

# MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Allgemeine Grundlagen der Raumakustik und Hörsamkeit und im speziellen in Museen für Musikinstrumente

verfasst von | submitted by

Gabriel Feller BA

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Arts (MA)

Wien | Vienna, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt |  
Degree programme code as it appears on the  
student record sheet:

UA 066 836

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree programme as it appears on the student record sheet:

Masterstudium Musikwissenschaft

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Dr. Christoph Reuter M.A.



## Danksagung

Für die Unterstützung während der Masterarbeit und des Studiums bedanke ich mich insbesondere bei Prof. Christoph Reuter für die Beratung und Betreuung. Ich bedanke mich bei Caroline Haas und dem Technischen Museum Wien, bei Silke Berdux und dem Deutschen Museum, München, bei Olga Sutkowska und dem Musikinstrumenten-Museum des Staatlichen Instituts für Musikforschung, Berlin, und bei Sebastian Kirsch und der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, für den Zugang in die Museen und die Möglichkeit bei ihnen zu Messen. Ich bedanke mich bei Henning Burghoff für seine Hilfe bei den Messungen, bei Sarah Ambros für die Unterstützung und Motivation, bei meinen Freund\*innen, meiner Familie und meinen Eltern für die Unterstützung und besonders meiner Mutter für unzählige Stunden Korrekturlesen für diese und alle anderen Arbeiten der letzten sechs Jahre.



## Inhalt

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Abstract.....                                    | 1  |
| 1 Einleitung.....                                | 3  |
| 2 Grundlagen der Raumakustik und Hörsamkeit..... | 5  |
| 2.1 Schall und Raumakustik.....                  | 5  |
| 2.1.1 Reflexionen.....                           | 5  |
| 2.1.2 Wellentheoretische Effekte.....            | 7  |
| 2.1.3 Freies und diffuses Feld.....              | 10 |
| 2.1.4 Zeitliche Verschmelzung und Echos.....     | 10 |
| 2.1.5 Absorption.....                            | 11 |
| 2.1.6 Hallradius.....                            | 12 |
| 2.2 Raumimpulsantwort.....                       | 13 |
| 2.2.1 Primärstruktur.....                        | 14 |
| 2.2.2 Sekundärstruktur.....                      | 18 |
| 2.2.3 Messung.....                               | 20 |
| 2.2.4 Simulation.....                            | 22 |
| 2.3 Raumakustische Parameter.....                | 24 |
| 2.3.1 Stärkemaß $G$ .....                        | 24 |
| 2.3.2 Nachhallzeit.....                          | 25 |
| 2.3.3 Early Decay Time.....                      | 27 |
| 2.3.4 Bassverhältnis $BR$ .....                  | 28 |
| 2.3.5 Klarheitsmaß $C80$ .....                   | 28 |
| 2.3.6 Deutlichkeitsmaß $C50$ .....               | 29 |
| 2.3.7 Deutlichkeitsgrad $D50$ .....              | 31 |
| 2.3.8 Silbenverständlichkeit $V$ .....           | 31 |
| 2.3.9 Speech Transmission Index.....             | 32 |
| 2.3.10 Articulation Loss of Consonants.....      | 33 |

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 2.4   | Raumakustische Anforderungen für Hörsamkeit..... | 35 |
| 2.4.1 | Hörsamkeit nach Normen .....                     | 35 |
| 2.4.2 | Hörsamkeit großer Räume .....                    | 39 |
| 2.5   | Zusammenfassung: Kapitel 2 .....                 | 41 |
| 3     | Raumakustische Bedingungen in Museen .....       | 42 |
| 3.1   | Hörsamkeit in Museen.....                        | 43 |
| 3.2   | Soundscape und Klang in Museen .....             | 46 |
| 3.3   | Fallstudien.....                                 | 49 |
| 3.4   | Zusammenfassung: Kapitel 3 .....                 | 53 |
| 4     | Raumakustische Messungen .....                   | 54 |
| 4.1   | Technisches Museum Wien .....                    | 54 |
| 4.1.1 | Hintergrund .....                                | 54 |
| 4.1.2 | Beschreibung des Museumsraums .....              | 55 |
| 4.1.3 | Messsituation .....                              | 58 |
| 4.1.4 | Verwendete Messgeräte.....                       | 59 |
| 4.1.5 | Messpfade im Raum.....                           | 59 |
| 4.1.6 | Messung.....                                     | 60 |
| 4.1.7 | Messergebnisse .....                             | 60 |
| 4.1.8 | Beurteilung der Messergebnisse .....             | 63 |
| 4.2   | Deutsches Museum, München .....                  | 64 |
| 4.2.1 | Hintergrund .....                                | 64 |
| 4.2.2 | Beschreibung des Museumsraums .....              | 65 |
| 4.2.3 | Messsituation .....                              | 70 |
| 4.2.4 | Verwendete Messgeräte.....                       | 70 |
| 4.2.5 | Messpfade im Raum.....                           | 70 |
| 4.2.6 | Messung.....                                     | 71 |
| 4.2.7 | Messergebnisse .....                             | 71 |

|       |                                                 |     |
|-------|-------------------------------------------------|-----|
| 4.2.8 | Beurteilung der Messergebnisse.....             | 76  |
| 4.3   | Berliner Musikinstrumenten-Museum.....          | 77  |
| 4.3.1 | Hintergrund.....                                | 77  |
| 4.3.2 | Beschreibung des Museumsraums.....              | 77  |
| 4.3.3 | Messsituation.....                              | 81  |
| 4.3.4 | Verwendete Messgeräte .....                     | 81  |
| 4.3.5 | Messpfade im Raum .....                         | 82  |
| 4.3.6 | Messung.....                                    | 83  |
| 4.3.7 | Messergebnisse.....                             | 83  |
| 4.3.8 | Beurteilung der Messergebnisse.....             | 86  |
| 4.4   | Sammlung alter Musikinstrumente, Wien .....     | 87  |
| 4.4.1 | Hintergrund.....                                | 87  |
| 4.4.2 | Beschreibung des Museumsraums.....              | 87  |
| 4.4.3 | Messsituation.....                              | 92  |
| 4.4.4 | Verwendete Messgeräte .....                     | 92  |
| 4.4.5 | Messpfade im Raum .....                         | 92  |
| 4.4.6 | Messung.....                                    | 94  |
| 4.4.7 | Messergebnisse.....                             | 94  |
| 4.4.8 | Unterschiede zwischen den einzelnen Sälen ..... | 100 |
| 4.4.9 | Beurteilung der Messergebnisse.....             | 101 |
| 5     | Folgerungen für die Museen .....                | 103 |
| 6     | Forschungsausblick.....                         | 105 |
| 7     | Conclusio .....                                 | 107 |
|       | Quellen .....                                   | 109 |
|       | Online-Quellen.....                             | 113 |



## Abstract

Museen stellen eine besondere Herausforderung in der raumakustischen Gestaltung dar, da für sie nur wenige Normen in diesem Bereich vorliegen und die Raumakustik und die Soundscape in den Ausstellungen teils großen Einfluss auf die Erfahrung der Museumsbesucher\*innen haben kann. Besonders Musikinstrumentenausstellungen stehen durch interaktive Exponate in einem Konflikt zwischen Geräusch und Stille. Es soll darum gemessen werden, welche raumakustischen Bedingungen momentan in verschiedenen Museen für Musikinstrumente herrschen und wie diese zu bekannten Normen und Empfehlungen stehen. Es wird zunächst ein Überblick über die einzelnen Mechanismen gegeben, die die Akustik eines Raums beeinflussen. Danach wird erklärt, wodurch besonders die Akustik in Museen geprägt wird, wie sie nützlich oder schädlich für die Ausstellung sein kann. In vier Museen wurden Raumakustik-Messungen durchgeführt und die erhaltenen Raumimpulsantworten auf Besonderheiten und gängige Parameter hin untersucht. Es zeigt sich, dass lediglich die speziell für Sprache bzw. Musik ausgestatteten Ausstellungsräume tatsächlich Empfehlungen erfüllen, wobei die deutlich längeren Nachhallzeiten in den anderen Museumsräumen auf den historischen Charakter der Gebäude zurückführbar sind und diesen auch womöglich unterstützen.



## 1 Einleitung

Mehrere Studien befassten sich bereits mit den akustischen Bedingungen in Museen oder den interaktiven Inhalten in Musikinstrumentenausstellungen. Nur wenig ist bekannt über die raumakustischen Bedingungen, die in letzteren herrschen. Die Richtlinien der DIN, ISO und VDI geben nur wenige Anhaltspunkte, wie die Raumakustik in Museen gestaltet werden sollte (DIN 18041; ISO 3382-2:2008; Nocke 2014, S. 149). Selbst diese wenigen Empfehlungen und Vorgaben geben jedoch keinen Kontext zu Musikinstrumentenausstellungen. Diese bilden einen besonderen Museums-Typ. Während in vielen Museen Stille noch als gesellschaftliche Norm gilt (Bubaris 2014, S. 392f), wurde bereits in den 1990er Jahren über das Committee for Museums and Collections of Instruments and Music (CIMCIM) Empfehlungen für die Didaktik in Musikausstellungen herausgebracht, die klangliche Erfahrungen dezidiert als Mittel für tieferes Verständnis des Ausstellungsinhalts nennen (1998). Während in anderen Museen also hauptsächlich auf das Hören von Stimmen, der inneren wie jenen von Museumsführer\*innen und Mit-Besucher\*innen, geachtet wird (Bubaris 2014, S. 396f), wird in Ausstellungen zu Musikinstrumenten also sowohl das Hören von Sprache als auch von Musik erwartet. Diese beiden Funktionen widersprechen sich jedoch häufig in ihren Richtwerten für gute Hörsamkeit (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 189). Bestehende Ausstellungen können als erste Grundlage dienen, um mögliche Lösungen zu diesem komplexen Sachverhalt zu finden. Hieraus ergibt sich die Forschungsfrage, nach der die vorliegende Masterarbeit arbeitet: Welche raumakustischen Bedingungen herrschen in aktuellen Musikinstrumentenausstellungen und wie verhalten sie sich gegenüber Raumakustik-Standards für Musik und Sprache?

Zwischen Dezember 2024 und März 2025 wurden in vier Museen mit Instrumentensammlungen in Deutschland und Österreich raumakustische Messungen durchgeführt. Die Museen gehören alle zum Deutschen oder Österreichischen Museumsbund, was eine Qualität in der museumsdidaktischen Arbeit und im Umgang mit Ausstellungs-gestaltungen garantiert, die bei privaten Sammlungen nicht vorausgesetzt werden können. Vermessen wurden die Ausstellung „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien, die Ausstellung „Musikinstrumente“ des Deutschen Museums in München, das Musikinstrumenten-Museum Berlin und die Sammlung alter Musikinstrumente

des Kunsthistorischen Museums Wien. Die Messungen wurden auf gängige raumakustische Parameter analysiert.

In der Masterarbeit wird inhaltlich darauf hingearbeitet, die durchgeführten Messungen auswerten zu können und in den Kontext von Hörsamkeit, raumakustischen Richtlinien und den klanglichen Bedingungen in Museen, speziell Musikinstrumentenmuseen zu bringen. Zunächst werden in Kapitel 2.1 grundlegende Zusammenhänge der Raumakustik erklärt, welche zu den den Messungen zugrunde liegenden Raumimpulsantworten führen (Kapitel 2.2). Aufbauend darauf werden dann verschiedene gängige Parameter der Raumakustik, Sprachverständlichkeit und Hörsamkeit in Kapitel 2.3 vorgestellt. Diese werden in Kapitel 2.4 genutzt, um die in Normen und Richtlinien vorgegebenen Angaben zur Hörsamkeit für verschiedene Raumnutzungen und die raumakustischen Bedingungen bestimmter Raum- und Gebäudetypen zu erklären. In Kapitel 3 wird schließlich konkret auf Vorgaben und Empfehlungen für Hörsamkeit in Museen eingegangen. Anhand von Fallbeispielen aus der Literatur werden hier auch auf Bedingungen für Klang und Geräuschkulisse in Museen eingegangen, die durch den erzählerischen Charakter der Museen und nicht durch raumakustische Parameter gegeben sind. Schließlich werden die Messungen nacheinander mit Messdaten und einer kurzen Beurteilung der Ausstellungs-Akustik vorgestellt. Die Beurteilung bezieht sich dabei konkret auf die raumakustische Ebene der Museen. Gegebenenfalls wird auf klangliche Eigenheiten der Museen aufmerksam gemacht, die sich mit den Grundlagen der Raumakustik erklären lassen (Kapitel 4). Die Folgen der akustischen Bedingungen für die Ausstellungen selbst und welche Möglichkeiten für die Museumsdidaktik sich damit bieten, werden in Kapitel 5 erklärt. Zuletzt wird ein kurzer Überblick über mögliche Forschungsrichtungen zur Vertiefung und Erweiterung der präsentierten Ergebnisse gegeben.

## 2 Grundlagen der Raumakustik und Hörsamkeit

### 2.1 Schall und Raumakustik

#### 2.1.1 Reflexionen

In der (geometrischen) Akustik kann Schall als Strahl angesehen werden, der in eine bestimmte Richtung verläuft. Dies liegt daran, dass sich Wellen stets über den schnellsten Weg bewegen. In einem gleichmäßigen Medium ist dieser Weg eine Gerade (Cremer 1948, S. 7; Hentschel 2008, S. 3). Trifft solch ein Schallstrahl nun auf eine Oberfläche, so wird dieser Schall reflektiert, ähnlich wie es Lichtstrahlen auf anderen Oberflächen tun. Dies hat zur Folge, dass auf Schallstrahlen die grundlegenden Gesetze der Optik angewandt werden: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel (Abb. 1) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 227; Cremer 1948, S. 9; Hentschel 2008, S. 4; Werner 2009, S. 135). Gleichzeitig wird ein Teil der eintreffenden Energie in die reflektierende Oberfläche durchgelassen und wird nicht reflektiert (Werner 2009, S. 125ff). Stehen zwei reflektierende Wände senkrecht zueinander, bedeutet dies, dass der eintreffende Schallstrahl so an der einen Wand und dann an der anderen Wand reflektiert wird, dass der Schall in die Ausgangsrichtung zurückgeworfen wird (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 229; Hentschel 2008, S. 4). Eine Reflexion nehmen Hörer\*innen so wahr, als läge die Schallquelle hinter der reflektierenden Wand, entsprechend der Richtung der Reflexionen. Es wird von einer Spiegelschallquelle gesprochen (Hentschel 2008, S. 4f; Werner 2009, S. 137).

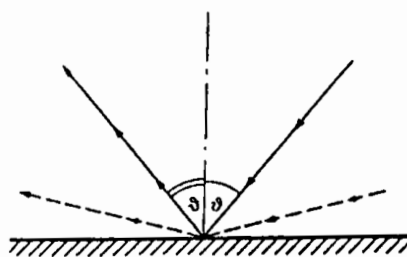


Abbildung 1: Das Reflexionsgesetz „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ am Beispiel der Schallstrahlreflexionen an einer Wand (Hentschel 2008, S. 4, Abb. 1a)

Die Anwendung dieses grundlegenden Gesetzes hat zur Auswirkung, dass sich auch die Brennpunktbildung bei konkaven Flächen (Hohlspiegelgesetze) in der Akustik widerspiegelt. Es können vier Fälle bei der Reflexion an konkaven Flächen beobachtet werden: (1) Bei der elliptischen Reflexion, wenn sich die Schallquelle näher am

Kreismittelpunkt der gekrümmten Fläche als an der Fläche selbst befindet, bildet sich ein Brennpunkt (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 231; Cremer 1948, S. 34f). Die Schallquelle und der Brennpunkt bewegen sich dabei entgegengesetzt zueinander; nähert sich die Schallquelle dem Kreismittelpunkt, nähert sich auch der Brennpunkt spiegelbildlich von der anderen Seite des Kreismittelpunkts und umgekehrt. Schallquelle und Brennpunkt befinden sich niemals auf der gleichen Seite des Kreismittelpunkts (Abb. 2c/d) (Cremer 1948, S. 35f). (2) Die Kreisreflexion ist eine Sonderform der elliptischen Reflexion, bei der die Schallquelle auf dem Kreismittelpunkt liegt, und somit jeder an der gekrümmten Fläche reflektierte Schall auf die Schallquelle zurückgeworfen wird. Der Brennpunkt dann liegt ebenso auf dem Kreismittelpunkt (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 231; Cremer 1948, S. 35). (3) Bei der parabolischen Reflexion liegt die Schallquelle exakt auf der halben Strecke zwischen gekrümmter Fläche und deren Mittelpunkt. Dies führt dazu, dass die reflektierten Schallstrahlen parallel zueinander verlaufen, ähnlich zu den Reflexionen an einem Parabolspiegel, was diesem Effekt seinen Namen gibt (Abb. 2b) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 231f; Cremer 1948, S. 36). (4) Die vierte Art der Reflexion an einer gekrümmten Fläche ist die hyperbolische. Sie entsteht, wenn die Schallquelle näher an der Fläche als am Kreismittelpunkt ist. Bei der hyperbolischen Reflexion wird der Schall gestreut; die Schallstrahlen haben also eine Divergenz (Abb. 2a). Diese Streuung im Schall findet sich auch bei der Reflexion an konvex gekrümmten Flächen. Im Gegensatz zur Reflexion an konkaven Flächen tritt die Streuung dabei nicht innerhalb eines bestimmten Distanzbereichs auf, sondern immer (Ahnert/Tennhardt 231f; Cremer 1948, S. 36).

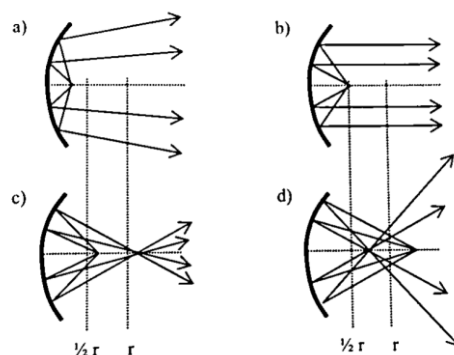


Abbildung 2: Darstellung der Hohlspiegelgesetze: a) hyperbolische Reflexion; b) parabolische Reflexion; c) elliptische Reflexion mit Schallquelle näher an der Kreisfläche als am Kreismittelpunkt; d) elliptische Reflexion mit der Schallquelle über dem Kreismittelpunkt hinaus (Werner 2009, S. 273, Abb. 6.32)

Die Reflexion von Schall(strahlen) nach dem Prinzip „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ ist allerdings nur unter bestimmten Bedingungen gegeben: Entweder, wenn die

Wellenlänge des Schalls deutlich kleiner ist als die Breite der Einheiten der Oberflächenstruktur, an der sie reflektiert wird („Gerichtete Reflexion“) (Abb. 3b), oder aber, wenn die Wellenlänge deutlich größer als die Oberflächenstruktur ist und somit an der größeren, hinter der Oberflächenstruktur liegenden Wand nach den Gesetzen der Optik reflektiert werden („Geometrische Reflexion“) (Abb. 3a). Ist jedoch die Wellenlänge ungefähr so groß wie die Strukturen auf der Reflexionsfläche, findet die Reflexion nicht in eine bestimmte Richtung, sondern diffus und streuend statt (Abb. 3c) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 227; Hentschel 2008, S. 5).

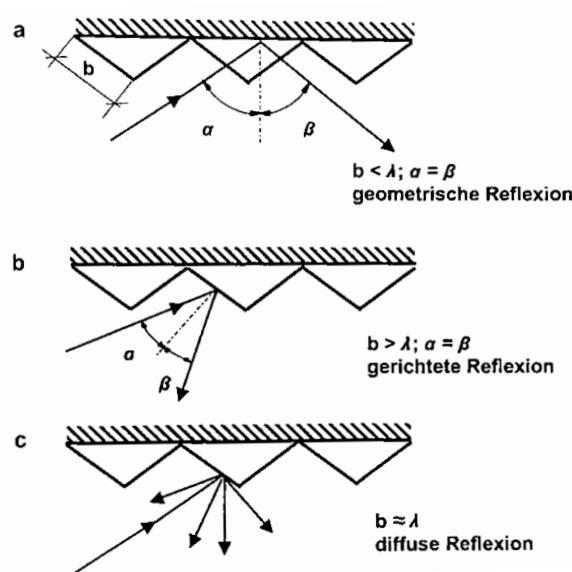


Abbildung 3: Darstellung von Reflexionen an Flächen mit lokaler Oberflächenstruktur in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Wellenlänge und Strukturgröße (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 227, Abb. 5.23)

Die Beugung bricht mit den oben aufgestellten Prinzipien. Trifft eine Schallwelle auf ein Objekt, das kleiner ist als die Welle(nlänge) selbst, scheint die Schallwelle hinter dem Objekt weiterzulaufen, quasi durch das Objekt hindurchzugehen. Es gibt allerdings keine klare Grenze zwischen Reflexion und Beugung, wodurch im Übergang von einem zum anderen Effekt Streuung stattfindet. Je kleiner das Objekt gegenüber der Schallwellenlänge ist, desto geringer die Streuung und desto klarer die Beugung (Cremer 1948, S. 9f; Hentschel 2008, S. 5f).

### 2.1.2 Wellentheoretische Effekte

Die Darstellung und Berechnung von Raumakustik und raumakustischen Phänomenen mit Schallstrahlen und Gesetzen, ähnlich zu denen der Optik, lassen sich lediglich in höheren Frequenzen nutzen. Man spricht von der geometrischen Raumakustik. In

tieften Frequenzen muss allerdings der Wellencharakter von Schall mit in die Betrachtung einbezogen werden, da dort nicht alle Effekte und Phänomene durch die geometrische und statistische Raumakustik erklärt werden können. Dies fällt in den Bereich der wellentheoretischen Raumakustik. Die Grenze zwischen geometrischer und wellentheoretischer Raumakustik in Räumen liegt auf der Schroeder-Frequenz:

$$f_{Schroeder} = 2000 * \sqrt{\frac{T}{V}} \text{ in Hz}$$

Hierbei beschreibt  $V$  das Raumvolumen und  $T$  die Nachhallzeit des Raums (siehe Kapitel 2.3.2) (Maier 2008, S. 281f; Werner 2009, S. 279). Die wellentheoretischen Effekte, besonders Raummoden, werden oberhalb dieser Frequenz nicht mehr klar voneinander unterscheidbar wahrgenommen (Hentschel 2008, S. 26).

Im Bereich der wellentheoretischen Akustik finden sich zwei wichtige Effekte, die die Akustik eines Raums stark beeinflussen können. Der Kammfiltereffekt entsteht, wenn Schallwellen so reflektiert werden, dass es bei bestimmten Frequenzen zu Überlagerungen kommt. Diese Überlagerungen sind aufgrund kurzer Laufzeitdifferenzen destruktiv und führen zur Auslöschung der Frequenz und ihrer ungeraden Vielfachen. Bei den geraden Vielfachen liegen die Wellen allerdings so übereinander, dass die Interferenz konstruktiv ist und diese Frequenzen somit verstärkt werden (Abb. 4) (Maier 2008, S. 282f; Hentschel 2008, S. 8f). Der andere Effekt sind Raummoden. Moden sind stehende Wellen im Raum, die ebenfalls durch Interferenzen von eintreffenden und reflektierten Wellen an parallelen Wänden entstehen. Die erste, tiefste Mode (Mode erster Ordnung) befindet sich auf der Frequenz, deren halbe Wellenlänge der Distanz zwischen den beiden gegenüberliegenden Wänden entspricht. Es ist die Resonanzfrequenz des Raums. Bei der Interferenz entstehen an den Wänden jeweils Druckmaxima, in der Raummitte hingegen ein Schalldruckminimum. In regulären Räumen finden Moden jedoch nicht nur an Wand- (und Decken/Boden-)Paaren statt, sondern auch auf einer zwei- und dreidimensionalen Ebene, die mehr als 2 Wände als Reflektoren nutzt. Moden werden somit auch nach ihrer Dimensionalität axial (1-dimensional) (Abb. 5), tangential (2-dimensional) (Abb. 6, links) oder oblique (3-dimensional) (Abb. 6, rechts) bezeichnet (Maier 2008, S. 283f; Hentschel 2008, S. 24f). Werden Moden nicht richtig abgedämpft, z. B. durch Absorber, kann dies dazu führen, dass die Hörer\*innen ein „Dröhnen“ im Raum wahrnehmen, da Raummoden eine lange Nachhallzeit haben

(Maier 2008, S. 290). Raummoden sollten also durch eine entsprechende Gestaltung der primären (keine parallelen Wände) oder sekundären Raumstruktur (Absorber an Stellen starker Schallbewegung bzw. geringen Schalldrucks, da Schalldruck und Schallschnelle um  $180^\circ$  versetzt sind (Maier 2008, S. 284)) vermieden werden.

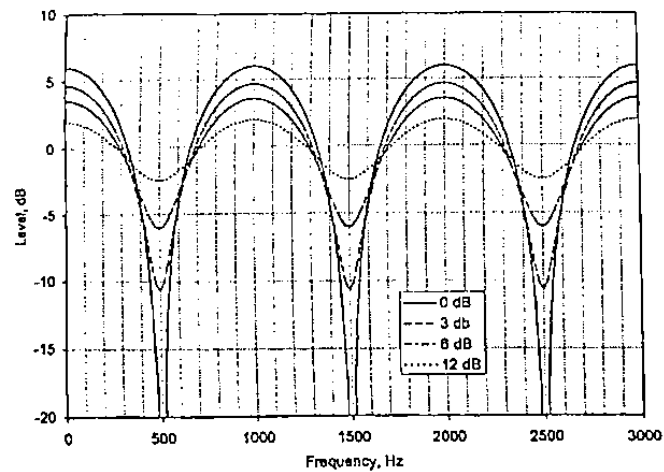


Abbildung 4: Kammfiltereffekt bei einer zeitlichen Verschiebung um 1 ms mit Auslöschungen bei 500 Hz, 1.500 Hz, 2.500 Hz (Hentschel 2008, S. 9, Abb. 6)

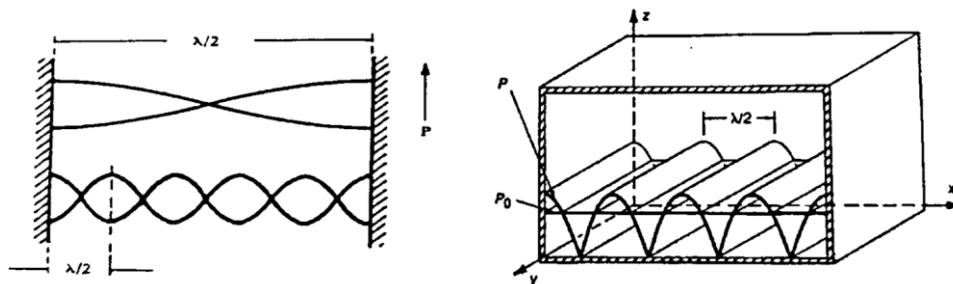


Abbildung 5: Axiale Raummoden in 2-dimensionaler und 3-dimensionaler Darstellung (Hentschel 2008, S. 24, Abb. 16a/b)

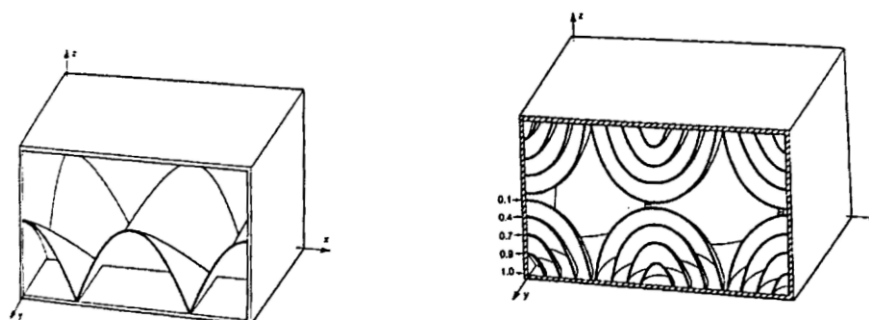


Abbildung 6: Tangentiale Raummode (links) und oblique Mode (rechts) in 3-dimensionaler Darstellung (Hentschel 2008, S. 25, Abb. 16c und 16d)

### 2.1.3 Freies und diffuses Feld

Trifft eine Schallwelle auf eine Wandfläche, wird diese reflektiert, aber unter Verlust von Schallenergie, da ein gewisser Teil der auf die Wand treffenden Energie als Wärme durch Reibung verloren geht und ein weiterer Teil der Schallenergie in die Wand hineingetragen wird (Ahner/Tennhardt 2008, S. 184f). Gibt es keine Schall-reflektierenden oder beugende Flächen (mit Ausnahme einer weiten Reflexionsfläche als Grundlage, z. B. ein Boden), spricht man von einem freien Schallfeld. In diesem kann die Ausbreitung von Schall einer Schallquelle als strahlenförmig angesehen werden. Innerhalb eines Raumes aus reflektierenden Flächen werden innerhalb einer Sekunde mehrere hunderttausend Reflexionen in den Raum zurückgeworfen (ca. 200.000 bei einer Raumgröße von  $800\text{ m}^3$  (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 182)). Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Schallstrahlen im Raum durch die Reflexionen spricht man von einem diffusen Schallfeld. Dieser Idealzustand bedeutet eine vom Abstand zur Schallquelle unabhängige Schallintensität (Ahner/Tennhardt 2008, S. 182; Hentschel 2008; S. 8). Eine gleichmäßige Schallausbreitung ohne bevorzugte Richtung kann auch als statische Schallverteilung bezeichnet werden (Hentschel 2008, S. 14). Grundlegend wird bei Schall, der bei Hörer\*innen oder Mikrofonen ankommt, unterschieden zwischen Direktschall, der den direkten Weg von der Schallquelle zur\*zum Hörer\*in/dem Mikrofon geht, also Teil des freien Schallfelds ist, und Diffusschall, der über eine oder mehrere Reflexionen bei Hörer\*innen oder Mikrofonen ankommt, also Teil des diffusen Schallfelds ist (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 182f).

### 2.1.4 Zeitliche Verschmelzung und Echos

Das menschliche Gehör nimmt nicht jegliche am Ohr eintreffenden Reflexionen getrennt voneinander wahr. Innerhalb eines bestimmten Bereiches der Laufzeitdifferenz wird ein Schallereignis durch die Reflexionen verstärkt gehört. Es wird von der Verwischungsschwelle gesprochen (Cremer 1948, S. 73; Nocke 2014, S. 92). Diese Schwelle bewegt sich im Bereich von  $50 - 80\text{ ms}$ , je nach Kontext (Gade 2014, S. 324; Nocke 2014, S. 91). Ist die Laufzeitdifferenz einer prominenten Reflexion so groß, dass es zu keiner zeitlichen Verschmelzung kommen kann, wird von einem Echo gesprochen, da die Reflexionen als Wiederholungen des eigentlichen Geräuschs wahrgenommen werden (Fasold/Veres 2003, S. 153). Als ein Echo gilt das Auftreten von

Laufzeitdifferenzen von mindestens 100 ms. Nach  $c = \frac{\lambda}{T}$  ergibt sich eine nötige Wegdifferenz von 34 m bei Direktschall und Reflexion bzw. ein Abstand von 17 m zu einer reflektierenden Wand, sofern es sich bei Sprecher\*in und Hörer\*in um die gleiche Person handelt. Der reflektierte Schall muss beim Eintreffen allerdings auch weiterhin den nötigen Schalldruckpegel haben, um sich – besonders in der Natur – von Störgeräuschen abzusetzen (Cremer 1948, S. 54f). Eine besondere Form des Echos entsteht, wenn sich zwei stark reflektierende Flächen in entsprechendem Abstand parallel gegenüberstehen. Der Schall wird immer wieder zwischen den Wänden hin und her geworfen. Man spricht von einem „Flatterecho“ (Cremer 1948, S. 24; Hentschel 2008, S. 10; Nocke 2014, S. 92). Echos gehören zu schädlichen Reflexionen; frühe Reflexionen, die den Schalleindruck verstärken, werden zu den nützlichen Reflexionen gezählt (Cremer 1948, S. 73).

### 2.1.5 Absorption

Wie bereits in Kapitel 2.1.4 erklärt, wird nur ein Anteil der auf eine Oberfläche eintreffenden Schallenergie reflektiert. Der Schallabsorptionsgrad beschreibt dabei das Verhältnis zwischen den nicht reflektierten Schallintensitätsanteilen ( $I_{dis}$  und  $I_{trans}$ ) und der ursprünglichen eintreffenden Schallintensität ( $I_{ein}$ ) bzw. 1 minus das Verhältnis zwischen reflektierter Schallintensität ( $I_{ref}$ ) und der eintreffenden Schallintensität. Erstere ergeben zusammen die absorbierte Schallintensität ( $I_{\alpha}$ ) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 184f; Werner 2009, S. 125, S. 210f):

$$\alpha = \frac{I_{trans} + I_{dis}}{I_{ein}} = 1 - \frac{I_{ref}}{I_{ein}} = \frac{I_{\alpha}}{I_{ein}}$$

Wird der Schallabsorptionsgrad mit der Größe einer Fläche  $S$  multipliziert, erhält man die äquivalente Schallabsorptionsfläche  $A$  ( $A = \alpha * S$ ). Diese wird zusätzlich zu verschiedenen Oberflächen auch für die Beschreibung schallabsorbierender Eigenschaften von Objekten verwendet. (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 185; Hentschel 2008, S. 16f; Werner 2009, S. 210f). Die Schallabsorption einer Oberfläche wird über Oktavbänder gefächert angegeben, da Oberflächen, Materialien und Objekte je nach Beschaffenheit Schall unterschiedlicher Frequenzbereiche unterschiedlich stark absorbieren. Für grobe Berechnungen reicht allerdings ein nicht über Oktavbänder aufgeteilter,

einfacher Absorptionsgrad (Werner 2009, S. 214). Der Absorptionsgrad einer Oberfläche oder eines Objektes kann in Hallräumen (Räume mit einer besonders langen Nachhallzeit und geringer Absorptionsfläche) gemessen werden. Hierzu werden die Nachhallzeiten mit und ohne Objekt im Raum verglichen und aus ihrer Differenz über die Sabine'sche Nachhallformel (siehe Kapitel 2.3.2) der Absorptionsgrad bzw. bei Objekten die äquivalente Absorptionsfläche berechnet (Hentschel 2008, S. 43). Einen besonders geringen Absorptionsgrad hat beispielsweise glatter Beton mit  $\alpha = 0,01 \dots 0,03$  je nach Frequenz und auch Teppiche haben nur in den hohen Frequenzen einen Absorptionsgrad von  $\alpha > 0,5$ . Akustikputz hingegen erreicht sogar Absorptionsgrade von bis zu  $\alpha = 0,9$  in den mittleren Frequenzen (Werner 2009, S. 213).

#### 2.1.6 Hallradius

Die kugelförmige Ausbreitung von Schall von Punktquellen bedeutet einen Abfall der Energiedichte des Direktschalls antiproportional zum Quadrat des Abstands zur Schallquelle. Zusammen mit dem Diffusfeld, dessen Schalldichte ideal konstant ist, ergibt sich der Hallradius  $r_H$ , der den Abstand zur Schallquelle in einem Raum beschreibt, bei dem die Schalldichten vom freien Schallfeld und vom Diffusfeld gleich groß sind. Der Hallradius  $r_H$  lässt sich berechnen mit (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 183)

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \approx 0,141\sqrt{A} \text{ in } m$$

und mit über die Sabine'sche Nachhallformel (siehe Kapitel 2.3.2) erweitern zu (Werner 2009, S. 237)

$$r_H = 0,057 * \sqrt{\frac{V}{T}} \text{ in } m$$

Die Formeln für den Hallradius ergeben sich aus dem Gleichstellen der Energiedichten des Direkt- und Diffusschallfelds (Werner 2009, S. 236):

$$w_{dir} = \frac{P}{4\pi * r_H^2 * v_s} = \frac{4 * P}{A * v_s} = w_{diff}$$

Mit der im folgenden Kapitel 2.2.2 beschriebenen Nachhallzeit lässt sich ebenso ein ungefährender Wert für den Hallradius aus der Nachhallzeit  $T$  und dem Raumvolumen  $V$  berechnen (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 183; Hentschel 2008, S. 20):

$$r_H \approx 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \text{ in m}$$

Ein hoher Anteil an Direktschall ist besonders für die Sprachverständlichkeit und für Lautsprecher wichtig (Hentschel 2008, S. 19).

## 2.2 Raumimpulsantwort

Für die Akustik in einem Raum lassen sich viele physikalische und subjektive Maße berechnen. Die Grundlage für viele dieser Maße ist die Raumimpulsantwort. Diese ist abhängig von der Gestaltung eines Raums (Primär: Raumform, Größe; Sekundär: Designelemente an Decken und Wänden, Möbel) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 186; Nocke 2014, S. 88). Eine Impulsantwort eines Raums entsteht durch Anregung des Raumes durch einen akustischen Impuls oder einen Sinus-Sweep und beschreibt den zeitlichen Verlauf des Schalldrucks im Raum (Abb. 7).

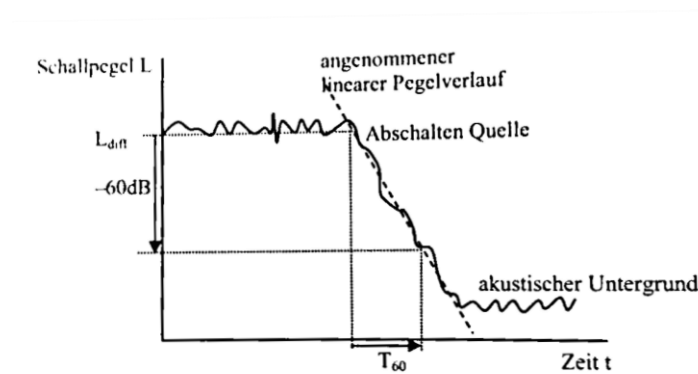


Abbildung 7: Raumimpulsantwort in Zeit-Schallpegel-Darstellung nach Abschalten eines konstanten Rauschens (Hentschel, S. 242, Abb. 6.19)

Der Schalldruck ändert sich durch die äquivalente Schallabsorptionsfläche und die Luftimpedanz (der Energieverlust des Schalls bei der Ausbreitung durch Energieumwandlung). Die Raumimpulsantwort wird mittlerweile für Bauplanungen in Computerprogrammen simuliert, allerdings findet auch die in-situ-Messung noch Anwendungen, vor allem, wenn der Raum bereits existiert (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 186; Gade 2014, S. 319ff). Die Messung der Raumimpulsantwort kann nicht nur der Betrachtung des

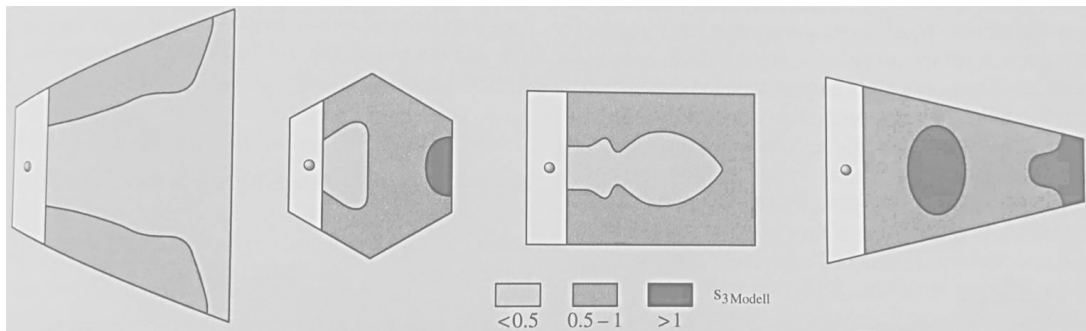
Schalldrucks dienen, sondern auch der Intensität und der Schallenergiedichte (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 188). Die in einer Raumimpulsantwort enthaltenen Reflexionen werden eingeteilt in Direktschall, frühe Reflexionen (deren Zeitunterschied zum Direktschall die Raumwahrnehmung beeinflusst) und statischen Nachhall bzw. diffuse Reflexionen (Hentschel 2008, S. 12). Die Art und Weise wie Reflexionen sich zu einer Raumimpulsantwort zusammensetzen kann dabei sowohl positive oder negative Auswirkungen auf die Verständlichkeit und die sogenannte Hörsamkeit haben (Werner 2009, S. 139).

### 2.2.1 Primärstruktur

Primärstrukturen geben die Akustik eines Raumes sehr stark vor. Lediglich mit einer sehr entgegenwirkenden Sekundärstruktur kann diese grundlegend verändert werden (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 207; Nocke 2014, S. 89). Schon das Volumen eines Raums kann zur Primärstruktur gezählt werden. Hierfür wird die Volumenkennzahl  $k$  verwendet, die das Mindestvolumen pro Platz angibt. Das Volumen und die Volumenkennzahl können die Hörsamkeit eines Raums stark beeinflussen und sinnvolle Raumnutzungen vorgeben, denn sie bestimmen auch, welche Nachhallzeit (siehe Kapitel 2.3.2) überhaupt möglich ist. Lange Nachhallzeiten durch große Überschreitungen der optimalen Volumenkennzahl sind zwar durch Absorber absenkbar, allerdings zum Nachteil der Darbietungslautstärke. Schwankungen in den Zuschauer\*innenzahlen bedeuten ebenfalls auch Schwankungen in der Nachhallzeit, da Personen auch als Absorptionsflächen dienen, die die Nachhallzeit verringern. (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 209f; Nocke 2014, S. 86f). Je größer die Volumenkennzahl ist, desto geringer ist auch der Absorptionsanteil durch das Publikum, sodass mit mehr Absorbern im mittleren und hohen Frequenzbereich gearbeitet werden sollte. Je nach Volumenkennzahl sollten darum Absorber für eine passende Raumakustik installiert werden. Das Publikum absorbiert vor allem mittlere und hohe Frequenzen, weshalb in Räumen mit  $k < 4 \text{ m}^3/\text{Person}$  besonders Tiefenabsorber installiert werden sollten (Nocke 2014, S. 86f). Die DIN 18041 gibt hier je nach Raumnutzung gewisse Toleranzbereiche für die Volumenkennzahl vor. Für Sprachdarbietungen sollte  $k$  im Bereich  $3 - 6 \text{ m}^3/\text{Person}$  liegen, für Musikdarbietung höher im Bereich  $7 - 12 \text{ m}^3/\text{Person}$ . Für die Nutzung

eines Raums für Sprache *und* Musik sollte eine Volumenkenzahl von  $k = 5 \dots 8 \text{ m}^3/\text{Person}$  vorliegen (DIN 18041 nach Nocke 2014, S. 88).

Auch die Raumform eines Konzertsaals trägt viel zur Klangfarbe des Raumes bei. Rechteckigen Konzerträumen wird z. B. eine größere Wärme und geringe Brillanz zu gesprochen, die andere Raumformen wie etwa Polygone missen lassen (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 207 und S. 211f). Die vielen verschiedenen Raumformen geben jedoch die Möglichkeit, einem Raum eine grundlegende Akustik für bestimmte Zwecke zu verleihen (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 2011). Nicht mit der Raumform zu verwechseln ist der Grundriss, in den bei Konzerthäusern auch die Bühnenpositionen mit einfließen. Von wo aus in einem Raum beschallt wird, kann zu großen Veränderungen in der Verteilung von Wandreflexionen führen, besonders bei Grundrissen wie Trapezen oder sogenannten Weinbergterrassen (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 212-215). Trapezartige Grundrisse haben den Vorteil, dass zwischen den schief zueinanderstehenden Wänden bereits ein Flatter-Echo automatisch verhindert wird (Cremer 1948, S. 24). Weinbergterrassen sind ähnlich zur Trapezform mit einer Bühne am schmalen Ende, jedoch mit abgeschnittenen Ecken am breiten Ende, sodass eine Sechseckform entsteht. Die Wände, die die Ecken abschneiden, führen dazu, dass Wandreflexionen gleichmäßiger im Raum verteilt werden im Gegensatz zum Trapez als Grundriss, bei dem die Wandreflexionen kaum den Mittelstreifen erreichen (Abb. 8) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 2014f; Gade 2014, S. 341). Bei runden Grundrissen ist Vorsicht geboten, da ohne entsprechendes Konzept für den Zuschauerraum die Verteilung des Schalls durch Konzentrationen bzw. Brennpunkte sehr unausgeglichen sein kann (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 2016f). Jedoch gelten sie als natürliche Formen, die auch bei Publikum von Straßenmusikern, Amphitheatern und dem römischen Zirkus zu finden sind (Gade 2014, S. 340). Rechteckige Grundrisse und quaderförmige Räume („Schuhkartons“) sind sehr gängige Formen, allerdings besteht hier stärker die Gefahr des Rückwurfs des Schalls zur Schallquelle als bei nicht rechteckigen Grundrissen, bei denen eher eine gleichmäßige Verteilung des Schalls im Raum, also ein gutes Diffusfeld, entsteht (Cremer 1948, S. 26f). Bei einer Anordnung mit Musikern an der Kopfseite und einer entsprechenden Länge des Raums können die Reflexionen durch die Seitenwände den Schall verstärken (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 212f). Quader gehören auch in alltäglichen Räumen aufgrund der einfachen Planungsmöglichkeiten zum Standard (Nocke 2014, S. 89).



*Abbildung 8: Verteilung des Schalldrucks durch frühe Reflexionen in verschiedenen Raumformen (v. l. n. r. Trapez, Hexagon, Rechteck, umgedrehtes Trapez), dunklere Farben bedeuten höhere Schalldruckpegel (Gade 2014, S. 341, Abb. 9.20)*

Einen zusätzlichen Effekt können Öffnungen zu anderen Räumen haben, in die Schall aus dem Raum „entkommen“ kann, der in verringerter Stärke allerdings auch wieder in den Raum hineingelangt (Gade 2014, S. 334). Normalerweise wirken sich angeschlossene Räume verlängernd auf die Nachhallzeit aus und nur dann verkürzend, wenn sie weniger hallig sind und stattdessen stärker absorbieren (Yang 2021, S. 98). Je größer die Öffnung zu den weiteren nacheinander angeschlossenen Räumen ist, in desto mehr aufeinander folgende Räume wird der Schall getragen. Dieser Effekt ist besonders groß bei stärkerer Schallabsorption in den Räumen und bei kleinen Öffnungen. Je größer die Öffnung wird, desto geringer ist der Unterschied in der Lautstärke zwischen den Räumen (Yang 2021, S. 123ff). Besonders bei geringer Schallabsorption trägt die Position der Raumverbindungen zur Lautstärkenverteilung bei (Yang 2021, S. 133).

Ebenso wie beim Grundriss sollten bei der Deckengestaltung monoton gekrümmte Formen wegen Brennpunktbildungen vermieden werden. Die Deckenform kann besonders zur Schalllenkung in den Zuschauerraum beitragen und so auch auf die Hörsamkeit des Raums einwirken. Ein zusätzliches Problem durch unpassende Deckenstrukturen kann das „Theaterecho“ sein, das durch die langen Strecken des Schalls von der Bühne zum hintersten Teil des Theaters oder Konzertsaals und der Reflexion an der Decke zurück in Richtung Zuschauerraum entsteht, was wegen einer langen Laufzeitdifferenz zwischen Direktschall und Reflexionen zu einem Echoeffekt führt (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 217ff; Gade 2014, S. 344f). Natürlich muss auch die Gestaltung von Kuppeln und anderer kreis- und ellipsenförmiger Decken passgenau akustisch geplant werden, da diese zu Brennpunktbildungen beitragen (siehe Kapitel 2.1.1) (Nocke 2014, S. 89). Zuletzt gehören auch Balkone und ähnliche Strukturen wie Galerien und Ränge in Theatern und Konzerthäusern zur Primärstruktur eines Raums. Durch ihre Möglichkeiten zur Streuung können sie sich positiv auf die Hörsamkeit und

Raumwahrnehmung auswirken. Allerdings besteht auch hier – in einem ähnlichen Prinzip wie bei Decken – die Gefahr eines Theaterechos. Ein zusätzliches Problem entsteht durch Balkone und Ränge, wenn der Bereich darunter zu weit nach hinten unter einem zu niedrigen Balkon liegt. Dies führt zu einem akustisch fast abgetrennten Bereich, der besonders in der Lautstärke leidet. Für Konzertsäle sollte darum gelten, dass die Tiefe des überdeckten Bereichs  $D$  (von der Balkonkante bis zur Rückwand) kleiner sein muss als die Höhe des Bereichs  $H$  (vom Boden zum Balkon). Für Opern- und Theaterhäuser gilt, dass  $D$  lediglich kleiner als die doppelte Höhe ( $2H$ ) sein muss (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 220f; Gade 2014, S. 343f).

Schwieriger zu berechnen ist die Schallabsorption durch das Publikum, welches durch Kleidung und Sitzordnung akustisch sehr komplex ist. Besonders in den hohen Frequenzen hat die Dichte des Publikums einen großen Einfluss, da eine sehr enge Bestuhlung eine äquivalente Absorptionsfläche von ca.  $A_{\text{äq}} = 0,5 \text{ m}^2$  pro Person in den Frequenzen ab 1.000 Hz bedeutet. Bereits ein Wechsel in der Publikumsdichte von  $0,5 \text{ m}^2/\text{Person}$  zu  $1,0 \text{ m}^2/\text{Person}$  führt dazu, dass sich die äquivalente Schallabsorption auf ca.  $A_{\text{äq}} = 0,8 \text{ m}^2$  pro Person erhöht, bei einer Publikumsdichte von  $6 \text{ m}^2/\text{Person}$  sogar auf fast  $A_{\text{äq}} = 1 \text{ m}^2$ . Bei Musikern hingegen ist die Wirkung andersherum: Eine dichtere Besetzung der Musiker\*innen hat besonders in den tiefen Frequenzen einen positiven Effekt auf die Schallabsorption des Orchesters (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 239f). Durch die periodische Sitzanordnung, die Streuung an den Köpfen und an den Schultern des Publikums kommt es zu zusätzlichen Dämpfungen. Besonders die Schultern verringern durch kurze Laufzeitdifferenzen und die resultierenden destruktiven Interferenzen den Schalldruck am Ohr um bis zu 14 dB, je nach Einfallswinkel an der reflektierenden Schulter (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 241; Gade 2014, S. 342). Mit dem richtigen (steigenden) Winkel des Publikumsraums nach hinten hin kann dieser Effekt vermieden werden. Höhenunterschiede zwischen einer Reihe und jener dahinter von ca. 12 cm sind sowohl auditiv als auch durch ein gutes Sichtfeld zu empfehlen. Allerdings verringert dies zusätzlich Volumen und Nachhallzeit (Gade 2014, S. 342f). In Auditorien sollte die Volumenkenzahl definitiv nicht unterschritten werden. Einer zu geringen Volumenkenzahl kann durch die Sekundärstruktur nicht entgegengewirkt werden, einer Überschreitung der empfohlenen Werte jedoch schon (Fasold/Veres 2003, S. 142).

### 2.2.2 Sekundärstruktur

Während die Primärstruktur aus den größeren architektonischen Bestandteilen eines Raums besteht, erstreckt sich die Sekundärstruktur über die kleineren Einheiten in der Raumgestaltung, die einen absorbierenden oder reflektierenden Effekt haben. Eine gut geplante Sekundärstruktur kann akustischen Schwächen der Primärstruktur entgegenwirken, allerdings teilweise nur mit hohem Aufwand (Fasold/Veres 2003, S. 133).

Größere Strukturen wie Lamellen-Decken können verschiedene raumakustische Parameter weiter beeinflussen. Diese können je nach Höhe der Anbringung, Winkel und Lamellen-Dicke die Nachhallzeit, die Klarheitsmaße und Early Decay Time (siehe Kapitel 2.3) mehr oder weniger stark verändern (Lee, Jeong 2025, S. 9).

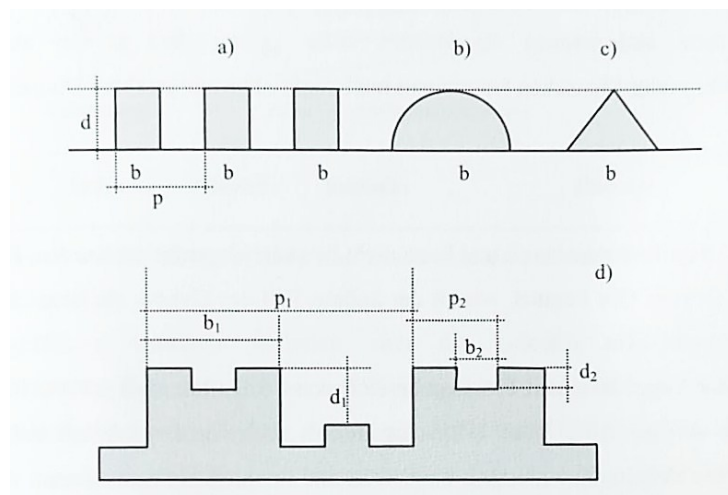


Abbildung 9: Geometrische Diffusoren in Form von a) regelmäßigen Quadern, b) Halbzylindern, c) Prismen und d) Doppel-Strukturen zur Diffusion zweier Frequenzen (Werner 2009, S. 141, Abb. 3.44)

Reflektoren dienen der Verteilung von Schall im Raum und müssen für die Erfüllung ihrer Funktion ein gewisses Gewicht pro Fläche mitbringen. Je tiefer die Frequenzen sind, die mit dem Reflektor zurückgeworfen werden sollen, desto größer muss die flächenbezogene Masse sein. Durch eine regelmäßig geometrische Struktur auf der Reflektorfläche (durch Halbkugeln, Quader, Pyramiden, halbe Zylinder etc.) kann statt geometrischen Reflexionen eine Streuung nach dem Prinzip der diffusen Reflexion verursacht werden. Die nötigen Abstände und Größen der Strukturen sind abhängig von der geometrischen Strukturform selbst und dem Frequenzbereich, der gestreut werden soll (Tab. 1) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 228ff; Hentschel 2008, S. 29f; Werner 2009, S. 140). Die geometrischen Strukturen können so angeordnet werden, dass sie größere Strukturen bilden und damit Schall in mehreren Oktavlagen streuen (Abb. 9) (Werner 2009, S. 140f).

*Tabelle 1: Parameter für gute Streuung durch geometrische Strukturen (Werner 2009, S. 140f)*

| <b>Struktur</b> | <b>Periodendauer <math>p</math></b> | <b>Strukturtiefe <math>d</math></b> | <b>Strukturbreite <math>b</math></b> |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Quader          | $\lambda - 2\lambda$                | $0,2 * p$                           | $d$                                  |
| Prismen         | $\lambda - 2\lambda$                | $0,25 * p$                          | $2d$                                 |
| Halbzylinder    | $\lambda - 2\lambda$                | $0,25 * p$                          | $2d - 5d$                            |

Da einfache Wandflächen außer bei der Benutzung speziellen Putzes keine großen Absorptionsgrade aufweisen, können Absorber in Räumen mit langer Nachhallzeit und geringer Absorptionsfläche Aushilfe leisten (Werner 2009, S. 2213ff). Bei Absorbern handelt es sich jedoch nicht allein um typische Absorberflächen, wie es sie im Handel gibt. Auch Einrichtungsgegenstände und Personen gelten als Absorber, da sie (auf verschiedene Arten) einen Teil der auf sie eintreffenden Schallenergie aufnehmen, statt zu reflektieren. Selbst Luft absorbiert Schall in geringem Maße durch die Impedanz. Die gängigsten Absorber sind poröse Materialien, bei denen die eintreffende Schallenergie in den Luftlöchern in Wärmeenergie umgewandelt wird. Die schallschluckende Eigenschaft des Materials ergibt sich allerdings nicht bloß durch die Porosität, sondern auch durch den richtigen Strömungswiderstand innerhalb des Absorbers. Ist dieser zu hoch, wirkt die Oberfläche wie ein Reflektor, ist er zu niedrig, schwingt die Luft ungehindert und der Schall wird an der Wand hinter dem Absorber reflektiert (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 233f; Hentschel 2008, S. 31f; Werner 2009, S. 218ff). Ein größerer Abstand der (porösen) Absorber zur Wand hilft bei der Absorption tiefer Frequenzen, da so die absorbierende Wirkung näher an deren Druckmaxima einsetzt (Hentschel 2008, S. 32f) ebenso wie dickeres Absorbermaterial (Werner 2009, S. 222). Zuvor wurde erwähnt, dass eine Resonatorfläche eine bestimmte flächenbezogene Masse nicht unterschreiten sollte. Dies liegt daran, dass eine an einer Wand installierte Platte mit einem gewissen Abstand zur Wand als Resonator bestimmter Frequenzen dient (Feder-Masse-System). Durch die Anregung wird Schallenergie vom Resonator aufgenommen und so absorbiert. Durch strategische Lochungen der Platten kann diese mit nur geringem Absorptionsverlust leichter gemacht werden (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 235f; Hentschel 2008, S. 34f; Werner 2009, S. 227ff). Durch die falsche Lochsetzung in der Platte wiederum kann es zur Streuung kommen (mikroperforierte Diffusoren mit Lochgrößen  $< 1\%$ ) (Werner 2009, S. 141) oder es verringert sich der Absorptionsgrad als Feder-Masse-System (Hentschel 2008, S. 35). Man spricht dann stattdessen von

Lochplattenresonatoren, die im zugrundeliegenden Prinzip eher der dritten Resonatorart ähneln (Hentschel 2008, S. 38; Werner 2009, S. 232). Dieser letzte gängige (fest installierbarer) Absorber ist der Helmholtzresonator, bei dem durch einen Hohlraum mit Öffnung die Luft innerhalb des Resonators angeregt werden kann und im Feder-Masse-Prinzip die Feder darstellt, während die Luft im Resonatorhals, also im Öffnungsbereich, als Masse dient. Durch eine Veränderung des Hohlraumvolumens oder der Öffnung kann der absorbierte Frequenzbereich verändert werden. Jedoch wird der Helmholtz-Resonator hauptsächlich für die Absorption tiefer Frequenzen in schmalbandigen Bereichen eingesetzt (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 237f; Werner 2009, S. 229ff). Die verschiedenen Arten an Absorbern eignen sich besonders für den tieffrequenten Bereich (Hentschel 2008, S. 34). Die richtige Menge an Absorbern bedeutet allerdings noch keine gute Raumaustik. Damit Absorber (besonders in leeren und großen Räumen) ihren vollen Wirkungsgrad erfüllen können, muss der Schall auch im Raum verteilt sein. Absorber und Diffusoren (und diffundierende Möbel) sollten deshalb im Zusammenspiel eingesetzt werden (Eßner/Schäfer 2012, S. 48ff).

### 2.2.3 Messung

Den korrekten Messungsvorgang für die Raumimpulsantwort geben die Normen DIN EN ISO 3382 vor; Teil 1 für Aufführungsräume, Teil 2 für gewöhnliche Räume und Teil 3 für Großraumbüros (Nocke 2014, S. 2014). Für die meisten Kriterien, die in der Raumakustik Anwendung finden, wird eine genügend laute, omnidirektionale Schallquelle zur Abgabe des Impulses verwendet (ISO 3382-2:2008, S. 3). Sollen mit einer Messung oder einer Simulation allerdings speziell Kriterien für die Verständlichkeit von Sprache untersucht werden, bieten sich Schallquellen mit einer Direktionalität ähnlich zu der von Menschen an (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 188). Gängig ist das Abspielen eines statischen Rauschens, um den Raum in einem möglichst breiten Frequenzspektrum anzuregen. Das Rauschen wird dann abgeschaltet und das Abklingen der Luftschwingungen aufgezeichnet („Interrupted Noise Method“) (ISO 3382-2:2008, S. 5f; Fasold/Veres 2003, S. 153). Als Alternative zum Rauschen können teilweise auch kurze, laute Knalle genutzt werden („Integrated Impulse Response Method“) (ISO 3382-2:2008, S. 6). Die Messung sollte in normalen Räumen einen Frequenzbereich von 125 – 4.000 Hz in Terz- oder Oktavbändern abdecken (Hentschel 2008, S. 42;

Werner 2009, S. 242). Die Messmikrofone sollten so im Raum verteilt sein, dass sie diesen gut abdecken und kein Bereich vernachlässigt wird. Meist werden die Mikrofone auf eine Höhe von 1,2 m eingestellt, um die Ohrhöhe einer sitzenden Person zu simulieren (Fasold/Veres 2003, S. 153). Die verwendeten Messmikrofone sollten ebenfalls omnidirektional und möglichst klein ( $\varnothing < 27 \text{ mm}$ ) sein und direkt (oder über Interfaces) an ein aufnahmefähiges Gerät angeschlossen sein (ISO 3382-2:2008, S. 3). Teilweise wird sich bei der Anzahl der benutzten Mikrofon- und Quellpositionen anhand der Anzahl der Sitzplätze (für verschiedene Arten von Auditorien) orientiert, von vier Mikrofonpositionen in kleinen Räumen bis hin zu 10 Mikrofonpositionen in Auditorien mit über 2.000 Sitzplätzen (Fasold/Veres 2003, S. 153). Die ISO 3382-2 „Acoustics – Measurement of room acoustic parameters“ gibt hier etwas genauere Angaben, besonders in Bezug auf die Qualität einer Raumimpulsantwort-Messung in nicht-performativen Räumen. Es wird zwischen drei Graden der Messgenauigkeit unterschieden: (1) Survey: Für Testungen im Bereich Lärmschutz (Luftschall und Trittschall); (2) Engineering: Überprüfung und Vergleich der Schalldämmleistung von Gebäuden; (3) Precision: Für Messungen mit nötiger hoher Präzision (ISO 3382-2:2008, S. 5). Letztere ist der höchste Grad mit mindestens zwei Quellpositionen, mindestens 3 Mikrofonpositionen und insgesamt 12 Quelle-Mikrofon-Kombinationen (Tab. 2). Die Mikrofone sollten genügend Abstand voneinander, zu den Quellen und zu den Wänden haben. Auch die Quellen müssen mit Abstand zu den Wänden positioniert werden. Der Mindestabstand zwischen Quellen und Mikrofonen berechnet sich aus dem Raumvolumen  $V$ , der Schallgeschwindigkeit  $c$  und der erwartbaren Nachhallzeit  $\hat{T}$  (ISO 3382-2:2008, S. 4):

$$d_{\min} = 2 * \sqrt{\frac{V}{c * \hat{T}}} \text{ in } m$$

*Tabelle 2: Mindestzahl an Impulsen, Quell- und Mikrofon-Positionen sowie deren Kombinationen in den verschiedenen Messmethoden (nach ISO 3382-2, S. 4, Tab. 1)*

| Messmethoden:                         | <b>Survey</b> | <b>Engineering</b> | <b>Precision</b> |
|---------------------------------------|---------------|--------------------|------------------|
| Quellen-Mikrofon-Kombinationen        | 2             | 6                  | 12               |
| Quell-Positionen                      | $\geq 1$      | $\geq 2$           | $\geq 2$         |
| Mikrofon-Positionen                   | $\geq 2$      | $\geq 2$           | $\geq 3$         |
| Anzahl der Impulse pro Quell-Position | 1             | 2                  | 3                |

Gemessen werden sollte mit maximal zwei Personen im Raum, da nur dann ein Raum als „leer“ akzeptiert wird. Bei großen Räumen (über  $300\text{ m}^3$ ) sollte zusätzlich auch Luftfeuchtigkeit und Temperatur gemessen werden, da hier die Luftimpedanz eine große Rolle in der Schallabsorption spielt (ISO 3382-2:2008, S. 2f). Bei der Aufnahme dürfen keine Übersteuerungen entstehen. Als Kontrolle sollte deshalb ein Aufnahme-gerät benutzt werden, dass die aufgenommene Raumimpulsantwort oder den Schalldruckabfall direkt anzeigt (ISO 3382-2:2008, S. 3f). Die Anregungen sollten mehrfach pro Quellposition erfolgen, damit die erhaltenen Raumimpulsantworten nach der Messung als solche oder in Form der errechneten Nachhallzeiten gemittelt werden können (ISO-3382-2:2008, S. 5). Die bei den Aufnahmen erhaltenen Nachhallkurven sollten eine gerade Linie bilden. Liegt keine gerade Linie vor, kann dies an Raummoden liegen, die auch dann das Messverfahren verfälschen. Auch sollten die durch Knalle erhaltenen Raumimpulsantworten aufgrund von Ungenauigkeiten mit Vorsicht betrachtet werden, sie sind allerdings zulässig (ISO 3382-2:2008, S. 6-7). Zusammen mit Sine-Sweeps, Pistolen-Schüssen und pseudo-randomisiertem Rauschen gehören Luftballons zu der bereits erwähnten „Integrated Impulse Response Method“, bei der über das umgekehrte Zeitintegral der quadrierten Raumimpulsantwort die Abfallkurve des Schalldruckpegels berechnet wird (ISO 3382:2-2008, S. 2). Solange die Quellen die oben beschriebenen Anforderungen an Omnidirektionalität, Breitbandigkeit und Lautstärkepegel erfüllen, sind sie alle valide Mittel in dieser Art der Raumimpulsantwort-Messung (ISO 3382-2:2008, S. 6).

#### 2.2.4 Simulation

Vor dem tatsächlichen Bau oder der Umsetzung raumakustischer Maßnahmen bieten sich verschiedene Methoden an, einen Raum akustisch darzustellen. Eine Möglichkeit sind Modellbauten, die heute meistens in Maßstäben 1:16 bis 1:20 gebaut werden und in denen wie in einer in-situ-Messung die Raumimpulsantwort gemessen werden kann. Jedoch muss für das wesentlich kleinere Modell (im Gegensatz zum größeren Original) auch ein Frequenzbereich gemessen werden, der entsprechend der Neuskalierung sehr hoch ist. Für die teilweise nötigen Impulse im Bereich  $5.000 - 160.000\text{ Hz}$  werden Knallfunkensender benutzt, die einigermaßen variable Richtcharakteristiken (Verteilung des Schalldrucks bei der Abstrahlung) und gute Wiederholbarkeit

aufweisen (Fasold/Veres 2003, S. 173). Die zu nutzenden Frequenzen ergeben sich aus dem Maßstab 1:  $M$  des Modells (Gade 2014, S. 337):

$$f_M = f * M$$

Für ein Modell mit dem Maßstab 1:5 würden die mittleren Frequenzen demnach 2.500 *Hz* und 5.000 *Hz* (statt 500 *Hz* und 1.000 *Hz*) betragen. Bereits 1934 erklärte Spandöck den Ablauf von Modellversuchen der akustischen Messung und erwähnte auch die Nutzung von den dem Maßstab entsprechenden Frequenzen mit dem Hinweis, dass auch die Absorption vom Standard auf die Frequenzen  $f_M$  übertragen werden müssen. Ist dies nicht erfüllt können zumindest noch die qualitativen Ergebnisse zur (primären und sekundären) Raumstruktur genutzt werden (Spandöck 1934, S. 345ff). Zwar sind Modelle durch ihre einfache Veränderbarkeit, besonders bei der Anpassung der Sekundärstruktur sehr praktisch und auch eine seit den 1950ern beliebte Art der raumakustischen Planung, allerdings sind sie auch sehr zeit- und kostenintensiv im Bau (Fasold/Veres 2003, S. 173f; Gade 2014, S. 338).

Eine kostengünstigere Alternative besteht seit längerer Zeit auch durch Computersimulationen, die wiederum verschiedene Rechenverfahren benutzen, um die akustische Situation in einem Raum vorherzusagen. Bei dem Spiegelschallquellenverfahren werden nach und nach die Reflexionen verschiedener Ordnungen berechnet. Dies benötigt jedoch einen hohen Rechenaufwand, weswegen die Berechnungen nur teilweise stattfinden. Mit einer errechneten Nachhallzeit wird eine wesentlich gröbere, aber schneller simulierte Raumimpulsantwort erreicht (Fasold/Veres 2003, S. 174f; Gade 2014, S. 336f; Werner 2009, S. 278). Gängig sind Berechnungen von Spiegelschallquellen der zweiten oder dritten Ordnung. Höhere Ordnungen verbessern das Simulationsergebnis kaum (Werner 2009, S. 139). Das Ray Tracing behandelt Schall – wie in der geometrischen Raumakustik üblich – als strahlenähnliche Kegel, deren Verläufe im Raum von der Quelle bis zum Eintreffen auf eine\*n virtuelle Zuhörer\*in verfolgt werden. Die kegelförmigen Schallstrahlen werden allerdings auch mit zunehmender zurückgelegter Strecke immer breiter und verlieren bei jeder Reflexion Energie (Fasold/Veres 2003, S. 175; Werner 2009, S. 278). Als tatsächlicher Strahl wird Schall von der dritten computergestützten Impulsantwort-Modellierung behandelt, dem Schallteilchensimulationsverfahren. Die Bewegung von mehreren tausend Luftteilchen wird verfolgt, die von einer Schallquelle an einem Punkt im virtuellen Raum aus angeregt werden. Wie auch

beim Ray Tracing wird der Absorptionsgrad von Oberflächen, an denen Reflexionen stattfinden, mit in die Berechnung einbezogen. Zusätzlich wird auch angegeben, wie diffus die Reflexion stattfinden soll (Fasold/Veres 2003, S. 175f; Gade 2014, S. 337). Innerhalb der Simulationen können verschiedene raumakustische Parameter berechnet werden, auch platzabhängig zur Visualisierung von Unterschieden z. B. bei einem Publikum in einem Theater. Je komplizierter Primär- und Sekundärstruktur sind, je genauer die gewünschten Daten, desto länger dauert die Simulation der Raumakustik. Insgesamt gilt die Computersimulation dennoch als deutlich schneller als das Messen in gebauten Modellen (Fasold/Veres 2003, S. 176; Gade 2014, S. 337). Auch die Berechnung von Parametern aus bekannten Messdaten dient der Untersuchung, wie sich die Raumakustik in einem bestimmten Raum wahrscheinlich verhält (Gade 2014, S. 338f). Solange die Absorptionsgrade im Raum bekannt sind, können sogar die Nachhallzeit und viele Parameter, die auf ihr basieren, berechnet werden. Hierzu zählen Absorber genauso wie die Absorption durch Publikum, die Luftimpedanz und sogar angeschlossene Räume (Gade 2014, S. 332ff). Letztere fügen der Absorptionsfläche im betrachteten Raum mehr Absorptionsfläche in Abhängigkeit von der Größe der Raumöffnung  $S$  und der Absorptionsfläche des angeschlossenen Raums hinzu (Gade 2014, S. 334):

$$A_{Raum1,gesamt} = A_{Raum1} + \frac{A_{Raum2} * S}{A_{Raum2} + S}$$

## 2.3 Raumakustische Parameter

Zur Betrachtung und Planung raumakustischer Bedingungen in Räumen verschiedener Art wurden mehrere Parameter in der Norm DIN EN ISO 3382 definiert und optimale Bereiche beschrieben (Nocke 2014, S. 97f). Ein Teil dieser in der der Norm definierten und weitere Parameter werden im Folgenden beschrieben, um diese später als Grundlage für Beurteilungen der für diese Masterarbeit vermessenen Räume zu verwenden.

### 2.3.1 Stärkemaß $G$

Das Stärkemaß  $G$  dient der Bewertung eines Raums nach seiner Lautstärke. Dies ist besonders auch für die raumakustische Planung wichtig, da die Lautstärke eines Raums ein wichtiger Punkt in der subjektiven Wahrnehmung von Raumakustik ist. Das

Stärkemaß  $G$  ist hierbei der Ausdruck, wie sehr anhaltende Lautstärke eines Signals durch den Raum selbst und seine Reflexionen hinzugegeben wird. Als Bezugspunkt dient dabei, wie sich das Signal einer (Kugel-)Schallquelle in 10 m Entfernung in einem freien Feld entwickeln würde (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 201; Fasold/Veres 2003, S. 153). Aus beiden Signalen lässt sich das Stärkemaß berechnen (Werner 2009, S. 260):

$$G = 10 * \lg \left( \frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_{10m}^2(t) dt} \right) dB$$

Ein Stärkemaß  $G$  von +6 dB bedeutet etwa, dass durch die Reflexionen an der Primär- und der Sekundär-Struktur die Lautstärke eines Signals doppelt so laut ist als es das Signal im Freifeld (in 10 m Entfernung) wäre. Historische Konzerträume können einen Stärkemaß von +18 dB haben, wodurch der Raum auch zu laut wirken kann. Als ideal werden meist schon Stärkemaße von +4 dB bis +5,5 dB (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 2001), jedenfalls von +1 dB bis +10 dB sowohl für Sprache als auch für Musik angesehen (Fasold/Veres 2003, S. 136). Symphonische Musik benötigt jedoch ein wesentlich geringeres Stärkemaß (+3 dB) als Kammermusik (+10 dB) (Gade 2014, S. 329). Das Stärkemaß  $G$  wird in situ über eine Mikrofonposition im Abstand von 10 m zur Schallquelle gemessen. Alternativ kann auch ein theoretisches Stärkemaß  $G_{theo}$  über das Raumvolumen  $V$  und die Nachhallzeit  $T$  berechnet werden (Gade 2014, S. 324f), welches allerdings das Stärkemaß tendenziell höher berechnet als es eigentlich ist (Aretz/Orlowski 2009, S. 1108):

$$G_{theo} = 45 dB + 10 * \lg \left( \frac{T}{V} \right) dB$$

### 2.3.2 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit  $T$  gilt als eine der wichtigsten und ältesten Parameter in der Raumakustik. Sie wurde erstmals durch den Physiker W. C. Sabine definiert (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 186; Nocke 2014, S. 89). Die Nachhallzeit beschreibt die Dauer eines Schalldruckpegelabfalls um 60 dB (Fasold/Veres 2003, S. 136; Hentschel 2008, S. 17) nach Aussetzen des als Hall bezeichneten diffusen Schallfelds in einem Raum (wird festgelegt als 0 dB) (Werner 2009, S. 234; Nocke 2014, S. 90). Für eine Messung der Nachhallzeit  $T$  wird also ein dynamischer Abfall von 60 dB gefordert; dieser ist

allerdings bedingt durch Hintergrund- und Störgeräusche nicht immer erreichbar. Weitere Möglichkeiten sind die Nachhallzeiten  $T_{30}$ ,  $T_{20}$  und  $T_{10}$ , bei denen ein Schalldruckabfall von jeweils 30, 20 und 10 dB gemessen wird und dann auf eine theoretische Schalldruckabfalldauer für 60 dB hochgerechnet wird (ISO 3382-2:2008, S. 2; Ahnert/Tennhardt 2008, S. 188f; Gade 2014, S. 323; Nocke 2014, S. 92). Auch die ISO 3382-2 präferiert die Nachhallzeit für einen 20 dB-Abfall (ISO 3382-2:2008, S. 1). Die Abnahme des Schalldruckpegels in dB sollte im Idealfall linear, die des Schalldrucks in  $pa$  exponentiell geschehen (Nocke 2014, S. 90). Die Nachhallzeiten  $T$  werden berechnet über die Raumimpulsantworten, die in Oktav- oder Terzbändern gemessen werden. Sie werden somit auch in Terz- oder Oktavbändern angegeben (Nocke 2014, S. 93). Um einen einzelnen Wert für die Nachhallzeiten zu erhalten, werden lediglich die Nachhallzeiten in den Oktavbändern für 500 Hz und 1.000 Hz gemittelt (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 189). Zusätzlich kann die Nachhallzeit  $T$  aber auch ohne die Raumimpulsantwort berechnet werden. Sie ist eine Folge der Raumimpulsantwort und somit genauso abhängig von Raumvolumen  $V$  und der (äquivalenten) Absorptionsfläche  $A_{\ddot{a}q}$  (Hentschel 2008, S. 18; Werner 2009, S. 242):

$$T = 0,163 * \frac{V}{A_{\ddot{a}q}} \text{ in s}$$

Die Nachhallformel entspricht nur dann annähernd den Realbedingungen, wenn in einem Raum der Schall auch diffus genug verteilt ist (Eßner/Schäfer 2012, S. 53). Sie ist nicht wie die durch Raumimpulsantworten errechneten Nachhallzeiten frequenzabhängig. Die annähernde Formel, die Sabine Anfang des 20. Jhdt. aufstellte, kann um die Luftimpedanz  $m$  erweitert werden (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 189):

$$T = 0,163 * \frac{V}{A_{\ddot{a}q} + 4 * m * V} \text{ in s}$$

Weist ein Raum besonders viele schallabsorbierende Flächen bzw. eine sehr kurze Nachhallzeit auf, kann zur genaueren Berechnung der Nachhallzeit statt der Sabine'schen Nachhallformel jene von Eyring verwendet werden mit der Gesamtoberfläche des Raums  $S_{ges}$  als zusätzlichen Parameter (Fasold/Veres 2003, S. 140):

$$T = 0,163 * \frac{V}{-\ln(1 - \alpha_{Raum}) * S_{ges}} \text{ in s}$$

Aus der Raumimpulsantwort berechnet sich die Nachhallzeit  $T_{30}$  über die Zeitpunkte, an denen der Schalldruckpegelunterschied  $-35\text{ dB}$  und  $-5\text{ dB}$  zum normalen Schalldruckpegel ist, also einen Abfall von  $30\text{ dB}$  zeigt ( $-25\text{ dB}$  zu  $-5\text{ dB}$  bei  $T_{20}$ ) (Gade 2014, S. 323):

$$T_x = 60\text{ dB} * \frac{T_{-(x+5)} - T_{-5}}{(-5\text{ dB}) - (-(x+5)\text{ dB})}$$

Die Anforderungen in Normen für die Nachhallzeit in Räumen ist je nach Nutzung und Raumgröße verschieden. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass für Musikdarbietungen eine längere Nachhallzeit empfohlen wird als für Sprachdarbietungen und dass größere Räume längere Nachhallzeiten benötigen. Für die genauen Sollwerte der Nachhallzeit in Räumen bestimmter Größe mit bestimmtem Nutzen gibt es gewisse Grenzen, von denen die Nachhallzeit real abweichen kann, um eine „gute“ Raumakustik zu erhalten. Diese Grenzen sind wiederum je nach Frequenz und Raumnutzung anders (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 189; Werner 2009, S. 245f). Das Optimum liegt jedoch für Sprache im Bereich um  $1\text{ s}$  und für Musik im Bereich von ca.  $2\text{ s}$  (Fasold/Veres 2003, S. 136). Typischerweise wird die Just Noticeable Difference von Nachhallzeit  $T$  bei  $5 - 10\%$  angegeben, kann aber auch je nach Kontext wie Musik Werte von über  $25\%$  erreichen (Meng/Zhao/He 2006, S. 421).

### 2.3.3 Early Decay Time

Die Early Decay Time (EDT, dt. Anfangsnachhallzeit) beschreibt im Gegensatz zur Nachhallzeit  $T$  lediglich den Abfall des Schalldruckpegels im Bereich  $0\text{ dB}$  bis  $-10\text{ dB}$  nach Ende des Anregungsimpulses. Sie ist besonders im Bereich der subjektiven Akustik passgenauer zur Wahrnehmung von Akustik, die sich auch trotz gleicher Nachhallzeiten  $T_{60}$  und  $T_{30}$  verschieden anhören kann (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 188; Werner 2009, S. 256). Der Schalldruck von Geräuschen fällt meist schon nach kurzer Zeit unter den der Umgebung, sodass Hörer\*innen die volle Entwicklung des Nachhalls nicht über den gesamten Abfall von  $60\text{ dB}$  wahrnehmen können. Die Early Decay Time hilft hier, die tatsächlich hörbaren Vorgänge besser zu beschreiben. Durch die stärkere Ortsabhängigkeit der  $EDT$ , kann mit ihr jedoch weniger allgemein in einem Raum gearbeitet werden als mit der Nachhallzeit (Fasold/Veres 2003, S. 141f; Gade 2014, S. 323). Tatsächlich scheint die Länge der  $EDT$  innerhalb eines Raums in den mittleren

Frequenzen stärker zu variieren und ist vor allem auch innerhalb eines Raums asymmetrisch im Vergleich zur *EDT* bei 4.000 Hz (Foteinou/Murphy 2012, S. 4f). Für Musik wird ein Wert von ungefähr 2,2 s empfohlen (Fasold/Veres 2003, S. 136). Die Early Decay Time wird berechnet mit (Gade 2014, S. 323)

$$EDT = 6 * t_{-10}$$

und als gemittelter Wert zwischen dem Oktavband für 500 Hz und 1.000 Hz angegeben (Taghipour 2020).

#### 2.3.4 Bassverhältnis *BR*

Ebenso wie die Klarheitsmaße kann das Bassverhältnis zu geeigneter Akustik beitragen, sowohl bei Sprache als auch bei Musik. Wie auch bei Nachhallzeiten ist für Sprache ein niedrigerer Wert besser als für Musik (0,9 – 1,0 vs. 1,0 – 1,3). Das namensgebende Verhältnis besteht zwischen den Nachhallzeiten der tiefen Frequenzen zu jenen der mittleren Frequenzen (Fasold/Veres 2003, S. 138; Fasold/Veres 2003, S. 136ff; Werner 2009, S. 256):

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}}$$

Das Bassverhältnis *BR* kann zur Beschreibung der Klangfarbgebung wie z. B. Wärme durch einen Raum genutzt werden, auch wenn die Wahrnehmung von tiefen Frequenzen teilweise mehr durch das Stärkemaß und die Early Decay Time geprägt zu sein scheint. Das Gegenstück zum Bassverhältnis ist das Höhenverhältnis *TR* (Treble Ratio) (Gade 2014, S. 326):

$$TR = \frac{T_{2000Hz} + T_{4000Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}}$$

#### 2.3.5 Klarheitsmaß *C<sub>80</sub>*

Bei dem sogenannten Klarheitsmaß *C<sub>80</sub>* handelt es sich um einen Index für die Durchsichtigkeit von Musik, bei dem die eintreffende (diffuse) Schallenergie innerhalb der ersten 80 ms nach Eintreffen des Direktschalls ins Verhältnis gesetzt wird zur nach der 80-ms-Grenze eintreffenden Schallenergie:

$$C_{80} = 10 * \lg \left( \frac{\int_0^{80} p^2(t)}{\int_{80}^{\infty} p^2(t)} \right) \text{ in } dB$$

Es gilt also: je höher das Klarheitsmaß  $C_{80}$ , desto stärker sind die frühen Reflexionen im Gegensatz zu den später eintreffenden (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 198f; Gade 2014, S. 324; Werner 2008, S. 258). Das Klarheitsmaß eignet sich im Besonderen für musikalische Darbietungen mit schnellen Musikabschnitten, wobei man bei verschiedenen Epochen der Musik von jeweils anderen für die Darbietung geeigneten Klarheiten ausgeht. Sakrale Musik benötigt eine Klarheit  $C_{80}$  von lediglich  $-5 \text{ dB}$  oder höher. Die Musik der Romantik bewegt sich in einem ähnlichen Bereich mit einem Mindestwert von  $-4,6 \text{ dB}$ , wo hingegen für die Wiener Klassik ein Klarheitsmaß von mindestens  $-1,6 \text{ dB}$  empfohlen wird. Da Räume mittlerweile für gewöhnlich nicht nur die Musik einer Epoche bedienen müssen, ist allgemein ein Klarheitsmaß  $C_{80}$  empfohlen, das sich in einem Bereich zwischen  $-3 \text{ dB}$  und  $+4 \text{ dB}$  befindet (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 199). Werte im Bereich  $-1 \text{ dB}$  bis  $+3 \text{ dB}$  gelten als optimal für Orchestermusik (Fasold/Veres 2003, S. 151; Werner 2009, S. 258). Jedoch muss erwähnt werden, dass trotz dieser scheinbar großen Schwankungsbereiche in den Anforderungen lediglich erst ein Unterschied von ca.  $\pm 1,5 \text{ dB}$  tatsächlich wahrnehmbar ist, unabhängig von der Nachhallzeit im Raum und von der Art der Musik (Ahearn/Schaeffler 2009; Martellotta 2010, S. 663),  $\pm 3 \text{ dB}$  laut Ahnert/Tennhardt (2008, S. 199). Das Klarheitsmaß  $C_{80}$  ist genauso wie das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  und der Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  unabhängig von der Nachhallzeit, jedoch aber lokal abhängig, da sie sich aus der Raumimpulsantwort errechnet (Nocke 2014, S. 96f). Das Klarheitsmaß  $C_{80}$  wird gemittelt zwischen den Oktavbändern  $500 \text{ Hz}$  und  $1.000 \text{ Hz}$  (Taghipour 2020).

### 2.3.6 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

Bei dem Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  handelt es sich quasi um das Gegenstück zum Klarheitsmaß  $C_{80}$ . Es befasst sich nämlich nicht mit der Eignung eines Raums für musikalische Darbietungen, sondern gibt eine Vorhersage zur Verständlichkeit von Sprache, teilweise auch von Gesang. Während bei der Musik von Klarheit ausgegangen wird, mit der Musik-Segmente gehört werden können, wird bei der Sprache die Deutlichkeit wichtig, wie gut Wörter über den Raum hinweg an einen Empfänger weitergegeben werden. Das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  beruht auf der Annahme, dass Reflexionen, die

innerhalb der ersten 50 ms nach dem Direktschall eintreffen, den Schalleindruck verstärken. Der Schall, der nach dieser Grenze eintrifft, wird demnach eher als schädlich bzw. als störend angesehen (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 192; Hentschel 2008, S. 13). Die Deutlichkeit von Sprache bezieht sich somit auf einen kleineren zeitlichen Abschnitt als die Klarheit von Musik, in dem das diffuse Schallfeld positive Auswirkungen hat. Die Berechnung von  $C_{50}$  und  $C_{80}$  sind somit bis auf die zeitliche Grenze gleich (Werner 2009, S. 258):

$$C_{50} = 10 * \lg \left( \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ in dB}$$

Da das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  auf Energieverhältnissen beruht, kann ein Raum auch trotz ähnlicher Nachhallzeiten  $T$  sehr verschiedene Deutlichkeitsmaße haben, z. B. durch die Verwendung anderer Absorber. Dadurch zeigt sich auch, dass nicht nur die Nachhallzeit den Raumeindruck nach der Raumimpulsantwort beschreibt (Campbell/Nilsson/Stevensson 2015, S. 1638f). Generell entspricht  $C_{50}$  (genauso wie  $C_{80}$ ) der Beurteilung der Klarheit von Räumen (Miśkiewicz et al. 2012, S. 46). Es muss trotzdem auch beachtet werden, dass das Deutlichkeitsmaß mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle abnimmt (Harvie-Clark/Dobinson 2013, S. 10f).

Beim Klarheitsmaß  $C_{80}$  zeigte sich zwar auch, dass es empfohlene Obergrenzen geben kann (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 199), bei der Deutlichkeit  $C_{50}$  jedoch wird hauptsächlich von einer Untergrenze von  $C_{50} = -2 \text{ dB}$  (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 192) oder sogar  $> 0 \text{ dB}$  (Fasold/Veres 2003, S. 136) ausgegangen. Auch bei der Schwelle zur Wahrnehmung von Unterschieden hebt sich das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  mit  $\pm 2,5 \text{ dB}$  von der Wahrnehmung der Klarheit  $C_{80}$  ab (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 192). Teilweise zeigten sich in Studien die Just Noticeable Difference für  $C_{50}$  allerdings auch mit ca.  $1,1 \pm 0,1 \text{ dB}$  (Bradley/Reich/Norcross 1999, S. 107f) und  $\pm 3 \text{ dB}$  in Alltagssituationen (Bradley/Reich/Norcross 1999, S. 99). Für Angaben wird der zwischen 500 Hz und 1.000 Hz gemittelte Wert verwendet (Taghipour 2020). Bei der Betrachtung von Kirchen und ähnlichen Räumen wird das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  trotz der Untersuchung von Sprachverständlichkeit scheinbar kaum eingesetzt (Brezina 2014, S. 390).

### 2.3.7 Deutlichkeitsgrad $D_{50}$

Der Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  wurde bereits im Jahr 1953 durch den Akustiker Thiele entwickelt und steht im direkten Zusammenhang mit dem Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ , da sich das eine aus dem anderen berechnen lässt:

$$C_{50} = 10 * \lg\left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}}\right) \text{ in dB}$$

Dieser Zusammenhang besteht, da sich beide auf die Schallenergie innerhalb der ersten 50 ms beziehen, jedoch setzt der Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  diese Energie in ein Verhältnis zur gesamten Schallenergie. Auch wird  $D_{50}$  nicht wie das Klarheitsmaß  $C_{80}$  und das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  (aufgrund ihrer logarithmischen Natur) in dB angegeben, sondern in Prozent, da es sich hier um direkte Verhältnisse handelt. Der Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  wird heute, auch bedingt durch die Umwandelbarkeit zwischen den Maßen, wesentlich weniger benutzt als das Klarheitsmaß  $C_{50}$  (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 192f; Werner 2009, S. 258). Berechnen lässt sich der Deutlichkeitsgrad natürlich auch über die Impulsantwort  $g(t)$  (Hentschel 2008, S. 13; Werner 2009, S. 257):

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} * 100 \%$$

Für den Fall einer Benutzung liegt der empfohlene Deutlichkeitsgrad (entsprechend dem empfohlenen Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ ) bei  $D_{50} = 50 \%$  (Fasold/Veres 2003, S. 136; Werner 2009, S. 257). Auch die Just Noticeable Difference von  $D_{50}$  lässt sich aus dem Deutlichkeitsmaß berechnen. Allerdings ist diese nicht stabil, sondern nimmt mit ansteigendem  $C_{50}$  ab ( $JND(C_{50}) \approx 1 \text{ dB}$ ) (Bradley/Reich/Norcross 1999, S. 106).

### 2.3.8 Silbenverständlichkeit $V$

Neben dem Klarheitsmaß  $C_{50}$  gibt es noch andere Arten der Beschreibung und Indikation, die als Maße für Verständlichkeit von Sprache angesehen werden. Eine der direktesten Möglichkeiten Sprachverständlichkeit zu messen, ist die Abfrage von sogenannten Logatomen, also Silben, die nach dem Schema Konsonant-Vokal-Konsonant aufgebaut sind. Dieser Test nutzt aus, dass es zu den 200 bis 1000 benutzten Logatomen keine Sinnergänzung durch textinhaltliche Kontexte geben kann, denn auch die Logatome selbst ergeben in sich keine eigenen Wörter (bspw. „got“, „detz“, „schriz“ und

viele mehr (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 192). Gezählt wird, wie viele der Logatome (in Prozent) korrekt verstanden werden, wobei mehr als 70 % eine sehr gute, unter 35 % eine schlechte Sprachverständlichkeit bedeuten (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 191f; Fasold/Veres 2003, S. 150; Werner 2009, S. 265). Die Silbenverständlichkeit kann herangezogen werden, wenn andere Sprachverständlichkeits-Parameter wie der Speech Transmission Index überprüft werden (van Wijngaarden/Drullman 2008, S. 4517f).

### 2.3.9 Speech Transmission Index

Der Sprach-Transmissions-Index (STI) ist einer der genauesten Indizes für Sprachverständlichkeit, da er im Gegensatz zum Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  und dem im nächsten Kapitel vorgestellten  $AL_{cons}$  alle Umgebungs- und Störgeräusche mit einbeziehen kann, die zusätzlich zu den eigentlichen Signalen bei den Messpunkten ankommen, also theoretisch auch die Sprachverständlichkeit stören. Dafür benötigt der STI allerdings auch eine besondere Art der Raumakustikmessung, die nicht unter allen Umständen möglich ist. Bei einer Messung für die Erschließung des STI wird der Raum durch ein Rauschen angeregt, welches speziell für die STI-Messung moduliert wurde. Das Rauschen wird von einer Schallquelle mit der gleichen Richtcharakteristik eines sprechenden Menschen abgespielt. Aus der erhaltenen Raumantwort wird zusammen mit dem ursprünglichen Nutzsignal, dem Störsignal, der Nachhallzeit  $t$  und der Modulationsfrequenz über mehrere Schritte der STI berechnet (siehe Ahnert/Tennhardt 2008, S. 194ff; Fasold/Veres 2003, S. 151; Gade 2014, S. 327f; Werner 2009, S. 261). Die Berechnung des STI aus der Raumimpulsantwort findet mittlerweile zunehmend über Computerprogramme statt (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 196). Es ist zu beachten, dass es sich beim STI um einen positionsabhängigen Parameter handelt, dessen Werte also innerhalb eines Raums schwanken (Nocke 2014, S. 92f). Auch wird der STI meist als monauraler Parameter behandelt. Erste Versuche, ihn binaural zu gestalten, scheinen erfolgreich oder zumindest mit ähnlicher Genauigkeit wie monaurale Messungen die Sprachverständlichkeit vorherzusagen (van Wijngaarden/Drullman 2008, S. 4522). Ursprünglich nur in der niederländischen Sprache entwickelt zeigte sich, dass der STI auch in anderen Sprachen funktioniert (Anderson/Kalb 1987). Zusätzlich zum regulären Speech Transmission Index gibt es auch den zunehmend weniger gebräuchlichen RASTI (Rapid Speech Transmission Index) und den STI-PA (Speech Transmission

Index for Public Address Systems), welcher sich auf die Sprachverständlichkeit bei Lautsprechersystemen bezieht und auch in internationalen Normen zu Anlagen für Notrufabstrahlungen genutzt wird (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 195). Die genauen Angaben zum Speech Transmission Index liefert die Norm DIN EN 60286-16 [42] mit besonderem Blick auf unverstärkte Räume (Nocke 2014, S. 95).

Allgemein sollte der STI über 50 % liegen (Fasold/Veres 2003, S. 136). Die Normen DIN EN ISO 9921 und DIN EN 60268-16 [42] geben genauer an, in welchen Bereichen ein STI liegen muss, damit ein Raum „ausgezeichnet[e]“ bis „schlecht[e]“ Silbenverständlichkeit vorzeigen kann (Tab. 3) (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 195f; Gade 2014, S. 328; Nocke 2014, S. 95).

*Tabelle 3: Werte-Bereiche für den STI und deren Bedeutung für die Silbenverständlichkeit im Raum (EN ISO 9921, nach Ahnert/Tennhardt 2008, S. 196)*

| STI-Werte   | Silbenverständlichkeit |
|-------------|------------------------|
| 0,75 – 1,00 | Ausgezeichnet          |
| 0,60 – 0,75 | Gut                    |
| 0,45 – 0,60 | Angemessen             |
| 0,30 – 0,45 | Schwach                |
| 0,00 – 0,30 | Schlecht               |

Der STI zeigt eine klare Beziehung zum Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ , aus der sich eine Just Noticeable Difference von ca. 0,03 ergibt (Bradley/Reich/Norcross 1999, S. 105f):

$$STI = 0,028 * C_{50}(100 \text{ Hz}) + 0,572$$

### 2.3.10 Articulation Loss of Consonants

Ein weiteres Maß für die Sprachverständlichkeit in Räumen ist der von Peutz entwickelte Articulation Loss of Consonants ( $AL_{cons}$ ) in Prozent. Ein Vorteil dieses Sprachverständlichkeitsmaßes ist dabei die Abhängigkeit vom Abstand zwischen Schallquelle und Schallempfänger zusammen mit Schallquelle und Hallradius (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 193; Fasold/Veres 2003, S. 150f). Zur Entwicklung der Formeln wurde unter der Leitung von Peutz seit den 1950er Jahren ein Testverfahren entwickelt, der sich an jenes zur Silbenverständlichkeit anlehnt (Peutz 1971, S. 916). Es zeigte sich, dass der

$AL_{cons}$  abhängig von der Nachhallzeit  $T$ , dem Volumen  $V$  sowie der Distanz  $D$  zwischen Schallquelle und Hörer\*in ist (Peutz 1971, S. 918):

$$AL_{cons} = \left( \frac{200 * D^2 * T^2}{V} + a \right) \text{ in } \%$$

$a$  stellt hier einen je nach Hörer\*in individuellen Wert dar, der je nach Hörfähigkeit und Verständnisfähigkeit bei 1,5 % – 12,5 % liegt. Für gut Zuhörende ist der Wert konstant (Peutz 1971, S. 918). Ab einer kritischen Distanz  $D_c$  (Peutz 1971, S. 916)

$$D_c = 0,2 * \sqrt{\frac{V}{T}} \text{ in } m$$

steigt der Articulation Loss allerdings nicht, sondern bleibt gleich. Außerhalb dieser Distanz berechnet sich der  $AL_{cons}$  mit (Peutz 1971, S. 918):

$$AL_{cons} = (9 * T + a) \text{ in } \%$$

Auch hier gibt es Bereiche, die als besser oder auch als schlechter gewertet werden (Tab. 4). Allerdings ist die subjektive Wertung stark abhängig von Sprecher\*in, Hörer\*in und Komplexität der Nachricht (Peutz 1971, S. 919). Der  $AL_{cons}$  wird entweder für die Nachhallzeiten in den Oktavbereichen 1.000 Hz oder 2.000 Hz berechnet oder für einen drei-Oktaven-Bereich um 1.000 Hz herum (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 193).

*Tabelle 4: Werte-Bereiche für den  $AL_{cons}$  und deren subjektive Bewertung nach Peutz und Ahnert/Tennhardt (Peutz 1971, S. 919; Ahnert/Tennhardt 2008, S. 193)*

| Nach Ahnert/Tennhardt | Nach Peutz        | Subjektive Bewertung           |
|-----------------------|-------------------|--------------------------------|
| $\leq 3\%$            |                   | Ideale Verständlichkeit        |
| 3 ... 8%              | $< 10\%$          | Sehr gute Verständlichkeit     |
| 8 ... 11%             | 10 ... 15%        | Gute Verständlichkeit          |
| $> 11\%$              | 15 ... 25%        | Befriedigende Verständlichkeit |
| $> 20\%$              | $> 25 \dots 30\%$ | Unbrauchbare Verständlichkeit  |

Zusätzlich zum  $AL_{cons}$  beschreibt Peutz auch den Articulation Loss of Vowels  $AL_v$  (Peutz 1971, S. 918):

$$AL_v = 20 * \frac{D * T}{V} \text{ in } \%, \text{ für } D \leq D_c$$

$$AL_v = 4,5 * \sqrt{T} \text{ in } \%, \text{ für } D \geq D_c$$

Dieser  $AL_v$  ist allerdings so gering, dass er kaum Auswirkungen auf die Sprachverständlichkeit hat (Bsp.  $T = 2 \text{ s}$ :  $AL_v(D \geq D_c) \approx 6,4 \%$ ). Peutz bewertet ihn darum als sekundären Effekt (Peutz 1971, S. 918). Weder der  $AL_{cons}$  noch der  $AL_v$  sind gängige Parameter in raumakustischen Untersuchungen (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2013; Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014; Yang 2021, S. 36), können aber in bestimmten Situationen Abhilfe leisten, wenn andere Parameter der Sprachverständlichkeit wegen ihrer zusätzlichen (teils aufwendigen) Messverfahren nicht betrachtet werden können.

## 2.4 Raumakustische Anforderungen für Hörsamkeit

Die Koordinierung zwischen physikalischen Kriterien, subjektiven Kriterien und Raumgestaltung ist für die Verwirklichung von akustisch möglichst optimalen Räumen sehr wichtig. Für verschiedene Raumnutzungen gibt es deswegen entsprechende Vorschriften, Richtlinien und Normen (Ahnert/Tennhardt 20008, S. 186). Zentral ist ein Aspekt der Akustik, der als Hörsamkeit beschrieben werden kann. Dabei geht es vor allem darum, dass für verschiedene Darbietungen von Sprache und Musik bestimmte raumakustische Parameter bevorzugt werden (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 206; Werner 2009, S. 210). Hierzu ist es wichtig, Tests zu subjektiven Wahrnehmungen nach Möglichkeit durch die objektiven, physikalisch berechenbaren Parameter zu ersetzen (Werner 2009, S. 210).

### 2.4.1 Hörsamkeit nach Normen

Bereits in Kapitel 2.3 wurden vereinzelt Unterschiede in Richtlinien und Empfehlungen aufgezeigt, die nun weiter ausgeführt werden sollen. Die meisten Räume, die für Darbietungen genutzt werden, haben eine unveränderbare Raumakustik, wie etwa Hörsäle, Theater, Opernhäuser und Konzertsäle. Es gibt allerdings auch Räume mit variabler Akustik. In diesen wird durch verschiedene mechanische (und teilweise auch elektroakustische) Maßnahmen die Raumakustik möglichst an die Sprach- oder Musikdarbietung angepasst, um eine möglichst gute Hörsamkeit zu erreichen. Kleine

Veränderungen lassen sich vornehmen, ohne dass der Raumeindruck verändert wird. Allerdings ist eine merkliche Raumänderung unabdingbar ab einer Veränderung von 0,5 s in der Nachhallzeit (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 208).

Die meisten bekannten Raumarten sind raumakustisch nicht variabel. Besonders Räume, die für Sprachdarbietungen geplant sind (z. B. Hörsäle, Sprechtheater und Kongresszentren), lassen sich auf Grundlage von DIN 18041 gestalten. Diese fordert eine geringe Nachhallzeit und einen geringen Störschalldruckpegel im Raum (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 206). Je größer der Störabstand (Differenz zwischen Störschallpegel und Sprachpegel) ist, desto höhere Sprachverständlichkeit ist möglich. Ab einem Störabstand von 12 dB wird über die Sprachverstärkung keine höhere Sprachverständlichkeit als 80 % erreicht (Werner 2009, S. 265). Andere Normen und Richtlinien scheint es nur wenig zu geben, höchstens noch die VDI 2569 „Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro“ (siehe Nocke 2014, S. 131ff) (Nocke 2014, S. 107). DIN 18041 deckt allerdings bereits eine große Anzahl verschiedener Nutzungen ab (Werner 2009, S. 167). In der DIN wird zwischen zwei Gruppen unterteilt. Gruppe A schließt verschiedene Räume im Bereich Musik, Sprache, Unterricht, sowie zwei Sportstätten-Typen mit ein. Hier soll Hörsamkeit über große Strecken gegeben sein (Nocke 2014, S. 112f). Gruppe B enthält Räume, bei denen Hörsamkeit nur über geringe Distanz gegeben sein muss (Nocke 2014, S. 118). Hierzu zählen Verkaufsräume, Gaststätten, Büroräume, verschiedene öffentliche Bereiche, Werkstätten, Bibliotheksräume, medizinisch genutzte Räume und – für diese Arbeit relevant – Ausstellungsräume (Nocke 2014, S. 112).

Für die Nachhallzeit bietet DIN 18041 Formeln zur Berechnung der Nachhallzeit nach Raumtyp in der Gruppe A. Räume für Musikunterricht und kleinere Säle für Musikdarstellungen gehören zum Typ „Musik“ (Nocke 2014, S. 112) und sollten bei einem Volumen  $V = 30 \dots 1.000 \text{ m}^3$  eine Nachhallzeit besitzen von (Nocke 2014, S. 115):

$$T_{\text{Musik}} = \left( 0,45 * \log\left(\frac{V}{m^3}\right) + 0,07 \right) \text{ in } s$$

Kleine Sprach-Räume wie z. B. Klassenzimmer benötigen eine Nachhallzeit von 0,8 – 1,0 s. Die Decke und Seitenwände können hier nützliche Reflektoren sein, während besonders die Rückwand zu schädlichen Reflexionen ab einer Raumlänge von 17 m führen kann. Tiefe Frequenzen sollten durch Resonatorplatten oder Hohlböden absorbiert

werden (Fasold/Veres 2003, S. 177f). Hörsäle benötigen eine Volumenkenzahl von  $4 - 6 \text{ m}^3/\text{Person}$  und eine Nachhallzeit von  $0,9 \text{ s}$  bis  $1,2 \text{ s}$ . Für die Sprachverständlichkeit ist insbesondere auch der Direktschall wichtig, weswegen ein Hörsaal in einer entsprechend Direktschall-fördernden Form geplant werden sollte (Fasold/Veres 2003, S. 183f). Die „Unterrichts“-Räume haben bei  $V = 30 \dots 1.000 \text{ m}^3$  allerdings eine nochmal geringere Nachhallzeit und Volumen als die „Sprache“-Räume bei  $V = 300 \dots 5.000 \text{ m}^3$  (Nocke 2014, S. 115):

$$T_{\text{Unterricht}} = \left( 0,32 * \log\left(\frac{V}{\text{m}^3}\right) - 0,17 \right) \text{ in s}$$

$$T_{\text{Sprache}} = \left( 0,37 * \log\left(\frac{V}{\text{m}^3}\right) - 0,14 \right) \text{ in s}$$

Bei Sportstätten werden lange Nachhallzeiten empfohlen, die bei einem Volumen von  $V = 2.000 \dots 8.500 \text{ m}^3$  Bereiche über  $T = 0,6 \text{ s}$  abdecken (Nocke 2014, S. 116):

$$T_{\text{Sport1}} = \left( 1,27 * \log\left(\frac{V}{\text{m}^3}\right) - 2,49 \right) \text{ in s}$$

$$T_{\text{Sport2}} = \left( 0,95 * \log\left(\frac{V}{\text{m}^3}\right) - 1,74 \right) \text{ in s}$$

Die optimale Nachhallzeit (Abb. 10) hat einen gewissen Toleranzbereich, von ca. 80 – 120 % des Optimalwerts. Bei Sprache (und Unterricht) darf die Nachhallzeit vor allem in den tiefen und hohen Frequenzen auch nochmals kürzer sein, bei Musik hingegen sollte die Nachhallzeit in den tiefen Frequenzen länger als der einfache Optimalwert sein, damit eine optimale Hörsamkeit beibehalten wird (Abb. 11) (Fasold/Veres 2003, S. 138f; Nocke 2014, S. 117). Für Menschen, die besonders eine höhere Sprachverständlichkeit benötigen (Nicht-Muttersprachler\*in, Sprachverständlichkeitsstörungen, eingeschränktes Hörvermögen, Aufmerksamkeitsschwächen etc.), sollte auf eine geringere Nachhallzeit geachtet werden (siehe Nocke 2014, S. 125ff) (Nocke 2014, S. 118). Aber selbst mit der für Inklusion 2016 überarbeiteten Version der DIN 18041 wird häufig nur die Nachhallzeit bedacht; eine Betrachtung aller Parameter ist allerdings für eine tatsächlich unterstützende Raumakustik sehr wichtig (Martin/Liebl 2018, S. 274).

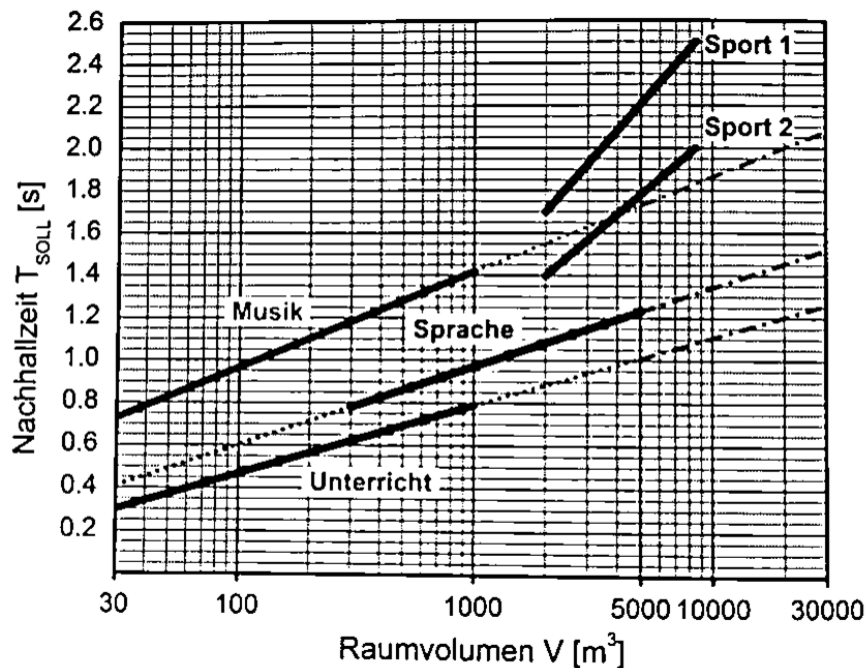


Abbildung 10: Optimale Nachhallzeiten  $T_{soll}$  in Abhängigkeit des Raumvolumens  $V$  für die Raumgruppen „Musik“, „Sprache“, „Unterricht“, „Sport 1“ und „Sport 2“ laut DIN 18041 (Nocke 2008, S. 116, Abb. 5.1)

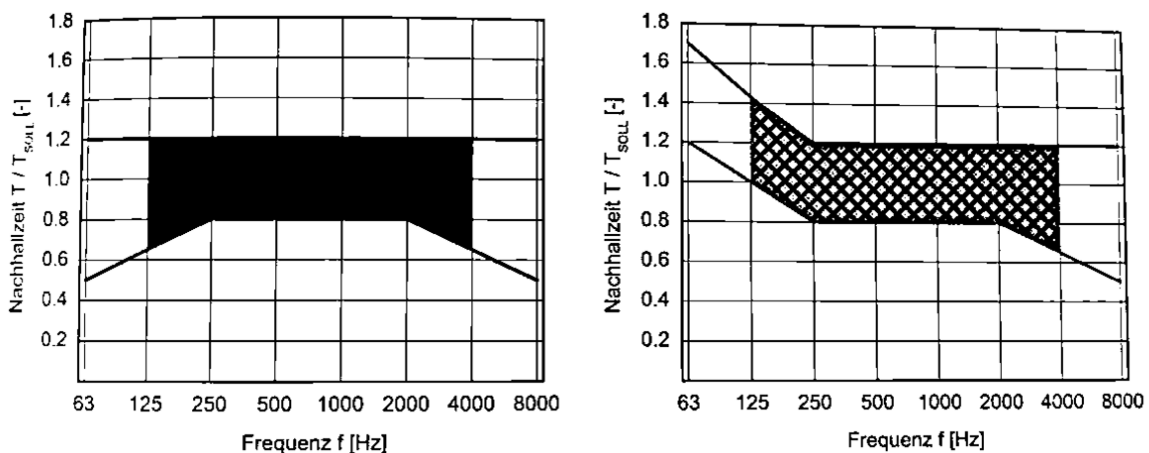


Abbildung 11: Toleranzbereiche der Nachhallzeiten  $T$  in Abhängigkeit der Frequenz für die Raumgruppen „Sprache“ (links) und „Musik“ (rechts) nach DIN 18041 (Nocke 2008, S. 117, Abb. 5.2)

Werden für die Gruppe A der DIN 18041 genaue Angaben zu den Soll-Werten der Nachhallzeit aufgestellt, gibt es für Gruppe B nur ungefähre Angaben zur Absorptionsfläche, die der allgemeinen Geräuschminderung dienen soll. Die äquivalente Absorptionsfläche  $A_{\text{äq}}$  sollte mindestens verdoppelt werden, wenn der Lautstärkepegel so um mindestens 3 dB gesenkt werden kann. Ebenso sollten zusätzliche Absorber eingesetzt werden, falls der über die gesamte Oberfläche des Raums gemittelte Absorptionsgrad

im Frequenzbereich 250 – 2.000 Hz geringer ist als  $\alpha = 0,35$  (Nocke 2014, S. 118f). Für eine Raumhöhe von  $h = 2,5\text{ m}$  kann aus Tabelle 6 der DIN 18041 die Fläche verwendeter Absorber gefächert nach Absorptionsgrad und Raumart abgelesen werden, die mit der Raumgrundfläche  $S$  multipliziert werden sollte. Für Museen, Foyers, Treppenhäuser und Flure wäre dies bspw. bei einem Absorptionsgrad von  $\alpha = 1,0$  eine Fläche von  $A_{\text{äq}} = 0,2 * S$  (Nocke 2014, S. 120).

#### 2.4.2 Hörsamkeit großer Räume

Sprechtheater sind in den Anforderungen an Volumenkenzahl und Nachhallzeit jenen von Hörsälen sehr ähnlich. Hier kommt es aber durch den wesentlich größeren Raum auch auf gezielte Reflexionslenkung an (Fasold/Veres 2003, S. 188). Die DIN 18041 muss hier im Kontext sehr großer Räume allerdings mit Vorsicht behandelt werden, da sie lediglich – ihrem Namen entsprechend – Angaben zu „kleinen bis mittelgroßen Räumen“ macht (DIN 18041). Zuletzt gab es einen Trend in der Gestaltung von Theatern, besonders solchen, die über die Funktionen einfacher Theater- und klassischer Musikdarbietungen hinausgehen, einen längeren Nachhall von bis zu 1,7 s zu verwenden, während ältere Theater Nachhallzeiten von ca. 1 s besitzen (Ahrent/Tennhardt 2008, S. 206). Eine tendenziell etwas längere Nachhallzeit mit bis zu 1,8 s haben Opernhäuser. Dies liegt an der vordergründigen Bedeutung der Musik im Gegensatz zur Sprache, die hier in den Hintergrund gerückt wird bzw. Teil der Musik ist. Durch verschiedene Anordnungen und elektroakustische Maßnahmen werden Opernräume an moderne Anforderungen angepasst (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 207). Mittlerweile kann für Opernhäuser aber eher mit einer Nachhallzeit von 1,2 s bis 1,6 s geplant werden bei einer Volumenkenzahl von  $5 - 8\text{ m}^3/\text{Person}$  (Fasold/Veres 2003, S. 194). Zwischen den Nachhallzeiten der Theater und der Opernhäuser liegen typische (moderne) Konzertsäle, die für alle Musikrichtungen verwendet werden, mit  $T = 1,2\text{ s}$  und Revuetheater mit einer maximalen Nachhallzeit  $T = 1,4\text{ s}$ , da diese meist bereits durch Lautsprecher zusätzlich beschallt werden (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 208). Sinfonische Konzertsäle sind einen großen Wandel durchlaufen und haben sich auch in der Raumform stark entwickelt. Besonders hervorzuheben sind jedoch in ihrer Hörsamkeit jene Säle, die in Schuhkasten-Form und in der 2. Hälfte des 19. Jhdt. eröffnet wurden. Mit Nachhallzeiten von 1,8 s bis 2,0 s befinden sie sich häufig im optimalen Bereich für

Musikdarbietungen und haben eine Volumenkenzahl von ca.  $10 \text{ m}^3/\text{Person}$ . Noch heute werden neue Konzertsäle mit ihnen als Vorbild gebaut (Fasold/Veres 2003, S. 197). Aber auch andere „moderne“ Bauformen wie elliptische und Weinberg-Bauten zeigen immer wieder Werte auf, die eine sehr gute Hörsamkeit andeuten (Fasold/Veres 2003, S. 202ff).

Kirchen sind wesentlich ausgefallener. Ursprünglich waren sie nicht auf gute Hörsamkeit, sondern auf Imposanz ausgelegt. Erst mit dem Aufkommen von Predigten ermöglichte die Kanzel bzw. das Kanzeldach als Reflektor eine verbesserte Sprachverständlichkeit. Nachhallzeiten über 10 s sind hier gängig und in Anbetracht der großen Hallenform von (großen) Kirchen nicht überraschend. Mit dem Aufkommen großer Glasfenster und Holzeinbauten im Barock begannen sich dort die Nachhallzeiten zu verschieben und auf ungefähr 2 – 3 s zu verringern (Fasold/Veres 2003, S. 208ff).

Die optimale Nachhallzeit richtet sich nicht nur nach dem Zweck eines Raums. Ein Raum mit zu kurzer Nachhallzeit kann schnell zu „trocken“ klingen. Zu lange Nachhallzeiten verdecken vor allem bei Sprache jedoch die nachfolgenden Silben durch den langanhaltenden Geräuschpegel. Die Akustik klingt dann „mulmig“ (Fasold/Veres 2003, S. 138ff; Werner 2009, S. 233).

*Tabelle 5: Die optimalen Werte für Sprache und Musik für die Kriterien verschiedener Höreindrücke (Fasold/Veres 2003, S. 136, Tab. 4.18)*

| Höreindruck      | Kriterium                       | Optimum           |                 |
|------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|
|                  |                                 | Sprache           | Musik           |
| Nachhallzeit     | Nachhallzeit $T$                | ca. 1 s           | ca. 2 s         |
|                  | Early Decay Time $EDT$          | –                 | ca. 2,2 s       |
|                  | Bassverhältnis $BR$             | –                 | 1,1 s bis 1,3 s |
| Durchsichtigkeit | Klarheitsmaß $C_{80}$           | –                 | –1 dB bis +3 dB |
|                  | Deutlichkeitsmaß $C_{50}$       | > 0 dB            | –               |
|                  | $AL_{cons}$                     | < 15 %            | –               |
|                  | Sprachübertragungsindex $RASTI$ | > 50 %            | –               |
| Lautstärke       | Stärkemaß $G$                   | + 1 dB bis +10 dB |                 |

## 2.5 Zusammenfassung: Kapitel 2

Für die Hörsamkeit eines Raumes, also die Anforderungen an einem Raum als akustisch gut für einen bestimmten Zweck angesehen zu werden, gibt es mehrere Parameter, nach denen sich gerichtet werden kann. Der Hintergrund der meisten dieser Parameter ist die Raumimpulsantwort. Bei dieser handelt es sich um den zeitlichen Verlauf des Schallpegelabfalls eines Raumes, der über eine breitbandige Schallquelle vollständig angeregt war und dessen Schallquelle nun abgeschaltet wird. Durch die Reflexionen an Wänden und Objekten wird Schall im Raum verteilt. Die Reflexionen verhalten sich dabei nach Gesetzen ähnlich zu denen der Optik, sodass nach diesen auch der Verlauf von „Schallstrahlen“ und somit die Raumakustik simuliert werden kann. Trifft Schall auf ein Objekt, wird nur ein Teil der Schallenergie wieder in den Raum gegeben; das wird Absorption genannt. Auch durch die Trägheit der Luft verliert Schall an Energie und somit nimmt der Schallpegel weiter ab. Die Dauer, bis der Schallpegel in einem angeregten Raum um  $60\text{ dB}$  abfällt, nennt man Nachhallzeit  $T$  und ist einer der gängigsten Indikatoren für Hörsamkeit. Je nachdem, ob ein Raum für Sprache, Musik oder einen anderen Zweck geeignet sein soll, muss die Nachhallzeit dementsprechend länger oder kürzer sein. Je kürzer die Nachhallzeit ist, desto klarer sind Schallereignisse voneinander unterscheidbar, desto verständlicher ist Sprache. Aus der Nachhallzeit lässt sich z. B. der Articulation Loss of Consonants  $AL_{cons}$  errechnen, welcher auch eine Art der Sprachverständlichkeit abbildet. Weitere Indikatoren für Sprachverständlichkeit sind der Speech Transmission Index, die Silbenverständlichkeit  $V$  und das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ . Für Musik ist hingegen das Klarheitsmaß  $C_{80}$  gängig. Besonders stark wird die Raumimpulsantwort von der Primärstruktur eines Raums (Raumgeometrie, Raummaße, Balkone und Galerien, angeschlossene Räume) beeinflusst, aber auch die Sekundärstruktur (Einrichtung, Menschen, Absorber) kann die raumakustischen Parameter nochmals verändern. Für die Hörsamkeit gibt es eigene Richtlinien und Normen, die nicht nur angeben, wie die Raumimpulsantwort zu messen ist, sondern auch, in welchen Rahmen sich Nachhallzeiten und andere Parameter für bestimmte Raumnutzungen und Raumgrößen bewegen dürfen. Die wichtigsten Normen sind im deutschsprachigen Raum die ISO 3382 „Messung von Parametern der Raumakustik“, die DIN 18041 „Hörsamkeit in Räumen“, die VDI 2569 „Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro“ und die ÖNORM B 8115-3 „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik“.

### 3 Raumakustische Bedingungen in Museen

“A museum is a not-for-profit, permanent institution in the service of society that researches, collects, conserves, interprets and exhibits tangible and intangible heritage. Open to the public, accessible and inclusive, museums foster diversity and sustainability. They operate and communicate ethically, professionally and with the participation of communities, offering varied experiences for education, enjoyment, reflection and knowledge sharing.” (International Council of Museums, 2022)

So definiert das International Council of Museums, kurz ICOM, seit 2022, was ein Museum ist. Besonders der letzte Teil „offering varied experiences for education enjoyment, reflection and knowledge sharing“ (International Council of Museums) zeigt den Umgang mit den Ausstellungen als Bildungseinrichtung, dessen Ziel auch der Wissensaustausch ist. Innerhalb des ICOM organisieren sich die Museen und Sammlungen für Musikinstrumente im International Committee for Museums and Collections of Instruments and Music (CIMCIM). Dieses erstellte 1998 einen Leitfaden, wie Wissensaustausch in Musikinstrumentensammlungen gestaltet werden kann. Führungen sollten „informative, entertaining and not over-theoretical“ (Birley et al. 1998, S. 3) sein. Je nach Gruppengröße und Art der Führung (z. B. bei Gesprächen) sollten auch individuelle Interessen der Besucher\*innen mit einbezogen werden und sie so zur Partizipation ermutigt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass durch die Verwendung möglichst vieler Sinne auch ein größerer Lernerfolg erzielt wird. So können gehörte Fakten durch eine kleinere Sammlung an Instrumenten zum Ausprobieren besser mit den physischen Musikinstrumenten verknüpft werden – und es hinterlässt einen bleibenden Eindruck vom Museumsbesuch (Birley et al. 1998, S. 3). Als Ergänzung und für die Erfahrung des angedachten Klangs von Musikinstrumenten sollten zusätzlich zur eigenständigen Entdeckung der Spielweisen auch professionelle Musiker\*innen herangezogen werden. So kann auch vertieft auf einzelne Aspekte des Klangs, der Spielweise und des Instruments selbst eingegangen werden, die Laien beim Spiel vielleicht noch nicht erreichen (Birley et al. 1998, S. 5). So ergeben sich mehrere akustische Signale, die bei der Gestaltung von Musikinstrumentensammlungen und -museen bedacht werden müssen: Sprache in Form von Führungen und Gesprächen mit Museumsführer\*innen, Musik in Form vom Ausprobieren und professionellem Spiel auf Musikinstrumenten in

einer angebrachten raumakustischen Umgebung. Im Falle von Klang-basierten Ausstellungen muss überlegt werden, welche Raumanteile sich auf die für den ausgestellten Klang optimale Akustik fokussieren und welche nach regulären Vorgaben und Empfehlungen für Museen gestaltet werden sollen (Patel 2019, S. 230).

### 3.1 Hörsamkeit in Museen

Museen wurden lange Zeit als Ort der Stille angesehen, in denen allein und in Ruhe Exponate betrachtet werden konnten. Dies liegt auch an der nötigen Hörbarkeit der inneren Stimme beim Lesen von Texten und Erklärungen (Bubaris 2014, S. 391f; D’Orazio/Montoschi/Garai 2020, S. 1; Bem et al. 2025, S. 1097). Durch die verschiedenen architektonischen Hintergründe von Museen ergeben sich allerdings unterschiedliche Varietäten in der Raumakustik und Hörsamkeit; die Besucher\*innen stehen bei modernen Gebäuden wesentlich mehr im Vordergrund, bei historischen Gebäuden – meistens Sammlungen von Adel und dementsprechend in Burgen, Schlössern und gehobenen Häusern - im Hintergrund. Durch Absorber an Decken wird die Akustik ggf. an Ausstellungszwecke angepasst. Sprachverständlichkeit ist besonders für die Funktionalität von Alarm-Lautsprecher-Systemen zu beachten. (Patel 2019, S. 228ff). Die Gestaltung von Klang im Museum wird allerdings vermehrt nicht nur auf die Funktionalität von Lautsprecher-Systemen bezogen, sondern gilt genauso als Bedingung für Erfolge von Ausstellungen wie andere Teile des Raumeindrucks auch. Je nach Art der Gestaltung von Raum und Klang kann es zu Schwierigkeiten kommen (Everrett 2019, S. 313). Die offene Gestaltung von Räumen z. B. führt zur Übertragung von störenden Geräuschen aus anliegenden Ausstellungsräumen (siehe Kapitel 2.2.1) (Patel 2019, S. 228).

Richtwerte für Museen im Generellen finden sich in bestehenden Normen und Vorgaben. Innerhalb der DIN 18041 werden Museen zur Gruppe B gezählt (Nocke 2014, S. 112). Sie benötigen demnach Hörsamkeit in geringerem Abstand zur Schallquelle als in Räumen der Gruppe A (Nocke 2014, S. 118). Nach DIN 18041 muss die Schallabsorptionsfläche im Raum bei einer durchschnittlichen Raumhöhe von 2,5 m und einem Schallabsorptionsgrad  $\alpha_w = 1,0$  das 0,2-fache der Grundfläche betragen, bzw. das 0,4-fache bei  $\alpha_w = 0,5$  oder das 1,0-fache bei  $\alpha_w = 0,2$  (Tab. 6) (Nocke 2014, S. 119f).

*Tabelle 6: Multiplikator für Grundflächen zum Erhalt der empfohlenen Absorberflächen bei einer Raumhöhe  $h = 2,5$  m und einem bewerteten Absorptionsgrad  $\alpha_w$  des Absorbers (DIN 18041 nach Nocke 2014, S. 120, Tab. 5.2)*

| Multiplikator | $\alpha_w$ |
|---------------|------------|
| 0,2           | 1,00       |
| 0,2           | 0,95       |
| 0,2           | 0,90       |
| 0,2           | 0,85       |
| 0,3           | 0,80       |
| 0,3           | 0,75       |
| 0,3           | 0,70       |
| 0,3           | 0,65       |
| 0,3           | 0,60       |
| 0,4           | 0,55       |
| 0,4           | 0,50       |
| 0,4           | 0,45       |
| 0,5           | 0,40       |
| 0,6           | 0,35       |
| 0,7           | 0,30       |
| 0,8           | 0,25       |
| 1,0           | 0,20       |

Zusätzlich macht die VDI 2081, Blatt 1 „Geräuscherzeugung und Lärmminderung in Raumluft-technischen Anlagen“ neben Angaben zum Schallpegel der Lüftungsanlagen auch Empfehlungen zur Nachhallzeit  $T$ . Es wird festgestellt, dass die Nachhallzeit auch hier einen wichtigen Beitrag leistet. Museen werden zu „Räumen mit Publikumsverkehr“ gezählt (Nocke 2014, S. 149). Ihre mittlere Nachhallzeit sollte  $T = 1,0$  s betragen (VDI 2081, Blatt 1 nach Nocke 2014, S. 149).

Auch eine Untersuchung von Carvalho, Garcia und Gonçalves zieht die Nachhallzeit  $T$  als wichtigen Punkt der akustischen Umgebung mit ein, zusammen mit dem RASTI des Raums (siehe Kapitel 2.3.9). Der akustischen Umgebung steht die Geräuschkulisse mit Parametern der Geräuschpegeldifferenzen an Fassaden ( $D_{2m,nT,w}$ ), der Lautstärkepegel des HVAC (Klimatisierungssystems) ( $L_{Aeq}$ ) und des Trittschallpegels ( $L'_{nT,w}$ ) gegenüber. Diese fünf Parameter sollen einen „Index für die akustische Qualität in Museen“ (IAQM) ergeben. Sie ergeben sich aus der in zwei Museen durchgeführten Umfrage zur Akustik und Geräuschkulisse und den Präferenzen beim Museumsbesuch (wichtig hier: 75% der Umfrage-Teilnehmenden bevorzugten Stille während ihres Besuchs). Die Parameter fließen normalisiert, verschieden anteilig in den Index mit ein, sodass am Ende ein Wert zwischen 0 (schlechteste) und 20 (beste akustische Qualität) für Bewertungen bereitsteht (Tab. 7) (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014, S. 1-7):

$$IAQM = 0,4 * RT + 0,2 * RASTI + 0,1 * L_{Aeq(HVAC)} + 0,2 * L'_{nT,w} + 0,1 * D_{2m,nT,w}$$

*Tabelle 7: Bewertungen der IAQM-Wertebereiche (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014, S. 6)*

| terrible | very bad | bad   | poor   | fair    | good    | very good | excellent |
|----------|----------|-------|--------|---------|---------|-----------|-----------|
| 0 – 3    | 3 – 5    | 5 – 7 | 7 – 10 | 10 – 13 | 13 – 15 | 15 – 17   | 17 – 20   |

Im Vergleich des IAQM mit den Ergebnissen der eigenen Umfrage fanden sich allerdings auch Diskrepanzen in der Bewertung der Museumsräume. Diese werden von den Autoren der Studie auf fehlende Messdaten zurückgeführt (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014, S. 7-8). Aus den Tabellen zu den normierten Werten lassen sich auch die dementsprechenden idealen Werte nach Carvalho et al. ablesen. Wie auch in VDI 2081 liegt für den IAQM die ideale Nachhallzeit für Museen bei  $1,0 - 1,2\text{ s}$  (befriedigend:  $0,6 - 2,6\text{ s}$ ), der ideale RASTI-Wert liegt bei  $0,60 - 0,65$  (befriedigend:  $0,45 - 0,75$ ) (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014, S. 6). Auch Carvalho et al. argumentieren, dass die Sprachverständlichkeit in Museen für Museumsführungen wichtig ist (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014, S. 1). Der Hintergrundgeräuschpegel (HVAC) liegt im besten Fall unterhalb von  $25\text{ dB}$  oder zumindest unter  $45\text{ dB}$  für eine befriedigende akustische Umgebung. Trittschall sollte unter  $45\text{ dB}$  (befriedigend:  $< 55\text{ dB}$ ) liegen und die Fasadenschallpegeldifferenz bei mindestens  $43\text{ dB}$  (befriedigend:  $\geq 33\text{ dB}$ ) (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014, S. 6). Diese Werte für befriedigende akustische Umgebungen decken sich auch mit denen, die die Autoren ein Jahr zuvor aufgestellt haben. Lediglich die Nachhallzeit wurde kleiner gefasst ( $0,8 - 1,4\text{ s}$ ) mit dem Hinweis, dass Besucher\*innen bei größeren Räumen längere Nachhallzeiten erwarten (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2013, S. 3). Der Hintergrundgeräuschpegel steigt allerdings zusätzlich durch die steigende Besucher\*innen-Zahl im Raum, wodurch die Hörsamkeit abnimmt und schließlich eine Museumsfatigue einsetzt. Es kann von einer Differenz von  $+6\text{ dB}$  bei doppelter Anzahl und  $-6\text{ dB}$  bei Verdopplung der äquivalenten Absorptionsfläche ausgegangen werden (D’Orazio/Montoschi/Garai 2020, S. 2). Mehr Besucher\*innen in einem Raum führen auch zum Lombard-Effekt, nach dem Menschen lauter sprechen, wenn sie in einer geräuschvollen Umgebung (z. B. durch Gespräche anderer) sind und dies sich immer weiter steigert. Nicht nur in Cafés und Kantinen, sondern auch in Kultureinrichtungen führt dies zusammen mit der Akustik zu schlechten Voraussetzungen für Menschen mit Hörschwierigkeiten (Rindel 2015, S. 2429f). Eine ähnliche Fatigue für Informationsaufnahmen geschieht auch bei Klassenräumen (Fry 2014, S. 14). Durch einen gesteuerten Besuchendenfluss und durch den Einsatz (höherer) Vitrinen können die menschengemachten Störgeräusche aber gebrochen oder geringgehalten werden (D’Orazio/Montoschi/Garai 2020, S. 9).

### 3.2 Soundscape und Klang in Museen

Nicht nur an die Nachhallzeiten sind Erwartungen gebunden (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2013, S. 3), auch die allgemeine Klanggestaltung bzw. die Soundscape in einem Museum hat einen Erwartungswert. Dieser scheint besonders groß, wenn gleichzeitig Besucher\*innen besonders wichtig ist, dass räumliche und akustische Umgebung (Sound-scape) zusammenpassen (Orhan/Yilmazer 2021, S. 6). Akustische bzw. Geräuschumgebungen können sich bei geringem Lautstärkepegel positiv auf das Ambiente in einem Museum auswirken, teilweise sogar immersiv. Laute Geräusche hingegen wirken störend, sogar in manchen Fällen vertreibend (Orhan/Yilmazer 2021, S. 7). Eine Untersuchung von Orhan und Yilmazer zeigte, dass sich sowohl Eindruck als auch Erwartung durch die architektonische Umgebung auf der einen und die akustische Umgebung auf der anderen Seite ergeben. Kommt es nun zwischen Erwartungen und Eindrücken zur Diskrepanz, erzeugt das bei Besucher\*innen von Museen negativere Reaktionen und sie verlieren Interesse und ihre Neugierde an dem ausgestellten Thema (Orhan/Yilmazer 2021, S. 8ff). Auffällig ist, dass Stille als Erwartung und Gediegenheit in Museen meistens eher an jene gebunden sind, die Kunst als Hochkultur oder eine institutionalisierte Sichtweise von Kultur darstellen. Mehr und mehr werden Museen aber interpretationsoffener und gleichzeitig offener gegenüber Interaktionen und Geräuschen. Klang wird zur Verstärkung der kulturellen Erfahrungen mit in Ausstellungen eingebaut (Bubaris 2014, S. 392f). Darum ist es besonders wichtig, das Sound Design (inkl. Raumakustik, Hintergrundgeräusche, Hintergrundmusik, Interaktivelemente etc.) in Einklang mit Ausstellungsinhalt und Ausstellungsraum zu bringen (Everett 2019, S. 314), da dieses auch zur besseren Aufnahmefähigkeit in Ausstellungen führen kann (Bem et al. 2025, S. 1098).

Bei der Betrachtung des Zusammenspiels aus Ausstellungsdesign und Sound Design kann die Methodik der Filmmusikforschung herangezogen werden. Geräusche der Umgebung und der Ausstellungsstücke können als diegetisch angesehen werden, da sie zeitabhängig sind. Im Gegensatz dazu sind Sprache und Musik, die unabhängig vom Zeitfenster des Besuchs sind, Teil des Nicht-Diegetischen (Bubaris 2014, S. 394; Everett 2019, S. 314). Jedoch ist zu empfehlen, dass die Museumsforschung eigene Methoden zur Untersuchung von Klängen, Musik und Geräuschkulissen erarbeitet und in der Praxis sogar als zentrales Element sieht (Everett 2019, S. 315). Everett fordert in einem

Beitrag Museumskurator\*innen dazu auf, bereits zu Beginn des Planungsprozesses sich klare Gedanken zu Geräusch und Klang in einer Ausstellung zu machen, genauso wie auch andere Elemente und Themen gesetzt und geordnet werden. Danach sollte auch in allen weiteren Phasen der Planung das Sound Design miterarbeitet werden. Von einem unveränderten Anfangsbeschluss oder gar kurzfristigen Plänen erst zum Schluss hin wird abgeraten (Everett 2019, S. 317ff). Ein Beispiel hierfür wäre die Planung des Narrativs einer Ausstellung. Dieses wird durch Audio-Guides und (außenstehende) Erklärungen über die Ausstellung umrahmt (nicht-diegetisch) und gleichzeitig von innen aus der Ausstellung heraus mit Videos und Aufnahmen begleitet. Hintergrundmusik, die die Geschichte einer Ausstellung miterzählt, kann auch genutzt werden, um die Ausstellung einzuteilen (Bubaris 2014, S. 394f). Die entstandene Soundscape verstärkt so durch das Hervorheben einer weiteren sensorischen Ebene Narrativ- und Ausstellungseindrücke (Bem et al. 2025, S. 1098). Der narrative Aspekt von Musik entsteht zum einen durch Crossmodal Correspondences, wenn Wahrnehmungen über soziale und kulturelle Konstruktionen miteinander verknüpft werden. Zum anderen ist natürlich auch die Identität, die auf Musik gelegt wird, ein Narrativ. Das Narrativ der Musik kann dazu dienen, das auch zurückwirkend ihre Identität von den Interpret\*innen und Rezipient\*innen aufgenommen wird. Die Nutzung von Musik in Museen bedeutet in diesem Fall, dass Museen Identitäten prägen und definieren (Wyatt 2014, S. 268ff). Musik kann so auch zum weiteren Nachdenken über präsentierte Kulturen anregen (Wyatt 2014, S. 272ff).

Häufig wird bei der Gestaltung eines Museums zunächst von der inneren Stimme als wichtigster „Klang“ für Besucher\*innen ausgegangen und erst bei der Ausstellungsplanung wird der Klang zentraler. Die klare Einbindung von Sounddesign und gezielt narrativer Raumakustik in die Architektur kann ebenfalls einen erzählenden Effekt haben (Bubaris 2014, S. 396f). Wird die Raumakustik vernachlässigt und nur auf mehr diegetischen Klang gesetzt, kann dies auch durch unbedachte Störungen zur Museumsfatigue führen (Fry 2002, S. 14; Bem et al. 2025, S. 1097). Besonders bei Ausstellungen mit vielen solcher Geräusche muss die Raumakustik gegensteuern, sodass der Gesprächspegel nicht erst durch die Interaktivelemente und später durch sich selbst höher getrieben wird (Fry 2002, S. 14f). Dies sollte beachtet werden, auch wenn bei Museen mit vielen interaktiven Exponaten das Präsentieren der Interaktivität, der Beweglichkeit, der Hörbarkeit erstmal wünschenswert und lockend erscheint (Fry 2002, S.

16). Einfache Beispiele der Regulierung sind die Isolierung der Klangelemente von möglichen Resonatoren, oder auch Absorber in der Nähe von Klangelementen und Lautsprechern, die womöglich einen breiten Abstrahlungsgrad haben. Die Absorber dienen der Begrenzung der Abstrahlung auf den Bereich der Besucher\*innen, die vor dem Exponat stehen. Auch bei einer Installation von zum Boden gerichteten Lautsprechern über den Besucher\*innen müssen die in den Raum strahlenden Reflexionen durch Schallabsorption am Boden gelenkt werden. Für die allgemeine raumakustische Gestaltung durch Absorber – besonders bei Museen in bereits bestehenden Räumen – bieten sich die gängigen Praktiken an, wobei immer auch auf eine ästhetische Einheit mit der Ausstellung geachtet werden sollte (Fry 2002, S. 15ff). Alternativ kann eine Soundscape so gestaltet werden, dass unerwünschte Geräusche überdeckt werden (Bem et al. 2025, S. 1098). Um zu überprüfen, ob bestimmte Soundscapes in Museen besser geeignet sind für Masking von Geräuschen ohne die Besucher\*innen wiederum abzulenken, stellten Bem et al. 23 Teilnehmende in virtuelle Ausstellungsräume mit verschiedenen Masking-Soundscapes mithilfe eines Panorama-Screen-Systems: (1) Es wurde keine zusätzliche Soundscape abgespielt, sodass nur die Projektorlüftungen des Screen-Systems zu hören waren; (2) es wurden reale Aufnahmen aus den projizierten Ausstellungsräumen abgespielt; (3) ein gängiger Sound-Masker in Form von Rauschen mit abgeschwächten Höhen und Tiefen wurde genutzt; (4) eine Geräuschkulisse wurde abgespielt, bei der zusätzlich zur realen Aufnahme auch zur Ausstellung passende Soundscapes aus verschiedenen Sound-Libraries (von Musik bis Vogelgeräuschen) als Geräusch-Maskierung abgespielt wurden. Die Versuchspersonen mussten auf einer Likert-Skala angeben, wie kongruent, ablenkend/fokussierend, zielführend die Soundscapes bzgl. der Immersion und der Auseinandersetzung mit der Kunst waren und schließlich welches sie präferierten (Bem et al. 2025, S. 1099ff). Während das konventionelle Masking (3), kein extra Sound (1) und die originale Soundscape (2) eher mittelmäßig kongruent und neutral bis ablenkend wirkten, zeigte besonders die auf die Ausstellung abgestimmte Soundscape (4) positive Kongruenz und war fokussierend. Es war auch die einzige Soundscape, die klar Immersion und Auseinandersetzung zu fördern schien. Insgesamt präferierten mehr als die Hälfte der Teilnehmenden die abgestimmte Soundscape und ein Fünftel die Stille. Die realen Aufnahmen wurden wegen der Geräusche anderer Besucher\*innen präferiert. Andere Teilnehmende bevorzugten jedoch aus genau diesem Grund eine Form des Maskings (konventionell oder Sound-

scape) (Bem et al. 2025, S. 1101ff). Dies zeigt, dass eine Abstimmung von Soundscape und Ausstellung, wie von Bubaris (2014) erklärt, die Erfahrung von Kultur in Museen weiter vertiefen und verstärken kann und somit Störgeräusche weniger ablenkend sein können. Aber auch eine eingespielte Soundscape und Hintergrundmusik benötigen geeignete raumakustische Bedingungen.

### 3.3 Fallstudien

In manchen Museen wie dem Met Breuer in New York oder dem High Museum of Art in Atlanta, Georgia, sind besonders die Decken mit großen, regelmäßigen Strukturen effektiv. Eigentlich als Diffusoren für Licht und als Versteck der Decken-Konstruktionen gedacht, erfüllen sie auch einen Zweck als Schall-Diffusoren. Im Fall des Met Breuer hilft hier auch die Beton-Struktur von Boden und Wänden (Patel 2019, S. 233f). Kisten-Strukturen, wie es sie im Met Breuer gibt, finden sich auch in der Erweiterung des St. Louis Art Museum. Hier werden die Innenräume dieser Strukturen so mit Absorbern verkleidet, dass sie auch Licht strategisch im Raum verteilen (Patel 2019, S. 236). Deckenabsorber sind auch in schlichter Weise im New Museum of Contemporary Art in New York hinter den Deckengerüsten und im Los Angeles County Museum of Art vertikal hängend über einer Schall durchlassenden und Licht diffundierenden Zwischendecke verbaut (Patel 2019, S. 231f).

Besonders durchdacht sind die Räume des SFMOMA, des San Francisco Museum of Modern Art. Hier wurde nicht nur in den Ausstellungsräumen – durch 10 cm dicke Absorber, schallisolierende Böden und Wände auf die Präsentation auch von Video- und Klang-Installationen ausgelegt – raumakustische Konzepte mit eingearbeitet. Die Ausstellungsräume nutzen hierfür speziell geformte Deckenelemente, die mit ihrer Bogenform Licht und Schall streuen. Die lauterer Areale wie Eingang und Ticketbereich wurden so mit Absorbern ausgestattet, dass trotz Menschenmengen der Schallpegel nicht zu stark ansteigt. Zwischen den Ausstellungsräumen bewegt man sich über Treppen. Werden diese normalerweise in der raumakustischen Planung vernachlässigt, wurden hier Echos und Reflexionen so positioniert, dass auch das Treppensteigen eine Klangerfahrung darstellt. Zusätzlich zu Standard-Ausstellungsräumen verfügt das SFMOMA auch über zwei Theater. Das White Box Theatre ist auf Performance-Kunst ausgelegt. Das Whattis-Theater hingegen wurde bei Renovierungen mit einer elektronisch

steuerbaren, variablen Akustik ausgestattet, um sich den verschiedenen Aufführungsarten anzupassen (Patel 2019, S. 238ff).

Eines der ältesten Beispiele für Nutzung akustischer Elemente ist das Londoner Science Museum, dessen Vorgänger seit der Eröffnung 1857 mehr und mehr akustische Ausstellungsstücke aus Musik (z. B. Harmonien und Concertinas) und Akustik (z. B. Apparate von Helmholtz und Edisons originalen Zinnfolien-Phonographie) beinhaltete. In der Zwischenkriegszeit wurde die Sammlung neu nach Klangproduktion, Geräuschkontrolle, Klangaufnahme, akustischen Messungen und nach Anwendung von Akustik in der Industrie sortiert. Diese Aufstellung ermöglichte eine gezieltere Akquise neuer Ausstellungsstücke (Rich 2017, „Sound at the Science Museum“). Besonders die Demonstration neuester Grammophon-Technologie störte dann allerdings den damaligen ruhigen Museumsbesuch, sodass die Vorführungen notfalls sogar unterbrochen werden mussten. Die lange Nachhallzeit der Museumsräume verstärkte den Störeffekt. Als Lösung wurden die Grammophonvorführungen bis zu ihrem Ende in den 1950er Jahren in einen separaten, vom restlichen Museum akustisch getrennten Hörsaal verlegt. Aber auch spätere Versuche akustische Exponate auszustellen wurden besonders von den Museumsmitarbeitern als störend und gegen die Museumsatmosphäre gerichtet empfunden (Rich 2017, „A gramophone demonstration“). 1960 wurden Radio-Audioguides eingeführt, die das Hören von Musikinstrumenten in Vitrinen ermöglichten, allerdings wurden die Guides bereits 4 Jahre nach Einführung wieder entfernt (Rich 2017, „The Radio-Guided Tour“). Erst bei einer Sonderausstellung im Jahr 1977 wurde Klang wieder im größeren Stil in das Museum eingearbeitet. Die Ausstellung befasste sich mit 100 Jahren Geschichte der Klangaufnahme und des Abspielens, wobei Rezensionen der Ausstellung die akustische Ebene (Kommentare des Ausstellungs-Assistenten) größtenteils vernachlässigten. Eine spätere „Talking Machines Gallery“ wurde bald gegen eine Optik-Ausstellung ausgetauscht (Rich 2017, „The Trumpet Shall Sound“). Der Einbezug von Klang in eine technisch-musikalische Ausstellung nahm also bereits vor hundert Jahren ihren Lauf – wenn auch dies nur langsam in der Gesellschaft und der Museumskultur Anklang fand. Aber auch in seinen Anfängen fanden sich schon Probleme und Lösungen in Form von und für Klänge als Störgeräusche und schlechten akustischen Bedingungen.

Eines der ältesten Museen für Musikinstrumente ist die Cité de la Musique in Paris. Das Museum geht ursprünglich auf eine Sammlung des Pariser Konservatoriums zurück, wurde Mitte des 19. Jahrhunderts dann weiterentwickelt und schließlich in den 1980ern an seinen jetzigen Ort verlegt. 1997 wurde es dort eröffnet und zeigte sich offen, den Besucher\*innen Musik vorzuführen, die dank Sensoren abgespielt wurde, sobald ein Raum betreten wurde. Zwar wurde dieses System später durch moderne Audio-Guides abgelöst mit der Möglichkeit mehrere Audiobeispiele pro Raum abzuspielen, allerdings blieb auch weiterhin ein raumbundener Beitrag erhalten: Jeden Tag wurde ein anderer Raum der Ausstellung von einem professionellen Musiker bespielt. Aber auch andere akustisch-musikalische Möglichkeiten wurden genutzt, von durchgehender Ambiente-Musik bis hin zu Listening-Rooms. Gleichzeitig schien immer auch der Wunsch nach Interaktion zwischen Besucher\*innen und der Ausstellung zu bestehen (de Visscher 2014, S. 239).

Die Sammlung Musik des Stadtmuseums München zeigt ein klares Narrativ in der Ausstellung mit dem Besucher\*innen auch interagieren zu können. In den 1960er Jahren wurde die Ausstellung noch nach der (veralteten) Kulturkreislehre und der Hornborsstel-Sachs-Systematik mit einem Blick von Afrika mit ersten Instrumenten hin zu Europa als „Hochkultur“ sortiert. Bei einer Neugestaltung der Sammlung wurde dann 2012 ein neues Narrativ gewählt. Von bayrischen Musikinstrumenten aus geht es von einer Einführung zu Grundlagen der Klangerzeugung und -gestaltung über kulturelle Aspekte des Klangs zum Instrumentenbau. Die Ausstellung schließt ab mit einer auf den vorherigen Teilen aufbauenden Erklärung zum gemeinsamen Spiel und zu Ensembles (Varsányi 2014, S. 297). In den einzelnen Ausstellungsabschnitten wurden interaktive Klangelemente eingebaut als Teil der Neukonzeption als „Soundlab“. Das Lithophon von Carl Orff dient als Schnittstelle zwischen dem Bayern-Teil und den außereuropäischen Musikinstrumenten. An einem beweglichen Xylophon-Holz kann ausprobiert werden, wie verschiedene Resonanzkörper klingen. Weitere akustische Exponate sind eine Schlitztrommel als Beispiel für Musik als Kommunikation, eine Steel-Drum, eine bronzene Kesseltrommel aus Myanmar, Stampfröhren, die das Zusammenspiel bei Gamelan-Musik verdeutlicht, ein Kin und eine Medienstation, um verschiedene Musikinstrumente der Sammlung oder auch die *Carmina Burana* von Carl Orff anzuhören (Varsányi 2014, S. 298ff). Alle diese Ausstellungsstücke wurden in Kooperation mit einem experimentellen Komponisten und einem Instrumentenbauer entwickelt

(Varsányi 2014, S. 298). Die Interaktivität der Ausstellung, die Möglichkeit selbst Musik auszuprobieren und auch „professionelle“ Klänge zu hören, entspricht den von der CIMCIM empfohlenen Möglichkeiten, Besucher\*innen eine Musik-Ausstellung näher zu bringen (1998). Das *Soundlab* soll noch weiterentwickelt werden mit einem größeren Fokus auf Klangentstehung und Klangwahrnehmung mit Ausstellungsstücken zu Echos, Chordophonen und Aerophonen (Varsányi 2014, S. 305ff). Fraglich ist, inwieweit auch mit Raumakustik in der Ausstellung gearbeitet wird oder ob sie in den Räumen angepasst wurde, um die Musikinstrumente verschiedener Kulturen ggf. auch in ihrer „ursprünglichen“ Raumakustik zu präsentieren.

Ein Ausstellungsstück, welches keinen Klang in den Raum abgibt, sondern Schall absorbiert, ist das *Myx*-Segel von Jonas Edvard, der mit Mycel als Werkstoff arbeitet. Das Segel bzw. die 24 einzelnen Myzel-Decken hingen als Bogen in einer Fläche von 3 m mal 4 m an der Decke einer der Räume der Ausstellung „The Future is present“ des Danish Design Museums. Edvard prüfte zuvor in einer Studie an der TU Berlin die schallabsorbierenden Eigenschaften von Myzel-Materialien. Das Myzel-Segel verringert die Nachhallzeit in dem Ausstellungsraum von  $T_{30} = 3,52 \text{ s}$  auf  $T_{30} = 2,83 \text{ s}$ . Besonders gut wirkt das Segel jedoch in den hohen Frequenzen mit  $\alpha = 0,9$  ab 1.600 Hz. Auch verbesserte das Segel die Sprachverständlichkeit im gesamten Raum, nicht nur in dem Teil, über dem es hing (Dwan/Edvard Nielsen/Wurm 2024).

### 3.4 Zusammenfassung: Kapitel 3

Für Museen speziell gibt es nur wenig Angaben in Normen und Richtlinien. Generell wird aber eine Nachhallzeit  $T = 1,0 \dots 1,2 \text{ s}$  als empfehlenswert angesehen. Andere Teile der Raumakustik, die die akustische Qualität von Museen beeinflussen können, sind die Sprachverständlichkeit, die Lautstärke des Belüftungssystems und der Geräuschpegelunterschied an den Museumsfassaden. Bei einer geeigneten Akustik eines Museums sollte aber nicht nur auf Normen geachtet werden, sondern auf die Ausstellung und das Narrativ des Museums, da eine besondere Raumakustik ebenfalls eine Rolle in der Erzählung einer Ausstellung spielen kann. Zusammen mit der Gestaltung von Soundscapes durch Hintergrundmusik und interaktive, akustische Exponate können Museumserlebnisse verstärkt und ein besserer Bezug zwischen Ausstellung und Besucher\*in hergestellt werden. Dabei wird in modernen Museumsgestaltungen immer häufiger mit der Stille als Gepflogenheit konzeptionell gebrochen. Auch in Ausstellungen und Museen über Musikinstrumente werden im Gegensatz zu ihren Anfängen von vor über 100 Jahren mehr Hands-On-Exponate benutzt, die durch die Besucher\*innen zum Klingen gebracht werden können und die Ausstellungsräume auf zuvor unbeachtete Art und Weise beanspruchen.

## 4 Raumakustische Messungen

In vier Ausstellungen für Musikinstrumente wurden die Raumimpulsantworten gemessen. Nach einer Vorstellung des jeweiligen Museums, der Ausstellungsräume und der Situation während der Messung werden die raumakustischen Werte der Räume beschrieben und in den Kontext von Richtlinien und Empfehlungen gesetzt. Der  $AL_{cons}$  – berechnet mithilfe der Nachhallzeit – wurde hier dem STI als Indikator für die Sprachverständlichkeit vorgezogen, da nur die Raumimpulsantwort gemessen wurde, auch wenn die Nutzung des  $AL_{cons}$  in Akustik-Messungen unüblich ist (Carvalho/Garcia/Gonçalves 2013; Carvalho/Garcia/Gonçalves 2014; Yang 2021, S. 36). Es wurde jeweils die Distanz zwischen Schallquelle und Hörer\*in ausgerechnet, bei der von einer befriedigenden Sprachverständlichkeit ausgegangen werden kann, und der  $AL_{cons}$  bei einer Entfernung von 2,5 m, um auch speziell die Bedingungen für Museumsguides betrachten zu können.

### 4.1 Technisches Museum Wien

#### 4.1.1 Hintergrund

Das Gebäude des Technischen Museums Wien wurde ab 1909 gebaut und 1913 fertig gestellt. Eröffnet wurde das Museum schließlich 1918 als „Technisches Museum für Industrie und Gewerbe“. Das Museum war Mitte der 1990er für mehrere Jahre geschlossen, in denen die Kuppel des Gebäudes angehoben wurde und in dem entstandenen vergrößerten Innenraum auf mehreren Ebenen Rundgänge als Ausstellungsräume installiert wurden („Technisches Museum (Gebäude)“ 2025). Das Technische Museum Wien bietet auf vier Ebenen Einblicke in vielfältige Bereiche der Technik, von Materialien über Energie und Lokomotiven bis hin zu Technik im Alltag. Auf der vierten Ebene des Gebäudes wird in der „Music Lounge“ über elektronische Musik allgemein und elektronische Musik in Österreich informiert (Technisches Museum Wien [1], [2]). Ebenso gibt es dort den Ausstellungsbereich „Musikinstrumente“, der sich mit den verschiedenen Bauarten von Klavieren und ihren Vorgängern beschäftigt, mit Musikautomaten, Orgeln, Geigenbau und anderen historischen Objekten des Musikinstrumentenbaus. Die Ausstellung „Musikinstrumente“ befindet sich größtenteils in einem vom großen Kuppelraum des Museums abgetrennten Raum (Technisches Museum Wien [3]).

#### 4.1.2 Beschreibung des Museumsraums

Der abgetrennte Raum der Ausstellung „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien lässt sich durch zwei Glastüren am jeweiligen Ende der langen Wand zum restlichen Museumsgebäude hin betreten. Der Raum hat eine quaderförmige Grundform, die beiden Ecken der Gebäudeaußenwände sind jedoch abgerundet (Abb. 12). An der Außenwand befinden sich fünf große Fenster. Der Ausstellungsraum hat eine Nische in das Museumsgebäude hinein, wo sich die „Geigenwerkstatt“ befindet (Abb. 14), und einen direkt angeschlossenen Raum für die Wiedergabe audiovisueller Medien. Dies ist der einzige Raum, der mit Absorbern verschiedener Art ausgestattet ist, sowohl an Wänden als auch an der Decke. Zwischen dem Medien-Raum und dem restlichen Ausstellungsraum befindet sich eine Glaswand mit im regulären Museumsbetrieb geöffneter Tür. Der eigentliche Ausstellungsraum hat verputzte Wände, Parkettboden und eine verputzte Decke mit Belüftungsanlage und mehreren Querbalken. In dem gesamten Raum einschließlich der Nische sind Vitrinen und größere Musikinstrumente, hauptsächlich Klaviere und eine Orgel, positioniert (Abb. 13).

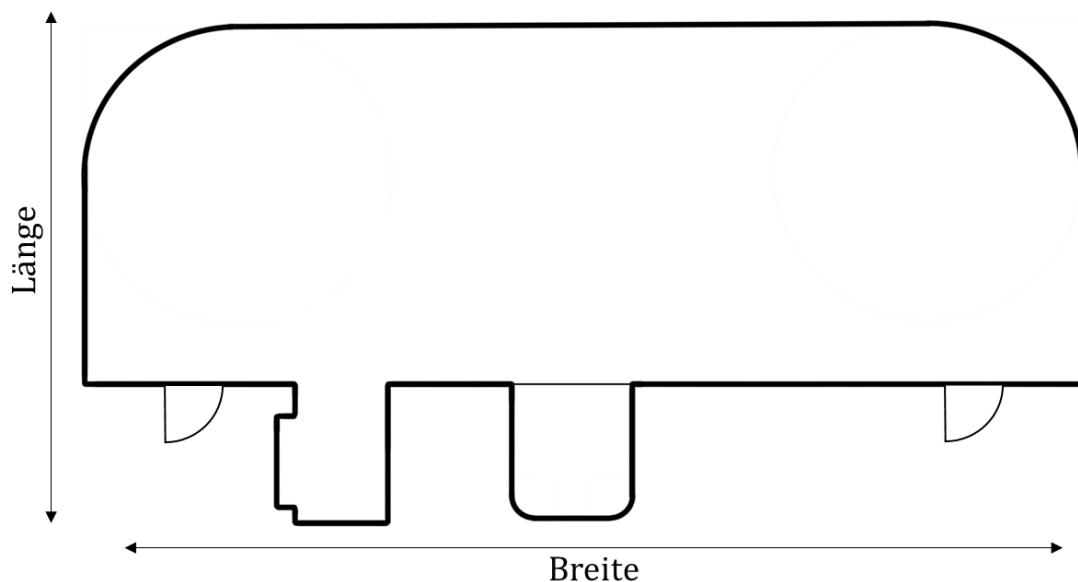


Abbildung 12: Grundriss des Ausstellungsraums „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien



*Abbildung 13: Ausstellungsraum "Musikinstrumente" des Technischen Museums Wien vom Medienraum nach rechts blickend*



*Abbildung 14: Nische mit "Geigenwerkstatt" in der Ausstellung "Musikinstrumente" des Technischen Museums Wien*



*Abbildung 15: Orgel-Funktionsmodelle des Technischen Museums Wien*

Innerhalb der Ausstellung „Musikinstrumente“ gibt es mehrere Ausstellungsstücke, mit denen die Besucher\*innen interagieren können. In einem Teil des Raums werden verschiedene Tasteninstrumente gezeigt, von Cembalo bis Flügel. Neben mehreren dieser Tasteninstrumente werden einzelne Tasten mit der jeweilig zugehörigen Tastenmechanik präsentiert, die auch angeschlagen werden können. Beim Anschlag des einzelnen Tons kann so beobachtet werden, was sich beim Spielen im Inneren des Instruments wie bewegt. Ein ähnliches Ausstellungsstück befindet sich auch am anderen Ende des Raums, hier zum Thema Orgel. Drei verschiedene Orgel-Mechaniken werden vorgestellt und können mit wenigen Tönen angespielt werden (Abb. 15). Zuletzt gibt es noch eine interaktive Darstellung eines Sonagramms. Ein Mikrofon, welches in der Mitte des Raums von der Decke hängt, nimmt durchgehend die Geräusche in dem Ausstellungsraum auf. Diese Aufnahme wird in Echtzeit auf ihre Frequenzanteile analysiert. Das sich damit ergebende Sonagramm wird auf eine Leinwand projiziert, die sich direkt vor dem mittleren Fenster befindet. Auch die anderen beiden Interaktiv-Exponate werden mit aufgenommen und erscheinen mit ihren Spektren auf der Leinwand, wenn sie laut genug angespielt werden.

Die Volumina der Musikinstrumente und Vitrinen wurde aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Größe – und schwer abnehmbaren Maße im Falle der Musikinstrumente – bei der Berechnung des Gesamtvolumens vernachlässigt (Tab. 18).

*Tabelle 8: Maße, Grundfläche und Volumen des Ausstellungsraums „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien*

### **Hauptraum**

|                        |         |
|------------------------|---------|
| Höhe                   | 4,87 m  |
| Länge                  | 12,24 m |
| Breite                 | 33,86 m |
| Radius der Abrundungen | 6,28 m  |

### **Nische**

|        |        |
|--------|--------|
| Höhe   | 4,87 m |
| Länge  | 4,72 m |
| Breite | 3,07 m |

### **Ausbuchtung in Nische**

|        |        |
|--------|--------|
| Höhe   | 2,50 m |
| Länge  | 3,04 m |
| Breite | 0,63 m |

### **Medienraum**

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Höhe                   | 4,19 m |
| Länge                  | 4,53 m |
| Breite                 | 3,99 m |
| Radius der Abrundungen | 0,86 m |

### **Gesamter Ausstellungsraum**

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| Grundfläche | 429,73 m <sup>2</sup>   |
| Volumen     | 2.077,23 m <sup>3</sup> |

#### 4.1.3 Messsituation

Die Messung des Ausstellungsraums fand am 4. Dezember 2024 vor Öffnung des Museums zwischen 7:30 Uhr und 9:00 Uhr statt. Dies garantierte, dass die Messung nicht von Museumsbesuchern unterbrochen wurde und die Messung nicht den regulären Museumsbetrieb störte. Während der Messung befand sich nur eine Person in regulärer Kleidung im Raum. Die Temperatur des Raums wird konstant bei 20 – 24 °C und die Luftfeuchtigkeit über 45 % gehalten, um die historischen Instrumente bestmöglich zu erhalten.

#### 4.1.4 Verwendete Messgeräte

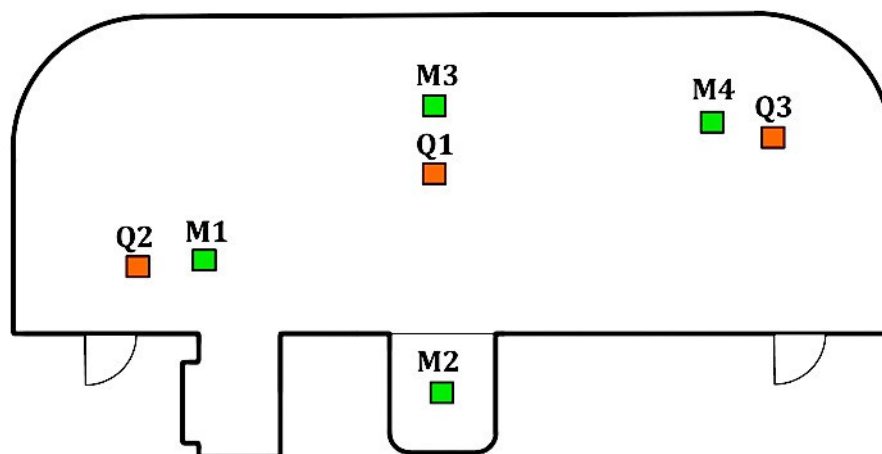
Als Impuls für die Anregung des Raums wurden handelsübliche Luftballons gewählt, die mit einer Nadel zerplatzt wurden. Damit bleibt die Impulsschallquelle gleich mit den Messungen in Museen außerhalb Wiens, bei denen die Transportmöglichkeiten für Lautsprecher eingeschränkt waren.

*Tabelle 9: Auflistung der bei der Messung im Technischen Museum Wien verwendeten Messgeräte*

|                     |                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| Messmikrofone       | Esper K4                                            |
| Impulsschallquellen | Zerplatzen handelsüblicher Luftballons              |
| USB-Audiointerface  | Behringer U-Phoria UMC-22                           |
| Aufnahme-Software   | Audacity v. 2.4.1                                   |
| Analyse-Software    | Aurora Plug-In für Audacity (Campanini/Farina 2009) |

#### 4.1.5 Messpfade im Raum

Um die Bedingungen einer präzisen Messung nach ISO 3382-2 zu erfüllen, wurden im Raum vier Positionen für die Messmikrofone und drei Positionen für Schallquellen ausgewählt. Jeweils ein Mikrofon und eine Schallquelle im Abstand von 1 m waren positioniert bei dem interaktiven Orgelexponat (M1, Q2), bei dem Sonagramm in der Mitte des Raums (M3, Q1) und bei den interaktiven Tasteninstrument-Mechaniken (M4, Q3). Das Messmikrofon M2 wurde in die Mitte des Medienraums gestellt (Abb. 16).



*Abbildung 16: Positionen der Messmikrofone und Impulsschallquellen für die Messung im Ausstellungsraum „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien; rot: Quellpositionen, grün: Messpositionen*

#### 4.1.6 Messung

Für die Messung wurden die Messsysteme auf  $96\text{ dB} - 12\text{ dB}$  fullscale eingepegelt. Die Mikrofone wurden jeweils auf eine Höhe von  $1,5\text{ m}$  eingestellt. Es wurden immer die Messpositionen 1 und 2 und die Messpositionen 3 und 4 zusammen gemessen. An jeder Quellposition wurden für die Messungen drei Luftballons als Impulsschallquelle zerplatzt, sodass an jeder Messposition jeweils drei Impulse von jeder Quellposition aufgenommen wurden. Die aufgenommenen Impulsantworten wurden anschließend in der auch für die Aufnahme verwendeten Software *Audacity* Version 2.4.1 mithilfe des „Aurora“-Plug-Ins (Campanini/Farina 2009) ausgewertet.

#### 4.1.7 Messergebnisse

##### 4.1.7.1 Impulsantworten

Die aufgezeichneten Raumimpulsantworten zeigten keine besonderen Auffälligkeiten (Abb. 17 und 18).

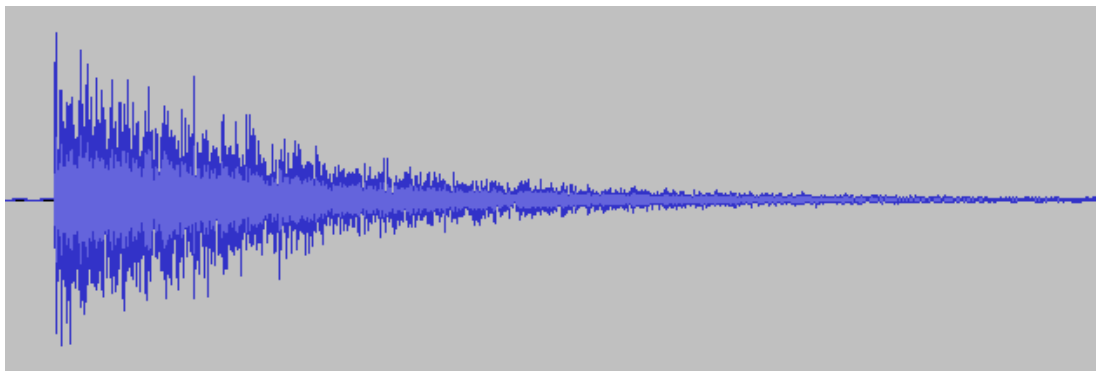


Abbildung 17: Raumimpulsantwort des Ausstellungsraums „Musikinstrumente“ im Technischen Museum Wien in Linear-Darstellung (Quellposition 1, Messposition 1); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude

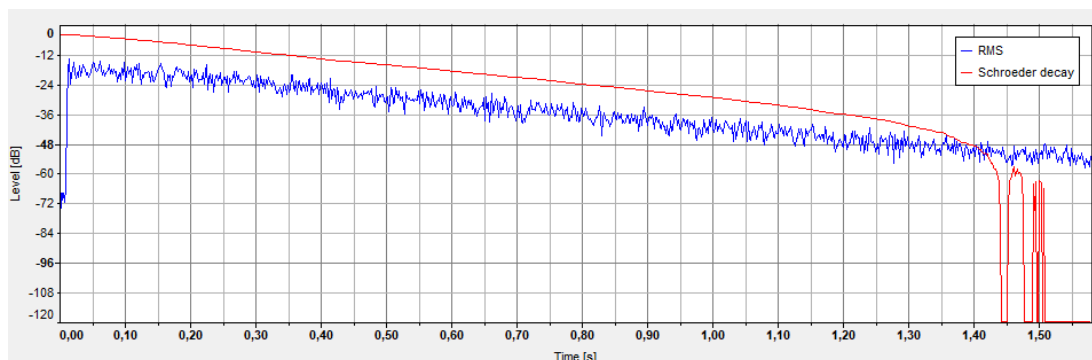


Abbildung 18: Raumimpulsantwort des Ausstellungsraums „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien in ETC-Darstellung (Quellposition 1, Messposition 1)

#### 4.1.7.2 Nachhallzeit

Die Messergebnisse der Nachhallzeiten  $T_{20}$  in den Oktavbändern mit den Mittelfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz und 4.000 Hz werden im Folgenden als Mittelwert aus allen Messungen sowohl in Tabellenform als auch als Graph dargestellt (Tab. 10 und Abb. 19).

Tabelle 10: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für den Ausstellungsraum „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien

| $T_{20}$ bei | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | $T_{\text{mid}}$ [s] |
|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------------|
|              | 2,21   | 2,19   | 2,42   | 2,48  | 2,42  | 1,93  | 2,45                 |

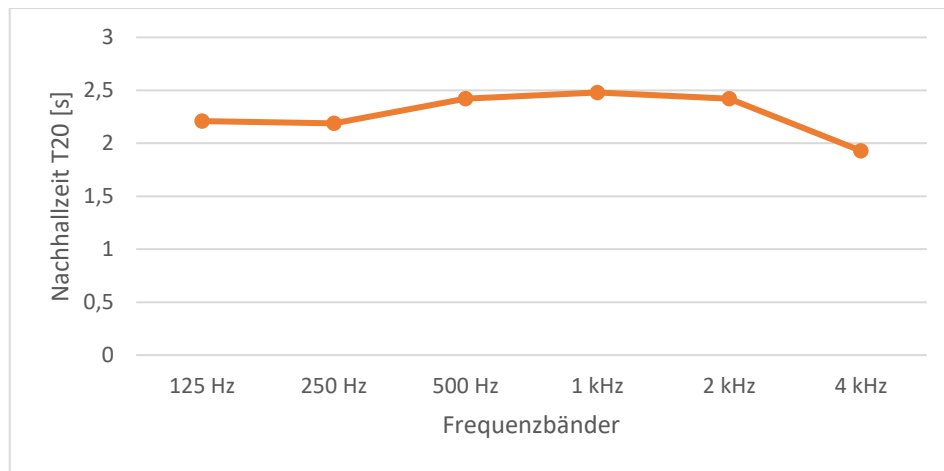


Abbildung 19: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für den Ausstellungsraum „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien

Es ist davon auszugehen, dass die Nachhallzeit im regulären Museumsbetrieb nur wenig geringer ist, da sich mehr Personen im Ausstellungsraum befinden. Für eine Gruppengröße von zehn Personen im Raum ergibt sich nach Umstellungen der Sabine'schen Nachhallformel zu

$$T_{\text{besetzt}} = 0,163 * \frac{V}{0,163 * \frac{V}{T_{\text{unbesetzt}}} + \alpha * \text{Personenzahl}} \text{ in s}$$

eine Nachhallzeit von  $T_{10 \text{ Personen}} = 2,41 \text{ s}$ . Der Unterschied zum leeren Raum ist demnach nicht bemerkbar.

#### 4.1.7.3 *Early Decay Time*

Die Early Decay Time beträgt gemittelt  $EDT = 2,31$  s. Über den Raum verteilt bewegt sich die Early Decay Time zwischen 2,15 s und 2,43 s.

#### 4.1.7.4 *Bassverhältnis BR*

Das Bassverhältnis der Nachhallzeiten im Ausstellungsraum „Musikinstrumente“ des Technischen Museums Wien beträgt  $BR = 0,90$ .

#### 4.1.7.5 *Theoretisches Stärkemaß $G_{theo}$*

$$G_{theo} = 45 \text{ dB} + 10 * \lg\left(\frac{T}{V}\right) \text{ dB}$$

Aus der Formel für das theoretische Stärkemaß lässt sich für den Ausstellungsraum mit einer mittleren Nachhallzeit  $T_{mid} = 2,45$  s und einem Raumvolumen  $V = 2.077,23 \text{ m}^3$  ein Wert von  $G_{theo} = +15,72 \text{ dB}$  berechnen.

#### 4.1.7.6 *Klarheitsmaß $C_{80}$*

Das Klarheitsmaß  $C_{80}$  beträgt über den gesamten Ausstellungsraum gemittelt  $C_{80} = -1,78 \text{ dB}$ .

#### 4.1.7.7 *Deutlichkeitsmaß $C_{50}$*

Das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  beträgt über den gesamten Ausstellungsraum gemittelt  $C_{50} = -4,24 \text{ dB}$ .

#### 4.1.7.8 *Articulation Loss of Consonants $AL_{cons}$*

Für die Berechnung eines Bereichs akzeptabler Sprachverständlichkeit kann ein  $AL_{cons}$  von 15% herangezogen werden. Dieser Wert ist nach Peutz (1971) die Grenze zwischen guter und befriedigender Verständlichkeit und liegt nach Ahnert und Tennhardt (2008, S: 193) im letzteren Bereich. Mit der umgestellten Formel

$$D = \sqrt{\frac{AL_{cons} * V}{200 * T^2}} \text{ in } m$$

ergibt sich für einen  $AL_{cons} = 15 \%$  im Ausstellungsraum eine Distanz von  $\sim 5 \text{ m}$ . Für eine Distanz von  $2,5 \text{ m}$  errechnet sich ein  $AL_{cons} \approx 3,6 \%$ .

#### 4.1.8 Beurteilung der Messergebnisse

Mit einer Nachhallzeit  $T_{mid} = 2,45 \text{ s}$  liegt der Wert deutlich über dem in VDI 2081 für Museen empfohlenen Wert von  $T = 1,0 \text{ s}$  (VDI 2081, Blatt 1 nach Nocke 2014, S. 149). Bei einem Raum mit einem Volumen von  $2077,23 \text{ m}^3$  betragen die optimalen Nachhallzeiten für Sprache  $T_{Sprache} = 1,09 \text{ s}$ , für Unterricht  $T_{Unterricht} = 0,89 \text{ s}$  und für Musik  $T_{Musik} = 1,72 \text{ s}$ . Die Nachhallzeit des Ausstellungsraums des Technischen Museums Wien ist mehr als doppelt so hoch wie die ersten beiden Optimal-Werte. Auch für den Bereich Musik wird die maximale Grenze ( $1,2 * T_{Musik} = 2,064 \text{ s}$ ) immer noch deutlich überschritten. Mit einem Bassverhältnis von  $BR = 0,90$  liegt der Raum eher im Bereich für Sprache. Das Klarheitsmaß  $C_{80}$  hingegen bewegt sich vollkommen im Rahmen der Anforderungen für Musik der Romantik und nur leicht unter der Mindestanforderung für Musik der Wiener Klassik und für Musik allgemein (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 199 und S. 258; Fasold/Veres 2003, S. 151). Das Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  andererseits liegt deutlich unter der Mindestanforderung für Sprache. Für Museumsführungen scheint die Sprachverständlichkeit sehr gut zu sein. Für kleine Gruppen, die lediglich in einem Radius von  $2,5 \text{ m}$  um den Museumsguide herum stehen, deutet sich eine sehr gute Sprachverständlichkeit an, und auch bei weiter entfernt stehenden Besucher\*innen, sollten Informationen zufriedenstellend ankommen. Mit einem theoretischen Stärkemaß von mehr als  $+15 \text{ dB}$  ist der Ausstellungsraum zwar sehr laut, dies passt allerdings auch zum historischen Charakter des Gebäudes und auch des Raums im Vergleich zu den restlichen Museumsbereichen.

## 4.2 Deutsches Museum, München

### 4.2.1 Hintergrund

Das Deutsche Museum wurde im Jahr 1903 in München gegründet und war in den ersten Jahren in verschiedenen anderen Museumsgebäuden untergebracht. Das Gebäude, welches sich auf der Isarinsel befindet, wurde ab 1906 gebaut und schließlich – verzögert durch den ersten Weltkrieg und die Inflation – im Jahr 1925 eröffnet. Weitere bereits geplante Gebäudeteile wurden erst während der NS-Zeit fertiggestellt und von den Nazis für Kundgebungen und Ausstellungen zum Zweck der Propaganda genutzt. Während des zweiten Weltkrieges wurden große Teile des Gebäudes und auch Ausstellungsstücke durch Bomben beschädigt. Erst im Jahr 1965 war die Ausstellungsfläche der Vorkriegszeit wieder hergestellt worden (Deutsches Museum [2]). Seit 2015 werden die Ausstellungen und die Ausstellungsräume modernisiert. Die Arbeiten sollen 2028 fertig sein, der erste Abschnitt des Museums wurde aber bereits 2022 wiedereröffnet (Deutsches Museum [3]). Das Museum beherbergt mehrere Themenbereiche rund um Technik und Naturwissenschaften, die wiederum in mehrere kleinere Ausstellungen eingeteilt sind. Themen des Museums in München sind „Mensch und Umwelt“, „Kommunikation Information Medien“, „Verkehr Mobilität Transport“, „Werkstoffe Energie Produktion“, eine Dauerausstellung zum Deutschen Zukunftspreis und der mit den meisten Ausstellungen im Museum vertretene Themenbereich „Naturwissenschaften“. Zu letzterem Thema wird innerhalb der Museumsordnung auch die Ausstellung „Musikinstrumente“ gezählt (Deutsches Museum [1]).

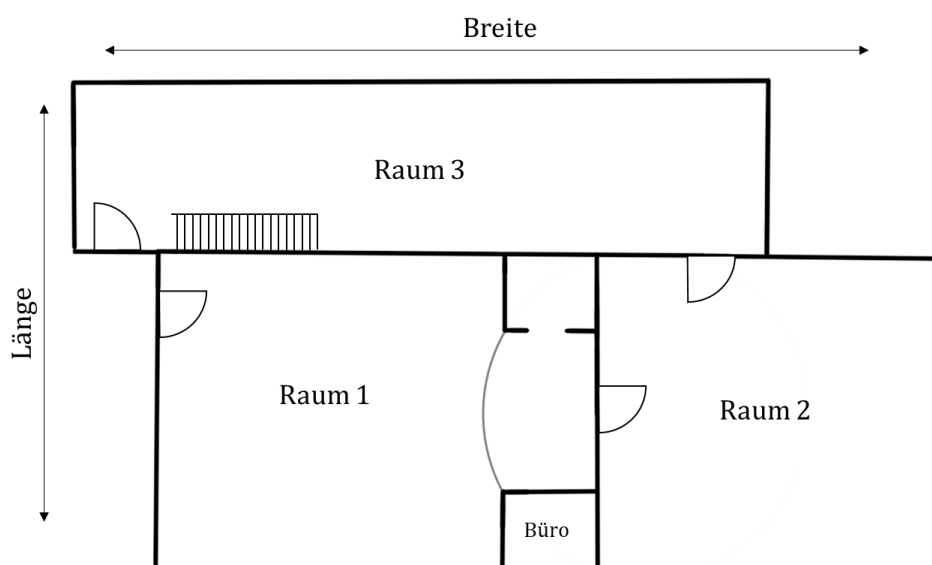


Abbildung 20: Grundriss der Ausstellung „Musikinstrumente“ im Deutschen Museum, München

#### 4.2.2 Beschreibung des Museumsraums

Die Ausstellung „Musikinstrumente“ des Deutschen Museums, München, ist auf drei Räume aufgeteilt, die als Teil des ersten Modernisierungsabschnitts 2022 neu eröffnet wurden (Abb. 20).

Raum 1 wird auch Musiksaal genannt. Der Raum hat eine gewölbte Decke mit Stuck und einen Balkon, auf dem eine Orgel steht. Unter dem Balkon befindet sich in der Mitte der Durchgang zum nächsten Raum, an der Seite zum einen das Büro, dessen Glastür im regulären Betrieb geschlossen ist, und auf der anderen Seite ein kleiner offener Raum mit einer zwei Wände bedeckenden Vitrine (Abb. 21). In der Mitte des Raums befindet sich ein niedriges, kreisförmiges Podest, auf dem mehrere Tasteninstrumente ausgestellt sind (Abb. 22). Des Weiteren befinden sich im Raum zwei weitere Orgeln und gegenüber vom Balkon ein Medientisch mit digitalen Demonstrationen zu Saitenanregung, Klangfarbe und Stimmungssystemen, einem Monochord und einem Orgelfunktionsmodell (Abb. 23). Letzteres stellt allerdings im Gegensatz zu jenem im Technischen Museum Wien nicht die verschiedenen Antriebe dar, sondern die Mechaniken hinter den Tasten und Registern. Den Namen bekommt der Saal unter anderem von seiner – mit Veranstaltungen im Blick – auf Musik ausgelegten Akustik, auf die während der Modernisierung geachtet wurde. Die Planung hierfür führte die Firma Möhler + Partner Ingenieure AG durch (Dietze/Schreier 2022).



*Abbildung 21: Raum 1 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, mit Blick auf den Balkon und die Tür zu Raum 2 darunter*



*Abbildung 22: Raum 1 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, mit Blick auf des Podest, den Media-Tisch und zwei Orgeln*

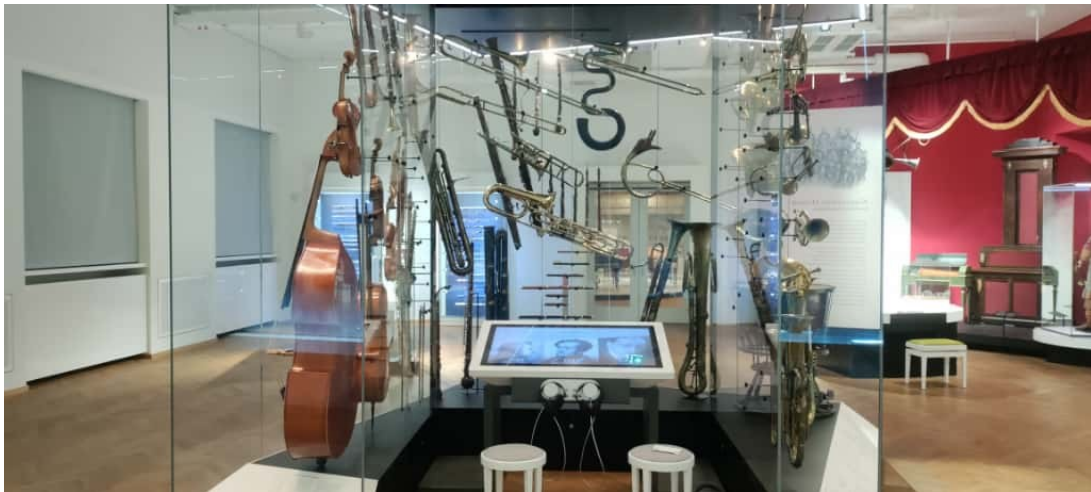


*Abbildung 23: Media-Tisch mit Orgel-Funktionsmodell in Raum 1 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München*

Raum 2 ist in der Grundform quadratischer als Raum 1. Die Decke des Raums ist im Gegensatz zum Musiksaal flach und beherbergt das Lüftungssystem. In einer Ecke ist ein Podest mit einem kleinen, nach oben gerafften Vorhang und einem runden Medientisch, an dem sich auch ein elektrisches Glockenspiel und ein Funktionsmodell für Chladni'sche Figuren befinden (Abb. 24). In der Mitte des Raums befindet sich der „Orchester-Kubus“, eine U-förmige, fast deckenhohe Vitrine mit verschiedenen Orchesterinstrumenten. In der Mitte des U ist ein Tisch zur Wiedergabe von Informationsfilmen über Kopfhörer (Abb. 25). In der schräg gegenüberliegenden Ecke des Podests mit Vorhang, hinter dem Orchester-Kubus, befindet sich eine Vitrine mit handgroßen Löchern, sodass die in der Vitrine befindliche Harfe angezupft werden kann. In den anderen beiden Ecken befindet sich ein Flügel und ein Tisch mit angebauter Info-Wand.



*Abbildung 24: "Bühne" und Medien-Tisch mit Hands-On-Exponaten in Raum 2 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München*



*Abbildung 25: Orchester-Cube in Raum 2 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München*

Durch Raum 2 gelangt man in Raum 3, welcher der länglichste der drei Räume ist. Auch er ist in schlichter Quaderform gehalten mit einem Belüftungssystem an der Decke. Die Ausstellung in Raum 3 bildet einen Zick-Zack-Gang, bei dem der Fokus auf elektronische Musik liegt (Abb. 26 und 27). Gleichmäßig auf die Raumlänge verteilt gibt es ein Hands-On-Ausstellungsstück: ein Theremin, ein Trautonium-Manual und ein Funktionsmodell modularer Synthesizer. Entlang der Ausstellung gibt es Wände, sodass der Gang wie zwischen aufgeschnittenen Räumen entlangführt. Hinten im Raum ist ein freier Bereich, in dem auch eine Treppe hinunter in das Lager der Sammlung führt (Abb. 28). Unten an der Treppe, vor der Tür zum Archiv, befindet sich ein Absatz.



*Abbildung 26: Ausstellungsgang in Raum 3 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, mit dem Theremin in der Mitte*



*Abbildung 27: Raum 3 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, aus der Mitte des Raums*



*Abbildung 28: Freier Raum neben der Treppe in Raum 3 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München*

*Tabelle 11: Maße, Grundflächen und Volumina der Räume der Ausstellung „Musikinstrumente“  
im Deutschen Museum, München*

### **Raum 1 (Musiksaal)**

|                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Höhe (Rand)                 | 4,77 m                  |
| Höhe (Mitte)                | 7,33 m                  |
| Balkon-Höhe                 | 3,30 m                  |
| Balkon-Tiefe                | 4,30 m                  |
| Länge                       | 13,18 m                 |
| Breite                      | 19,50 m                 |
| Länge (Räume unter Balkon)  | 3,19 m                  |
| Breite (Räume unter Balkon) | 4,33 m                  |
| Grundfläche                 | 240,67 m <sup>2</sup>   |
| Volumen                     | 1.354,53 m <sup>3</sup> |

### **Raum 2**

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| Höhe        | 4,96 m                  |
| Länge       | 13,20 m                 |
| Breite      | 15,35 m                 |
| Grundfläche | 202,62 m <sup>2</sup>   |
| Volumen     | 1.005,00 m <sup>3</sup> |

### **Raum 3**

|                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Höhe                               | 4,60 m                  |
| Länge                              | 6,80 m                  |
| Breite                             | 31,6 m                  |
| Tiefe (Treppe)                     | 6,0 m                   |
| Länge (Treppe, vertikal zur Tiefe) | 5,0 m                   |
| Breite (Treppe)                    | 1,2 m                   |
| Höhe (Treppenabsatz)               | 2,5 m                   |
| Länge (Treppenabsatz)              | 2,5 m                   |
| Breite (Treppenabsatz)             | 1,2 m                   |
| Grundfläche                        | 214,88 m <sup>2</sup>   |
| Volumen                            | 1.013,91 m <sup>3</sup> |

Für die Akustikmessung im Rahmen der Modernisierung wurde für den Musiksaal ein Volumen von  $1.302,45 \text{ m}^3$  errechnet (Tab. 11); dies liegt vermutlich an einem möglichen Ausschluss des Balkonraums und der Berechnung mit einer durchschnittlichen Raumhöhe (Dietze/Schreier 2022, S. 11).

#### 4.2.3 Messsituation

Die Messung fand am 6. Februar 2025 zwischen 16:30 Uhr und 19:30 Uhr nach Schließung des Museums statt. Während der Messung befand sich eine Person im Raum. Die Raumtemperatur wird konstant auf eine Luftfeuchtigkeit von  $50 \pm 5 \%$  gehalten. Die Temperatur wurde zum Zeitpunkt der Messung auf  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  geschätzt.

#### 4.2.4 Verwendete Messgeräte

Bei der Messung im Deutschen Museum und den darauffolgenden Messungen wurden aufgrund der Verfügbarkeit andere Messmikrofone und Audio-Interfaces benutzt. Als Impulsschallquelle dienen weiterhin handelsübliche Luftballons und auch Aufnahme- und Analyse-Software bleiben gleich.

*Tabelle 12: Auflistung der bei der Messung im Deutschen Museum, München verwendeten Messgeräte*

|                     |                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| Messmikrofone       | Behringer ECM-8000                                  |
| Impulsschallquellen | Zerplatzen handelsüblicher Luftballons              |
| USB-Audiointerface  | Universal Audio Volt 2                              |
| Aufnahme-Software   | Audacity v. 2.4.1                                   |
| Analyse-Software    | Aurora Plug-In für Audacity von Prof. Angelo Farina |

#### 4.2.5 Messpfade im Raum

Wie auch bei der Messung im Technischen Museum Wien wurden in jedem Raum drei Quellpositionen und vier Messpositionen verwendet (Abb. 29).

Die Quellpositionen 1.1 und 1.2 im Musiksaal wurden jeweils direkt neben dem Orgelfunktionsmodell und dem Monochord gestellt. Eine Messposition in diesem Raum befindet sich unter dem Balkon, eine in der Ausstellungsniische daneben. In Raum 2 befindet sich Quellposition 2.2 neben dem Chladni-Modell und Quellposition 2.3 an der

spielbaren Harfe. Messposition 2.4 befindet sich im Orchester-Kubus. In Raum 3 befinden sich die Quellpositionen 3.1, 3.2 und 3.3 am Theremin, am Trautonium-Modul und am Synthesizer-Modell. Die Messpositionen wurden möglichst in die Nähe von Hands-On-Exponaten oder möglichen Positionen von Besucher\*innen formiert.



Abbildung 29: Positionen der Impulsschallquellen und der Messmikrofone für die Messung in der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München; rot: Quellpositionen, grün: Messpositionen

#### 4.2.6 Messung

Auch für diese Messung wurden die Messsysteme auf  $96\text{ dB} - 12\text{ dB}$  fullscale eingepegelt und jeweils zwei Messpositionen auf einmal aufgenommen. Die Mikrofone wurden jeweils auf eine Höhe von  $1,6\text{ m}$  eingestellt. An jeder Quellposition wurden für die Messungen drei Luftballons als Impulsschallquelle zerplatzt, sodass an jeder Messposition jeweils drei Impulse von jeder Quellposition aufgenommen wurden. Die aufgenommenen Impulsantworten wurden anschließend in der auch für die Aufnahme verwendeten Software *Audacity* Version 2.4.1 mithilfe des „Aurora“-Plug-Ins (Campaini/Farina 2009) ausgewertet.

#### 4.2.7 Messergebnisse

##### 4.2.7.1 Impulsantworten

Keiner der drei Ausstellungsräume zeigte Auffälligkeiten in seinen Raumimpulsantworten (Abb. 30–35).

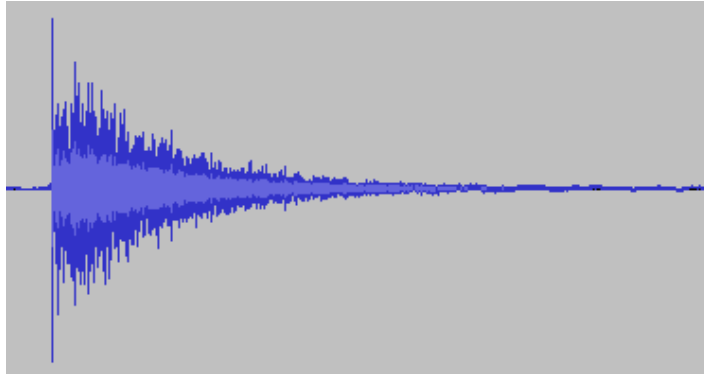


Abbildung 30: Raumimpulsantwort von Raum 1 (Musiksaal) der Ausstellung "Musikinstrumente" im Deutschen Museum, München (Quellposition 3, Messposition 1); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude

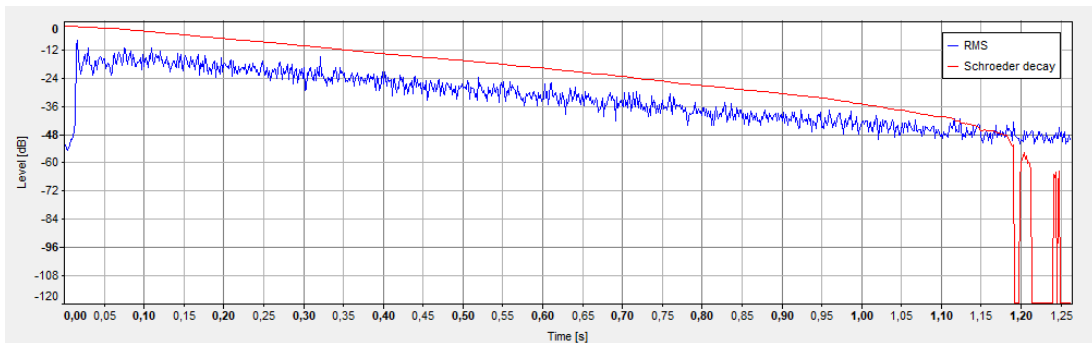


Abbildung 31: Raumimpulsantwort von Raum 1 (Musiksaal) der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, in ETC-Darstellung (Quellposition 3, Messposition 1)

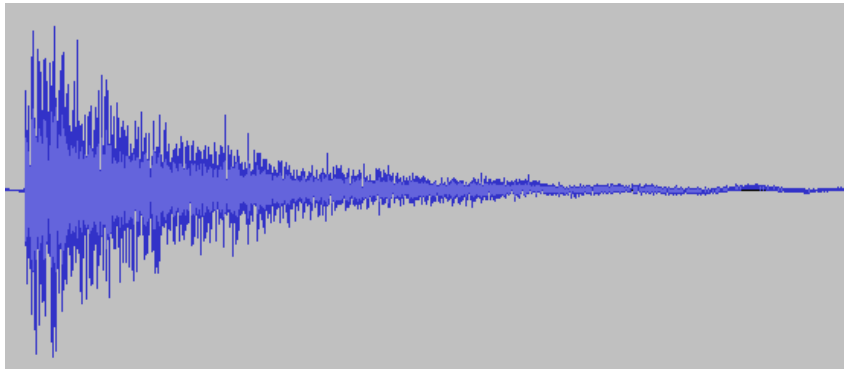


Abbildung 32: Raumimpulsantwort von Raum 2 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München (Quellposition 2, Messposition 1); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude

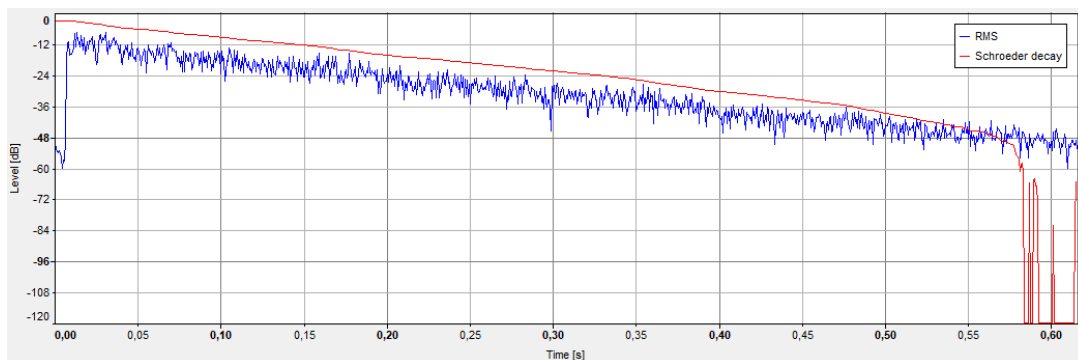


Abbildung 33: Raumimpulsantwort von Raum 2 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, in ETC-Darstellung (Quellposition 2, Messposition 1)

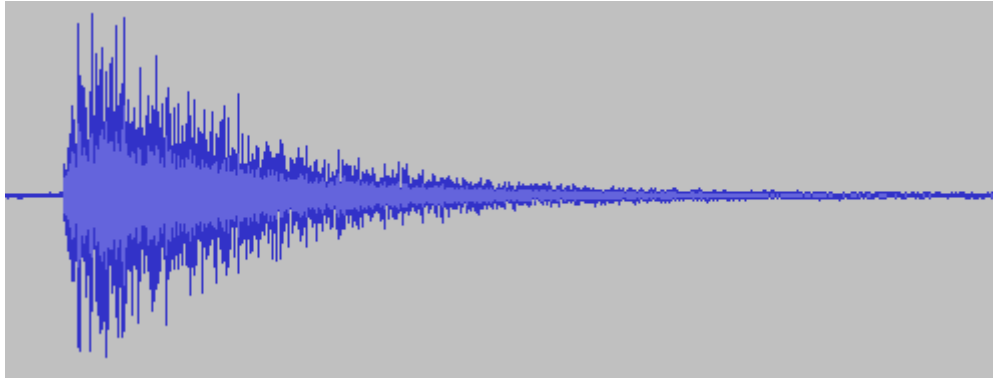


Abbildung 34: Raumimpulsantwort von Raum 3 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München (Quellposition 2, Messposition 1); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude

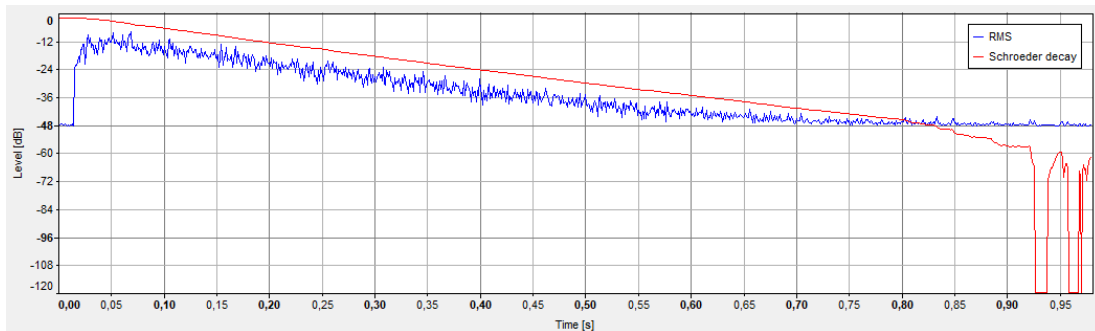


Abbildung 35: Raumimpulsantwort von Raum 3 der Ausstellung "Musikinstrumente" des Deutschen Museums, München, in ETC-Darstellung (Quellposition 2, Messposition 1)

#### 4.2.7.2 Nachhallzeit

Die Messergebnisse der Nachhallzeiten  $T_{20}$  in den Oktavbändern mit den Mittelfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz und 4.000 Hz werden im Folgenden als Mittelwert aus allen Messungen sowohl in Tabellenform als auch als Graph dargestellt (Tab. 13 und Abb. 36).

Tabelle 13: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für die Räume der Ausstellung „Musikinstrumente“ des Deutschen Museums, München

| $T_{20}$ bei | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | $T_{\text{mid}}$ [s] |
|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------------|
| Raum 1       | 1,48   | 1,66   | 1,93   | 2,06  | 1,94  | 1,70  | 2,00                 |
| Raum 2       | 0,78   | 0,77   | 0,84   | 0,91  | 0,97  | 0,93  | 0,88                 |
| Raum 3       | 0,89   | 0,91   | 1,05   | 1,14  | 1,17  | 1,11  | 1,10                 |

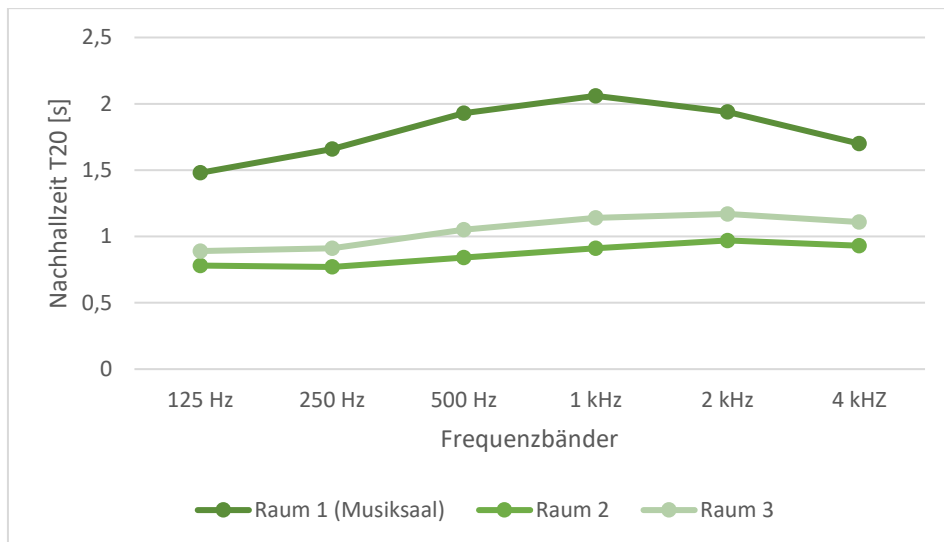


Abbildung 36: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für die Räume der Ausstellung „Musikinstrumente“ des Deutschen Museums, München

Durch Besucher\*innen verringern sich die Nachhallzeiten leicht. Bei der Messung des Musiksaals durch Möhler + Partner Ingenieure AG wurde darum davon ausgegangen, dass bei einer „Belegung von 80% von 100 Personen“ ein mittlerer Wert von  $T_{mid} = 1,35$  s erreicht wird. In ihrer Messung erhielten sie Werte 0,10 – 0,15 s unter den jetzigen Messergebnissen (Dietze/Schreier 2022, S. 11). Mit einer Personengruppe von 10 Personen kann nach den jetzigen Messungen von einer Nachhallzeit  $T_{10 \text{ Personen}} = 1,91$  s für den Musiksaal ausgegangen werden.

#### 4.3.7.3 Early Decay Time

Die Early Decay Time beträgt für den Musiksaal gemittelt  $EDT = 1,95$  s und bewegt sich im Raum um  $\pm 0,1$  s. Raum 2 hat eine Early Decay Time  $EDT = 0,88$  s mit einer räumlichen Verteilung von  $\pm 0,08$  s. Raum 3 weist  $EDT = 1,06 \pm 0,15$  s auf und damit die stärksten positionsabhängigen Schwankungen.

#### 4.2.7.4 Bassverhältnis BR

Das Bassverhältnis der Nachhallzeiten in den Ausstellungsräumen des Deutschen Museums beträgt für den Musiksaal (Raum 1)  $BR = 0,79$ , für Raum 2  $BR = 0,89$  und für Raum 3  $BR = 0,82$ .

#### 4.2.7.5 Theoretisches Stärkemaß $G_{theo}$

$$G_{theo} = 45 \text{ dB} + 10 * \lg\left(\frac{T}{V}\right) \text{ dB}$$

Aus der Formel für das theoretische Stärkemaß lassen sich für die Ausstellungsräume des Deutschen Museums die Werte in Tabelle 4 berechnen.

Tabelle 14: Raumvolumen  $V$ , Nachhallzeit  $T_{mid}$  und das daraus errechnete theoretische Stärkemaß  $G_{theo}$  für die drei Räume der Ausstellung „Musikinstrumente“ im Deutschen Museum, München

| Raum   | Volumen $V [m^3]$ | Nachhallzeit $T_{mid} [s]$ | Stärkemaß $G_{theo} [dB]$ |
|--------|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| Raum 1 | 1.354,53          | 2,00                       | +16,69                    |
| Raum 2 | 1.005,00          | 0,88                       | +14,42                    |
| Raum 3 | 1.013,91          | 1,10                       | +15,35                    |

#### 4.2.7.6 Klarheitsmaß $C_{80}$

Die gemittelten Klarheitsmaße betragen  $C_{80} = -0,88 \text{ dB}$  in Raum 1,  $C_{80} = +4,71 \text{ dB}$  in Raum 2 und  $C_{80} = +2,89 \text{ dB}$  in Raum 3.

#### 4.2.7.7 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

Die gemittelten Deutlichkeitsmaße betragen  $C_{50} = -3,68 \text{ dB}$  in Raum 1,  $C_{50} = +1,64 \text{ dB}$  in Raum 2 und  $C_{50} = -0,28 \text{ dB}$  in Raum 3.

#### 4.2.7.8 Articulation Loss of Consonants $AL_{cons}$

Für die Berechnung der Bereiche akzeptabler Sprachverständlichkeit wird wieder  $AL_{cons} = 15 \%$  herangezogen und berechnet mit der in Kapitel 4.1.7.8 verwendeten Formel (Tab. 15).

Tabelle 15: Maximale Distanz für einen  $AL_{cons} = 15\%$  und  $AL_{cons}$  bei einer Distanz von 2,5 m zur Schallquelle in den drei Räumen der Ausstellung „Musikinstrumente“ im Deutschen Museum, München

| Raum   | $D_{AL_{cons}=15\%} [m]$ | $AL_{cons D=2,5m} [\%]$ |
|--------|--------------------------|-------------------------|
| Raum 1 | 5,04                     | 3,69                    |
| Raum 2 | 9,87                     | 0,93                    |
| Raum 3 | 7,93                     | 1,49                    |

#### 4.2.8 Beurteilung der Messergebnisse

Der Musiksaal (Raum 1) soll in seiner Akustik auf Musikdarbietungen zugeschnitten sein. Möhler + Partner Ingenieure AG maßen bzw. berechneten für einen zu 80 % besetzten Zustand bei einer Kapazität von 100 Personen einen Wert von  $T = 1,35 \text{ s}$ , der über alle Oktaven hinweg den in DIN 18041 empfohlenen Bereich nicht verließ. Im unbesetzten Zustand jedoch sind nach ihren Messungen die Vorgaben für Musik überschritten (Dietze/Schreier 2022, S. 11). Auch die Nachhallzeit der Messung von Februar 2025 und der berechnete Nachhall bei 10 Personen im Raum sind mehr als 20 % höher als der Soll-Wert von  $T_{\text{Musik}} = 1,47 \text{ s}$ . Das Bassverhältnis  $BR = 0,79$  ist sowohl für Sprache als auch Musik deutlich zu niedrig. Das Klarheitsmaß hingegen erweist sich mit  $C_{80} = -0,88$  sehr gut für Musik und auch die Early Decay Time ist in einem angemessenen Rahmen. Während das Deutlichkeitsmaß sehr stark unter dem empfohlenen Mindestwert liegt, zeigt sich beim  $AL_{\text{cons}}$  eine nahezu sehr gute Sprachverständlichkeit in einem Abstand von 2,5 m. Auch für befriedigende Sprachverständlichkeit sollte ein Abstand von ca. 5 m gut für Museumsführungen möglich sein.

Die Räume 2 und 3 sind im Gegensatz zum Musiksaal für Sprache ausgelegt – nach Angaben der Kuratorin der „Musikinstrumente“-Ausstellung besonders für das Alarmsystem. Dies schlägt sich auch in den Nachhallzeiten nieder, die beide innerhalb des  $\pm 20 \%$ -Bereichs des Soll-Werts für Sprache ( $T_{\text{Sprache}} = 0,97$  für beide Räume) liegen. Raum 2 befindet sich sogar im Soll-Bereich für Unterricht. Das Bassverhältnis liegt bei Raum 2 nur knapp unter dem für Sprache empfohlenen Bereich mit  $BR = 0,89$ , Raum 3 liegt mit  $BR = 0,82$  hingegen schon weiter entfernt. Auch das Deutlichkeitsmaß deutet darauf hin, dass beide Räume sehr gut für den Sprachgebrauch geeignet sind, und die  $AL_{\text{cons}}$ -Werte indizieren eine sehr gute Sprachverständlichkeit, die auch über den halben Raum hinweg noch zufriedenstellend ist. Ein Problem, das alle drei Räume aufweisen, ist wiederum das Stärkemaß  $G_{\text{theo}}$ , das sich bei allen ca. 5 dB – in Raum 1 sogar fast 7 dB – über dem empfohlenen Bereich befindet und die Räume sehr laut wirken lässt.

## 4.3 Berliner Musikinstrumenten-Museum

### 4.3.1 Hintergrund

Im Jahr 1984 wurde das Musikinstrumenten-Museum des Staatlichen Instituts für Musikforschung in Berlin im jetzigen Gebäude eröffnet. Im späten 19. Jahrhundert bestand das Museum als „Sammlung alter Musikinstrumente“ und wurde noch vor der Jahrhundertwende in ein Museum umgewandelt. Mit Curt Sachs gab es nicht nur ein bekanntes Gesicht der Musikwissenschaft als Museumsdirektor, auch unter den Exponaten befinden sich noch heute mit dem „Bach-Cembalo“ und Flöten aus dem Besitz von Friedrich II. berühmte Musikinstrumente. Das Museum wurde unter der NS-Herrschaft in das Staatliche Institut für Musikforschung eingegliedert. Durch den zweiten Weltkrieg schrumpfte die Sammlungsgröße auf ca. 700 Instrumente, weniger als ein Viertel ihrer vorherigen Größe. Das Museumsgebäude, das schließlich neben dem Gebäude der Philharmonie Berlin gebaut wurde, beherbergt mittlerweile ca. 3.600 Musikinstrumente, von denen 800 ausgestellt werden. Das Gebäude wurde von Hans Scharoun entworfen (Staatliches Institut für Musikforschung [1]), der auch die Philharmonie selbst und auch die Staatsbibliothek plante (TU Berlin).

### 4.3.2 Beschreibung des Museumsraums

Das Musikinstrumenten-Museum Berlin besteht aus einem großen, zweistöckigen Raum mit einer Galerie. Das Museumsgebäude hat einen sehr komplexen Grundriss, der ähnlich zu einem Trapez ist (Abb. 40 und 41). Auf einer Seite ist der Raum gefächert, auf der anderen Seite ist der Raum durch Säulen gestützt. Unterhalb der Galerie ist der Ausstellungsbereich durch ein Podest angehoben. Im Freiraum sind zwei Bereiche vertieft. In der Mitte des Raums ist eine Treppe ins Untergeschoss. Im schmalen Ende des Trapezes befindet sich eine Orgelbühne und eine Treppe hoch zur Galerie. Am breiten Ende gibt es sowohl eine Wendeltreppe von der Galerie hinunter bis ins Untergeschoss und eine gerade Treppe zwischen den Ebenen (Abb. 39). Der Eingangsbereich ist direkt angeschlossen. Auf der Ebene der Galerie werden die Säulen vom Erdgeschoss weitergeführt (Abb. 37). Angeschlossen ist dort auch ein kleines Auditorium mit zwei offenen Eingängen, Rängen an der Wand und einer kleinen Bühne in der Mitte. An der Galerie hängt die Wurlitzer-Theaterorgel, auf der bei Führungen gespielt wird (Abb. 38). Zwischen zwei Säulen ist ein kleiner Raum aufgebaut. Das Dach bildet

Zacken mit Fenstern und mehrere geschwungene Akustik-Platten sind aufgehangen. Unter der Galerie hängen dicht aneinander vertikale Akustik-Paneele. Der Boden ist – abgesehen von den Podest-Bereichen – mit Teppich versehen, auch auf der Galerie. Über das gesamte Museum sind Vitrinen und Musikinstrumente, u. a. Orgeln, aufgestellt (Abb. 37). Für Führungen sind an mehreren Stellen kleine Hands-On-Sammlungen und interaktive Exponate verteilt, bei denen verschiedene Musikinstrumente angehört werden können. Neben der Theaterorgel werden bei den Führungen auch andere Objekte bespielt.



*Abbildung 37: Innenraum des Musikinstrumenten-Museums, Berlin von der Wurlitzer-Theaterorgel im Obergeschoss aus auf das Erdgeschoss und die Galerie (Staatliches Institut für Musikforschung [2])*



*Abbildung 38: Innenraum des Musikinstrumenten-Museums, Berlin mit Blick auf (v. l. n. r.) den Podestraum, das Dach und die Wurlitzer-Theaterorgel (AndreasPraefke, Wikimedia Commons)*



*Abbildung 39: Innenraum des Musikinstrumenten-Museums, Berlin mit Blick von der zweiten Etage auf den Freiraum mit einem Cembalo im Vordergrund (Morn the Gorn, Wikimedia Commons)*

Die Grundfläche musste aufgrund der komplexen Raumform (Abb. 40 und 41) den Gebäudeplänen entnommen werden.

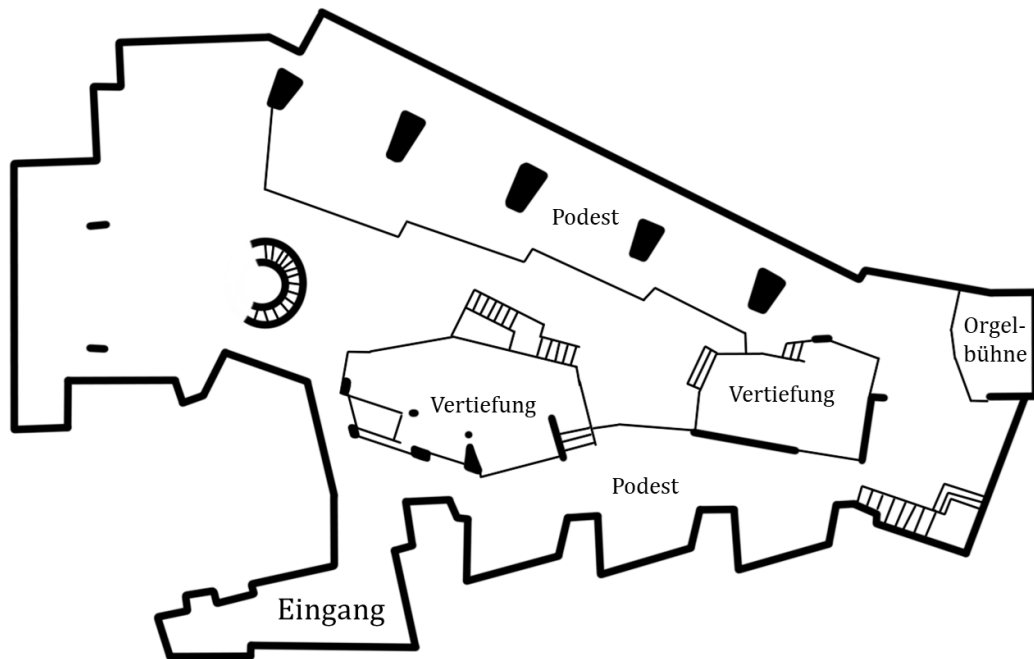


Abbildung 40: Grundriss des Berliner Musikinstrumenten-Museums, Erdgeschoss

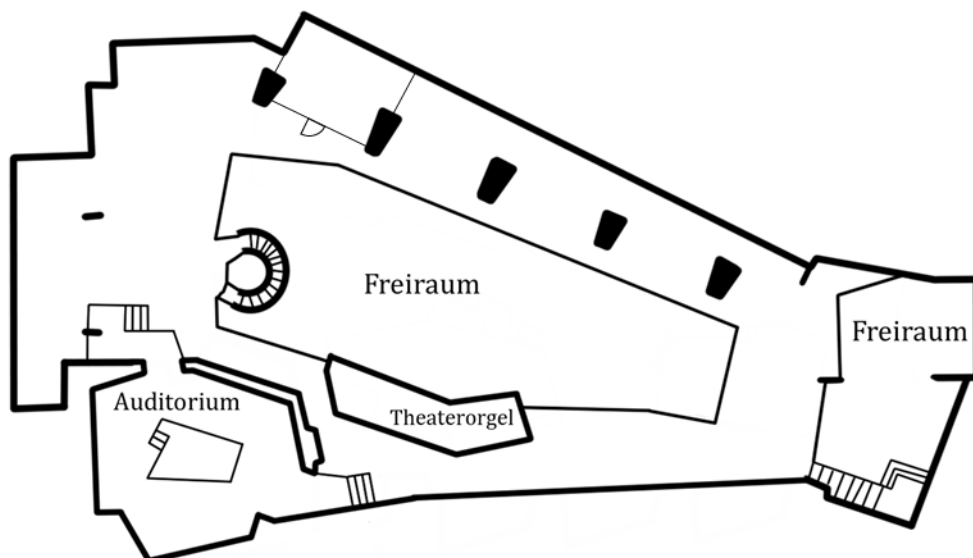


Abbildung 41: Grundriss des Berliner Musikinstrumenten-Museums, 1. Stock (Galerie)

*Tabelle 16: Maße, Grundflächen und Volumina des Musikinstrumenten-Museums Berlin*

**Ausstellung**

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| Höhe (Mitte)             | 9,25 m                   |
| Höhe (unter Galerie)     | 3,10 m                   |
| Höhe (von Galerie aus)   | 5,10 m                   |
| Höhe (Eingang)           | 3,46 m                   |
| Höhe (Auditorium)        | 4,76 m                   |
| Grundfläche              | 1.958,56 m <sup>2</sup>  |
| Grundfläche (Auditorium) | 254,43 m <sup>2</sup>    |
| Volumen                  | 16.254,23 m <sup>3</sup> |

#### 4.3.3 Messsituation

Die Messung fand am 25. Februar 2025 zwischen 14:00 Uhr und 19:00 Uhr nach Schließung des Museums statt. Während der Messung befanden sich zwei Personen im Raum. Die Raumtemperatur wird konstant auf 18 °C und die Luftfeuchtigkeit auf 55 % gehalten.

#### 4.3.4 Verwendete Messgeräte

Die verwendete Technik entspricht jener der Messung im Deutschen Museum, München.

*Tabelle 17: Auflistung der bei der Messung im Musikinstrumenten-Museum, Berlin, verwendeten Messgeräte*

|                     |                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| Messmikrofone       | Behringer ECM-8000                                  |
| Impulsschallquellen | Zerplatzen handelsüblicher Luftballons              |
| USB-Audiointerface  | Universal Audio Volt 2                              |
| Aufnahme-Software   | Audacity v. 2.4.1                                   |
| Analyse-Software    | Aurora Plug-In für Audacity von Prof. Angelo Farina |

#### 4.3.5 Messpfade im Raum

Aufgrund der Größe und Komplexität des Raums wurden für diese Messung mehr Quell- und Messpositionen benutzt.

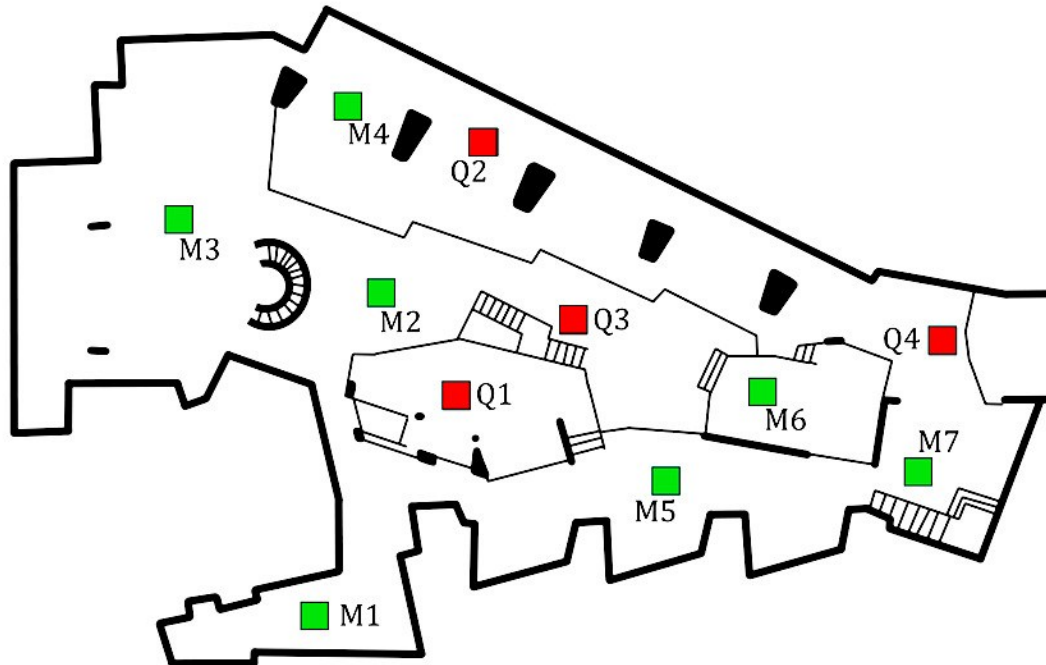


Abbildung 42: Positionen der Impulsschallquellen und der Messmikrofone für die Messung im Berliner Musikinstrumente-Museum, Erdgeschoss; rot: Quellpositionen, grün: Messpositionen

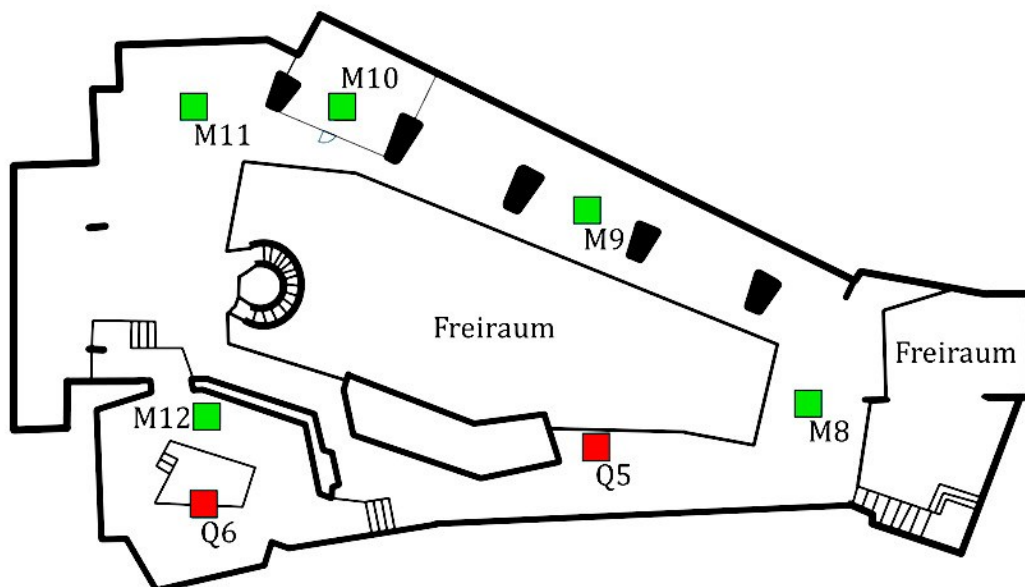


Abbildung 43: Positionen der Impulsschallquellen und der Messmikrofone für die Messung im Berliner Musikinstrumenten-Museum, 1. Stock (Galerie); rot: Quellpositionen, grün: Messpositionen

Die Quellpositionen Q1, Q2 und Q5 sind an Stationen der Führungen gesetzt. Bei Q1 befindet sich auch das Modul der Theaterorgel. An Quellposition Q3 ist das Vorführungsmodell der Cembalo-Mechanik und bei Q4 eine Orgel, die bei Führungen eingesetzt wird. Q6 ist auf der Bühne des Auditoriums. Die Messpositionen sind möglichst im Raum verteilt, um alle Bereiche des Museums abzudecken (Abb. 42 und 43). Messposition 1 befindet sich im Eingangsbereich. Bei der Auswertung der Messung fiel auf, dass bei Messposition 1 im Eingang nur Quellpositionen 1–3 laut genug für die Analyse-Software waren. Gleichzeitig wurde Quellposition 6 nur von Messpositionen 12 und 11 aufgenommen.

#### 4.3.6 Messung

Für diese Messung wurden die Messsysteme auf  $114\text{ dB} - 12\text{ dB}$  fullscale eingepegelt und jeweils zwei Messpositionen auf einmal aufgenommen. Die Mikrofone wurden jeweils auf eine Höhe von  $1,6\text{ m}$  eingestellt. An jeder Quellposition wurden für die Messungen drei Luftballons als Impulsschallquelle zerplatzt, sodass an jeder Messposition jeweils drei Impulse von jeder Quellposition aufgenommen wurden. Die aufgenommenen Impulsantworten wurden anschließend in der auch für die Aufnahme verwendeten Software *Audacity* Version 2.4.1 mithilfe des „Aurora“-Plug-Ins (Campanini/Farina 2009) ausgewertet.

#### 4.3.7 Messergebnisse

##### 4.3.7.1 Impulsantworten

Die Impulsantworten des Berliner Musikinstrumenten-Museums zeigen keine Echos. Allerdings zeigt sich, dass die ersten Reflexionen (nach  $10\text{ ms}$ ) aufgrund der weit entfernten Wände erkennbar leiser eintreffen. Aufgrund der für die Raumgröße zu hohen Pegelung wird für bessere Sichtbarkeit der Raumimpulsantwort in Audacity die  $\text{dB}$ -Darstellung anstatt, wie bei den anderen Museen, die lineare Darstellung gezeigt (Abb. 44 und 45).

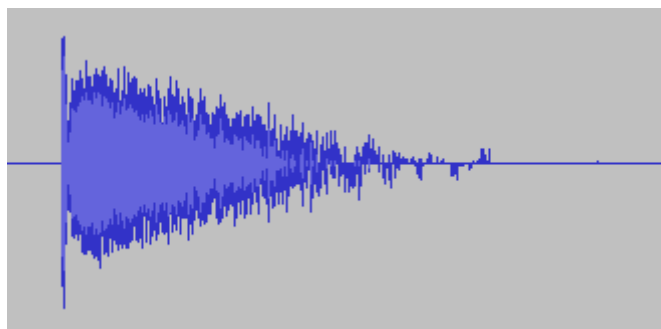


Abbildung 44: Raumimpulsantwort des Berliner Musikinstrumenten-Museums in dB-Darstellung (Quellposition 1, Messposition 2); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude (dB)

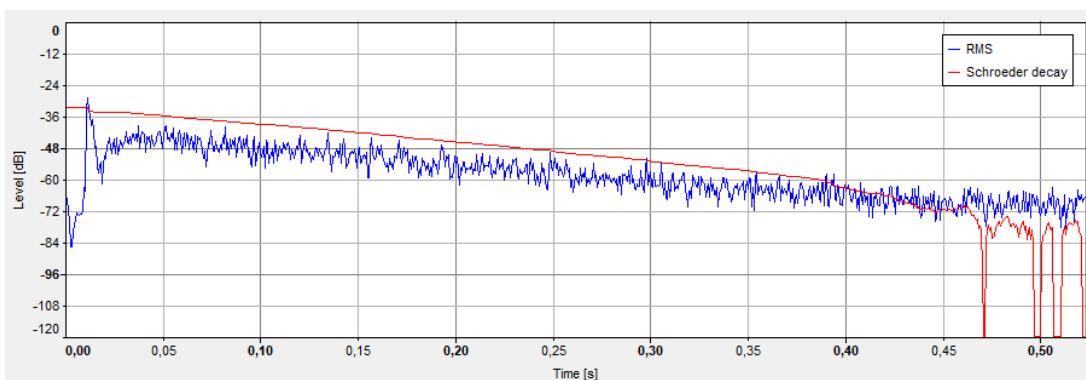


Abbildung 45: Raumimpulsantwort des Berliner Musikinstrumenten-Museums in ETC-Darstellung (Quellposition 1, Messposition 2)

#### 4.3.7.2 Nachhallzeit

Die Messergebnisse der Nachhallzeiten  $T_{20}$  in den Oktavbändern mit den Mittelfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz und 4.000 Hz werden im Folgenden als Mittelwert aus allen Messungen sowohl in Tabellenform als auch als Graph dargestellt (Tab. 18 und Abb. 46).

Es ist davon auszugehen, dass die Nachhallzeit im regulären Museumsbetrieb geringfügig kürzer ist, da sich mehr Personen im Ausstellungsraum befinden. Für eine Gruppengröße von 20 Personen im Raum ergibt sich nach der Sabine'schen Nachhallformel eine nicht merkbare Differenz von  $\Delta T = 0,003$  s.

Tabelle 18: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für das Berliner Musikinstrumenten-Museum

| $T_{20}$ bei | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | $T_{\text{mid}}$ [s] |
|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------------|
|              | 0,83   | 0,82   | 0,84   | 0,86  | 0,87  | 0,85  | 0,85                 |

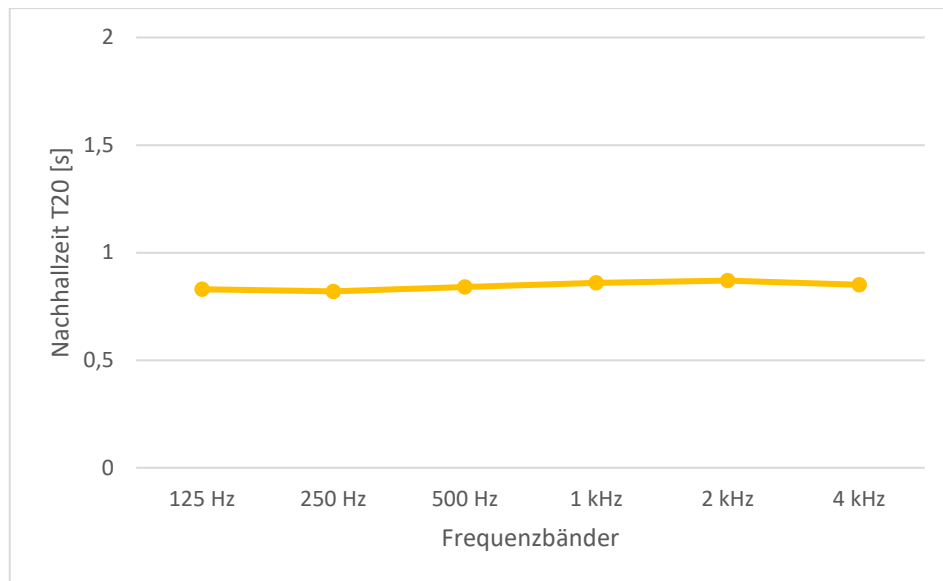


Abbildung 46: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für das Berliner Musikinstrumenten-Museum

#### 4.3.7.3 Early Decay Time

Die Early Decay Time beträgt gemittelt  $EDT = 1,44 \text{ s}$  mit großen Schwankungen über den Raum verteilt mit Werten zwischen  $0,5 \text{ s}$  und  $1,8 \text{ s}$ .

#### 4.3.7.4 Bassverhältnis $BR$

Das Bassverhältnis der Nachhallzeiten im Berliner Musikinstrumenten-Museum beträgt  $BR = 0,97$ .

#### 4.3.7.5 Theoretisches Stärkemaß $G_{theo}$

$$G_{theo} = 45 \text{ dB} + 10 * \lg\left(\frac{T}{V}\right) \text{ dB}$$

Aus der Formel für das theoretische Stärkemaß lässt sich für den Ausstellungsraum mit einer mittleren Nachhallzeit  $T_{mid} = 0,85 \text{ s}$  und einem Raumvolumen  $V = 16.254,23 \text{ m}^3$  ein Wert von  $G_{theo} = +2,18 \text{ dB}$  berechnen.

#### 4.3.7.6 Klarheitsmaß $C_{80}$

Das Klarheitsmaß über den gesamten Raum gemittelt beträgt  $C_{80} = +2,65 \text{ dB}$ .

#### 4.3.7.7 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

Das Deutlichkeitsmaß über den gesamten Raum gemittelt beträgt  $C_{50} = -0,32 \text{ dB}$ .

#### 4.3.7.8 Articulation Loss of Consonants $AL_{cons}$

Die Sprachverständlichkeit fällt im Musikinstrumenten-Museum Berlin aufgrund der für die Raumgröße sehr geringen Nachhallzeit besonders hoch aus. Für die Berechnung eines Bereichs akzeptabler Sprachverständlichkeit wird ein  $AL_{cons}$  von 15 % herangezogen. Berechnet mit der umgestellten Formel

$$D = \sqrt{\frac{AL_{cons} * V}{200 * T^2}} \text{ in } m$$

ergibt sich eine Distanz von  $\sim 41 \text{ m}$ . Bei  $D = 2,5 \text{ m}$  gibt es einen  $AL_{cons} \approx 0,06 \%$ .

#### 4.3.8 Beurteilung der Messergebnisse

Für ein Raumvolumen von über  $15.000 \text{ m}^3$  hat das Berliner Musikinstrumenten-Museum eine sehr kurze Nachhallzeit. Mit  $T_{mid} = 0,85 \text{ s}$  fällt das Museum unter die empfohlenen Nachhallzeiten für Musik ( $T_{Musik} = 1,94 \text{ s}$ ), Sprache ( $T_{Sprache} = 1,42 \text{ s}$ ) und Unterricht ( $T_{Unterricht} = 1,18 \text{ s}$ ) und deren untere Grenzen ( $0,8 * T_{Unterricht} = 0,94 \text{ s}$ ). Damit erklärt sich auch die theoretisch fantastische Sprachverständlichkeit, geht man vom Articulation Loss of Consonants aus. Laut diesem könnte theoretisch von einem Ende des Museums zum anderen kommuniziert werden. Das Bassverhältnis liegt ebenfalls mit  $BR = 0,97$  im Bereich für Sprache und auch das Deutlichkeitsmaß von  $C_{50} = -0,32 \text{ dB}$  liegt über der empfohlenen Mindestgrenze von  $-2 \text{ dB}$  und indiziert eine sehr gute Hörsamkeit für Sprachdarbietungen. Das Stärkemaß  $G_{theo} = +2,18 \text{ dB}$  ist genauso gut geeignet für Sprache, aber auch für Musik. Mit einem Klarheitsmaß von  $C_{80} = +2,65 \text{ dB}$  deutet sich eine potenzielle Eignung für Musikdarbietungen an, obwohl der Museumsraum eigentlich eine zu trockene Akustik hat.

## 4.4 Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

### 4.4.1 Hintergrund

Die Sammlung alter Musikinstrumente ist Teil des Kunsthistorischen Museums in Wien und befindet sich in der Hofburg. Sie hat die ältesten Ursprünge der untersuchten Ausstellungen. Im 16. Jahrhundert wurde sie von Erzherzog Ferdinand II. begründet. Erstmals zusammen mit dem Bestand, der auf die Familie Obizzi zurückgeht, wurde die Sammlung im Jahr 1916 ausgestellt. Während des NS-Zeit wurde die Sammlung eigenständig und auch mit begleitenden Konzerten im Palais Pallavicini präsentiert. Nach der NS-Zeit wurde die Sammlung in der Neuen Burg (Teil der Hofburg) neu eröffnet und wird seit 1993 in 12 Sälen der Burg zur Schau gestellt. Diese Säle waren vorher die Privatgemächer von Kaiser Franz Joseph I. und Kaiserin Elisabeth. Zu den Ausstellungsstücken gehören historische Musikinstrumente aus dem 16. Jahrhundert bis hin zu Nachahmungen aus der Zeit des 20. Jahrhunderts und der Wiederentdeckung der Alten Musik (Kunsthistorisches Museum).

### 4.4.2 Beschreibung des Museumsraums

Zehn der zwölf Säle, die als Ausstellungsräume der Sammlung dienen, sind gerade aneinandergereiht mit offenen Türen. Der mittlere Saal XIV ist der größte Saal und wird auch für Konzerte genutzt. Für diesen Zweck können die Türen des Raums auch geschlossen werden. Jeweils die drei Säle rechts und links von Saal XIV spiegeln sich in ihren Raummaßen. An Saal XIV ist eine Halle angeschlossen, die zur Zeit der Messung für eine Erweiterung der Ausstellung neu konzipiert wurde. An die Säle XI und XVII ist jeweils eine Gang-ähnliche Halle angeschlossen, die weitere Ausstellungsräume bilden (Abb. 47).

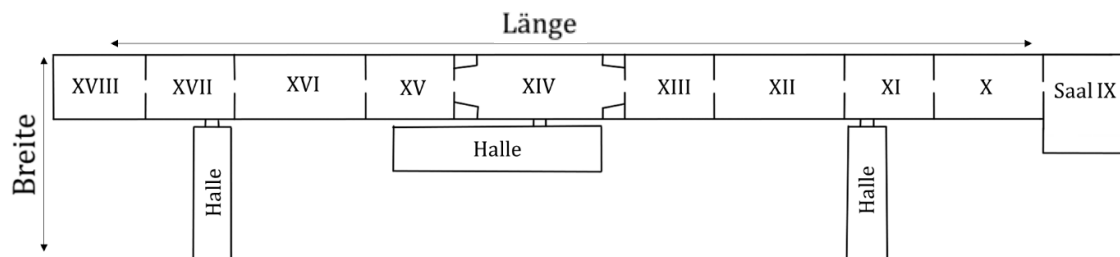


Abbildung 47: Grundriss der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

Die Säle IX bis XVIII sind mit (knarrendem) Parkett ausgelegt und die Wände sind schlicht verputzt. Jede Decke dieser Säle ist mit einem leicht gewölbten Akustik-Element bespannt (Abb. 48). Da die Säle am Rand der Burg liegen, hat diese Seite in jedem Saal Fenster. Die Hallen an Saal XI und Saal XVII sind ebenfalls verputzt mit zusätzlichen Marmor-Elementen. Die Halle an Saal XIV ist ebenfalls verputzt mit Marmorsäulen an den Wänden, hat jedoch eine große Fensterwand zum Inneren des restlichen Museums. Auf der Seite von Saal XV hat die Halle Einbauwände für das neue Raumkonzept., auf der anderen Seite des Saals ist eine Sitzgruppe (Abb. 49). Eine Ausnahme bildet Saal XIV, welcher mit Marmor bedeckte Wände hat und oben an den Wänden und an der Decke reich mit Stuck verziert ist (Abb. 50).



*Abbildung 48: Saal X der Sammlung alter Musikinstrumente in Wien*



*Abbildung 49: An den Saal XIV angrenzende Halle in der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, mit Einbauwänden hinten im Bild und einem aufgestellten Gussrahmen eines Flügels im Vordergrund*



*Abbildung 50: Saal XIV der Sammlung alter Musikinstrumente in Wien*



*Abbildung 51: Saal XIII der Sammlung alter Musikinstrumente in Wien*



*Abbildung 52: Saal XVI der Sammlung alter Musikinstrumente in Wien*

In den Hauptsälen der Ausstellung befinden sich in den niedrigeren Nummern hauptsächlich Vitrinen mit Musikinstrumenten (Abb. 48 und 51), in den Sälen mit höheren Nummern vermehrt Flügel und andere freistehende Tasteninstrumente und auch Gemälde an der Wand (Abb. 52). In Saal XIV befinden sich nur wenige Exponate. Saal IX bildet den Eingang zur Sammlung.

Tabelle 19: Maße, Grundflächen und Volumina der Räume der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

### Saal IX

|        |         |
|--------|---------|
| Höhe   | 6,40 m  |
| Länge  | 11,04 m |
| Breite | 13,80 m |

### Säle X – XIII & XV – XVIII

|                        |         |
|------------------------|---------|
| Breite                 | 9,15 m  |
| Höhe                   | ~6,20 m |
| Länge (Saal X)         | 15,07 m |
| Länge (Säle XI & XVII) | 12,34 m |
| Länge (Säle XII & XVI) | 18,36 m |
| Länge (Säle XIII & XV) | 12,38 m |
| Länge (Saal XVIII)     | 12,87 m |

### Saal XIV

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| Höhe        | 7,30 m                  |
| Länge       | 23,89 m                 |
| Grundfläche | 211,41 m <sup>2</sup>   |
| Volumen     | 1.553,29 m <sup>3</sup> |

### Gesamter Ausstellungsraum (Säle IX – XVIII)

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| Grundfläche | 1.407,55 m <sup>2</sup> |
| Volumen     | 9.028,97 m <sup>3</sup> |

### Halle (Saal XIV)

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| Höhe        | Ø = 5,74 m              |
| Länge       | 29,62 m                 |
| Breite      | 6,38 m                  |
| Grundfläche | 204,06 m <sup>2</sup>   |
| Volumen     | 1.171,30 m <sup>3</sup> |

### Halle (Säle XVII & XI)

|             |                       |
|-------------|-----------------------|
| Höhe        | Ø = 5,98 m            |
| Länge       | 5,58 m                |
| Breite      | 19,38 m               |
| Grundfläche | 111,39 m <sup>2</sup> |
| Volumen     | 666,11 m <sup>3</sup> |

#### 4.4.3 Messsituation

Die Messung fand Montag, 10. März 2025, zwischen 9:00 Uhr und 13:00 Uhr statt; montags ist die Sammlung geschlossen. Während der Messung befanden sich drei Personen in den Räumen. In den Sälen herrschte eine Temperatur von ca. 18 °C und eine Luftfeuchtigkeit von 50 %.

#### 4.4.4 Verwendete Messgeräte

Aufgrund der Gruppengröße bei der Messung konnten doppelt so viele Messmikrofone verwendet werden als bei den anderen drei Messungen.

*Tabelle 20: Auflistung der bei der Messung in der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, verwendeten Messgeräte*

|                     |                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------|
| Messmikrofone       | Behringer ECM-8000                                  |
| Impulsschallquellen | Zerplatzen handelsüblicher Luftballons              |
| USB-Audiointerface  | Universal Audio Volt 2                              |
| Aufnahme-Software   | Audacity v. 2.4.1                                   |
| Analyse-Software    | Aurora Plug-In für Audacity von Prof. Angelo Farina |

#### 4.4.5 Messpfade im Raum

Die Mess- und Quellpositionen wurden nach den Saalbezeichnungen benannt und innerhalb der Säle und Hallen durchnummeriert, ähnlich wie auch bei den Messungen im Deutschen Museum, München, geschehen (z. B. Saal X: MX.1, MX.2, MX.3, MX.4, QX). Den Hallen wurden zusätzlich die Nummern der angeschlossenen Säle gegeben (Bsp.: Halle neben Saal XIV wird zur Halle XIV).

In jedem Saal des großen Ausstellungsraums wurden vier Messpositionen verteilt, angepasst an die Verteilung von Vitrinen und Exponaten. Dadurch wiederholt sich keine Messung genau in den Sälen mit gleichen Raummaßen. In den Sälen IX und XVIII, die jeweils die Enden der Saalreihe bilden, und im großen Saal XIV wurden jeweils zwei Quellpositionen ausgewählt; in den anderen sieben Sälen der Reihe nur eine (Abb. 53 und 54). Eine Messstation bestand immer aus den vier Messpositionen im Saal, der Quellposition(en) im Saal, und den Quellpositionen direkt im Nebenraum (z. B. für Saal X: QIX.2, QX, QXI). Darum wurden auch zwei Quellen in jedem Endraum positioniert,

sodass auch bei den dortigen Stationen von drei Orten Schallimpulse ausgingen. Die Quellpositionen im Nebenraum ergaben sich durch den mit Exponaten verstellten Platz und durch die offenen Türen, die viel Schall aus Nebenräumen hereinlassen.

In Saal XIV fand zusätzlich eine Messung mit geschlossenen Türen wie bei Konzerten statt. Auch in der Halle XIV wurden zwei Quellpositionen gewählt mit vier Messpositionen; in der vermessenen Halle XVII wurden aufgrund des Platzmangels zwei Quellpositionen und lediglich zwei Messpositionen genommen. Die baugleiche Halle an Saal XI wurde eben wegen dieser Baugleichheit nicht nochmals vermessen. Die baugleichen Säle wurden wegen der Unterschiede bei den Anschlussräumen und der Verteilung von Exponaten alle vermessen.

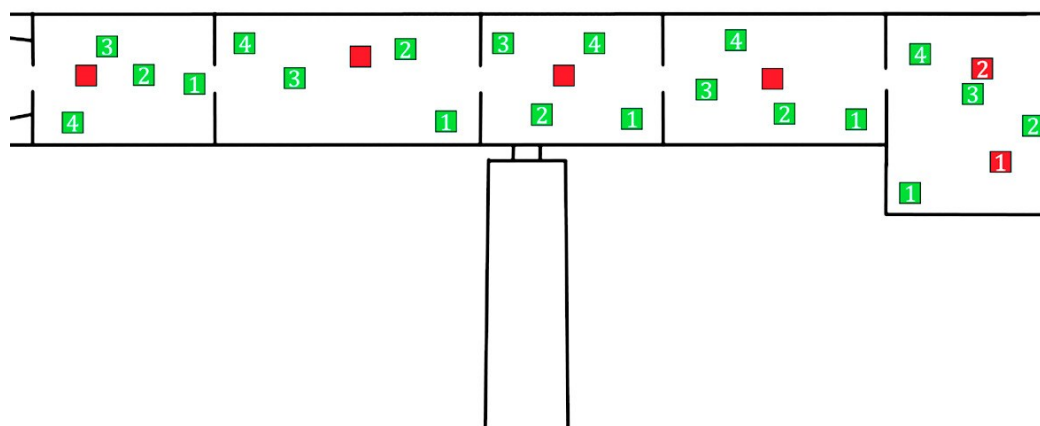


Abbildung 53: Positionen der Impulsschallquellen und Messmikrofone in den Sälen IX – XIII und der Halle XI der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien; rot: Quellpositionen, grün: Messpositionen

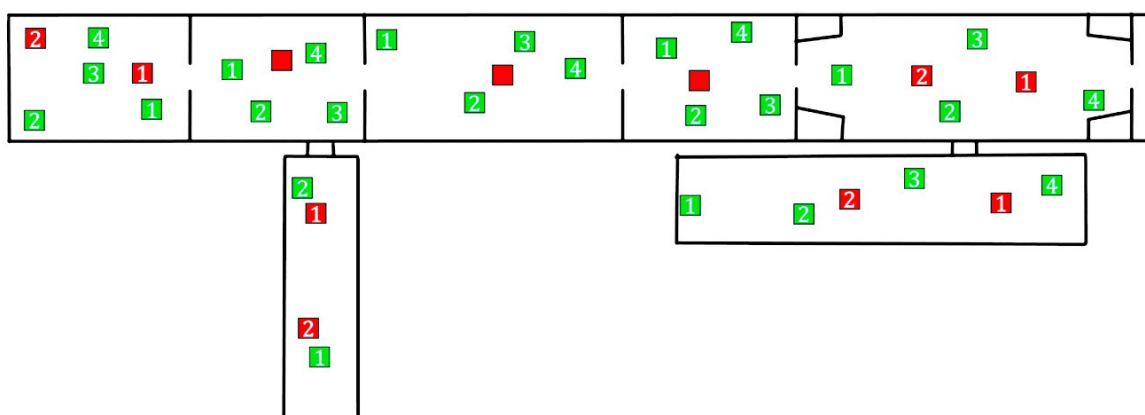


Abbildung 54: Positionen der Impulsschallquellen und Messmikrofone in den Sälen XIV – XVIII und in den Hallen XIV und XVII der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien; rot: Quellpositionen, grün: Messpositionen

#### 4.4.6 Messung

Auch für diese Messung wurden die Messsysteme auf  $114\text{ dB} - 12\text{ dB}$  fullscale eingepegelt und jeweils zwei Messpositionen auf einmal aufgenommen. Die Mikrofone wurden jeweils auf eine Höhe von  $1,6\text{ m}$  eingestellt. An jeder Quellposition wurden für die Messungen drei Luftballons als Impulsschallquelle zerplatzt, sodass an jeder Messposition jeweils drei Impulse von drei (bzw. zwei) Quellpositionen aufgenommen wurden. Die aufgenommenen Impulsantworten wurden anschließend in der auch für die Aufnahme verwendeten Software *Audacity* Version 2.4.1 mithilfe des „Aurora“-Plug-Ins (Campanini/Farina 2009) ausgewertet.

#### 4.4.7 Messergebnisse

##### 4.4.7.1 Impulsantworten

Bei keiner der Raumimpulsantworten der Ausstellungsräume zeigten sich Auffälligkeiten, wie z. B. Echos (Abb. 55–64).

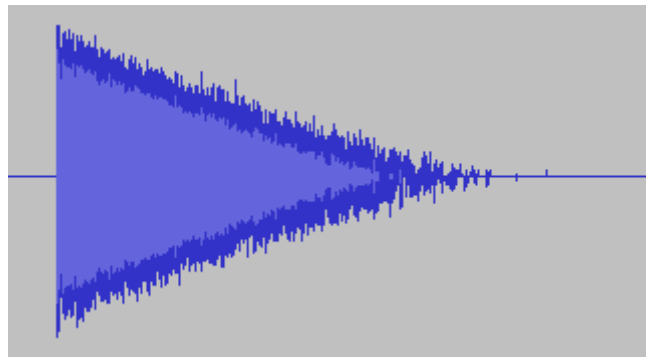


Abbildung 55: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in dB-Darstellung (Saal XV: Quellposition XV, Messposition XV.4); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude (dB)

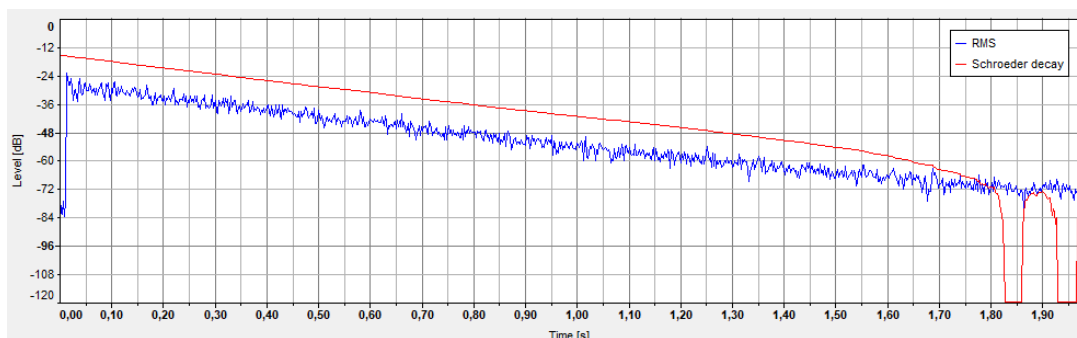


Abbildung 56: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in ETC-Darstellung (Saal XV: Quellposition XV, Messposition XV.4)

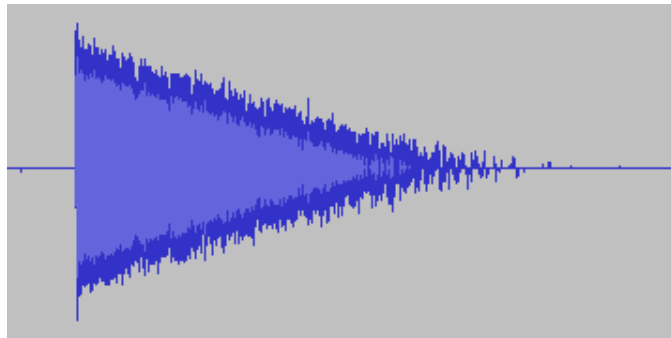


Abbildung 57: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in dB-Darstellung (Saal XIV (offen): Quellposition XIV.2, Messposition XIV.2); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude (dB)

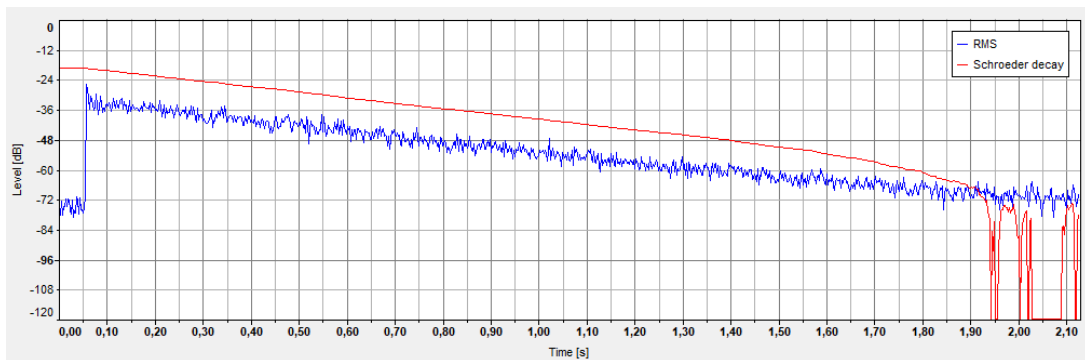


Abbildung 58: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in ETC-Darstellung (Saal XIV (offen): Quellposition XIV.2, Messposition XIV.2)

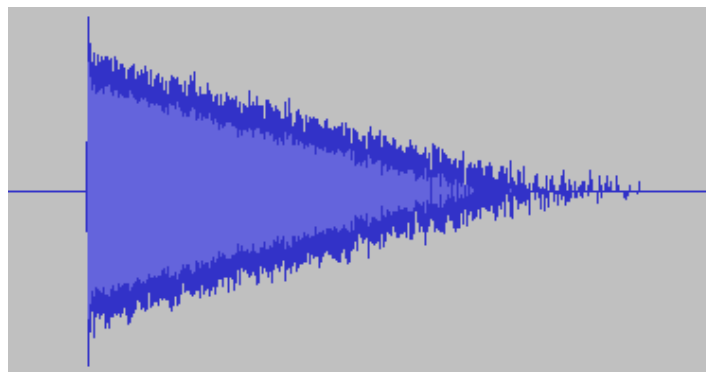


Abbildung 59: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in dB-Darstellung (Saal XIV (geschlossen): Quellposition XIV.2, Messposition XIV.2); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude (dB)

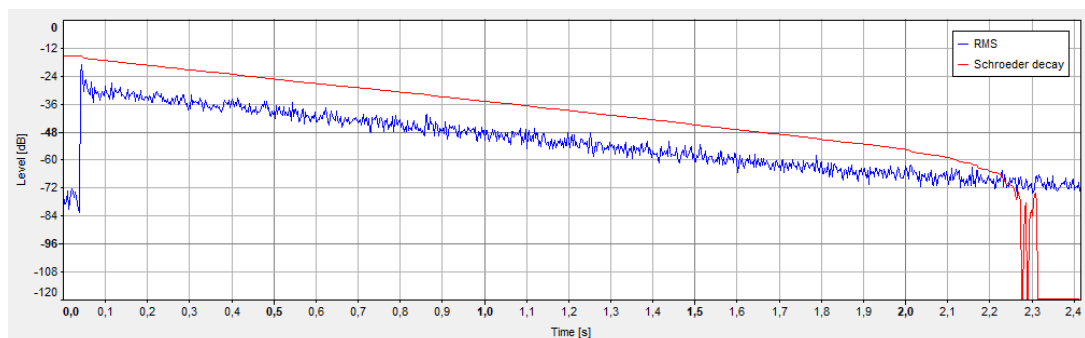


Abbildung 60: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in ETC-Darstellung (Saal XIV (geschlossen): Quellposition XIV.2, Messposition XIV.2)

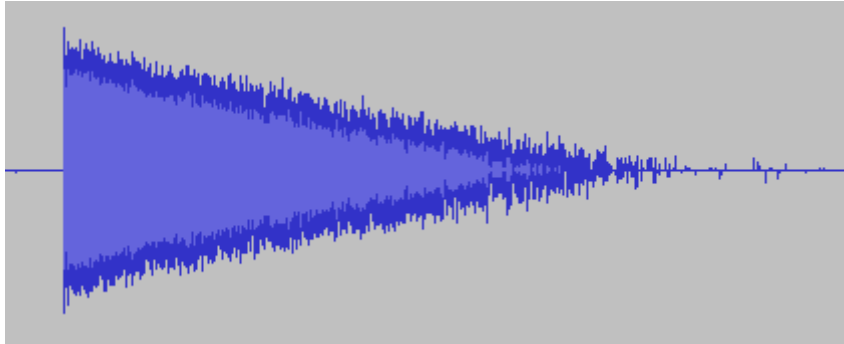


Abbildung 61: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in dB-Darstellung (Halle XIV: Quellposition H-XIV.2, Messposition H-XIV.3); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude (dB)

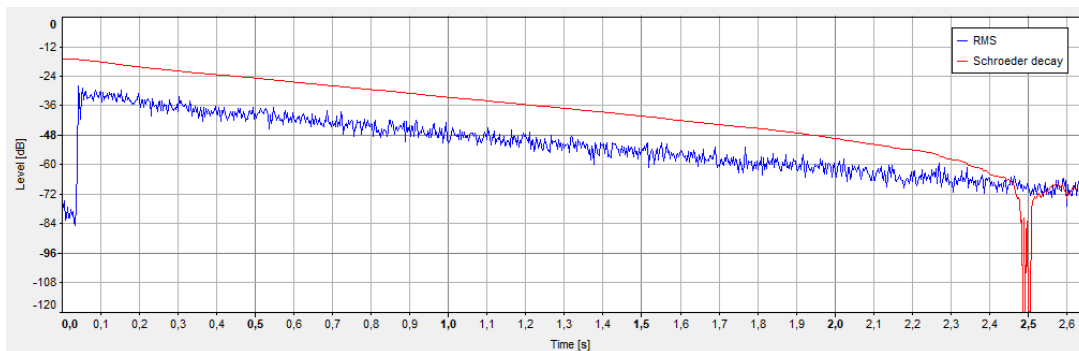


Abbildung 62: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in ETC-Darstellung (Halle XIV: Quellposition H-XIV.2, Messposition H-XIV.3)

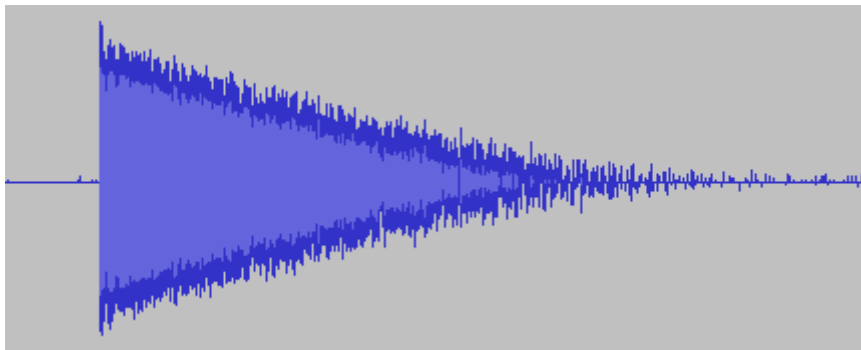


Abbildung 63: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in dB-Darstellung (Halle XVII: Quellposition H-XVII.2, Messposition H-XVII.1); x-Achse: Zeit, y-Achse: Amplitude (dB)

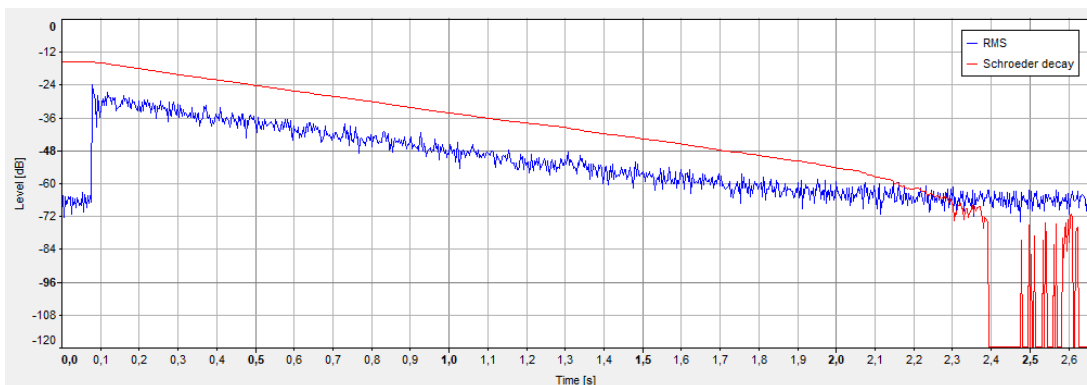


Abbildung 64: Raumimpulsantwort der Säle der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in ETC-Darstellung (Halle XVII: Quellposition H-XVII.2, Messposition H-XVII.1)

#### 4.4.7.2 Nachhallzeit

Die Messergebnisse der Nachhallzeiten  $T_{20}$  in den Oktavbändern mit den Mittelfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz und 4.000 Hz werden im Folgenden als Mittelwert aus allen Messungen sowohl in Tabellenform als auch als Graph dargestellt (Tab. 21 und Abb. 65).

Tabelle 21: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für die Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

| $T_{20}$ bei       | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | $T_{\text{mid}}$ [s] |
|--------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------------------|
| Säle IX - XVIII    | 2,06   | 2,52   | 2,77   | 2,91  | 2,81  | 2,40  | 2,84                 |
| Saal XIV (geschl.) | 1,99   | 2,71   | 3,14   | 3,27  | 3,02  | 2,50  | 3,21                 |
| Halle XIV          | 3,47   | 3,79   | 3,95   | 3,91  | 3,55  | 2,73  | 3,93                 |
| Halle XVII         | 2,95   | 3,37   | 3,12   | 3,06  | 2,82  | 2,18  | 3,09                 |

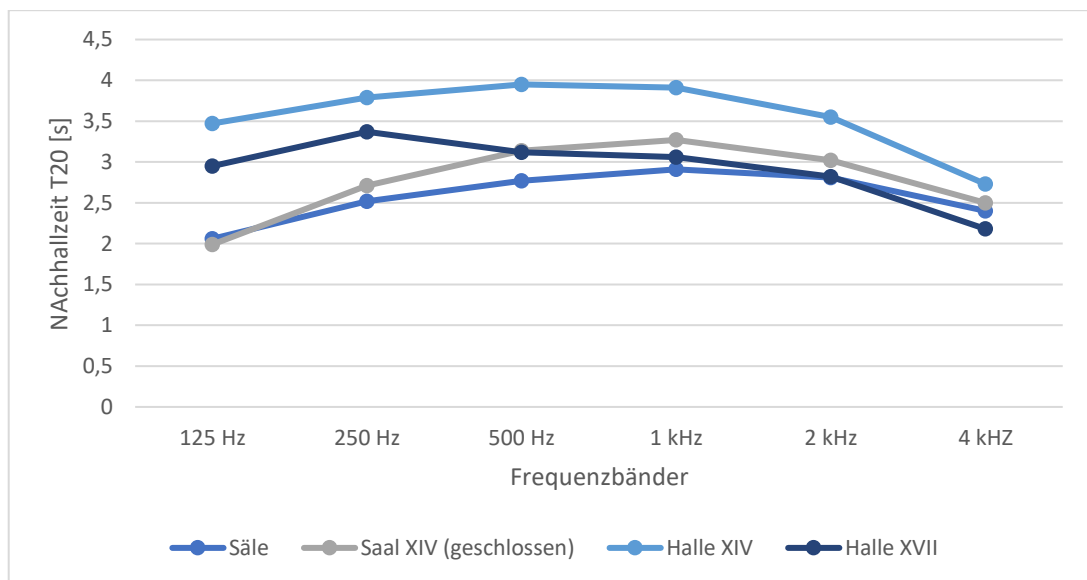


Abbildung 65: Mittelwerte der in Oktavbänder aufgeschlüsselten Nachhallzeiten  $T_{20}$  für die Räume der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

Die Sammlung alter Musikinstrumente weist die längsten Nachhallzeiten der untersuchten Musikinstrumenten-Ausstellungen auf. Besonders in den mittleren Frequenzen ist diese hoch (Abb. 66). Alle Räume weisen Abfälle in den hohen und tiefen Frequenzen auf, jeweils unterschiedlich stark. Auffällig ist dies in Halle XIV, bei der die Nachhallzeit von 500 Hz auf 4.000 Hz um beinahe 1,5 s kürzer wird. Die geringe Nachhallzeit in den tiefen Frequenzen in den Sälen könnte mit den großen Abhäng-Platten an den Decken und den Fenstern nach draußen zusammenhängen. Diese Eigenschaften fehlen beiden Hallen.

Zu beachten ist auch die deutlich längere Nachhallzeit in Saal XIV, wenn die Türen geschlossen sind. Hier steigt die Nachhallzeit um  $\Delta T = 0,37 \text{ s}$  im Vergleich zum gesamten Saalkomplex mit offenen Türen; wenn nur der offene Saal XIV herangezogen wird, beträgt die Differenz sogar  $\Delta T = 0,39 \text{ s}$ . Wenn der Saal jedoch für z. B. ein Konzert genutzt wird, verringert sich die Nachhallzeit. Ausgehend von bspw. 80 sitzenden Personen fällt die Nachhallzeit nach der Formel, die bereits in Kapitel 4.1.7.2 vorgestellt wurde,

$$T_{\text{besetzt}} = 0,163 * \frac{V}{0,163 * \frac{V}{T_{\text{unbesetzt}}} + \alpha_{\text{Sitzend}} * \text{Personenzahl}} \text{ in s}$$

auf eine Nachhallzeit im besetzten Zustand von  $T_{80 \text{ Personen}} = 2,13 \text{ s}$ . Bei einer Besetzung mit 120 Personen wäre sogar eine Nachhallzeit  $T_{120 \text{ Personen}} = 1,82 \text{ s}$  erreichbar.

#### 4.4.7.3 Early Decay Time

Die Early Decay Time beträgt für den Saalkomplex gemittelt  $EDT = 3,29 \pm 0,30 \text{ s}$  mit geringen Unterschieden zwischen den einzelnen Sälen. Innerhalb der Säle selbst bewegt sich die Early Decay Time zwischen 2,1 s und 4,5 s. Der geschlossene Saal XIV hat eine Early Decay Time  $EDT = 3,25 \text{ s}$  mit positionsbedingten Unterschieden von  $\pm 0,20 \text{ s}$ , also ähnlich zum offenen Saal. Die Halle XIV weist eine  $EDT = 4,22 \pm 0,30 \text{ s}$  auf und Halle XVII  $EDT = 3,13 \pm 0,10 \text{ s}$ .

#### 4.4.7.4 Bassverhältnis BR

Das Bassverhältnis der Nachhallzeiten für den gesamten Saalkomplex beträgt  $BR = 0,81$ . Für den geschlossenen Saal XIV im unbesetzten Zustand beträgt das Bassverhältnis  $BR = 0,68$ . Die beiden Hallen haben ein Bassverhältnis von  $BR = 0,92$  in Halle XIV und von  $BR = 1,02$  in Halle XVII.

#### 4.4.7.5 Theoretisches Stärkemaß $G_{theo}$

$$G_{theo} = 45 \text{ dB} + 10 * \lg\left(\frac{T}{V}\right) \text{ dB}$$

Aus der Formel für das theoretische Stärkemaß lässt sich für die Ausstellungsräume der Sammlung alter Musikinstrumente folgende Werte berechnen:

Tabelle 22: Raumvolumen  $V$ , Nachhallzeit  $T_{mid}$  und das daraus errechnete theoretische Stärkemaß  $G_{theo}$  für die Räume der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

| Raum               | Volumen $V [m^3]$ | Nachhallzeit $T_{mid} [s]$ | Stärkemaß $G_{theo} [dB]$ |
|--------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| Säle IX - XVIII    | 9.028,97          | 2,84                       | +9,98                     |
| Saal XIV (geschl.) | 1.553,29          | 3,21                       | +18,15                    |
| Halle XIV          | 1.171,30          | 3,93                       | +20,26                    |
| Halle XVII         | 666,11            | 3,09                       | +21,66                    |

Im besetzten Zustand verringert sich das theoretische Stärkemaß vom geschlossenen Saal XIV bei 80 Personen auf  $G_{theo} = +16,37 \text{ dB}$  und bei 120 Personen auf  $G_{theo} = +15,59 \text{ dB}$ .

#### 4.4.7.6 Klarheitsmaß $C_{80}$

Die gemittelten Klarheitsmaße betragen  $C_{80} = -4,20 \text{ dB}$  für den Saalkomplex,  $C_{80} = -3,06 \text{ dB}$  im geschlossenen Saal XIV,  $C_{80} = -4,37$  in der Halle XIV und  $C_{80} = -3,26 \text{ dB}$  in der Halle XVII.

#### 4.4.7.7 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

Die gemittelten Deutlichkeitsmaße betragen  $C_{50} = -6,39 \text{ dB}$  für den Saalkomplex,  $C_{50} = -5,31 \text{ dB}$  im geschlossenen Saal XIV,  $C_{50} = -6,46 \text{ dB}$  in Halle XIV und  $C_{50} = -5,49 \text{ dB}$  in Halle XVII.

#### 4.4.7.8 Articulation Loss of Consonants $AL_{cons}$

Für die Berechnung der Bereiche akzeptabler Sprachverständlichkeit wird  $AL_{cons} = 15 \%$  herangezogen und berechnet mit

$$D = \sqrt{\frac{AL_{cons} * V}{200 * T^2}} \text{ in } m$$

Auch der  $AL_{cons}$  bei einer Distanz von  $2,5 \text{ m}$  wird berechnet (Tab. 23).

Tabelle 23: Maximale Distanz für einen  $AL_{cons} = 15\%$  und  $AL_{cons}$  bei einer Distanz von 2,5 m zur Schallquelle in den Räumen der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien

| Raum               | $D_{AL_{cons}=15\%}$ [m] | $AL_{consD=2,5m}$ [%] |
|--------------------|--------------------------|-----------------------|
| Säle IX – XVIII    | 9,16                     | 1,12                  |
| Saal XIV (geschl.) | 3,36                     | 8,29                  |
| Halle XIV          | 2,38                     | 16,48                 |
| Halle XVII         | 2,29                     | 17,92                 |

#### 4.4.8 Unterschiede zwischen den einzelnen Sälen

In den Berechnungen von Stärkemaß und  $AL_{cons}$  in den Kapiteln 4.4.7.5 und 4.4.7.8 wurde für den Saalkomplex jeweils das Gesamt-Volumen berechnet. Die Ergebnisse weichen stark von denen der Hallen und des geschlossenen Saals XIV ab. Wird mit einem durchschnittlichen Volumen pro Raum gerechnet, erhält man  $G_{theo} = 19,98$  dB,  $AL_{consD=2,5m} = 11,17$  % und  $D_{AL_{cons}=15\%} = 2,90$  m. Diese Ergebnisse ergeben im Kontext der anderen Räume, besonders im Kontext des geschlossenen Saals XIV, mehr Sinn. Die Betrachtung der Säle als weitgehend unabhängig wirft die Frage auf, ob sie sich in den Nachhallzeiten, den Klarheits- und Deutlichkeitsmaßen und der Early Decay Time signifikant unterscheiden.

Um dies zu untersuchen, wurden die mittleren Nachhallzeiten jedes Impulses in den Räumen mit einem t-Test in JASP auf signifikante Unterschiede zu den restlichen Sälen untersucht. Es wird der Welch's t-Test verwendet, da die Raumdaten nicht die gleiche Varianz aufweisen (Tab. 24).

Tabelle 24: t-Test-Ergebnisse und Nachhallzeiten für die Nachhallzeiten der Säle IX – XVIII der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien. Es werden nur signifikante Ergebnisse angezeigt, gerundet auf zwei Nachkommastellen; Ergebnisse mit  $p < 0,001$  sind fett markiert

| t-Test vs.   | IX            | X            | XI           | XII          | XIII         | XIV          | XV           | XVI          | XVII         | XVIII         |
|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>T_20</b>  | 3,38          | 3,08         | 2,74         | 2,71         | 2,62         | 2,83         | 2,56         | 2,66         | 2,92         | 3,12          |
| <b>IX</b>    | --            | <b>5,95</b>  | <b>15,91</b> | <b>24,87</b> | <b>17,33</b> | <b>23,79</b> | <b>22,24</b> | <b>25,73</b> | <b>8,17</b>  | <b>7,87</b>   |
| <b>X</b>     | <b>-5,95</b>  | --           | <b>5,73</b>  | <b>7,10</b>  | <b>7,41</b>  | <b>5,02</b>  | <b>9,02</b>  | <b>7,92</b>  | 2,26         | --            |
| <b>XI</b>    | <b>-15,91</b> | <b>-5,73</b> | --           | --           | 2,15         | -2,27        | <b>3,55</b>  | --           | -2,79        | <b>-7,91</b>  |
| <b>XII</b>   | <b>-24,87</b> | <b>-7,10</b> | --           | --           | 2,03         | <b>-4,25</b> | <b>3,83</b>  | --           | -3,57        | <b>-10,89</b> |
| <b>XIII</b>  | <b>-17,33</b> | <b>-7,41</b> | -2,15        | -2,03        | --           | <b>-4,77</b> | --           | --           | <b>-4,45</b> | <b>-9,79</b>  |
| <b>XIV</b>   | <b>-23,79</b> | <b>-5,02</b> | 2,27         | <b>4,25</b>  | <b>4,77</b>  | --           | <b>7,21</b>  | <b>5,75</b>  | --           | <b>-8,29</b>  |
| <b>XV</b>    | <b>-22,24</b> | <b>-9,02</b> | <b>-3,55</b> | <b>-3,83</b> | --           | <b>-7,21</b> | --           | -2,62        | <b>-5,67</b> | <b>-12,40</b> |
| <b>XVI</b>   | <b>-25,73</b> | <b>-7,92</b> | --           | --           | --           | <b>-5,75</b> | 2,62         | --           | <b>-4,33</b> | <b>-11,93</b> |
| <b>XVII</b>  | <b>-8,17</b>  | -2,26        | 2,79         | 3,57         | <b>4,45</b>  | --           | <b>5,67</b>  | <b>4,33</b>  | --           | -3,15         |
| <b>XVIII</b> | <b>-7,87</b>  | --           | <b>7,91</b>  | <b>10,89</b> | <b>9,79</b>  | <b>8,29</b>  | <b>12,40</b> | <b>11,93</b> | 3,15         | --            |

Tatsächlich zeigen sich teilweise große Unterschiede in den Nachhallzeiten der einzelnen Säle. Saal IX liegt signifikant über allen anderen Sälen mit einer Nachhallzeit  $T_{IX} = 3,38$  s. Auch Saal XVIII hat einen längeren Nachhall als alle anderen Säle (bis auf Saal IX) mit  $T_{XVIII} = 3,12$  s. Diese beiden Räume sind jeweils am Ende des Saalkomplexes gelegen und haben somit nur eine Öffnung in den Komplex hinein, wo vermehrt Schall geschluckt werden kann. Saal IX ist zudem nochmals größer als die meisten anderen Säle ( $V_{IX} = 975,05 \text{ m}^3$ ). Der mittlere Saal XIV ist zwar an zwei Seiten mit weiteren Sälen verbunden, allerdings ist er auch der Saal mit dem größten Volumen, sodass eine höhere Nachhallzeit  $T_{XIV} = 2,83$  s als jene der anliegenden Säle nicht verwunderlich ist. Auch erwartbar war, dass sich jeweils die Nachhallzeiten der Säle XII und XVI sowie der Säle XIII und XV nicht signifikant unterscheiden, da sie fast gleich gebaut sind. Zwar sind auch die Säle XI und XVII baugleich, jedoch lässt sich die längere Nachhallzeit von Saal XVII wiederum mit der Lage direkt neben einem (kürzeren) Endraum begründen.

Insgesamt ist der Nachhall an den Enden des Saalkomplexes also am längsten und wird zur Mitte hin geringer. Der mittlere Saal bildet aufgrund seiner Größe die Ausnahme. Die Nachhallzeiten werden also zur Mitte des Saalkomplexes hin geringer trotz gleicher Anzahl angeschlossener Säle (bzw. Anzahl angeschlossener Saalreihen). Die besonders starken Unterschiede jeweils von den Sälen IX bis XI sowie XVIII bis XVI deuten darauf hin, dass die zusätzliche schallschluckende Wirkung einer länger werdenden, angeschlossenen Raumreihe mit zunehmender Anzahl der Räume in der Reihe geringer ausfällt. Die schallabsorbierende Wirkung eines zusätzlich mit dem originalen Raum verbundenen Saals ist stärker verglichen mit einer Verlängerung der Raumreihe. Dieser Sachverhalt passt auch zu Ergebnissen von Gade und Yang (Gade 2014, S. 334; Yang 2021, S. 98 und S. 123ff).

#### 4.4.9 Beurteilung der Messergebnisse

Weder der Saalkomplex (sowohl mit Gesamtvolumen als auch mit Durchschnittsvolumen) noch der geschlossene Saal XIV, noch die beiden Hallen erreichen Nachhallzeiten, die innerhalb der vorgegebenen Bereiche liegen (Tab. 25). Halle XIV kommt mit fast 4 s Nachhallzeit sogar in die Nähe von Kirchenakustik.

Tabelle 25: Soll-Werte der Nachhallzeiten für Musik, Sprache und Unterricht in den jeweiligen Ausstellungsbereichen der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, sowie die gemessenen Nachhallzeiten

| Raum                     | $T_{mid}$ [s] | $T_{Musik}$ [s] | $T_{Sprache}$ [s] | $T_{Unterricht}$ [s] |
|--------------------------|---------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| Säle IX – XVIII (gesamt) | 2,84          | 1,85            | 1,32              | 1,10                 |
| Saal XIV (geschlossen)   | 3,21          | 1,51            | 1,04              | 0,85                 |
| Halle XIV                | 3,93          | 1,45            | 1,00              | 0,81                 |
| Halle XVII               | 3,09          | 1,34            | 0,90              | 0,73                 |

Für den geschlossenen Saal XIV gilt als möglicher Ausgangspunkt eine Nachhallzeit im mit 80 Personen besetzten Zustand von  $T_{80 \text{ Personen}} = 2,13 \text{ s}$ , welche im generell guten Bereich für Musik liegt (Fasold/Veres 2003, S. 136). Ab 120 Personen ( $T_{120 \text{ Personen}} = 1,82 \text{ s}$ ) liegt die Nachhallzeit sogar im Toleranzbereich des Musik-Sollwerts. Auch das Klarheitsmaß  $C_{80} = -3,06 \text{ dB}$  liegt nur leicht unter der Mindestgrenze von  $C_{80} = -3 \text{ dB}$  für Musik. Bei den anderen Räumen ist dies nicht der Fall; sie liegen bis zu  $1,5 \text{ dB}$  unter der Grenze. Auffälliger ist es noch bei dem Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ , bei dem alle Räume nicht einmal ein Maß von  $C_{50} = -5 \text{ dB}$  erreichen mit einer eigentlichen unteren Grenze für Sprache von  $C_{80} = -2 \text{ dB}$ . Lediglich der Articulation Loss of Consonants  $AL_{cons}$  deutet darauf hin, dass bei kleinen Gruppen, die nah an einem Museumsguide stehen, eine gewisse Sprachverständlichkeit herrscht. Die Hallen zeigen ein gutes Bassverhältnis für Sprache (Halle XIV:  $BR = 0,92$ ) bzw. Musik (Halle XVII:  $BR = 1,02$ ).

## 5 Folgerungen für die Museen

Die vier hier untersuchten Museen geben lediglich einen kleinen Überblick über die möglichen raumakustischen Bedingungen in Museen und speziell in Ausstellungen über Musikinstrumente. Besonders die beiden Ausstellungen, die sich in historisch wenig veränderten Räumen befinden, zeigen mindestens in der Nachhallzeit unzureichende Werte für Museen und den Empfehlungen für diese (ca.  $T = 1$  s). Auch Werte, die für Musikdarbietungen und Sprache in den jeweiligen Raumvolumen angebracht wären, erreichen diese Räume nicht. Eine Möglichkeit ist, die Räume entsprechend mit Akustikelementen auszustatten, um so die gewünschte Hörsamkeit zu erreichen. Für die Räume der Ausstellung „Musikinstrumente“ des Deutschen Museums, München, wurde bereits jeweils eine gewünschte Hörsamkeit erarbeitet, die im Rahmen von Modernisierungen umgesetzt wurde. Hier sind beide gängigen Bereiche abgedeckt, mit Raum 1 ausgelegt auf Musik und den Räumen 2 und 3 ausgelegt auf Sprachverständlichkeit. Das Musikinstrumenten-Museum Berlin hat ebenfalls Nachhallzeiten, die fast den Empfehlungen für Sprache entsprechen. Der Ausstellungsraum „Musikinstrumente“ im Technischen Museum Wien hingegen hat eine zu lange Nachhallzeit. Die nötige zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche zum Erreichen eines Soll-Werts lässt sich berechnen mit

$$A_{\text{äq}} = 0,163 * V * \left( \frac{T_{\text{mid}} - T_{\text{soll}}}{T_{\text{soll}} * T_{\text{mid}}} \right) \text{ in } m^2$$

Um die Nachhallzeit des Technischen Museums in den Empfehlungsbereich zu verringern, benötigt man demnach mindestens eine zusätzliche Absorptionsfläche von  $26 m^2$ . Für den Optimal-Wert wird eine zusätzliche Absorptionsfläche von ca.  $60 m^2$  benötigt. Diese muss jedoch auch strategisch im Raum verteilt werden. Im Rahmen der Geschichte der Museumsgebäude muss allerdings auch beachtet werden, welche Wirkung die Akustik auf das Museumserlebnis als Besuch eines historischen Gebäudes haben kann. In klar als historisch erkennbaren Räumen könnte sich eine längere Nachhallzeit sogar positiv auf den Raumeindruck auswirken (Patel 2019, S. 228ff; Orhan/Yilmazer 2021, S. 6). In diesem Sinne wäre eine starke Veränderung z. B. in der Sammlung alter Musikinstrumente, Wien, in dem Saalkomplex nicht empfehlenswert, damit sich die Erwartungen an diese großen, im Stil des 19. Jhdt. gehaltenen Säle mit den tatsächlichen akustischen Bedingungen decken. Die Abstimmung zwischen Raum

und Raumakustik sollte immer auch der Vorbeugung von Museums-Fatigue dienen (Orhan/Yilmazer 2021, S. 8ff).

Eine weitere Möglichkeit, mit verfehlten Empfehlungen in der Raumakustik umzugehen, ist die Einbindung von akustisch besonders problematischen Räumen in die narrative Gestaltung der Ausstellung (Bubaris 2014, S. 394f). Bei der Halle XIV der Sammlung alter Musikinstrumente in Wien könnte dies eine mögliche Lösung sein. Die Nachhallzeit  $T = 3,93 \text{ s}$  ist mehr als doppelt so hoch wie der Optimal-Wert für Musikdarstellungen, fast vierfach des Optimal-Wertes für Sprachdarbietungen. Um die Nachhallzeit auf den Soll-Wert für Musik zu bringen, müsste die äquivalente Absorptionsfläche um mehr als  $80 \text{ m}^2$  erhöht werden, für Sprachdarbietungen sogar fast  $230 \text{ m}^2$ . Statt die Nachhallzeit anzupassen können auch Exponate gewählt werden, die sonst in Räumen mit ähnlichen raumakustischen Bedingungen gespielt werden. So hohe Nachhallzeiten sind meistens in Kirchen und Sakralräumen zu finden (Fasold/Veres 2003, S. 208ff). Möglich wäre bspw. ein Ausstellungsbereich zu Instrumenten alter Kirchenmusik.

Ein größeres Problem sind in allen historischen Gebäuden die sehr großen Stärkemaße  $G$ , die dazu führen, dass die Räume schnell sehr laut werden. Lediglich das modernste Gebäude, das Musikinstrumenten-Museum Berlin, ist innerhalb des empfohlenen Rahmens von  $+1 - +10 \text{ dB}$  für Sprache und Musik (Fasold/Veres 2003, S. 136); die anderen Ausstellungen bewegen sich viel mehr im gängigen Bereich historischer Säle (Ahnert/Tennhardt 2008, S. 2001). Es sollte deshalb darauf geachtet werden, dass bei Exponaten der Schall möglichst daran gehindert wird, sich als Störgeräusche im Raum zu verteilen (Fry 2002, S. 14f). Gleichzeitig sollten die akustischen Interaktiv-Exponate hörbar genug sein, um bei Besucher\*innen in der Nähe Neugierde zu wecken.

## 6 Forschungsausblick

Um die genauen Verhältnisse zwischen Museumsbesuchern, Exponaten und Raumakustik betrachten zu können, braucht es noch weitere vertiefende Forschung. Hier wurden zunächst nur erste Messdaten zu den Bedingungen in vier Museen vorgelegt, mit einem Schwerpunkt auf raumakustische Messungen. Es gibt jedoch noch viele weitere öffentliche und private Musik-Ausstellungen und Instrumentensammlungen, die vermessen werden können. Während dies zwar ein wichtiger Teil in der Gestaltung des Museumsraums ist, sollte natürlich nicht die Ausstellung selbst und ihr Inhalt aus dem Blick gelassen werden. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist die Betrachtung von Musikinstrumenten-Ausstellungen aus der Sicht der Museumsdidaktik (siehe Everett 2019). Ein weiterer Punkt hier ist die Beschreibung der Räume und des Ausstellungskonzepts durch die Verantwortlichen selbst (siehe Varsányi 2014). Auch die Gebäudegeschichte kann viel Hintergrund liefern, um die akustischen Umgebungen und Entwicklungen in den Ausstellungen zu verstehen (siehe Rich 2017 und de Visscher 2014). Verbunden mit all diesen Hintergründen kann besser über das Zusammenspiel zwischen Ausstellung und Raumakustik geforscht werden. Aber nicht nur die historische Sichtweise gibt wichtige Anhaltspunkte, um die Forschung um Hörsamkeit in Museen und besonders in Musikinstrumentenausstellungen auszubauen. Die Untersuchungen von Orhan und Yilmazer (2021) sowie Bem et al. (2025) zeigen, dass die Besucher\*innen im Blick behalten werden müssen. Durch Fragebögen an die Besucher\*innen kann vor Ort in bestehenden akustischen Situationen geforscht werden. Neue Methoden im Bereich Virtual Reality (wie genutzt von Bem et al. 2025) können hier aber auch genutzt werden, um separat von den Museen zu überprüfen, welchen Einfluss Raumakustik auf die Interaktion mit akustischen Hands-On-Exponaten und der Beurteilung dieser haben kann. Aufgrund dieser Methoden können auch neue Empfehlungen für Musikinstrumentensammlungen aufgestellt werden, wie mit Raumakustik umgegangen werden könnte. Erste Empfehlungen – wenn auch nur für die didaktische Arbeit – gibt es durch das CIMCIM (Birley et al. 1998). Jedoch zeigen auch die Richtlinien und Empfehlungen zur Raumakustik, dass sich lediglich bedingt mit dem Raumtyp „Museum“ überhaupt beschäftigt wurde (siehe Nocke 2014, S. 112ff). Eine weitere Art der Forschungsarbeit sollte darum auch darin bestehen, sich intensiv mit den aktuellen Richtwerten zu beschäftigen und sie im Kontext realer Museumsgebäude- und Bedingungen zu setzen.



## 7 Conclusio

In der vorliegenden Masterarbeit wurden vier sehr unterschiedliche Ausstellungen für Musikinstrumente raumakustisch vermessen. Sowohl in der Art und Geschichte der Räume als auch im Hintergrund der jeweiligen Ausstellungskonzepte finden sich Unterschiede, die Einfluss nehmen auf das Zusammenspiel von Ausstellung und Raum. Während die modernen und modernisierten Ausstellungsräume ein klares raumakustisches Konzept zu verfolgen scheinen, bleiben die historisch belassenen Gebäude hinter den Erwartungen an Hörsamkeit in Museen zurück. Gleichzeitig sind sie im Einklang mit typischerweise in alten (Konzert-)Sälen vorhandenen raumakustischen Werten. Fraglich ist daher, inwieweit die jeweilige Raumakustik von den Besucher\*innen als passend empfunden wird. Ein gängiges Problem ist in den (historischen) schallabsorptions-technisch wenig ausgestatten Räumen das Stärkemaß. Es liegt in diesen Räumen regelmäßig weit über den empfohlenen Werten und verstärkt so vor allem auch Störgeräusche oder macht Klänge, die innerhalb der Ausstellung eigentlich erwünscht sind, zu Störgeräuschen. Für den raumakustischen Umgang mit Interaktiv-Exponaten gibt es allerdings bereits erste Forschungen und Empfehlungen, die zur Abhilfe herangezogen werden können. Auch zum allgemeinen Klangbild in Museen wurde bereits geforscht, sodass, aufbauend auf den jeweiligen Studien, Ausstellungskonzepte im Einklang mit der vorhandenen Raumakustik und mit den klanglichen Konzepten erarbeitet werden können. So könnten für Museen sonst störende raumakustische Bedingungen unter dem Vorwand der Musik, des Ausstellungskontexts und des Ausstellungsnarrativs genutzt werden, um bei den Besucher\*innen sogar eine stärkere Immersion in den Ausstellungsinhalt zu erreichen, mindestens aber möglicher Museums-Fatigue durch eine unpassende Soundscape entgegenzuwirken. Mindestens ausreichend funktioniert in den vier Museen die Sprachverständlichkeit, die teilweise besonders in raumakustischen Planungen beachtet wurde. In den historisch belassenen Sälen trotz sie langen Nachhallzeiten, die weit über die empfohlenen Soll-Werte nach DIN 18041 hinausgehen. Dies ist besonders wichtig für die Kommunikation mit den Museumsbesucher\*innen untereinander, aber auch während Museums-Führungen, bei denen mit den Besucher\*innen möglichst interagiert werden soll. Der Störcharakter von langer Nachhallzeit sollte dennoch nicht vernachlässigt werden, ebenso wie andere Störgeräusche, die durch Exponate, Menschen und den Raum selbst zustande kommen.



## Quellen

DIN 18041:2016-3. *Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*, Berlin: DIN Media 2016.

ISO 3382-2:2008. *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*, Genf: ISO 2008.

Ahearn, Meghan J. / Schaeffler, Matthew J. / Celmer, Robert D. / Vigeant, Michelle C.: „Investigation of the just noticeable difference of the clarity index for music, C80“, in: *The Journal of the Acoustical Society of America* 126/4 (2009), Art. 2288.

Ahnert, Wolfgang / Tennhardt, Hans-Peter: „Raumakustik“, in: Stefan Weinzierl (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 181–266.

Anderson, B. Wayne / Kalb, Joel T.: „English verification of the STI method for estimating speech intelligibility of a communications channel“, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 81/6 (1987), S. 1982–1985.

Aretz, Marc / Orłowski, Raf: „Sound strength and reverberation time in small concert halls“, in: *Applied Acoustics* 70/8 (2009), S. 1099–1110.

Bem, Milena Jonas / Chabot, Samuel R. V. / Braasch, Jonas: „Effects of sounds on the visitors' experience in museums“, in: *The Journal of the Acoustical Society of America* 154/4 (2023), Art. A257, DOI: 10.1121/10.0023459.

Birley, Margaret / Eichler, Heidrun / Myers, Arnold / CIMCIM Working Group for Education and Exhibitions: *Voices for the Silenced. Guidelines for Interpreting Musical Instruments in Museum Collections*, Paris: ICOM 1998, [https://cimcim.mini.icom.museum/wp-content/uploads/sites/7/2019/01/Voices\\_for\\_the\\_Silenced.pdf](https://cimcim.mini.icom.museum/wp-content/uploads/sites/7/2019/01/Voices_for_the_Silenced.pdf), Zugriff: 28.09.2025.

Bradley, John S. / Reich, Rebecca / Norcross, Scott G.: „A just noticeable difference in C50 for speech“, in: *Applied Acoustics* 58/2 (1999), S. 99–108.

Brezina, Pavol: „Measurement of intelligibility and clarity of the speech in Romanesque churches“, in: *Journal of Cultural Heritage* 16/3 (2015), S. 386–390, DOI: 10.1016/j.culher.2014.06.010.

Bubaris, Nikos: „Sound in museums – museums in sound“, in: *Museum Management and Curatorship* 29/4 (2014), S. 391–402, DOI: 10.1080/09647775.2014.934049.

Campanini, Simone / Farina, Angelo: „A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module“, in: *Proceedings of the Linux Audio Conference 2009, Parma, Italy, 16.–19. April 2009*, 2009, <https://www.angeloferina.it/Public/papers/246-LAC-2009.pdf>, Zugriff: 12.12.2025.

Campbell, Colin / Nilsson, Erling / Svensson, Carsten: „The same reverberation time in two identical rooms does not necessarily mean the same levels of speech clarity and sound levels when we look at impact of different ceiling and wall absorbers“, in: *Energy Procedia* 78 (2015), S. 1635–1640.

Carvalho, António P. O. / Garcia, Luísa M. M. / Gonçalves, Hélder J. S.: „Acoustics of Modern and Old Museums“, in: *Proceedings of the NOISE-CON Congress and Conference, Denver, Colorado, 26.–28. August 2013*, 2013, <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/68667>, Zugriff: 29.09.2025.

Carvalho, António P. O. / Garcia, Luísa M. M. / Gonçalves, Hélder J. S.: „A multi-criterion method to assess the acoustic quality in museums“, in: *Proceedings of the NOISE-CON Congress and Conference, Fort Lauderdale, Florida, 8.–10. September 2014*, 2014, <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/76129/2/92415.pdf>, Zugriff: 29.09.2025.

D’Orazio, Dario / Montoschi, Federico / Garai, Massimo: „Acoustic comfort in highly attended museums: A dynamical model“, in: *Building and Environment* 183 (2020), Art. 107176, DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107176.

Dwan, Albert / Nielsen, Jonas Edvard / Wurm, Jan: „Room acoustics of Mycelium Textiles. The Myx Sail at the Danish Design Museum“, in: *Research directions. Biotechnology design* 2 (2024), Art. e7, DOI: 10.1017/btd.2024.2.

Eßner, Georg / Schäfer, Thomas: „Messung der Nachhallzeiten in großen und/oder leeren Räumen“, in: *Bauphysik* 34/2 (2012), S. 45–54.

Everett, Tom: „A Curatorial Guide to Museum Sound Design“, in: *Curator: The Museum Journal* 62/3 (2019), S. 313–325, DOI: 10.1111/cura.12305.

Foteinou, Aglaia / Murphy, Damian Thomas: „The control of early decay time on auralization results based on geometric acoustic modelling“, in: *Baltic Nordic Acoustics Meeting (BNAM2012)*, 18-20 Jun 2012, 2012, <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/75128>, Zugriff: 28.09.2025

Fry, Robert: „Delightful Sound and Distracting Noise. The Acoustic Environment of an Interactive Museum“, in: *The Journal of Museum Education* 27/1 (2002), S. 14–17.

Gade, Anders C.: „Acoustics in Halls for Speech and Music“, in Rossing, Thomas D. (Hrsg.): *Springer Handbook of Acoustics* (2. Auflage), Berlin, Heidelberg: Springer 2014, S. 317–366.

Harvie-Clark, Jack / Dobinson, N. „The practical application of G and C50 in classrooms“, in: *Proceedings of the INTER\_NOISE and NOISE-CON Congress and Conference, Innsbruck, Austria, 15.–18. September 2013*, 2013, S. 1510–1520.

Hentschel, Thomas: *Praktische Raumakustik. Grundlagen, Konzepte und Methoden*, Saarbrücken: VDM 2008.

Lee, Hyojin / Jeong, Daeup: „The effect of changes in the configuration of a slatted ceiling on reverberation and clarity in a room“, in: *Applied Acoustics* 235 (2025), DOI: 10.1016/j.apacoust.2025.110693

Maier, Peter: „Studioakustik“, in: Stefan Weinzierl (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*, Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 267–312.

Martin, Noemi / Liebl, Andreas: „Wirkung von Nachhall in Bildungsräumen“, in: *Bauphysik* 40/5 (2018), S. 270–275.

Martellotta, Francesco: „The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces“, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 128/2 (2010), S. 654–663.

Meng, Zihou / Zhao / Fengjie / He, Mu: „The Just Noticeable Difference of Noise Length and Reverberation Perception“, in: *Proceedings of the 2006 International Symposium on Communications and Information Technologies, Bangkok, Thailand, 2006*, 2006, S. 418–421, DOI: 10.1109/ISCIT.2006.339980.

Miśkiewicz, Andrzej / Rogala, Tomira / Rościszewska, Teresa / Rudzki, Tomasz / Fidecki, Tadeusz: „Concert Hall Sound Clarity. A Comparison of Auditory Judgements and Objective Measures“, in: *Archives of Acoustics* 37/1 (2012), S. 41–46.

Nocke, Christian: *Raumakustik im Alltag. Hören – Planen – Verstehen*, Stuttgart: Fraunhofer IRB 2014.

Orhan, Cemre / Yilmazer, Semiha: „Harmony of context and the built environment. Soundscapes in museum environments via GT“, in: *Applied Acoustics* 173 (2021), Art. 107709, DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107709.

Patel, Raj: *Architectural Acoustics. A guide to integrated thinking*, London: RIBA Publishing 2020, DOI: 10.4324/9780429348044.

Peutz, Victor M. A.: „Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room“, in: *Journal of the Audio Engineering Society* 19/11 (1971), S. 915–919.

Rich, Jennifer: „Acoustics on display. Collecting and curating sound at the Science Museum“, in: *Science Museum Group Journal* 7 (2023), DOI: 10.15180/170706.

Rindel, Jens Holger: „The Acoustics of places for social gatherings“, in: *Proceedings of the EuroNoise Conference, Maastricht, Niederlande, 31. Mai – 3. Juni 2015*, 2015, S. 2429–2436, <https://odeon.dk/pdf/C127-Keynote%20EuroNoise%202015%20Rindel.pdf>, Zugriff: 29.09.2025.

Spandöck, Friedrich: „Akustische Modellversuche“, in: *Annalen der Physik* Band 20/4 (5. Folge) (1934), S. 345–360.

Taghipour, Armin / Athari, Sahand / Disladottir, Arnthrudur / Sievers, Tessa / Eggen-schwiler, Kurt: „Room Acoustical Parameters as Predictors of Acoustic Comfort in Outdoor Spaces of Housing Complexes“, in: *Frontiers in psychology* 11 (2020), S. 344. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.00344.

de Visscher, Eric: „Sight and Sound. From a Museum of Instruments to a Museum of Music“, in: *Music in Art* 39/1-2 (2014), S. 237–241.

Werner, Ulf-Jürgen: *Schallschutz und Raumakustik. Handbuch für Theorie und Praxis*, Berlin: Bauwerk 2009.

van Wijngaarden, Sander J. / Drullman, Rob: „Binaural intelligibility prediction based on the speech transmission index“, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 123/6 (2008), S. 4514–4523.

Wyatt, Simon: „Music in the Museum“, in: *Music in Art* 39/1-2 (2014), S. 267–279.

Yang, Tingting: *Acoustics in Sequential Spaces*, Dissertation. University College London, 2021.

### Online-Quellen

AndreasPraefke: „Berlin Musikinstrumentenmuseum 3.jpg“, in: *Wikimedia Commons*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berlin\\_Musikinstrumentenmuseum\\_3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Berlin_Musikinstrumentenmuseum_3.jpg), Nutzung unter der Creative Commons-Lizenz „Attribution-Share Alike 3.0 Unported“: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>, Zugriff: 26.11.2025.

Deutsches Museum [1]: „Alle Ausstellungen auf der Münchner Museumsinsel“, in: *Website des Deutschen Museums*, <https://www.deutsches-museum.de/museumsinsel/ausstellung/alle-ausstellungen>, Zugriff: 28.09.2025.

Deutsches Museum [2]: „Die Geschichte des Deutschen Museums“, in: *Website des Deutschen Museums*, <https://www.deutsches-museum.de/museum/geschichte>, Zugriff: 28.09.2025.

Deutsches Museum [3]: „Einblicke“, in: *Website des Deutschen Museums*, <https://modernisierung.deutsches-museum.de/einblicke>, Zugriff: 28.09.2025.

International Council of Museums: „Museum Definition“, in: *Website des International Council of Museums*, <https://icom.museum/en/resources/standards-guidelines/museum-definition>, Zugriff: 28.09.2025.

Kunsthistorisches Museum: „Sammlung alter Musikinstrumente“, in: *Website des Kunsthistorischen Museums*, <https://www.khm.at/ausstellungen/sammlung-alter-musikinstrumente#tab-neuaufstellung-in-der-neuen-burg-3732>, Zugriff: 28.09.2025.

Morn the Gorn: „MIM Pleyel Harpsichord CN454.jpg“, in: *Wikimedia Commons*, Nutzung unter der Creative Commons-Lizenz „Attribution 3.0 Unported“: <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.en>, Zugriff: 26.11.2025.

Staatliches Institut für Musikforschung [1]: „Geschichte des MIM“, in: *Website des Staatlichen Instituts für Musikforschung*, <https://www.simpk.de/museum/sammlung/geschichte.html>, Zugriff: 28.09.2025.

Staatliches Institut für Musikforschung [2]: „Informationen für Ihren Besuch“, in: *Website des Staatlichen Instituts für Musikforschung*, <https://www.simpk.de/museum/besuch-des-musikinstrumenten-museums/informationen-fuer-ihren-besuch.html>, Zugriff: 26.11.2025.

„Technisches Museum (Gebäude)“, in: *Wien Geschichte Wiki*, [https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/index.php?title=Technisches\\_Museum\\_\(Geb%C3%A4ude\)&oldid=978417](https://www.geschichtewiki.wien.gv.at/index.php?title=Technisches_Museum_(Geb%C3%A4ude)&oldid=978417), Beitrag in Version vom 04.02.2025, Zugriff: 28.09.2025.

Technisches Museum Wien [1]: „Museumsplan“, in: *Website des Technischen Museums Wien*, <https://www.technischesmuseum.at/museumsplan>, Zugriff: 28.09.2025

Technisches Museum Wien [2]: „Music Lounge. Elektronische Musik in Österreich“, in: *Website des Technischen Museums Wien*, [https://www.technischesmuseum.at/ausstellung/music\\_lounge](https://www.technischesmuseum.at/ausstellung/music_lounge), Zugriff: 28.09.2025.

Technisches Museum Wien [3]: „Musikinstrumente“, in: *Website des Technischen Museums Wien*, <https://www.technischesmuseum.at/ausstellung/musikinstrumente>, Zugriff: 28.09.2025.

TU Berlin: „Hans Scharoun als Architekt des ‚Neuen Bauens‘“, in: *Website der TU Berlin*, <https://www.tu.berlin/ueber-die-tu-berlin/geschichte/persoenlichkeiten/hans-scharoun>, Zugriff: 28.09.2025.



