Abb. 18 eine Verschiebung der Kurvenschar hin zu niedrigeren Werten bei Reduktion der Anzahl der angrenzenden Senderäume ersichtlich.

Für vier angrenzende Senderäume wird die 90%-Linie im Falle des Instituts 4 (rote Kurve, Abb. 18) im betrachteten Wertebereich immer noch nicht geschnitten.

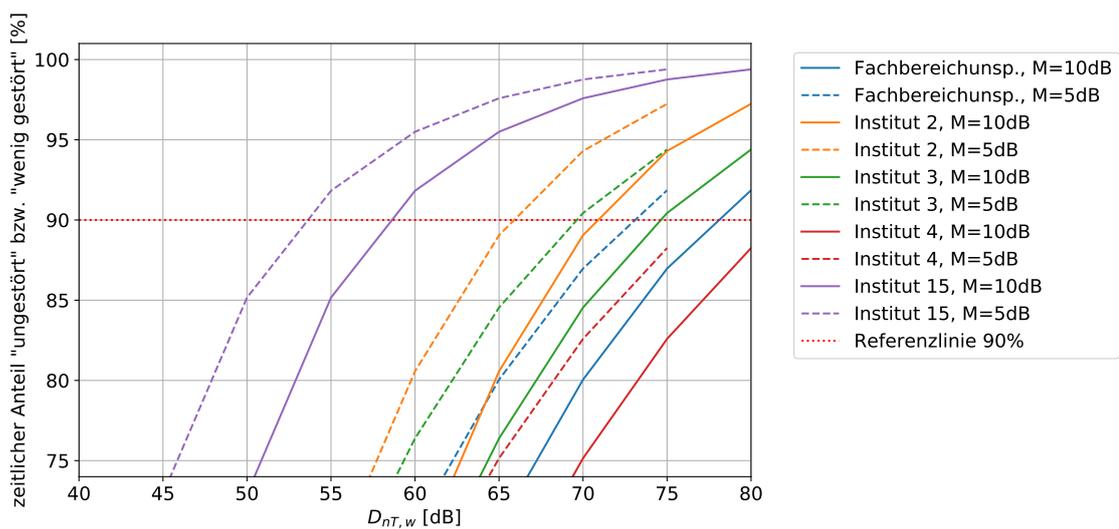


Abbildung 19 – Detailabbildung; drei angrenzende Senderäume

4.2.3 Zwei angrenzende Senderäume

Mit sinkender Anzahl angrenzender Senderäume sinkt erwartungsgemäß die Anforderung an den Schallschutz für konstante Schutzwirkung. Dadurch, dass die Mittelung nun über immer weniger mögliche Besetzungszustände erfolgt, ändert sich die Steigung der Kurven der verschiedenen Fachbereiche.

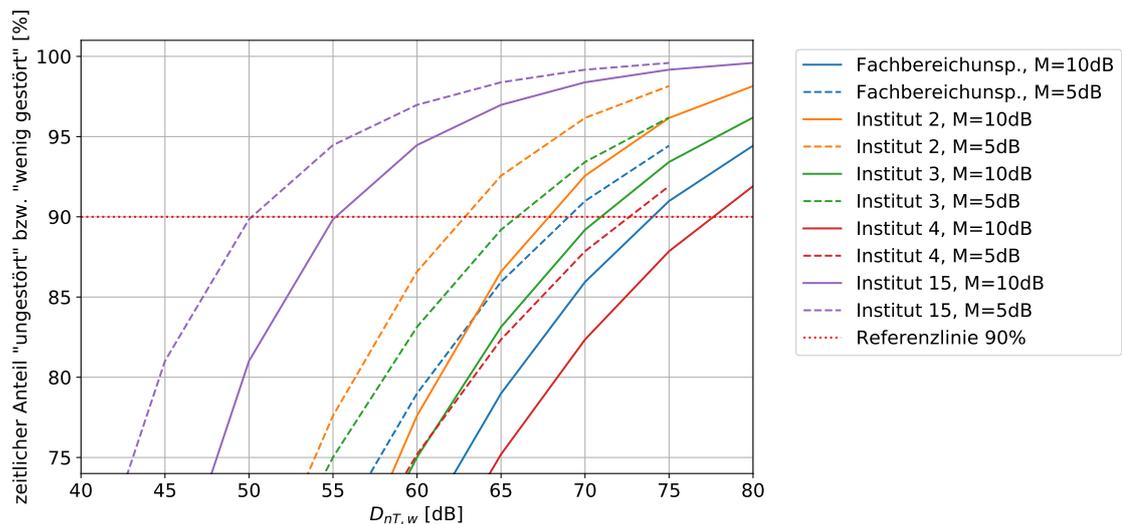


Abbildung 20 – Detailabbildung; zwei angrenzende Senderäume

4.2.4 Ein angrenzender Senderaum

Bei nur noch einem angrenzenden Senderaum nähert sich die Kurve für den fachbereichspezifischen Fall der des Instituts 4 - Blasinstrumente (blaue bzw. rote Kurve in Abb. 21) an. Dies entspricht der Erwartung, da die Messungen am Institut 4 die Hälfte aller durchgeführter Messungen ausmachen (vgl. Abschnitt 2.1, S. 8) und sich so, bei sinkender Anzahl an Kombinationen, immer stärker niederschlagen.

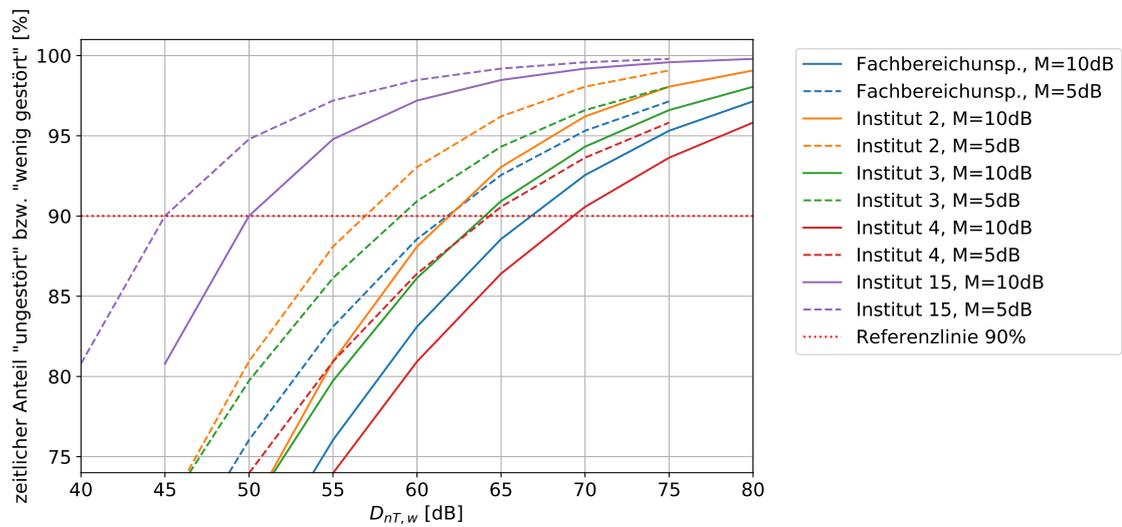


Abbildung 21 – Detailabbildung; ein angrenzender Senderaum

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt kann festgehalten werden, dass, je höher die Dynamik innerhalb eines untersuchten Fachbereichs ist, desto steiler zeigt sich die Ergebniskurve $D_{nT,w}$ vs. *zeitlicher Anteil*. Der absolute Schalldruckpegel eines untersuchten Instrumentes (oder eines Fachbereichs) spielt innerhalb der statistischen Erhebung eine eher untergeordnete Rolle.

Die Zunahme des geforderten Schallschutzes verhält sich mit $+6dB$ für einen konstante Schallschutzwirkung je Verdoppelung der Senderäume (=Quellen) wie erwartet, zumindest solange der Sättigungsbereich noch nicht erreicht ist und die Ergebniskurven einen annähernd linearen Verlauf aufweisen.

5 Klassifizierung

Auf Grundlage der in [ÖNORM B 8115-5 2012, Anhang A] angeführten Tabelle (Abb. 22) soll nun unter Verwendung der berechneten Ergebnisse, eine Klassifizierung speziell für den Fall einer Musikuniversität vorgenommen werden. Die Klassen sind dabei, angelehnt an [ÖNORM B 8115-5 2012, Anhang A] mit A+++, A++ sowie A+ (bzw. A3+, A2+, A+) bezeichnet.

Schallpegel und Hörbarkeit im Empfangsraum, abhängig vom Schallpegel im Senderaum und der Schallschutzklasse						
Schallschutzklasse		Klasse A hoher Komfort	Klasse B Komfort	Klasse C ^a „Standard Reihenhaus“	Klasse C ^b Standard	Klasse D ^b gering
Anforderung		$D_{nT,w} + C_{50,3150}$ 60 dB	$D_{nT,w} + C_{50,3150}$ 55 dB	$D_{nT,w}$ 60 dB	$D_{nT,w}$ 55 dB	$D_{nT,w}$ 50 dB
Schallquelle	Schallpegel im Senderaum $L_{A,eq}/L_{A,1}$	Hörbarkeit zu erwartende Schallpegel im Empfangsraum $L_{A,eq}/L_{A,1}$				
		dB				
Unterhaltung normal	73/82	fast unhörbar 13/22	Spitzen hörbar 18/27	kaum hörbar 15/24	Spitzen hörbar 20/29	hörbar 25/34
Unterhaltung laut	78/87	Spitzen hörbar 18/27	hörbar 23/32	Spitzen hörbar 20/29	hörbar 28/37	deutlich hörbar 30/39
Musik – Einzelinstrument ^a	78/86	Spitzen hörbar 18/26	hörbar 23/31	Spitzen hörbar 20/28	hörbar 25/33	deutlich hörbar 30/38
Streichquartett, Kammermusik	91/98	deutlich hörbar 31/38	deutlich hörbar 36/43	deutlich hörbar 36/43	sehr deutlich hörbar 41/48	besonders deutlich hörbar 46/53
Musik- oder Heimkinoanlage („Partybetrieb“)	93/100	deutlich hörbar 33/40	sehr deutlich hörbar 38/45	sehr deutlich hörbar 38/45	besonders deutlich hörbar 43/50	überaus deutlich hörbar 48/55

^a jedoch keine Instrumente wie Klavier, Cello, Perkussionsinstrumente (Instrumente mit ausgeprägtem Körperschalleintrag)

^b Bewertung auf Basis massiver Baukonstruktionen; im Leichtbau ist abhängig vom Spektrum der Schallquelle und der Schalldämmung gegebenenfalls eine davon abweichende Beurteilung zu erwarten.

Abbildung 22 – Klassifizierung nach [ÖNORM B 8115-5 2012], Anhang A

5.1 Herangezogenes statistisches Gütemaß

Die in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse zeigen immer das arithmetische Mittel über die verschiedenen, möglichen Besetzungszustände der Sende- und Empfangsräume. Wie Abb. 23 zeigt, liegt der Mittelwert jedoch nur knapp unter dem Median, was bedeutet, dass die Ergebnisse des Mittelwertes nur für gut die Hälfte der möglichen, einzelnen Besetzungszustände zutreffen.

Um eine höhere Sicherheit zu gewährleisten, wird für die Klassifizierung statt dem arithmetischen Mittelwert das $Q_{0,90}$ -Quantil herangezogen. Die Verwendung dieses Quantils gewährleistet, dass die ermittelten Berechnungsergebnisse auf 90% der möglichen Besetzungszustände der Sende- und Empfangsräume zutreffen.

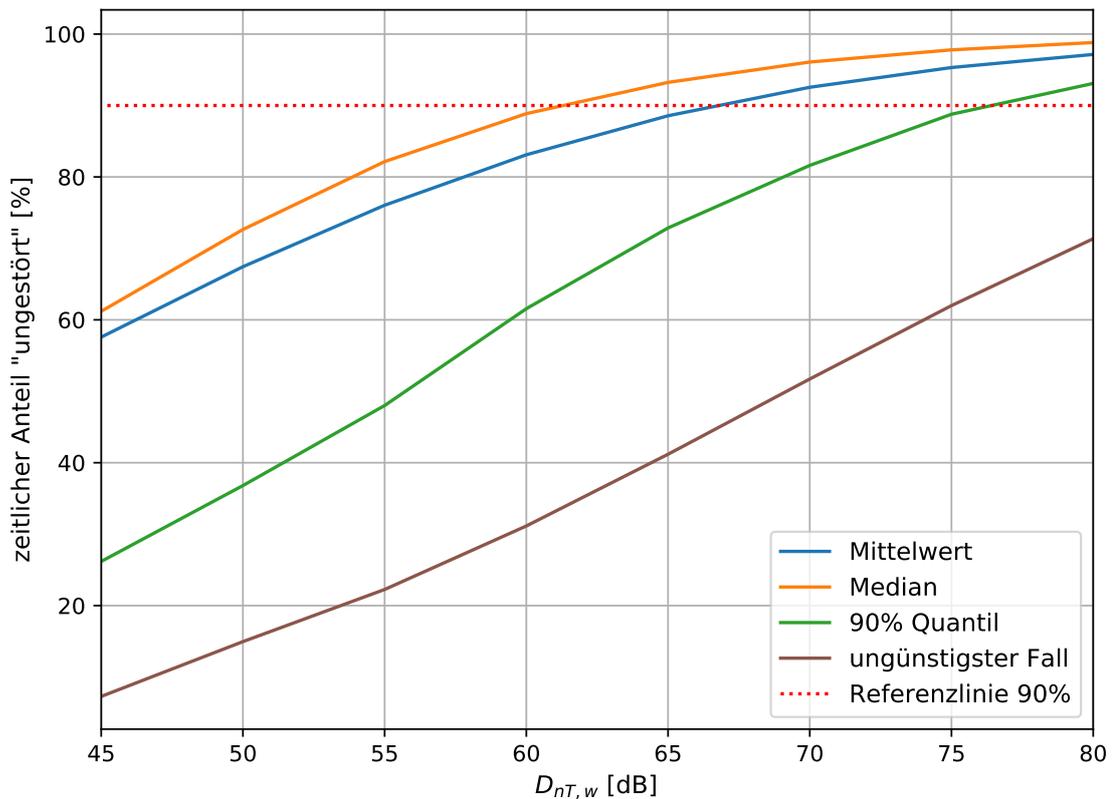


Abbildung 23 – Fachbereichspezifisch, ein angrenzender Senderaum

5.2 Wahl des Maskierabstandes

Der Zusammenhang zwischen einem, im Senderaum erzeugten Schallpegel und dessen Hörbarkeit im Empfängerraum in Abhängigkeit von $D_{nT,w}$ zeigt [ÖNORM B 8115-5 2012, Tabelle A.1] in Abb. 22. Dabei wird für unterschiedliche Schallquellen bei unterschiedlichen bewerteten (und ggf. korrigierten) Standard-Schallpegeldifferenzen der zu erwartende Pegel im Empfangsraum in acht verschiedenen Hörbarkeitsstufen angegeben:

- fast unhörbar
- kaum hörbar
- Spitzen hörbar
- hörbar
- deutlich hörbar
- sehr deutlich hörbar
- besonders deutlich hörbar
- überaus deutlich hörbar

Die Abstufung findet in $5dB$ -Schritten statt.

Die nach Norm am ehesten auf eine Musikuniversität zutreffende Kategorie scheint die Kategorie „Kammermusik, Streichensembles“ (auch für Einzelinstrumente) zu sein. Dies

begründet sich zum einen dadurch, dass in einer Musikuniversität auf professionellem Niveau gespielt wird, wobei grundsätzlich höhere Pegel als auf Amateurniveau in einer Wohnung zu erwarten sind. Zum anderen sind von der Kategorie „Einzelinstrument“ in [ÖNORM B 8115-5 2012, Tabelle A.1] bzw. Abb. 22 „(...) Instrumente wie Klavier, Cello, Perkussionsinstrumente (Instrumente mit ausgeprägtem Körperschalleintrag“ [ÖNORM B 8115-5 2012, Tabelle A.1 Fußnote a] explizit ausgenommen, die einen großen Anteil, der auf einer Musikuniversität unterrichteten Instrumente ausmachen.

Selbst in der höchsten Kategorie „Klasse A - hoher Komfort“ ist diese Art der Schallquelle laut Norm im Empfängerraum noch *deutlich hörbar*. Die vorgenommene Definition der Klassen A3+, A2+, A+ soll die Hörbarkeit nun auf *fast unhörbar*, *kaum hörbar* bzw. *Spitzen hörbar* minimieren. Dazu wird der Maskierabstand M entsprechend angepasst. Die in Abschnitt 3.2.4 vorgenommenen Definition der „geringen Störung“ wird dabei um eine weitere Kategorie mit $M = 0\text{dB}$ erweitert:

- Klasse A+++ : $M = 10\text{dB}$
- Klasse A++ : $M = 5\text{dB}$
- Klasse A+ : $M = 0\text{dB}$

Diese Einteilung entspricht der Verschiebung der $Q_{0,90}$ -Kurve in Abb. 23 um 0dB, 5dB, 10dB nach links.

5.3 Wahl des zeitlichen Anteils

Der zeitliche Anteil „nicht gestört“ bzw. „wenig gestört“ nähert sich in Abschnitt 4 asymptotisch der 100%-Marke (sicheres Ereignis) an, per Definition kann dieser Wert jedoch nie erreicht werden. Um dennoch einen ausreichenden Schallschutz zu gewährleisten wird der Zielwert auf 90% festgelegt.

Der sich so ergebende Schnittpunkt der $Q_{0,90}(M = 10\text{dB})$ -Kurve mit der 90%-Referenzlinie bestimmt den Mindestwert für den $D_{nT,w}$ der höchsten Klasse A3+. Dies bedeutet, dass in 90% der Fälle für 90% der Zeit der Schall aus einem angrenzenden Senderaum im Empfangsraum höchstens *kaum hörbar* ist. Die $D_{nT,w}$ -Werte der mittleren (A2+) bzw. niedrigsten (A+) ergänzten Klasse liegen entsprechend 5 bzw. 10 dB darunter.

Die Abbildung 24 zeigt die Schnittpunkte der beiden Kurven und den geforderten $D_{nT,w}$ -Wert für alle drei Klassen im fachbereichspezifischen Fall bei einem angrenzenden Senderaum. Die Abbildungen 28, 25, 26 und 27 zeigen die Schnittpunkte der beiden Kurven und den geforderten $D_{nT,w}$ -Wert für alle drei Klassen in den institutsspezifischen Fällen bei einem angrenzenden Senderaum.

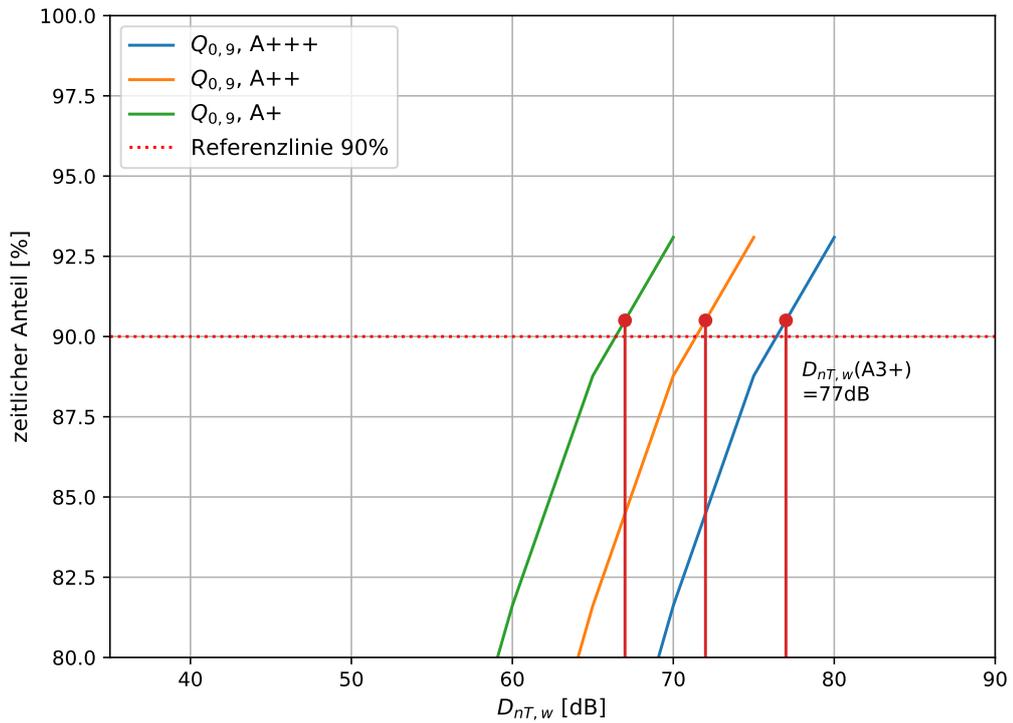


Abbildung 24 – Klassifizierung Fachbereichspezifisch, ein angrenzender Senderaum

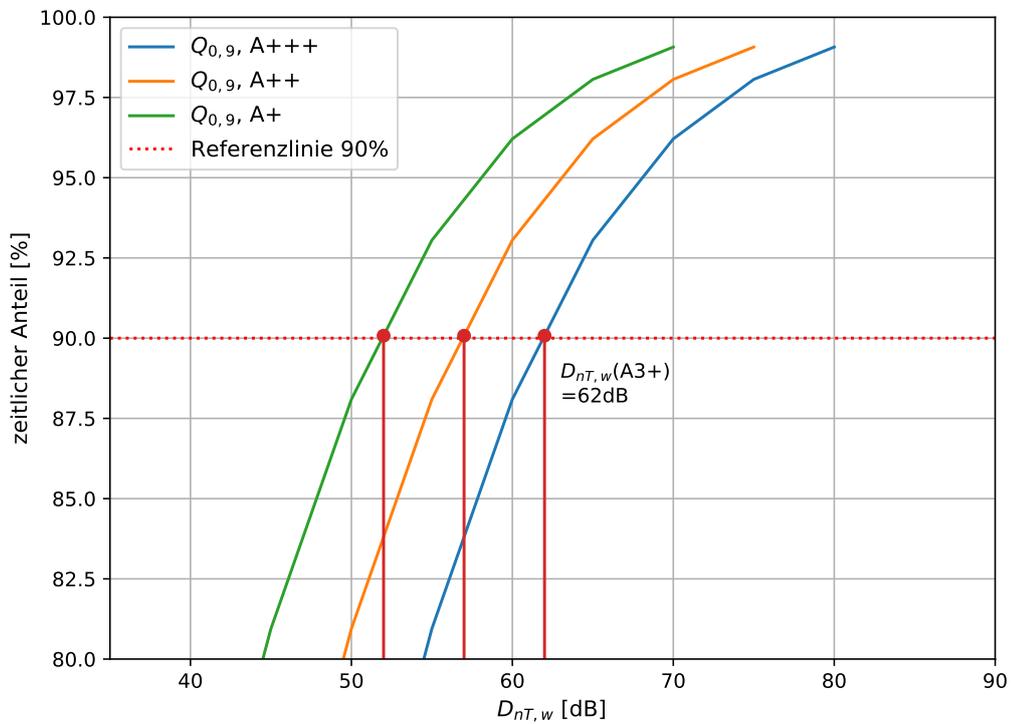


Abbildung 25 – Klassifizierung Institut 2 (Klavier), ein angrenzender Senderaum

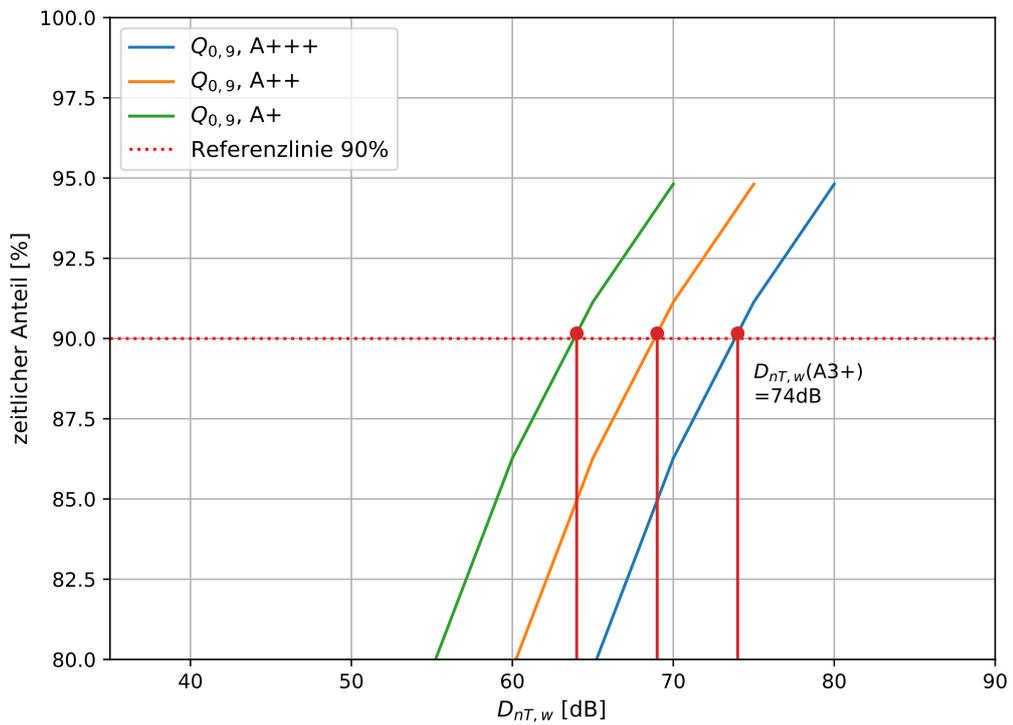


Abbildung 26 – Klassifizierung Institut 3 (Streichinstrumente), ein angrenzender Senderaum

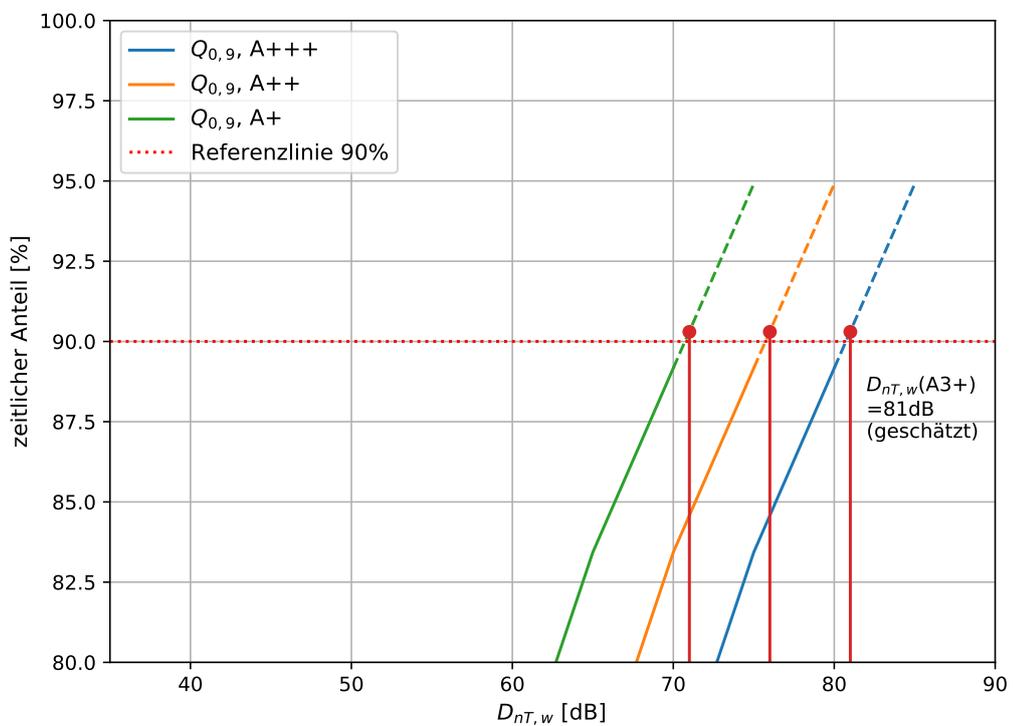


Abbildung 27 – Klassifizierung Institut 4 (Blasinstrumente), ein angrenzender Senderaum

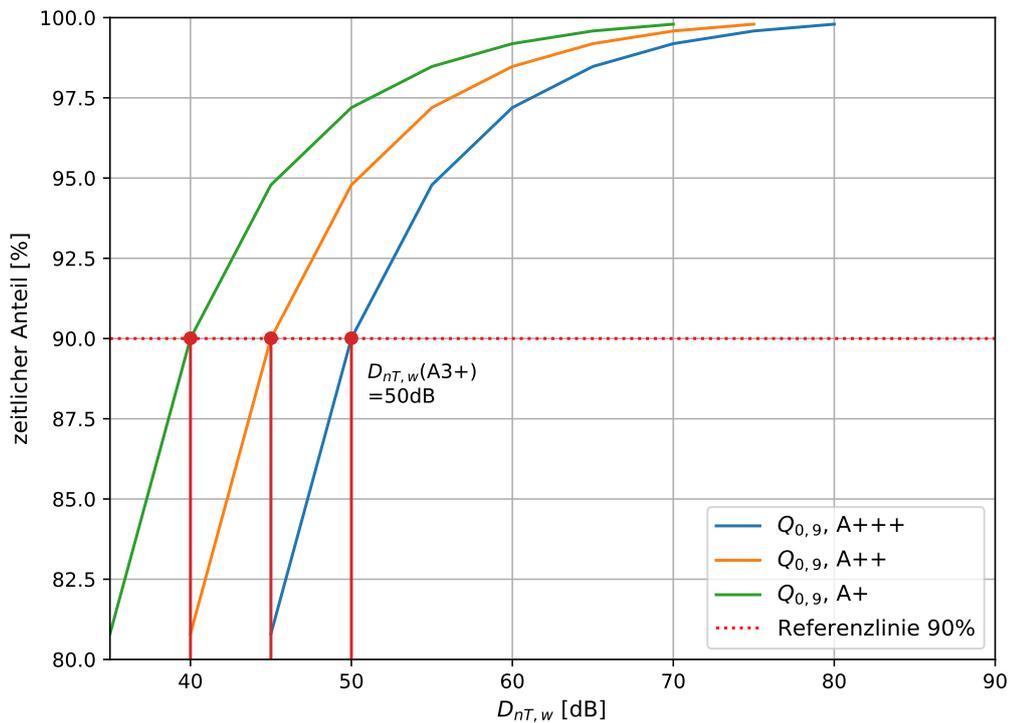


Abbildung 28 – Klassifizierung Institut 15 (Alte Musik), ein angrenzender Senderaum

Die Ergebnisse nach Anzahl der angrenzenden Senderäume aus 4.2 ergaben bei einer Verdoppelung der Senderäume eine Erhöhung des notwendigen $D_{nT,w}$ s um 6dB. Derselbe Zusammenhang gilt bei der Klassifizierung der Unterrichtsräume. Die Tabelle 2 beinhaltet alle $D_{nT,w}$ -Mindestwerte der einzelnen Klassen, für die unterschiedlichen Institute bei *einem* angrenzenden Senderaum. Bei Verdopplung der angrenzenden Senderäume muss für den Erhalt der Schallschutzklasse der geforderte Wert des $D_{nT,w}$ um 6dB erhöht werden, andernfalls fällt die Schallschutzklasse auf die nächstniedrigere zurück.

Tabelle 2 zeigt einen Klassifizierungsvorschlag, als allgemeine Empfehlung auf Grundlage der berechneten Ergebnisse dient der fachbereichenspezifische Fall. Die Anforderungen für spezielle Fachbereiche sind als Vergleichswerte mit angeführt.

	Klasse A+++ <i>fast unhörbar</i>	Klasse A++ <i>Spitzen hörbar</i>	Klasse A+ <i>hörbar</i>
Fachbereich	geforderter $D_{nT,w}$ [dB]		
unspezifisch	≥ 77	≥ 72	≥ 67
<i>Vergleichswerte:</i>			
Klavier (Inst.2)	≥ 62	≥ 57	≥ 52
Streichinstrumente (Inst.3)	≥ 74	≥ 69	≥ 64
Blasinstrumente (Inst.4)	≥ 81	≥ 76	≥ 71
Alte Musik (Inst.15)	≥ 50	≥ 45	≥ 40

Tabelle 2 – Klassifizierungsvorschlag für Musikuniversitäten, zwei benachbarte Räume (ein Senderraum)

6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Berechnungen legen nahe, dass die Verwendung der für den Wohnbau konzipierten Schallschutzspezifikation D_{nT} bzw. $D_{nT,w}$ im Musikbereich wenig sinnvoll erscheint. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Instrumente deutlich höhere Schallpegel produzieren, als es für Wohnsituationen üblich ist, und das sowohl im Sende- als auch im Empfangsraum. Um ein halbwegs zufriedenstellendes Ergebnis zu erreichen, müsste eine bauakustische Spezifikation erfüllt werden, die - mindestens wirtschaftlich - kaum umsetzbar erscheint.

Jedoch sei angemerkt, dass - selbst bei Umsetzung einer A+++-Bewertung keine Garantie für den Schallschutz gegeben werden kann, da es sich bei den in dieser Arbeit vorgenommenen Betrachtungen um statistische handelt, etwaige „Ausreißer“ sind möglich.

6.1 Mögliche Lösungsansätze

Mit den gewonnenen Daten lassen sich dennoch mögliche Lösungswege aufzeigen. Die Ergebnisse fallen nämlich immer dann besonders schlecht aus, wenn die erwartete Differenz der Pegel im Sende- bzw. Empfangsraum besonders hoch ist. Eine Einteilung und räumliche Zusammenfassung von Instrumenten mit ähnlichem erzeugtem Schallpegel und -spektrum sowie eine Isolierung besonders lauter Instrumente mit keinen oder möglichst wenig angrenzenden Unterrichtsräumen scheint sinnvoll. Hierzu sei jedoch angemerkt, dass dies auf der Universität Musik und darstellende Kunst Graz, an der die Untersuchungen durchgeführt wurden, bereits passiert. So befindet sich beispielsweise der Unterrichtsraum für die besonders laute Basstuba in einem Kellerraum des Gebäudes.

Darüber hinaus wäre es beispielsweise möglich, durch die Zuweisung einer Art individueller Lautstärkesignatur je Instrument den jeweiligen Unterrichtsraum dynamisch, unter

Nutzung vorhandener IT-Infrastruktur zur Termin- und Raumplanung zuzuweisen.

6.2 Begriffunschärfe „Störung“

In dieser Arbeit wurde der Begriff der „Störung“ gleichgesetzt mit der „Hörbarkeit“. Diese Definition ist möglicherweise zu streng gefasst, da ein Schallereignis, nur weil es hörbar ist, nicht zwangsläufig auch als störend empfunden wird. Jedoch scheint es vor dem Hintergrund der sehr hohen intersubjektiven Unterschiede - besonders im Musikbereich - sehr schwierig, eine Parametrisierung zu treffen.

6.3 Ausblick

Vor diesem Hintergrund könnte in weiterführender Forschung - etwa mittels eines Hörversuches oder auszufüllenden Fragebogen nach einer tatsächlichen Unterrichtssituation - der Störungsbegriff im musikalischen Kontext weiter untersucht werden.

Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei den InstitusleiterInnen Fr. Prof.in Ikeba, Fr. Prof.in Schittenhelm, Hr. Prof. Eibinger sowie Hr. Prof. Hubmann für die Kooperation und die Möglichkeit, die Messungen an ihren Instituten durchzuführen, bedanken. Unser Dank gilt darüber hinaus auch allen Professorinnen und Professoren sowie den Studierenden, deren Unterrichtsstunden wir für die Messungen begleiten durften.

Anhang

Aufbereitung der Nachhallzeit-Messungen

Im Zuge der Berechnung der geforderten Pegelreduktion $\Delta L(f_n)$ in Abschnitt 3.2, Seite 13, wird der gegebene Wert für $D_{nT}(f_n)$ um die Nachhallzeit des Empfangsraumes $T(f_n)$ korrigiert. Die Korrektur findet dabei für jede Terz statt, die Messung der Nachhallzeit konnte jedoch nur oktavweise vorgenommen werden (siehe Abschnitt 2.4, Seite 10). Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Anregung des Raumes durch einfaches Händeklatschen der Signal-Rauschabstand speziell in tiefen Frequenzen, unterhalb von 250Hz (respektive sogar unterhalb 500Hz), zu niedrig für eine aussagekräftige Messung ist.

Um dennoch eine Korrektur je Terz für den gesamten betrachteten Frequenzbereich von 50Hz bis 5000Hz vornehmen zu können, wurden die gemessenen Werte der Nachhallzeit von den Oktavbändern von 250Hz bzw. 500Hz bis 8kHz auf die Terzbänder linear interpoliert. Für die fehlenden Werte der tieferen Frequenzen wurde die letzte gültige Messung der tiefsten Frequenz konstant extrapoliert, wie in Abb. 29 zu sehen ist.

Da sich die Nachhallzeiten in allen vermessenen Unterrichtsräumen recht ähnlich verhalten und ohnehin nahe der Standard-Nachhallzeit von $T_0 = 0,5\text{s}$ liegen, ist diese grobe Annäherung ausreichend.

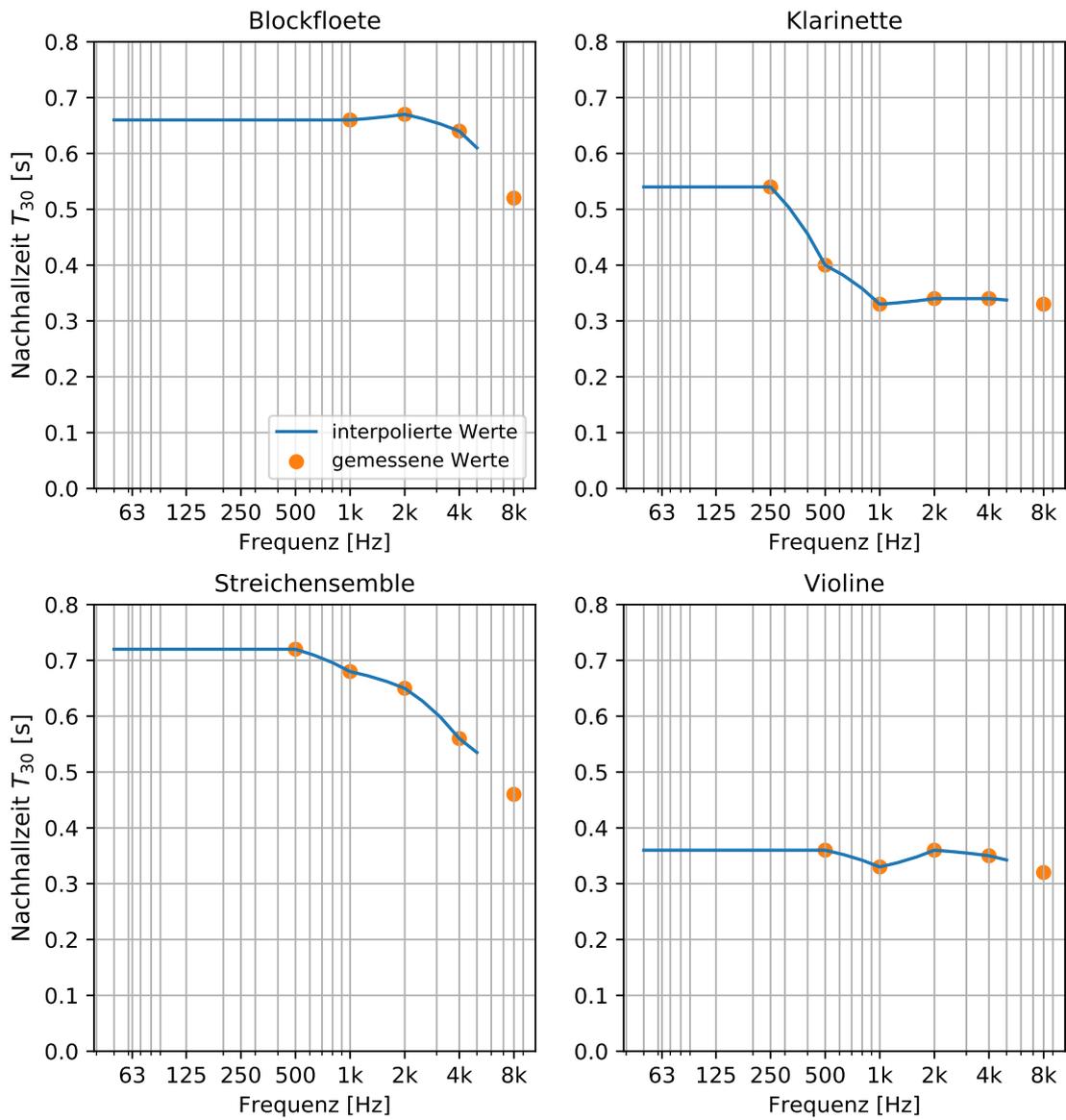


Abbildung 29 – Extrapolation der Nachhallzeit für verschiedene Räume

Literatur

- [ÖNORM EN ISO 16283-1 2018] ÖNORM EN ISO 16283-1:2018 04 01 (Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau, Teil 1: Luftschalldämmung)
- [ÖNORM B 8115-1 2011] ÖNORM B 8115-1:2011 06 01 (Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 1: Begriffe und Einheiten)
- [ÖNORM B 8115-5 2012] ÖNORM B 8115-1:2012 04 01 (Schallschutz und Raumakustik im Hochbau, Teil 5: Klassifizierung)
- [ÖNORM EN ISO 717-1 2013] ÖNORM EN ISO 717-1:2013 06 15 (Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 1: Luftschalldämmung)
- [ÖNORM EN ISO 12354-1 2017] ÖNORM EN ISO 12354-1:2017 (Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen)
- [OIB 2019] OIB-330.5-002/19 Richtlinie 5 Schallschutz.
- [Fastl, Zwicker 2009] Fastl, H. und Zwicker, E. (2007) *Psychoacoustics, Facts and Models*(3. Ausgabe). Berlin: Springer-Verlag.
- [Kürti 1971] Kürti, I. (1971) *Übereinstimmung der Lebensdauer der Konstruktionen und der funktionellen Zeitgemäßheit von Wohnhäusern*, Budapest: Periodica Polytechnica Architecture.
- [Park, Bradley 2009] Park, H.K. und Bradley, J.S. (2009) *Evaluating standard airborne sound insulation measures in terms of annoyance, loudness, and audibility ratings*, The Journal of the Acoustical Society of America 126, 208.
- [Hongisto et al. 2014] Hongisto, V., Oliva, D. und Keränen, J. (2014) *Subjective and Objective Rating of Airborne Sound Insulation – Living Sounds*, Acta Acustica United with Acustica 100, 848-863.

Geräteverzeichnis

Art	Hersteller	Modell	Anmerkung
Pegelmessgerät	NTi Audio	XL2	zur Verfügung gestellt vom IEM
Messmikrofon, Kl. 2	NTi Audio	M4261	zur Verfügung gestellt vom IEM
Mikrofonkabel	NTi Audio	ASD Cable, 5m	zur Verfügung gestellt vom IEM
Distanzmesser	Bosch	<i>unbekannt</i>	zur Verfügung gestellt vom IEM
Mikrofonstativ	König&Meyer	210/2	

Tabelle 3 – Geräteverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1	Klassifizierung des Luftschallschutzes im Gebäudeinneren aus [ÖNORM B 8115-5 2012, Anhang A]	7
2	Gemittelte Spektren je Fachbereich	9
3	Messaufbau für Streichensembel-Unterricht, Raum 03.06, Neubau	10
4	Beispielhafte Histogramme verschiedener Instrumente in verschiedenen Terzbändern (Auswahl)	13
5	Korrelationsmatrix über alle Messpunkte	18
6	Pegelverteilungen (blau, orange), Differenzverteilung (grün), Mittelwert (rot) sowie Standardabweichung (magenta) der angenommenen Normalverteilung	20
7	Bewertungskurve aus [ÖNORM EN ISO 717-1 2013]	23
8	Ergebnisse der Berechnungen, Fachbereichsspezifisch	27
9	Detailabbildung; fachbereichsspezifisch	28
10	Ergebnisse der Berechnungen, Institut 2 - Klavier	29
11	Detailabbildung; Institut 2	30
12	Ergebnisse der Berechnungen, Institut 3 - Saiteninstrumente	31
13	Detailabbildung; Institut 3	32
14	Ergebnisse der Berechnungen, Institut 4 - Blasinstrumente	33
15	Detailabbildung; Institut 4	34
16	Ergebnisse der Berechnungen, Institut 15 - Alte Musik	35
17	Detailabbildung; Institut 15	36
18	Detailabbildung; vier angrenzende Senderäume	37
19	Detailabbildung; drei angrenzende Senderäume	37
20	Detailabbildung; zwei angrenzende Senderäume	38
21	Detailabbildung; ein angrenzender Senderaum	39
22	Klassifizierung nach [ÖNORM B 8115-5 2012], Anhang A	40
23	Fachbereichsspezifisch, ein angrenzender Senderaum	41
24	Klassifizierung Fachbereichsspezifisch, ein angrenzender Senderaum	43
25	Klassifizierung Institut 2 (Klavier), ein angrenzender Senderaum	43
26	Klassifizierung Institut 3 (Streichinstrumente), ein angrenzender Senderaum	44
27	Klassifizierung Institut 4 (Blasinstrumente), ein angrenzender Senderaum	44
28	Klassifizierung Institut 15 (Alte Musik), ein angrenzender Senderaum	45
29	Extrapolation der Nachhallzeit für verschiedene Räume	50

Tabellenverzeichnis

1	Gewählte Werte für $D_{nT,w}$ bzw. $D_{nT}(f_n)$	23
2	Klassifizierungsvorschlag für Musikuniversitäten, zwei benachbarte Räume (ein Senderaum)	46
3	Geräteverzeichnis	52