
RAUMAKUSTIK: GRUNDLAGEN, KONZEPTE UND ANWENDUNGSBEISPIELE

Toningenieur-Projekt

Autor: Daniel Reisinger, 00912535
Datum: Graz, SS 2018
Betreuerin: Dipl.-Ing. Jamilla Balint

Abstract

The acoustic properties of a room determine its suitability for specific uses. The requirements and specifications for music performance, teaching or industry are significantly different. As part of this project, the relevant standards and guidelines of various sectors were considered. In room acoustic evaluations the room impulse response is an easy-to-determine size to calculate acoustically interesting parameters such as reverberation time or quality measures. For this purpose, a tool for ISO-compliant impulse response processing was programmed in Matlab. In addition to calculation options for quality measures and stage measured quantities, this includes an algorithm to minimize the influence of noise when calculating reverberation time.

A further section is dedicated to the room acoustics of venues. Concert halls and operas fascinate not only with their visual appearance and ambience, but also with their outstanding acoustic qualities. Based on research by the acousticians Beranek and Adelman-Larsen, a selection of venues in room acoustics was considered. In addition, it explains how the subjective perception of hearing can be linked to acoustically measurable factors and why room acoustics parameters of venues have to be regarded with respect to the performed musical genre.

Abstrakt

Die akustischen Eigenschaften eines Raumes bestimmen dessen Eignung für unterschiedliche Verwendungszwecke. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen und Vorgaben für Musikdarbietung, Unterricht oder Industrie maßgeblich. Im Rahmen der Projektarbeit wurden zugehörige Normen und Richtlinien verschiedener Sparten betrachtet. Zentral ist bei den notwendigen raumakustischen Evaluierungen die Raumimpulsantwort. Mit dieser einfach zu ermittelnden Größe können akustisch interessierende Parameter wie die Nachhallzeit oder Gütemaße errechnet werden. Dazu wurde ein Tool zur ISO-konformen Verarbeitung von Impulsantworten in Matlab programmiert. Dieses enthält neben Berechnungsmöglichkeiten für Gütemaße und Bühnennessgrößen auch einen Algorithmus zur Störgeräuschkompensation bei Berechnung der Nachhallzeit.

Ein Abschnitt widmet sich der Raumakustik von Spielstätten. Konzertsäle für Orchester und Oper faszinieren neben Optik und Ambiente auch durch ihre herausragenden akustischen Eigenschaften. Stützend auf Untersuchungen der Akustiker Beranek und Adelman-Larsen wurde eine Auswahl an Spielstätten in ihren raumakustischen Merkmalen betrachtet. Zudem wird erläutert, wie das subjektive Hörempfinden mit akustisch messbaren Faktoren in Verbindung gebracht werden kann und warum die raumakustischen Parameter von Spielstätten genreabhängig sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Überblick einiger Normen aus der Raumakustik	2
2.1	ÖNORM EN ISO 3382-1. Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 1: Aufführungsplätze (2009)	2
2.2	ÖNORM EN ISO 3382-2. Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (2009)	10
2.3	ÖNORM EN ISO 3382-3 - Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 3: Großraumbüros	14
2.4	ÖNORM B 8115-3. Schallschutz und Raumakustik im Hochbau Teil 3: Raum- akustik (2005)	18
2.5	OIB-Richtlinie 5: Schallschutz (2015)	20
3	Raumakustik an Aufführungsorten	23
3.1	Aufführungsorte für Orchestermusik und Oper	23
3.2	Aufführungsorte für Rock- und Popmusik	31
3.3	Auswahl an Konzerthäusern in Österreich	36
3.3.1	Salzburg: Großes Festspielhaus	36
3.3.2	Wien: Großer Musikvereinsaal	39
3.3.3	Wien: Konzerthaus	43
3.3.4	Wien: Staatsoper	47
3.4	Auswahl an Konzerthäusern weltweit	51
3.4.1	Berlin, Deutschland: Philharmonie	51
3.4.2	Bayreuth, Deutschland: Richard-Wagner-Festspielhaus	55
3.4.3	Boston, USA: Boston Symphony Hall	60
3.4.4	Luzern, Schweiz: Kultur- und Kongresszentrum	64
3.4.5	Sydney, Australien: Concert Hall of the Sydney Opera House	69
4	Verarbeitung von Raumimpulsantworten	73
4.1	Berechnungen mittels Impulsantwort	73
4.1.1	Schröder Rückwärtsintegration zur Berechnung der Nachhallzeit	75
4.1.2	Truncation- und Kompensationsalgorithmen zur störgeräuschreduzier- ten Auswertung gemessener Raumimpulsantworten	75
4.1.3	Auswertung der gegebenen Impulsantworten	80
4.2	Fazit und Ausblick	103
5	Michael Möser, Technische Akustik	104
5.1	Rechenbeispiele Kapitel 1 S. 15ff	104
5.2	Rechenbeispiele Kapitel 2 S. 71ff	108
5.3	Rechenbeispiele Kapitel 3 S. 118ff	116
5.4	Rechenbeispiele Kapitel 6 S. 223ff	123
5.5	Rechenbeispiele Kapitel 7 S. 244ff	132
6	Anhang	138
6.1	MATLAB-Tool Programmcode	138
6.2	MATLAB-Skript Möser Kap. 3 Bsp. 8	152

1 Einleitung

Die akustischen Bedingungen in einer Räumlichkeit entscheiden über deren Eignung für bestimmte Verwendungszwecke. Allgemein beeinflusst geeignete Raumakustik Lebensraum für Freizeit, Arbeit, Bildung, aber auch Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen positiv. Gleichermaßen kann eine ungeeignete Akustik die Kommunikation stören, ein Konzerterlebnis trüben oder sich gar gesundheitlich negativ auswirken. Es ist daher wichtig, die notwendigen Parameter, welche die akustischen Eigenschaften eines Raumes maßgeblich bestimmen, im geeigneten Rahmen festzulegen und evaluierbar zu machen.

Die vorliegende Projektarbeit befasst sich im ersten Abschnitt mit den typischen Normen und Vorschriften innerhalb der Raumakustik, welche Aufschluss über Berechnung und Messung von raumakustischen Parametern sowie deren Bedeutung geben. Zu erkennen ist, wie und warum Örtlichkeiten je nach Verwendungszweck in ihrer Akustik unterschiedlich zu planen und auszustatten sind. Der nachfolgende Abschnitt *Raumakustik an Aufführungsorten* betrachtet die Ansprüche, messtechnisch erfassbare Charakteristika sowie allgemeine Gebäudeeigenschaften von Aufführungsorten für Musik und zeigt, wie und warum die raumakustische Gestaltung genreabhängig ist. Zudem werden subjektiven Beurteilungskriterien der akustischen Qualitäten eines Raumes mit objektiv-messbaren Kriterien in Verbindung gebracht. Anschließend finden sich noch einige Beispiele an Aufführungsorten, die in ihrer Architektur und den raumakustischen Eigenschaften beschrieben werden.

Ein zentraler Arbeitsgegenstand ist das Kapitel *Verarbeitung von Raumimpulsantworten*, da aus diesen sämtliche Parameter für akustischen Eigenschaften eines Raumes ermittelt werden können. Hierbei wurde ein Tool entwickelt, welches unterschiedliche Berechnungen der Nachhallzeit sowie die Berechnung von Gütemaßen ermöglicht. Zudem werden die Problematiken, induziert durch Störgeräuscheinfluss sowie endliche Integrationsgrenzen, aufgezeigt und Vorschläge zur Kompensation erläutert. Die Abhandlung erfolgt auf Basis eines Vergleichs von drei vorgegeben Impulsantworten. Das abschließende Kapitel gibt einen breit gefächerten Einblick in Berechnungsmöglichkeiten der technischen Akustik mit Hauptaugenmerk auf Raumakustik.

2 Überblick einiger Normen aus der Raumakustik

Es gibt mehrere Normen und Richtlinien, welche für die raumakustische Gestaltung und Messung von zugehörigen Parametern relevant sind. Diese zielen darauf ab, die akustischen Eigenschaften von Räumen so zu regeln, dass für NutzerInnen gute Verhältnisse im Rahmen des jeweiligen Verwendungszweck gesichert werden können. Neben wichtigen Vorgaben für die Sprachverständlichkeit und Musikgenuss liegen zudem Vorschriften für die Regelung von Lärmbelastungen vor, um eventuelle gesundheitliche Beeinträchtigungen auf ein Minimum zu reduzieren. Einige Normen zielen daher darauf ab, bereits im Bauplanungsprozess Entscheidungen und Vorgaben zu integrieren.

Im Rahmen der Arbeit wurde die dreiteilige ÖNORM EN ISO 3382 betrachtet, welche die Anforderungen von Aufführungsplätzen, gewöhnlichen Räumen und Großraumbüros regelt. Zusätzlich enthalten ist der dritte Teil der Norm B-8115, welche neben Regelungen für Schallschutz auch Vorgaben zur Raumakustik enthält. Eine aktuellere Richtlinie des Österreichischen Instituts für Bautechnik wird in Ergänzung ebenfalls betrachtet.

2.1 ÖNORM EN ISO 3382-1. Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 1: Aufführungsplätze (2009)

Die ÖNORM EN ISO 3382-1 legt die Nachhallzeit als wesentliche Kenngröße zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften eines Raumes fest. Im ersten Teil werden hierbei die Messverfahren zur Ermittlung der Nachhallzeit mit der Impulsantwort und Methode des abgeschalteten Rauschen für Aufführungsräume beschrieben. Neben den Verfahren selbst, werden auch benötigte Geräte, Auswertung, Erstellung von Prüfberichten und aus der Impulsantwort abgeleitete Parameter erläutert bzw. definiert.

Messung der Nachhallzeit

In diesem Abschnitt werden grundlegende Begrifflichkeiten wie z.B. Abklingkurve mit Verweis auf die [ISO 354 2003] beschrieben. Für die Bestimmung der Abklingkurve wird allerdings von nicht-kontinuierlicher Anregung (z.B. Pistolenschuss mit Pegelschreiber aufzeichnen), mit Ausnahme von Überschlagsmessungen, abgeraten.

Zudem werden Kategorien von Besetzungszuständen definiert: *unbesetzt* (nutzungsbereit, allerdings ohne anwesende Personen), *Studiozustand* (mit Ausführenden, ohne Publikum) und *besetzt* (80-100% der Plätze sind belegt).

Messungen können in allen Besetzungszuständen durchgeführt werden. Einrichtungen zur Variation der Raumakustik sollten sich in Normaleinstellung befinden; bei elektroakustischen Systemen ist deren Auswirkungen zu bestimmen. Temperatur und relative Luftfeuchte sollten mit Grenzabweichungen von ± 1 °C und $\pm 5\%$ gemessen werden. In Theatern sind nutzungstypische Szenarien zu beschreiben und gegebenenfalls Mehrfachmessungen durchzuführen (z.B. Vorhang offen/geschlossen, Bühneneinrichtung).

Prüfeinrichtungen

Die Schallquelle sollte so ungerichtet wie möglich sein und einen genügend hohen Schallpegel erzeugen, wobei der Minimalabstand Quelle-Mikrofon 1,5 m betragen muss. Es sollen ungerichtete und kleinstmögliche Mikrofone (max. 13 mm Membrandurchmesser bzw. max. 26 mm bei Druckempfänger) zur Ermittlung des Schalldrucks verwendet werden, deren Ausgangssignal direkt in entsprechende Eingänge eines (Live)Analysesystems bzw. in ein Signalaufzeichnungsgerät zur späteren Analyse gespeist wird. Filter und Messgerät haben den IEC-Bestimmungen nach [IEC 61260-1 2014] bzw. [IEC 61672-1 2013] zu genügen.

Eine eventuell notwendige Aufzeichnung ist auf Magnetband oder digital möglich, wobei keine automatische Verstärkungsregelung bzw. dynamische Rauschabstandsoptimierung eingesetzt werden darf. Die Aufnahmedauer soll 5 s über der erwarteten Nachhallzeit liegen. Zudem sind Eigenschaften für den Frequenzgang mit flach, ($< \pm 3$ dB), Dynamikbereich (Rauschabstand mind. 50 dB) festgelegt. Für Altgeräte relevant: erlaubt sind möglichst geringe Geschwindigkeitsschwankungen ($\pm 2\%$) zwischen Wiedergabe und Aufnahme.

Apperatur zur Erzeugung der Aufzeichnung des Pegelabklingvorgangs

Hier stehen drei Verfahren zur Auswahl:

- Exponentialmittelwertbildung mit kontinuierlicher Kurve als Ausgangssignal
- Exponentialmittelwertbildung auf Basis aufeinanderfolgender, diskreter Abtastwerte aus fortlaufend gebildeten Mittelwerten des Ausgangssignal
- Mittelwertbildung aufeinanderfolgender, diskreter Linear-Mittelwerte als Ausgangssignal

Die Mittelwertbildungszeit muss kleiner als $\frac{T}{12}$ sein, wobei T die Nachhallzeit in Sekunden darstellt. Übersteuerung darf in keiner Form auftreten, wobei bei Impulsschallquellen Spitzenwert-Anzeiger zur Überwachung anzuwenden sind.

Messpositionen

Es müssen mindestens zwei Senderpositionen, gewählt entsprechend der üblichen Nutzungsorte und 1,5 m über den Boden, eingesetzt werden. Die Mikrofone müssen an für ZuhörerInnenpositionen repräsentativen Orten platziert werden (Ohrhöhe), wobei der gesamte Raum erfasst werden muss. Die Positionen müssen $\frac{\lambda}{2}$ bzw. 2 m voneinander, und $\frac{\lambda}{4}$ bzw. 1 m von reflektierenden Oberflächen entfernt liegen. Zudem ist eine Mikrofonposition zu nah an der Quelle zu vermeiden, da der so erfasste Direktschall das Ergebnis verfälscht. Zudem ist anhand der Geometrie und Raumbeschaffenheit visuell zu beurteilen, ob eine Mittelwertbildung der Messungen sinnvoll ist. Die Beurteilung soll dabei auf Absorptions- bzw. Streueigenschaften von Begrenzungsflächen und Verbindung der Raumvolumina Bezug nehmen. Bei unzureichender Homogenität sind getrennte Messungen und Beurteilungen vorzunehmen.

Messverfahren - Verfahren des abgeschalteten Rauschens

Der Raum wird mittels Lautsprecher angeregt, wobei Anregungssignal und Quelle folgende Eigenschaften besitzen muss:

- Das Signal muss breitbandiges, statistisches oder pseudo-statistisches, elektrisches Rauschen sein.

- Die Bandbreite muss jeweils größer als eine Terz bzw. Oktave gewählt werden, wobei das Signal im jeweiligen Band ein entsprechend flaches Spektrum besitzen muss. Alternativ kann das Spektrum eine rosa Färbung besitzen.
- Der erzeugte Pegel muss so hoch liegen, dass die Abklingkurve mindestens 35 dB über dem Störpegel im entsprechenden Frequenzband liegt. Bei Messung von T_{30} sind mindestens 45 dB vorgeschrieben.

Hierbei muss sowohl beim Standard- als auch beim Präzisionsverfahren das Rauschen so lange eingeschaltet bleiben, bis das Schallfeld im Raum den stationären Zustand erreicht. Die Anzahl der notwendigen Messpositionen ergibt sich aus der geforderten Genauigkeit, wobei aufgrund des Zufallscharakters des Sendersignals eine Messreihe aufgenommen und deren Mittelwert gebildet werden muss.

Verfahren der integrierten Impulsantwort

Die Impulsquelle, welche eine quasi beliebige Schallquelle sein kann, muss einen Spitzenschalldruck erzeugen können, der ausreicht, um in jedem relevanten Frequenzband mindestens 35 dB über dem Störpegel (T_{30} : 45 dB) zu liegen. Gemäß [ISO 18233 2006] dürfen auch besondere Schallsignale, welche die Impulsantwort erst nach spezielle Verarbeitung des Mikrofonsignals liefern, genutzt werden. Das können z.B. Sinus-Sweep oder MLS sein.

Durch Integration der auf diesen Wegen erhaltenen und anschließend quadrierten Impulsantwort erhält man die Abklingkurve durch Rückwärts-Integration:

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau)d\tau + C = \int_\infty^t p^2(\tau)d(-\tau) + C \quad (2.1)$$

Beziehungsweise

$$\int_t^\infty p^2(\tau)d\tau = \int_0^\infty p^2(\tau)d\tau - \int_0^t p^2(\tau)d(\tau) \quad (2.2)$$

p ... Schalldruck der Impulsantwort als Zeitfunktion, E ... Energie der Abklingkurve als Zeitfunktion, t ... Zeit

Bei bekanntem Störpegel können bei Gleichung (2.1) die Grenzen t sowie $t_1 > t$ verwendet und zum Ergebnis ein wählbarer Korrekturwert C hinzuaddiert werden. Verlässlich ist bei der Wahl von C hier die Annahme eines exponentiellen Abklangs der Energie.

Auswertung der Abklingkurven

Bestimmt man T_{30} , ist bei der Abklingkurve der Bereich zwischen 5 dB und 35 dB unterhalb des stationären Pegels zu betrachten (T_{20} : 5-25 dB). In diesem Bereich ist für die Kurve eine Gerade mit dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate rechnerisch zu ermitteln bzw. bei Pegelschreibern händisch einzutragen. Aus der Steigung dieser ergibt sich die Abklingrate d in dB/s, woraus folgt

$$T_{30} = \frac{60}{d} \quad (2.3)$$

Folgen die Abklingkurven nicht näherungsweise der Geraden ist das Ergebnis unter Umständen unzuverlässig.

Messunsicherheit - Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen

Die Messunsicherheit liegt aufgrund des Zufallcharakters des Sendersignals stark von der Anzahl der Mittelungen ab und ist mittels folgender Standardabweichung zu betrachten:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88 \cdot T_{20} \sqrt{\frac{1 + 1,90/n}{N \cdot B \cdot T_{20}}} \quad (2.4)$$

$$\sigma(T_{30}) = 0,55 \cdot T_{30} \sqrt{\frac{1 + 1,52/n}{N \cdot B \cdot T_{30}}} \quad (2.5)$$

B ... Bandbreite in Hz, n ... Anzahl der an jeder Position gemessenen Abklingvorgänge, N ... Anzahl der unabhängigen Messpunkte

Bei **Verfahren der integrierten Impulsantwort** ist keine zusätzliche Mittelung zur Erhöhung der statistischen Messgenauigkeit erforderlich.

Vorwiegend für Altgeräte sind zudem untere Grenzwerte für zuverlässige Ergebnisse, bedingt durch Filter und Detektor, festgelegt. Bei sehr kurzen Nachhallzeiten kann das Ergebnis durch Filter und Detektor beeinflusst werden, sodass bei Vorwärtsanalyse die Grenzwerte $BT > 16$ und $T > 2 \cdot T_{det}$ einzuhalten sind, wobei T_{det} der Nachhallzeit des Mittelwert bildenden Detektors entspricht.

Räumliche Mittelwertbildung

Mittels arithmetischer Mittelung der Nachhallzeiten für alle unabhängigen Sender- und Empfängerpositionen erhält man die Werte für getrennt ausgewiesene Flächen, oder den gesamten Raum. Als Genauigkeitsmaß und zur Bestimmung der räumlichen Varianz kann die Standardabweichung bestimmt werden. Alternativ kann auch eine Scharmittelung der Abklingkurven vorgenommen werden.

Die Ergebnisse werden mittels Diagramm und Tabellen dargestellt. Es sind die ermittelten Nachhallzeiten für jede Messfrequenz in bestimmten Maßstäben anzugeben. Einzahlwerte ($T_{30,mid}$, $T_{20,mid}$) können durch die Mittelung der Nachhallzeiten in den 500-Hz- und 1000-Hz-Oktavbändern bzw. Terzbändern von 400 Hz bis 1250 Hz gewonnen werden.

Gütemaße zur Beschreibung des subjektiven Eindrucks

Dieser Teil des Anhangs beschäftigt sich mit aus der Impulsantwort abgeleiteten Messgrößen (Gütemaßen), die bei der Betrachtung des ZuhörerInnenraumes Anwendung finden. Diese sind hilfreich, da sie die messbare raumakustische Beschaffenheiten mit der subjektiven Empfindungen des Menschen verknüpfen können. Neben der Nachhallzeit werden als wichtigste Größen die folgenden angesehen:

Subjektiver Aspekt	Akustische Größe
Subjektiver Schallpegel	Stärkemaß G
Halligkeit	Klarheitsmaß C_{80} , Deutlichkeit D_{50} , Schwerpunkzeit T_s
Scheinbare Quellbreite (ASW)	Früher seitlicher Energieanteil J_{LF} bzw. J_{LFC}
ZuhörerInnen-Einhüllung (LEV)	Später seitlicher Schallpegel L_J

Stärkemaß G

Diese logarithmische Verhältnisgröße setzt auf Basis eines kalibrierten Kugelstrahlers die Schalleinwirkung der gemessenen Impulsantwort zu jener Wirkung der gleichen Quelle in 10 m Entfernung im Freifeld in Beziehung. Die Berechnungen erfolgen hierbei auf Basis des Augenblickswerts des Schalldrucks der Impulsantwort $p(t)$:

$$G = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t) dt} \right) = L_{pE} - L_{pE,10} \text{ dB} \quad (2.6)$$

wobei L den Schalldruckwirkpegel beschreibt

$$L_{pE} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T_0} \int_0^\infty \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (2.7)$$

bzw.

$$L_{pE,10} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T_0} \int_0^\infty \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (2.8)$$

mit jeweils $T_0 = 1 \text{ s}$.

Frühe Abklingzeit EDT

Dieses Maß, im Englischen *early decay time*, wird aus der Abklingkurve ermittelt und sollte aus der linearen Regressions-Geraden mittels der anfänglichen 10 dB der Abklingkurve errechnet werden. EDT ist subjektiv bedeutsamer als die Nachhallzeit T .

Früh-zu-Spät-Index C_{t0}

Hier wird der früh eintreffende zum spät eintreffenden Energieanteil in Beziehung gesetzt. Üblicherweise werden für die frühe Zeitgrenze t_e Werte von 50ms oder 80ms (Stichwort C_{80}) verwendet:

$$C_{te} = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^\infty p^2(t) dt} \right) \text{ dB} \quad (2.9)$$

Bei Sprachbedingungen wird D_{50} (Deutlichkeit oder Tonschärfe) genutzt:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \dots \text{ Deutlichkeitsmaß} \quad (2.10)$$

wobei C_{50} dann aus folgendem Zusammenhang gewonnen werden kann:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \text{ dB ... Deutlichkeit(sgrad)} \quad (2.11)$$

Schwerpunktzeit T_S

Dieses Maß betrachtet die quadrierte Impulsantwort im Zeitpunkt des ersten Moments und vermeidet so die diskrete Trennung von Früh- und Spätperiode der Impulsantwort. Hierbei ermittelt sich t mittels des Flächenschwerpunktsatzes.

$$T_S = \frac{\int_0^\infty t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \quad (2.12)$$

Früher Seitenschallgrad J_{LF} bzw. J_{LFC}

Wird der Momentanschalldruck der Impulsantwort $p(t)$ mit einem Kugelmikrofon und zusätzlich der Momentanschalldruck der Impulsantwort $p_L(t)$ mittels Achter-Charakteristik gemessen, so kann der Energieanteil der ersten 80 ms aus seitlichen Richtungen wie folgt bestimmt werden:

$$J_{LF} = \frac{\int_0^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad (2.13)$$

Aufgrund der im Wesentlichen cosinusförmigen Richtcharakteristik des Gradientenmikrofons wird J_{LFC} als subjektiv genauer beurteilt:

$$J_{LFC} = \frac{\int_0^{0,080} p_L(t) \cdot p(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad (2.14)$$

Bei der Messung der Impulsantwort hat die Nullrichtung des Gradientenmikrofons in Richtung der Bühne bzw. Quellposition zu zeigen.

Gütemaße - Messverfahren

Die Schallquelle sollte die Eigenschaften entsprechend Abschnitt 2.1 besitzen. Dabei soll ein Messsignal mit ausreichend hohem Pegel in allen Oktavebändern von 125 Hz bis 4000 Hz erzeugt werden können. Bei Prüfungen unter SprecherInnenbedingungen kann die Quelle Richtwirkung entsprechend eines Menschen besitzen. Es sind kalibrierte Kugelmikrofone zu benutzen, wobei für die Ermittlung von $J_{LF(C)}$ auch Gradientenmikrofone notwendig sind. Die notwendige Impulsantwort ist wiederum in Oktavbändern zu messen und ist bei nicht exakt wiederholbarer Bestimmung an der selben Position anhand mehrerer Messungen zu mitteln. Die Impulsantworten sollen mittels der unter Abschnitt 2.1 beschriebenen Rückwärts-Integration ermittelt werden, wodurch man die den jeweiligen Bändern entsprechenden Abklingzeiten erhält. Zur Berechnung der genannten Größen ist es sinnvoll, eine zeitliche Fensterung vorzunehmen. Bei der notwendigen Oktavbandfilterung ist vor allem bei niedrigen Frequenzen (und geringerer Bandbreite) der Einfluss durch die Zeitverzögerung der Filter zu berücksichtigen. Dieses Problem wird am besten durch Zeit-Fensterung der breitbandigen Impulsantwort vor dem Filtervorgang vermieden. Unter Umständen müssen die Integrationsbereiche für die Gütemaße vergrößert werden, um die durch das Filtern verzögerte Energie zu erfassen.

Messpositionen

Da die Messgrößen nicht-statische Merkmale aufweisen, die von Platz zu Platz schwanken, ist es ratsam üblicherweise drei Schallquellenaufstellungen auf der Bühne zu verwenden. In größeren bzw. kleineren Umgebungen sind entsprechend mehr oder weniger Positionen zu wählen. Je nach Raumgröße sind für die Empfänger 6-10 Positionen zu verwenden, welche über die Flächen gleichmäßig verteilt liegen. Es gelten die Bestimmungen unter Abschnitt 2.1.

Binaurale Messgrößen

Der Räumlichkeitseindruck entsteht in der Regel durch den binauralen Hörvorgang, wobei in zwei Unterklassen eingeteilt werden kann: (Scheinbare) Verbreiterung der Quellenbreite (engl.: apparent source with, *ASW*) und Eindruck inmitten des Schalls bzw. von diesem eingehüllt zu sein (engl.: listener envelopment, *LEV*). Der messbare interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten *IACC* basiert auf der Messung der Impulsantwort am linken bzw. rechten Ohrkanal $p_l(t)$ bzw. $p_r(t)$ und ist wie folgt definiert:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (2.15)$$

mit $IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|$, für $-1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}$.

Es besteht allerdings noch keine allgemeine Übereinstimmung bezüglich der Anwendung, daher ist die *IACC* Gegenstand der Forschung. Zur Ermittlung der notwendigen Messdaten können Kunstköpfe oder natürliche Köpfe (z.B. In-Ear-Mikrofon) verwendet werden. Dabei gelten für die Messverfahren im Allgemeinen die Verfahren aus dem vorhergehenden Abschnitten 2.1 und 2.1.

Bühnen-Messgrößen

Um akustisch optimale Bedingungen für MusikerInnen untereinander, also auf der Bühne, sicherzustellen, können Messungen mit nahe zueinander angeordneter Quelle und Mikrofon durchgeführt werden.

Frühe Unterstützung ST_{early}

Ziel der Messung ist die Erfassung, wie leicht andere Mitglieder des Orchesters gehört werden können. Hierbei wird das Verhältnis der reflektierten Energie innerhalb der ersten 0,1 s relativ zum Direktschall ($t = 0$) betrachtet:

$$ST_{early} = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_{0,02}^{0,10} p^2(t) dt}{\int_0^{0,01} p^2(t) dt} \right) \text{ dB} \quad (2.16)$$

Späte Unterstützung ST_{late}

Die späte Unterstützung ist ein Maß für die von den MusikerInnen wahrgenommene Halligkeit. Ähnlich wie bei ST_{early} wird das Verhältnis der reflektierten Energie relativ zum Direktschall,

allerdings *nach* den ersten 0,1 s, betrachtet:

$$ST_{late} = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_{0,10}^{1,00} p^2(t) dt}{\int_0^{0,01} p^2(t) dt} \right) \text{ dB} \quad (2.17)$$

Messpositionen

Höhe von Quelle und Mikrofon müssen gleich sein (1,0 m oder 1,5 m über dem Boden), wobei drei unterschiedliche Positionen gewählt werden sollen. Typischerweise vorhandene Stühle und Notenpulte sollten platziert werden, allerdings sollte ein Abstand zu den Messinstrumenten von ca. 2 m eingehalten werden, da sonst Reflexionen die Ergebnisse verfälschen könnten.

Prüfbericht

Im Prüfbericht sind eine Reihe relevanter Angaben zu verschriftlichen:

- Erklärung, dass die Ergebnisse in Übereinstimmung mit dieser ISO ermittelt wurden sowie Datum und Details zur Messorganisation
- Bezeichnung, Ort, Grundriss und Volumen des Raums sowie Temperatur und Luftfeuchte
- bei Spielstätten Infos über Sitzplätze (Anzahl, Material), Bühnenausstattung etc. und deren Zustand bei Messung
- Wandmaterial, Einrichtung zur Variation der Akustik und deren Zustand bei Messung
- Beschreibung der eingesetzten Messgeräte, Quellen/Quellsignal sowie Messpunktdichte und eventuellen Plan von Sender- und Empfängerpositionen

Für die Angabe der Ergebnisse bei Bestimmung von **Gütemaßen** können die gewonnen Größen kompakt in Form von arithmetischen Mittelwerten aus den Ergebnissen von Oktavbereichspaaren (125 Hz und 250 Hz, 500 Hz und 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz) dargestellt werden, wobei diese entsprechend zu kennzeichnen sind. In der Regel ist es nicht sinnvoll über alle Mikrofonpositionen im Raum zu mitteln. Zudem muss L_J energetisch gemittelt werden. Im Falle des Stärkemaßes G empfiehlt sich eine grafische Darstellung als Funktion des Abstands zwischen Empfänger und Quelle zu erstellen. **Bühnen-Messgrößen** sind für jede Position als Einzelergebnisse arithmetisch gemittelt aus den vier Oktavbändern anzugeben, wobei die Standardabweichung pro Oktavband auf 1 dB geschätzt wird.

2.2 ÖNORM EN ISO 3382-2. Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (2009)

Ziel dieses Teils der Norm ist das Festlegen der raumakustischen Eigenschaften in gewöhnlichen Räumen, womit nicht bereits durch eine existierende Norm definierte Räumlichkeiten gemeint sind. Dabei sollen genormte Messungen dazu dienen, anhand der Ergebnisse entsprechende Korrekturen und deren Kontrolle zu übernehmen. Normativ wird auf die ISO 3382-1, ISO 18233 und IEC 6260 verwiesen. Zudem werden die Begrifflichkeiten entsprechend der ISO 354:2003 verwendet.

In der ÖNORM EN ISO 3382-2 wird die Messgenauigkeit mit den Stufen: *Kurz*, *Standard* und *Präzision* eingeführt, welche sich - neben der Genauigkeit - hauptsächlich in der Anzahl der Messpositionen und somit im Zeitaufwand voneinander unterscheiden. Als Auswertungsbereiche bei Ermittlung der Nachhallzeit sind sowohl 20 dB als auch 30 dB definiert, wobei dem 20-dB-Auswertungsbereich aufgrund der subjektiven und praktischen Bedeutsamkeit (Störabstand) der Vorzug gegeben wird. Um Anomalien bei Abklingkurven zur Bestimmung der Nachhallzeit zu quantifizieren, wurden zwei Maße zur Bestimmung von Nichtlinearität und Krümmung eingeführt. Eine Erkenntnis der Norm ist, dass der Einsatz rotierender Messmikrofone keine relevante Verbesserung bietet.

Messbedingungen

Aufgrund des großen Einflusses der Anwesenheit von Personen auf die Nachhallzeit, muss der Besetzungszustand berücksichtigt werden. In Räumen, deren Volumen größer als 300 m² ist, darf die Luftabsorption nur vernachlässigt werden, wenn die Nachhallzeit bei 2 kHz kürzer als 1,5 s und bei 4 kHz kürzer als 0,8 s ist. Für die Quelle, Mikrofon, Filter, Analysegeräte etc. gelten wiederum die Anforderungen nach ISO 3382-1 laut Abschnitt 2.1 dieser Arbeit. Beim Kurz- und Standardverfahren vereinfacht sich die Anforderung für die Quelle: diese muss einen Schalldruckpegel erzeugen, der ausreicht die Abklingkurven im dynamisch erforderlichen Mindestbereich ohne Fremdgeräuscheinfluss abzubilden.

Messpositionen

Die Norm definiert die Mindestanzahl an Messpunkten in Verbindung mit den unterschiedlichen Verfahren:

	kurz	Standard	Präzision
Sender-Mikrofonkombination	2	6	12
Senderpositionen	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Mikrofonpositionen	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Abklingvorgänge pro Position	1	2	3
Frequenzbereich Oktavbänder	250 Hz - 2 kHz	125 Hz - 4 kHz	125 Hz - 4 kHz
Frequenzbereich Terzbänder	(nicht erforderlich)	100 Hz - 5 kHz	100 Hz - 5 kHz

Für die Positionierung sollten zudem folgende Abstände eingehalten werden:

Mikrofonabstand	
zueinander	$\lambda/2$ bzw. 2 m im üblichen Frequenzbereich
zu reflektierender Oberfläche	$\lambda/4$ bzw. 1 m im üblichen Frequenzbereich

Um Direktschall-Einfluss zu vermeiden gilt es, zwischen Quelle und Mikrofon den Mindestabstand d_{min} einzuhalten. Dieser errechnet sich in Meter mittels Volumen V in m^3 , Schallgeschwindigkeit c in m/s und geschätzter Nachhallzeit \hat{T} in s aus:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}} \quad (2.18)$$

Anwendung der Verfahren

Das **Kurzverfahren** ist zum Zwecke des Schallschutzes für die Messung von Luftschall- und Trittschalldämmung geeignet, wobei die Messung nach [ÖNORM EN ISO 10052 2010] durchzuführen ist. Das **Standardverfahren** ist nach [ÖNORM EN ISO 140 2007] (alle Teile) zur Überprüfung von Eigenschaften und Spezifikation der Nachhallzeit von Gebäuden anzuwenden. Die Nenngenauigkeit sollte bei Oktavebändern besser als 5% und bei Terzbändern besser als 10% sein. Es sind Messungen an mindestens zwei Senderpositionen und mindestens 6 unabhängige Sender-Mikrofonkombinationen erforderlich.

Messunsicherheit

Dieser Abschnitt liefert Berechnungsformeln für Varianzen relevanter Messergebnisse. Für die Abklingrate d aus Abschnitt 2.1 ist mit Messungen, auch an derselben Position, die Varianz des Gesamtmittels $var\{\bar{d}\}$ festgelegt als:

$$var\{\bar{d}\} = \frac{1}{N} var_B\{d\} + \frac{1}{Nn} var_e\{d\} \quad (2.19)$$

Hierbei ist n ... Anzahl der an jeder Position gemessenen Abklingvorgänge, N ... Anzahl der unabhängigen Messpunkt, $var_e\{d\}$... Scharvarianz einer Position und $var_B\{d\}$... räumliche Varianz.

Die relative Varianz der Nachhallzeit ergibt sich aus:

$$\frac{var\{\bar{T}\}}{\bar{T}^2} = \frac{var\{\bar{d}\}}{\bar{d}^2} \quad (2.20)$$

Die Standardunsicherheit bzw. der geschätzte Variationskoeffizient der mittleren Nachhallzeit lautet daher:

$$\frac{\sigma\bar{T}}{\bar{T}} = \sqrt{\frac{var\{\bar{d}\}}{\bar{d}^2}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{var_B\{d\}}{d^2} + \frac{var_e\{d\}}{n \cdot d^2}} \quad (2.21)$$

Bei **abgeschaltetem Rauschen** ergibt sich die Standardunsicherheit mit der Standardabweichung $\sigma\bar{T}$ somit aus:

$$\frac{\sigma\bar{T}}{\bar{T}} = G \cdot \sqrt{\frac{1 + H \ln n}{N \cdot B \cdot T}} \quad (2.22)$$

wobei B ... Bandbreite in Hz, G, H ... Konstanten abhängig vom Auswertungsbereich D sowie T ... Nachhallzeit in Sekunden sind.

Beim **Verfahren mit integrierter Impulsantwort** ist die Scharvarianz theoretisch $var_e\{d\} = 0$,

was der Mittelung einer unendlichen Anzahl von Rauschanregungen an selber Position entspricht. Daher darf für $n = 10$ eingesetzt werden.

Auswertung nicht-linearer Abklingkurven

Für die Messung der Nachhallzeit wird angenommen, dass die Abklingkurve annähernd durch die Neigung einer Geraden beschrieben werden kann. Inwieweit dies erfüllt ist, kann mit folgenden Indikatoren beschrieben werden:

Grad der Nichtlinearität

Erfolgt die Ermittlung der Geraden mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate, ist dieser mittels dB-Pegels L_i , im Punkt i , Schätzwert der linearen Regression \hat{L}_i im Punkt i und Mittelwert der Punkte \bar{L} wie folgt zu berechnen:

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (2.23)$$

Der quadrierte Korrelationskoeffizient r ist festgelegt als:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{L}_i - \bar{L})^2}{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \quad (2.24)$$

Es gilt $0 \leq r^2 \leq 1$, wobei eine vollkommen gerade Abklingkurve $r^2 = 1$ entspricht. Es wird in diesem Zusammenhang der Nichtlinearitätsparameter festgelegt:

$$\zeta = 1000 \cdot (1 - r^2) \quad (2.25)$$

wobei ζ typischerweise zwischen 0 ‰ bis 5 ‰ aufweist. Ein Wert größer 10 ‰ deutet auf eine starke Abweichung von einer Geraden hin.

Grad der Krümmung

Typischerweise verläuft der Abklingvorgang zu Beginn etwas steiler als im letzten Teil, da eine Mischform von Abklingarten unterschiedlicher Pegelabnahmen zusammenwirkt. Bei nicht gleichmäßiger Verteilung der Absorptionsoberflächen im Raum weist die Kurve stärkere Krümmungen auf. Das Ergebnis wird dadurch weniger zuverlässig, da es stark davon abhängt, welcher Teil der Kurve ausgewertet wird. Der Krümmungsparameter C beschreibt dieses Verhältnis durch:

$$C = 100 \cdot \left(\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right) \quad (2.26)$$

wobei C typischerweise zwischen 0 % bis 5 % aufweist. Ein Wert größer 10 % deutet auf eine starke Abweichung von einer Geraden hin. Negative Werte deuten in der Regel auf Fehler in den Messungen hin.

Anpassung mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate

Die Annäherung der Abklingkurve mittels einer Geraden sollte mittels dieser Methode aus der linearen Regressionsanalyse erfolgen. Die Höhe \hat{L}_i der Regressionsgeraden bei der Probe i ist

festgelegt als:

$$\hat{L}_i = a + b \cdot t_i \quad (2.27)$$

wobei a der Achsenabschnitt der Geraden (dB) und b die geschätzte Steigung (dB/s) und t_i die Zeit in s darstellt. Die Schätzwerte für den Achsenabschnitt und Steigung sind errechenbar mittels:

$$a = \bar{L} - b\bar{t} \quad (2.28)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i L_i) - m\bar{t}\bar{L}}{\sum_{i=1}^n (t_i^2) - m\bar{t}^2} \quad (2.29)$$

wobei

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (2.30)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (2.31)$$

Die geschätzte Nachhallzeit \hat{T} in s beträgt dann:

$$\hat{T} = -\frac{60}{b} \quad (2.32)$$

2.3 ÖNORM EN ISO 3382-3 - Akustik - Messung von raumakustischen Parametern Teil 3: Großraumbüros

Der Teil Großraumbüros befasst sich mit Büros und ähnlichen Räumlichkeiten, in welcher eine große Anzahl an Personen arbeiten, Gespräche führen und sich voneinander unabhängig an abgegrenzten Arbeitsplätzen auf Aufgaben konzentrieren. Die Personen können also durch nutzungstypische Vorgänge in ihrer Umgebung negativ beeinflusst werden. Bei schlechten akustischen Bedingungen bestehen folgende Gefahren:

- Verringerung der Konzentrations- und Leistungsfähigkeit durch (akustische) Ablenkung
- Vertrauliche oder teilweise vertrauliche Gespräche können von Dritten gewollt oder ungewollt mitgehört werden
- Einschränkung der Privatsphäre

Wie in den vorhergehenden Teilen, wird die Nachhallzeit als entscheidendes Charakteristikum zur Messung herangezogen. Zudem besitzen auch der Sprachübertragungsindex und der Fremdgeräuschpegel Bedeutsamkeit. Die in dieser Norm vorgegebenen, anzustrebenden Einzahl-Werte haben eine gute private Gesprächsumgebung am einzelnen Arbeitsplatz als Ziel. Die erforderlichen Messungen sind erst durchführbar, wenn der Raum vollständig eingerichtet ist. Dabei sollten übliche Geräuschquellen (z.B. Lüftungen) aktiviert werden, jedoch keine Personen anwesend sein, da so der Fremdgeräuschpegel zu stark (zeitlich) schwankt. Die angegebenen Einzahlwerte bilden hierbei die Situation einer einzelnen, sprechenden Person nach (entspricht dem maximalen Pegel). Daher werden die Messungen mit einem Lautsprecher durchgeführt. Sprechen mehrere Personen, so ist die Maskierung zu erhöhen und der Schalldruckpegel der Einzelquelle zu verringern.

Begriffe

Neben den in vorangegangenen Abschnitten erläuterten Begrifflichkeiten, werden hier nachfolgende zusätzlich definiert. Die **räumliche Schallverteilung des A-bewerteten Schalldruckpegels der Sprache** beschreibt die Schalldruckpegelabnahme eines Spektrums entsprechend menschlicher Sprache in A-Bewertung in Kurvenform als Funktion des Abstands. Die **räumliche Abklingrate der Sprache** $D_{2,S}$ ist bezogen auf den A-bewerteten Schalldruckpegelabfall für Sprache je Abstandsverdopplung. Diese Rate ist nicht auf einzelne Bänder anzuwenden. Das Formelzeichen $L_{p,A,S,4m}$ bezeichnet den A-bewerteten Schalldruckpegel von Sprache in einem Abstand von 4 m. Der Wert für den Abstand kann auch über die Regressionslinie der räumlichen Schallverteilung erhalten werden. Der **Sprachübertragungsindex** STI (engl.: speech transmission index) beschreibt die in [IEC 60268-16 2011] geregelte Übertragungsqualität von Sprache in Hinblick auf deren Verständlichkeit. Auch diese Größe kann mittels Kurve räumlich verteilt dargestellt werden. Der **Ablenkungsabstand** r_D beschreibt jenen Abstand von der sprechenden Person, bei dem der $STI < 50\%$ beträgt. Nach Überschreiten des Abstands beginnen Konzentrationsfähigkeit und Privatsphäre rasch zuzunehmen.

Einzahl-Werte

Zur Ermittlung von Schalldruckpegel und STI muss in Oktavbändern zwischen 125 Hz bis 8 kHz gemessen werden, wobei der STI nach [IEC 60268-16 2011] zu bestimmen ist. Die zu bestimmenden Einzahl-Werte sind:

- r_D
- $D_{2,S}$

- $L_{p,A,S,4m}$
- $L_{p,A,B}$, der mittlere A-bewertete Fremdgeräuschpegel

Zusätzlich ermittelt werden kann der Vertraulichkeitsabstand r_P , welcher sich aus dem STI am nächstgelegenen Arbeitsplatz ergibt.

Messbedingungen

Die **Schallquelle** muss ungerichtet sein und rosa Rauschen erzeugen. Alternativ sind deterministische Signale mit rosa Spektrum wie z.B. MLS oder Sweeps erlaubt, mit welchen die Impulsantwort gemessen werden kann. Die Anforderungen nach der ISO 3382-1 für ungerichtete Quellen unter Abschnitt 2.1 dieser Arbeit müssen erfüllt sein. Hierbei ist die Höhe auf 1,2 m festgelegt. Das **Mikrofon** muss so ungerichtet wie möglich zu sein, wobei an jeder Mikrofonposition und in jedem Oktavband (Filter nach [IEC 60268-16 2011]) der Schallpegel bestimmt werden muss. Die Messung wird im voll möblierten Raum und ohne Anwesende durchgeführt. Zudem müssen die üblichen Geräuschquellen entsprechend der normalen Arbeitszeit aktiv sein. Der **Fremdgeräuschpegel** ist für die Bestimmung des STI zu messen. Dabei beachtet diese Norm jene Geräusche, welche von später anwesenden SprecherInnen erzeugt werden, nicht. r_D bzw. r_p nehmen in der Praxis daher oft geringere Werte als in den Messungen an.

Messpositionen

Für die Messaufstellungen wird eine gedachte Linie entlang der Arbeitsplätze angenommen, wobei ca. 6-10 Messpositionen (mind. 4) entlang dieser zu wählen sind. Deren Abstand ist von der Raumgröße abhängig, wobei $D_{2,S}$ nur zwischen 2 m bis 16 m zu bestimmen ist. Ist das Büro in Zonen aufteilbar, ist dies zu berücksichtigen. Sender und Empfänger müssen sich in einer Höhe von 1,2 m befinden, wobei von sitzender Körperhaltung ausgegangen wird. Quelle und Sender sind so zu positionieren, dass sich deren Aufstellung mit der Kopfposition der üblicherweise arbeitenden Personen deckt. Diese müssen mindestens 0,5 m entfernt von Tischen sowie mindestens 2,0 m entfernt von Wänden und anderen reflektierenden Oberflächen sein.

Messgrößen

Pro Messpunkt werden folgende vier Messungen durchgeführt:

- $L_{p,LB}$ Schalldruckpegel des rosa Rauschens in Oktavbändern (125 Hz bis 8 kHz)
- STI
- Fremdgeräuschpegel in Oktavbändern, $L_{p,B}$
- Abstand von der Schallquelle, r

Bestimmung von Einzahlwerten

Schallleistungsspektrum der normalen Sprache

Die vorliegende Norm enthält eine Tabelle, welche auf Basis von ANSI S 3.5-1997 Schallleistungspegel für Oktavbänder enthält, welche einer nicht vom Geschlecht abhängigen Sprache bei normalem Stimmaufwand entsprechen. Insgesamt ergibt sich dabei ein A-bewerteter Schalldruckpegel von 57,4 dB und ein A-bewerteter Schalldruckpegel von 59,5 dB für ungerichtete Quellen.

Räumliche Abklingrate $D_{2,S}$

Zur Bestimmung der räumlichen Abklingrate des A-bewerteten Schalldruckpegels für Sprache ist der Ausgang (rosa Rauschen) so zu kalibrieren, dass der Schalleistungspegel der Quelle am entferntesten Messort in jedem Oktavband das Fremdgeräusch um 6 dB überschreitet. Im Freifeld gilt dann für den Schalldruckpegel in $r = 1$ m Entfernung des akustischen Mittelpunkts der Quelle:

$$L_{p,Ls,1m,i} = L_{W,Ls,i} + 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4\pi \cdot r^2}\right) \approx L_{W,Ls,i} - 11 \text{ dB} \quad (2.33)$$

Hierbei ist $L_{W,Ls,i}$ der Schalleistungspegel im i -ten Oktavband. Nach Auswahl einer Quellposition wird für jede n -te Messposition der Schalldruckpegel $L_{p,Ls,n,i}$ bestimmt und eine Fremdgeräuschkorrektur entsprechend [ISO 3744 2010] durchgeführt. Nun ist die Schwächung $D_{n,i}$ in dB am Messpunkt n im i -ten Oktavband wie folgt zu bestimmen:

$$D_{n,i} = L_{p,Ls,1m,i} - L_{p,Ls,n,i} \quad (2.34)$$

Der Schalleistungspegel für normale Sprache $L_{W,S}$ steht mit dem Schalleistungspegel des Sprachspektrums (in 1 m Abstand) $L_{p,S,1m}$ in folgender Beziehung:

$$L_{W,S} = L_{p,S,1m} + 11 \text{ dB} \quad (2.35)$$

Für die Position n im Oktavband i kann der Schalldruckpegel normaler Sprache nun berechnet werden mit:

$$L_{p,S,n,i} = L_{p,S,1m,i} - D_{n,i} \quad (2.36)$$

Um nun den A-bewerteten Sprechpegel für die Position n zu erhalten, wird folgende Summe gebildet:

$$L_{p,A,S,n} = 10 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^7 10^{\frac{L_{p,S,n,i} + A_i}{10}}\right) \quad (2.37)$$

Dabei ist A_i der in Tabellen vorzufindende Wert für die A-bewerte Korrektur anzuwenden auf das jeweilige Oktavband.

Die Abklingrate der A-bewerteten Sprache für N Messpositionen wird mittels Methode der kleinsten Quadrate bestimmt:

$$D_{2,S} = -\log(2) \cdot \left(\frac{N \cdot \sum_{n=1}^N L_{p,A,S,n} \log\left(\frac{r_n}{r_0}\right) - \sum_{n=1}^N L_{p,A,S,n} \sum_{n=1}^N \log\left(\frac{r_n}{r_0}\right)}{N \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 - \left(\sum_{n=1}^N \left(\frac{r_n}{r_0}\right)\right)^2}\right) \quad (2.38)$$

mit $r_n \dots$ Abstand zur n -ten Messposition und $r_0 \dots$ Bezugsabstand, 1 m.

Bei der grafischen Auswertung werden in der Regel der Schalldruckpegel L_p auf der Abszisse und die Frequenzbänder entlang der Ordinate aufgetragen. Die Schwächung D_n kann so einfach abgelesen werden.

Ablenkungsabstand und Vertraulichkeitsabstand

Diese Werte werden auf Basis der Ermittlung des STI nach [IEC 60268-16 2011] für jede Kombination aus Quelle und Empfänger entlang des Messweges bestimmt. Dabei wird der über die Messpositionen gemittelte Fremdgeräuschpegel eingesetzt, da eine räumliche Änderung des

Fremdgeräuschpegels zu nicht eindeutigen Ergebnissen führen kann. Die beiden Abstandswerte werden auf einer linearen Achse mittels linearer Regressionsgerade dargestellt.

Angabe der Ergebnisse

Ähnlich der Teile zuvor, muss aus dem Prüfbericht hervorgehen, dass die Messung in Übereinstimmung mit der vorliegenden Norm durchgeführt wurden. Dabei sind unter anderem Informationen über Raum, Lage, Grundriss (inkl. Abmessungen), verwendetes Equipment sowie entsprechende Messergebnisse aufzubereiten.

Beispiele für Zielwerte

Größe	Schlecht	Gut
$D_{2,S}$	$< 5 \text{ dB}$	$\geq 7 \text{ dB}$
$L_{p,A,S,4m}$	$> 50 \text{ dB}$	$\leq 48 \text{ dB}$
r_D	$> 10 \text{ m}$	$\leq 5 \text{ m}$

Zusammenhang zwischen STI und positiven Effekten

Die ursprüngliche Konzeption von Großraumbüros liegt im Ansatz ein Umfeld zu schaffen, in dem sich mehrere Personen während Teamarbeiten, Wissensaustausch etc. mittels Sprache verständigen. Immer häufiger werden solche Büros für allerlei Arbeitssituationen eingesetzt. Die in [ISO 3382-1 engl. 2009] enthaltenen Vorgaben sollen im Akustischen bei diesem veränderten Anwendungszweck die Arbeitenden in Produktivität und im Wohlbefinden unterstützen. Laut wissenschaftlichen Studien ist die Fehlerrate bei kognitiv anspruchsvollen Aufgaben bei gleichzeitig gesprochener Sprache (also mit Informationen) im Hintergrund um bis zu 41% höher. Mehrere Studien haben dies nachweisen können vgl. [Haapakangas et al. 2008, Kaarlela-Tuomaala et al. 2009, Haka et al. 2009]. Die negativen Wirkungen von Sprache auf die Arbeitsleistung verschwindet bei einem STI unter 0,50 schnell. Somit wurde der Ablenkungsgrad r_D bei diesem STI als Abstand festgelegt, da unter einem STI von 0,20 die negativen Wirkungen durch unerwünschtes Mithören verschwinden. Der Vertraulichkeitsabstand r_p wurde somit auf diesem Wert ausgerichtet. Detailliertere Forschung diesbezüglich wurde vor allem von [Nilsson und Hellström 2009] betrieben.

2.4 ÖNORM B 8115-3. Schallschutz und Raumakustik im Hochbau Teil 3: Raumakustik (2005)

Teil 3 der ÖNORM B 8115 [ÖNORM B 8115-3 2005] befasst sich im Speziellen mit der Raumakustik. Die Norm legt Anforderungen für Räume in denen Sprachverständlichkeit (z.B. Unterrichtsräume) und Lärminderung (z.B. Produktionsräume) die primären Ziele sind, fest. Die Anforderungserfüllung wird mittels Messung der Nachhallzeit nachgewiesen. Dabei sollen den AnwenderInnen die Angaben dazu dienen, die erforderliche Absorption zu bestimmen. Umgebungen mit akustisch höheren Anforderungen, wie Konzertsäle und Tonstudios, werden hier nicht behandelt. Wohl aber betrachtet werden Proberäume und Aufführungsorte für z.B. Musikschulen. Die Berechnungen und Messungen dieser Norm werden für Hörsamkeit in Oktavbändern der Mittenfrequenzen 125 Hz - 4000 Hz sowie für Lärminderung in Oktavbändern der Mittenfrequenzen 250 Hz - 2000 Hz durchgeführt.

Hörsamkeit

Gute Hörsamkeit ist über eine bestimmte **Nachhallzeit**, die von der Nutzung und dem Raumvolumen abhängig ist, und durch die Sicherung der **Geringhaltung des Grundgeräuschpegels** definiert. Dabei müssen Einflüsse in Bezugnahme auf den Besetzungsgrad beachtet und in manchen Fällen (z.B. absorbierend gestaltete Polsterung der Stühle) kompensiert werden.

Die jeweilige Nachhallzeit errechnet sich hierbei aus unterschiedlich gewichteter Logarithmierung des Raumvolumens und dem Hinzufügen von Korrekturtermen. Das führt bei einem Raum, welcher rein auf Kommunikation ausgelegt ist, zu volumensabhängigen Nachhallzeiten von 0,3-0,7 s, bei Nutzung als Darbietungsort von Musikaufführungen wären es zwischen 0,7-1,9 s. Bei Mehrzwecknutzung muss ein Kompromiss gefunden werden. Empfohlen werden hierbei Anpassungsmaßnahmen, die z.B. die Variation des Schallabsorptionsvermögens ermöglichen. Die zulässigen Toleranzbereiche sind frequenzabhängig.

Für die optimale Nachhallzeit sind im besetztem Zustand für unterschiedliche Nutzungen abhängig vom Volumen V folgende Formeln gültig:

- **Kommunikation:** $T = 0,32 \cdot \log(V - 0,17)$
- **Sprache:** $T = 0,37 \cdot \log(V - 0,14)$
- **Musikaufführung:** $T = 0,45 \cdot \log(V + 0,07)$
- **Musikproberäume:** $T = 0,47 \cdot \log(V - 0,37)$

In den Kategorien Kommunikation und Musikproberäume sind die Angaben für ein Volumen von 30 m^3 bis $1\,000 \text{ m}^3$ gültig, bei Sprache und Musikaufführung von 30 m^3 bis $10\,000 \text{ m}^3$. Bei Sprache, Kommunikation und Musikproberäumen ist der zulässige Toleranzbereich der Nachhallzeit nach oben hin mit dem Faktor 1,2 beschränkt. Für Frequenzen unter dem 250-Hz-Band und über dem 2-kHz-Band können kürzeren Zeiten eher toleriert werden. Bei Musikaufführungen ist eine Erhöhung unter 250 Hz erwünscht, wobei für das 63-Hz-Band das bis zu 1,7-fache der optimal errechneten Nachhallzeit zulässig ist. Das Toleranzband weitet sich ab dem 2-kHz-Band nach unten hin auf.

Zur Sicherung eines geringen Grundgeräuschpegels muss auch bei der Geräteeinrichtung auf die Schallpegel von beispielsweise Lüftern geachtet werden. Bei Nutzung von Personen mit Hörschäden sollten die Nachhallzeiten 20 % unter den vorgeschlagenen Grenzen liegen und ein sehr geringer Grundgeräuschpegel sichergestellt sein. Gleiches gilt für Räumlichkeiten, in denen Fremdsprachen zur Kommunikation genutzt werden.

Lärminderung

Dieser Abschnitt befasst sich mit Räumlichkeiten, in denen mittels Lärminderung gesunde Arbeitsbedingungen und Sprachverständlichkeit gesichert werden sollen. Nach den Kriterien dieses Abschnitts können z.B. sämtliche Arbeitsräume, Büroräume und Räume von Bildungseinrichtungen (Gänge an Schulen, Kindergärten) ausgelegt werden. Die für den Abschnitt Hörsamkeit geltenden Zielwerte sollen zu diesen Zwecken als Minimalwerte angesehen werden. Maßnahmen, die zu höherer Absorption führen, sind als zweckmäßig und nur durch technische und wirtschaftliche Möglichkeiten als begrenzt anzusehen.

Die Anforderungen werden für unterschiedliche Szenarien (z.B. eingerichtete Räume) anhand des mittleren Schallabsorptionsgrads α_m für die Oktaveband-Mittenfrequenzen zwischen 250-4000 Hz beschrieben. Hierbei ist die Bestimmung von α_m in [ÖNORM EN ISO 12354-6 2004] geregelt und liegt je nach Szenario und Frequenzband zwischen 0,2 und 0,3.

Praxisorientierte Raumplanung mit Augenmerk auf Akustik

Im Anhang finden sich praktische Hinweise zur akustischen Gestaltung von Räumen. Hier werden Problematiken, wie Raumresonanzen, Flatterechos und Verteilung von schallabsorbierenden bzw. schallreflektierenden Flächen diskutiert und Lösungsansätze umrissen. Einige Beispiele:

- Vermeidung symmetrischer Raumabmessungen/geometrie
- Schrägstellung bzw. Anti-Parallelisierung von (gegenüberliegenden) Flächen zur Vermeidung von Flatterechos
- Nutzen von Erstreflexionen unter 50 ms

Der zweite Teil des Anhangs enthält Skizzen, welche auf Basis der Strahlenverfolgung in unterschiedlichen Szenarien Reflexionswege und die Platzierung von Absorptionsflächen beschreiben.

2.5 OIB-Richtlinie 5: Schallschutz (2015)

Das Österreichische Institut für Bautechnik stellt online frei erhältlich die OIB-Richtlinie 5 [OIB-330.5 2005] zur Verfügung, welche sich mit Schallschutz in Gebäuden auseinandersetzt. Angewandt werden soll diese in Gebäuden bzw. Gebäudeteilen, welche dem längeren Aufenthalt von Menschen dienen, wobei bei regulärer Nutzung ein Anspruch an Ruhe besteht (z.B. Wohngebäude, Schulen, Krankenhäuser etc.). Die Richtlinie ist in drei Teile untergliedert: Baulicher Schallschutz, Raumakustik und Erschütterungsschutz, wobei die beiden letzten Teile wenig detailliert ausgeführt worden sind.

Baulicher Schallschutz

Dieser Abschnitt befasst sich mit Sicherstellung des Lärmschutzes von unbeeinträchtigten Menschen, welche durch Schallimmissionen von außen bzw. anderen Gebäudeteilen gestört werden könnten. Dazu muss der Außenlärmpegel nach aktuellem Stand der Technik für Tag (6:00 bis 22:00 Uhr) und Nacht ermittelt werden. Es hat dabei die Anwendung von Anpassungswerten (Beurteilungspegeln) zu erfolgen. Allgemein darf das bewertete, resultierende Bauschalldämm-Maß $R'_{res,w}$ der Außenbauteile 33 dB bzw. das bewertete Schalldämm-Maß R_w der opaken (lichtundurchlässigen) Außenbauteile 43 dB nicht unterschreiten.

Außenbauteile

Für Gebäude mit höherer Anforderungen an die Nutzung sind eigene Werte in Form von Tabellen angeführt, welche in Abhängigkeit von maßgeblichen Außenlärmpegel zu erfüllen sind. Hier werden zwei Gruppen unterschieden: Außenbauteile von Wohngebäuden, Hotels, Schulen, Krankenhäuser u. dgl. sowie Außenbauteile von Verwaltungs- und Bürogebäuden u. dgl., wobei die Mindestwerte für die Schalldämmung in der ersten Gruppe allgemein höher angesetzt werden. Definiert sind hierbei Werte für Außenbauteile, Fenster und Außentüren, Decken, Wände und Gebäudetrennwände. Die Werte für $R'_{res,w}$ steigen mit dem Außenlärmpegel und liegen für die erste Gruppe zwischen 33-53 dB, für die zweite Gruppe zwischen 33-48 dB. Gibt es Lüftungsdurchführungen, so dürfen diese im geschlossenen Zustand das vorgegebene $R'_{res,w}$ maximal um 5 dB unterschreiten.

Innenbereich

Für die Schallübertragung durch Trennbauteile bzw. Schall-Längsleitung wird die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ betrachtet, welche je nach Raum- und Gebäudekategorie sowie unter Betrachtung der örtlichen Verbindungen (Öffnungen, wie z.B. Türen und Fenster) bestimmte Werte nicht unterschreiten darf. Diese liegen ohne Verbindungen zwischen 50-55 dB bzw. mit Verbindungen zwischen 35-50 dB. Niedrigere Werte betreffen hierbei Nebenräume wie z.B. Treppenhäuser.

Für den Luftschallschutz von Türen wird das Schalldämm-Maß R_w herangezogen, wobei der mindestens erforderliche Wert für R_w von Türen (inkl. Türblatt und Zarge) wiederum abhängig von der Raumkategorie ist und zwischen 28-42 dB liegt. Die Werte für R_w von Türen sind der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ untergeben.

Für den Trittschallschutz wird der Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ betrachtet, welcher je nach Raumkategorie (Aufenthaltsräume und Nebenräume) zwischen 48-58 dB nicht überschreiten darf. Die höchsten Werte beziehen sich hierbei auf z.B. Dachböden und Terrassen. Der Gehbelag darf bei der Überprüfung mit keinerlei zusätzlichen Einrichtungen (z.B. Teppichen) ausgestattet sein. Der maximale Anlagengeräuschpegel $L_{AFmax,nT}$, welcher durch den Betrieb von **haustechnischen Anlagen** anderer Nutzungseinheiten entsteht, darf 25 dB (gleichbleibend, inter-

mittierend) bzw. 30 dB (kurzzeitig) nicht überschreiten. In Nebenräumen sind um 5 dB erhöhte Werte zulässig.

Reihenhäuser und angrenzende Gebäude

Gebäude mit Nutzungseinheiten, welche Emissionen über wohn- und büroähnlichen Verhältnissen abgeben, sind ergänzenden Betrachtungen und Maßnahmen zu unterziehen. Der anzuwendende Planungsbasispegel L_{PB} darf im zu schützenden Bereich vom Beurteilungspegel L_r nicht überschritten werden. Auch kennzeichnende Spitzenpegel $L_{A,Sp}$ dürfen den L_{PB} um maximal 10 dB überschreiten.

Für den Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ gelten ebenfalls je nach Nutzung und Tages- bzw. Nachtzeit niedrigere Grenzen von 38 dB bzw. 33 dB sowie 60 dB zwischen Aufenthaltsräumen bei Nutzungseinheiten in Verkaufsstätten u. dgl..

Die Richtlinie weist zudem darauf hin, dass für Gebäude und Einheiten mit spezieller Nutzung im Einzelfall abweichende Anforderungen von allen oben beschriebenen Punkten gelten können.

Raumakustik

Die Richtlinie beschreibt Mindestmaßnahmen für Räume ohne spezielle oder ohne außerordentliche hohe Anforderungen an die Raumakustik. Grundsätzlich sind die Angaben entsprechend [ÖNORM B 8115-3 2005] formuliert.

Bei der Nutzung zur Darbietung von Sprache (z.B. Vortragssaal) wird bezüglich der **Hörsamkeit** folgende Forderung an die Nachhallzeit T in Abhängigkeit vom Raumvolumen V für Räume zwischen 30 m^3 und 10.000 m^3 gestellt:

$$T = (0,37 \cdot \log V) - 0,14 \text{ s} \quad (2.39)$$

Diese ist in Oktavbändern von 250 Hz bis 2 kHz einzuhalten, wobei Abweichungen von $\pm 20 \%$ pro Oktavband zulässig sind.

Bei Räumlichkeiten, in denen **Lärmminderung** eine schützende Maßnahme für die NutzerInnen darstellt (z.B. Arbeitsräume, aber auch Turnsäle und Pausenräume), gelten nachfolgende Mindestanforderungen zur Lärmminderung. Diese sind anhand des mittleren Schallabsorptionsgrads der Begrenzungsflächen zu messen. Im leeren Raum hat dieser in Oktavbändern von 250 Hz bis 4 kHz mindestens $\alpha_{m,B} = 0,20$ zu betragen. Dabei wird geraten, nach Möglichkeit bei 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz mindestens $\alpha_{m,B} = 0,25$ anzustreben. Wenn es betriebstechnische Gründe (z.B. Hygiene) nicht zulassen, sind Abweichungen zulässig.

Kommentar zu den betrachteten Vorschriften und Richtlinien

In den betrachteten Normen wird vor allem die Nachhallzeit als zentrale Messgröße herangezogen. Zielwerte für diese sind dabei von Verwendungszweck und Raumvolumen abhängig. Auf Basis dieser Werte lässt sich mit einfachen Formeln die Zielnachhallzeit abschätzen.

Bei ÖNORM EN ISO 3382 sind die Vorgaben generell nachvollziehbar und teils mit mathematischen Begründungen versehen. Was in Anbetracht des Erscheinungsdatum der Norm einen antiquierten Eindruck hinterlässt, sind jene Vorgaben für technisches Equipment, welche die (analoge) Aufzeichnung auf Band und damit verbundene Parameter wie z.B. Gleichlaufschwankungen regeln.

Für den ersten Teil, Aufführungsplätze, sind überwiegend interessante Messgrößen wie die Gütemaße definiert. Wertvoll eine detailliertere Einbeziehung von Genreabhängigkeit und nicht enthaltene, verbreitete Messgröße wie z.B. das Bassverhältnis. Im zweiten Teil ist die Titelbezeichnung *gewöhnliche Räume* nicht besonders treffend gewählt - mangels klarer Definition zeichnet sich hier eine Tendenz hin zu Irreführung ab, da die Norm primär unterschiedliche Genauigkeitsklassen beschreibt. Beim enthaltenen Präzisionsverfahren existieren keine unmittelbaren Angaben, in welchem Frequenzbereich dieses durchzuführen ist. Die Priorität dieses Teils liegt weiters auf Unsicherheitsstatistik und Nichtlinearitäten. Der dritte Teil, Großraumbüros, liefert eine gut begründete Übersicht der Messmethode(n) und Zielwerte sowie einen Exkurs in Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz. Kritisch zu betrachten sind die zahlreichen Verweise auf andere Normen, wodurch tendenziell der Eindruck von Unvollständigkeit entsteht, sollte man mit dieser Vorschrift alleine arbeiten wollen.

Die ÖNORM B 8115-3 liefert in kompakter und gleichzeitig informativer Herangehensweise einen raumakustischen Leitfaden, welcher die Anforderungen der meisten Arten von Räumen abdeckt. Sowohl Hörsamkeit als auch Lärminderung werden berücksichtigt, wobei man in sorgfältig gewählten Grundzügen einen relevanten Überblick erhält. Zudem enthalten sind baupraktische Tipps zum Vermeiden akustisch negativer Phänomene (z.B. Flatterechos). Der als universal gültig angegebene Ansatz, schallabsorbierende Maßnahmen seien nur durch (bau-)technische und wirtschaftliche Faktoren begrenzt, ist kritisch zu hinterfragen.

Die OIB-Richtlinie 5 liefert in universeller Art eine Zusammenfassung von baulichen Schallschutz, Raumakustik und Erschütterungsschutz. Letzterer Abschnitt bringt inhaltlich nur die triviale Erkenntnis, dass Personen vor unzumutbaren Störungen durch Erschütterung zu schützen sind. Im Abschnitt zum baulichen Schallschutz fehlen grundsätzlich die Begründungen, allerdings für AnwenderInnen praktisch ist die Vielzahl an Zielwerttabellen unterschiedlicher Szenarien. Der Abschnitt Raumakustik stellt eine kürzere und praxisorientierte Fassung der B 8115-3 dar.

3 Raumakustik an Aufführungsorten

3.1 Aufführungsorte für Orchestermusik und Oper

Musik und Akustik - Was macht gute Akustik in Konzertsaal und Oper aus?

Im Konzertsaal und Opernhaus spielt die Raumakustik eine entscheidende Rolle, welche den Aufführungsorten, neben allgemeinem Ambiente, ihren individuellen Charakter verleihen. Oftmals ist den HörerInnen die Wichtigkeit des raumakustischen Designs gar nicht unmittelbar bewusst ist, wenngleich deren Auswirkungen eindeutig wahrgenommen werden und direkt in das Konzerterlebnis einfließen. Allgemein teilen MusikerInnen und Publikum ihre Vorstellungen von bzw. Ansprüche an einen „gut klingenden“ Konzertsaal. Leise Passagen sollen klar hörbar sein, laute Passagen entfalten erst mit entsprechendem Nachhall das gewisse Maß an Dramatik, ohne unangenehme Lautstärkepegel zu erreichen. Der Nachhall sorgt für klangliche Einhüllung, Lebendigkeit und eine volle Entfaltung des Instrumentalklangs des Orchesters. Gleichzeitig sollen schnelle Passagen nicht in einem undefinierbaren Brei verschwimmen und Echos, die irritieren bzw. zu einer falschen Lokalisation führen können, vermieden werden.

Das Zusammenspiel der physischen Merkmale eines Raumes und der subjektiven, menschlichen Wahrnehmung haben den Akustiker Leo Leroy Beranek (*1914 - †2016) dazu veranlasst, über hundert DirigentInnen und MusikkritikerInnen nach ihren akustischen Präferenzen zu befragen und die Raumeigenschaften messtechnisch zu erfassen [Beranek 2004]. Es kristallisierte sich eine Vorliebe für Musik aus der klassischen und romantischen Periode, aufgeführt in rechteckigen Säle mit einer mittleren Nachhallzeit von 1,7 bis 2,1 Sekunden, heraus. DirigentInnen stehen vor der Aufgabe mit unterschiedlichen Räumen richtig umzugehen. Vielgereist ist auch Stardirigent Herbert von Karajan, welcher selbst hohen Wert auf die Akustik seiner Aufführungsorte legte. Nicht alle Räume schienen ihm geeignet, um seine Vorstellungen realisieren zu können. Unter anderem äußerte er das auch gegenüber der neuen Berliner Staatsoper im Jahr 1943. Sein Bewusstsein und die Offenheit für die Raumakustik, ebneten einen Stück weit den Weg, Designs fernab des traditionellen europäischen Schuhkartons zu verwirklichen. In den 1930ern wurden zwei Dirigenten auf ihren Umgang mit Raumakustik untersucht. Leopold Stokowski, der typischerweise in der Academy of Music, Philadelphia USA tätig war, entwickelte eine spezielle Technik, mit welcher er eine spezielle Art von Fülle und Lebendigkeit in eher trockene und klar klingende Räumlichkeiten bringen konnte. Ebenso realisierte Sergei Alexandrowitsch Koussevitzky seine Vorstellungen mit eigenen Spieltechniken vor allem in der Boston Symphony Hall, USA. Bei einer Aufführung im Raum des jeweilig Anderen, konnte das Publikum die klanglichen Auswirkungen ihrer technischen Unterschiede wahrnehmen und sogar beschreiben.

Bei MusikerInnen ist der Zugang zur Raumakustik individueller, da die akustische Umgebung direkten Einfluss auf die anzuwendende Spieltechnik und Dynamik nimmt. Die Anforderungen und Vorstellungen sind von Instrument zu Instrument sehr verschieden. Violinen benötigen eine gute Balance zwischen Direktheit und Hall. Während sich PianistInnen in Räumen mit etwas kürzerer Nachhallzeit am wohlsten fühlen, verleihen der Orgel vergleichsweise längere Nachhallzeiten erst ihren typischen Charakter.

Schlussendlich liegt es an DirigentInnen und MusikerInnen eine Komposition mit dem Raum

zusammenzuführen. Es werden auch seitens der KomponistInnen Entscheidungen im Bewusstsein für eine bestimmte Räumlichkeit getroffen und oftmals explizit für einen Raum und dessen Akustik komponiert. Betrachtet man die einzelnen Perioden der Musikgeschichte, die eng verwoben mit unterschiedlichen Aufführungsräumlichkeiten und -kontexten sind, spielt die Raumakustik ebenfalls eine tragende Rolle. Im Barock entwickelten sich zwei gegensätzliche Raum- und gleichzeitig Klangkonzepte, für welche gezielt komponiert wurde. Einerseits gab es Aufführungsorte mit längerer Nachhallzeit und andererseits Räumlichkeiten, die in ihrer Akustik intime Nähe vermittelten. In der Regel lagen die Nachhallzeiten typischer Aufführungsorte bei weniger als 1,5 Sekunden. Beispielsweise waren die meisten Fugen von Bach für kleinere Kapellen mit niedrigen Nachhallzeiten konzipiert und auch seinen späteren Schaffensort, die Thomaskirche in Leipzig, würde man mit 2 Sekunden Nachhall heute als eine eher trockene Umgebung ansehen. Aktuell bevorzugen wir es, typisch-barocken Kontrapunkt mit den charakteristischen Tempi und Verzierungen, bei niedrigeren Nachhallzeiten zu hören.

In der Klassik löste man sich vom Kontrapunkt, langsam auch von Hof bzw. Kirche und steigerte sich nicht nur kompositorisch, sondern auch klanglich in Richtung Fülle und Größe. Größere Besetzungen und erhöhtes Publikumsinteresse (bzw. Zugang) führten zu größeren Räumlichkeiten. Dennoch findet man die ersten Konzertsäle mit Nachhallzeiten, die bei Vollbesetzung 1,6 Sekunden übersteigen, erst Mitte des 19. Jahrhunderts. Heute werden für klassische Aufführungen Nachhallzeiten zwischen 1,6 – 1,8 Sekunden bevorzugt, was späteren Konzertsälen dieser Periode entspricht. Das allseitig weitere Expandieren in der Romantik umfasst auch eine Zunahme der Nachhallzeit hinauf in den Bereich von 1,9 – 2,1 Sekunden. Ein Streben nach einem voluminösen Klangideal bei gleichzeitiger Unschärfe und Dramatik wird so erfüllt. Der Anteil des Direktschalls aus dem Orchestergraben soll den Reflexionen des Raums klar unterlegen sein. Diese prägenden Ansprüche zeigen noch heute Nachwirkungen im Bau von Konzerthallen und sind auch von KomponistInnen der Zeit klar in die Werke miteinbezogen worden.

Ein zeitgemäßer Konzertsaal sollte im besten Fall in der Lage sein, mit einer breiten Palette an Klangidealen umzugehen. Daher hat bei neueren Konzepten die variable Raumakustik (aktiv und passiv) einen besonders hohen Stellenwert. Die notwendigen Maßnahmen können z.B. Vorhänge, gekoppelte Räume oder elektroakustische Anlagen umfassen. Wiederum andere Ansprüche an die Raumakustik stellt die Oper, bei welcher die Sprachverständlichkeit eine zentrale Rolle spielt. Die hohen Nachhallzeiten der Konzertsäle sind dafür eher ungeeignet. Vor allem in Europa, wo überwiegend Aufführungen in jeweiliger Publikumssprache stattfinden, sind die Nachhallzeiten eher kurz (im Mittel 1,2 Sekunden). Auffällig ist, dass Opernhäuser in Japan oder Nord- und Südamerika aufgrund der für diese Länder häufig in Fremdsprachen aufgeführten Opern weniger Wert auf die direkte Verständlichkeit gelegt wird. Raumakustisch spiegelt sich das in höheren Nachhallzeiten wieder. Eine erwähnenswerte Ausnahme in Europa ist hier das nach Richard Wagners Vorstellungen errichtete Opernhaus, das Festspielhaus Bayreuth, welches vollbesetzt eine 1,6-sekündige Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen besitzt. Schlussendlich soll das Publikum in den Genuss einer guten musikalischen Darbietung kommen, da bei diesem alle Fäden zusammenlaufen. Natürlich wird die Qualität eines Aufführungsortes nicht allein an naturwissenschaftlich festmachbaren Kriterien, wie raumakustische Parameter, bestimmt. Welchen Ruf ein Konzertsaal im Ganzen genießt, wird laut Beranek maßgeblich von MusikkritikerInnen mitbestimmt, welche sehr wohl auch das raumakustische Erlebnis entsprechend hinterfragen und dokumentieren. Hier sind Eröffnungskritiken oft problematisch, da es oft Monate dauern kann, bis sich ein Orchester an die räumlichen Gegebenheiten angepasst hat. Neben der Programmgestaltung und der Gesamterfahrung (auch im Visuellen) ist ein professionelles Orchester am Standort mitbestimmend dafür, wie ein Konzertsaal beurteilt und eingeordnet wird. Eine Studie bezüglich der akustischen Beurteilung von 24 Opernhäusern zeigte, dass die sechs besten Orte eine Nachhallzeit von 1,24 bis 1,6 Sekunden besitzen (Median 1,4 Sekunden) [Beranek und Hidaka 2000]. Zudem umfassten diese weniger als 2500 Publikumsplätze. Nur in

drei Spielstätten wurde der Orchestergraben von DirigentInnen als akustisch angenehmer als ein Publikumsplatz beschrieben.

Die Sprache der musikalischen Akustik - Auswahl und Definition typischer Begrifflichkeiten

Beranek gibt in Abschnitt [Beranek 2004, S. 19-35] eine Einführung in 25 ausgewählte Begrifflichkeiten der Raumakustik bezogen auf Säle und Häuser mit über 700 Sitzplätzen. Dabei bezieht er sich bei Beschreibungen und Beispielen vorwiegend auf musikalische Schallereignisse. Definitionen und Erklärungen unterstützen DirigentInnen, AkustikerInnen und MusikerInnen bzw. KritikerInnen im Austausch ihrer Vorstellungen und Ansprüche an die Raumakustik. Nicht bei allen Definitionen ist man sich einig und das teils sehr spezifische Vokabular ist vielen KünstlerInnen ebenfalls nicht geläufig. Uneinheitliche und subjektive Sprache bzw. eine Palette von Adjektiven zur Beschreibung der in der Regel klarer definierten, physikalischen Vorgänge stellen eine Herausforderung für alle Beteiligten dar.

Nachhall und Klangfülle

In geschlossenen Räumen kommt es in der Regel zu einem „Nachklingen“ von bereits beendeten Schallereignissen. Die Schallwelle, z.B. erzeugt von einer Geige, breitet sich vom Korpus weg in alle Richtungen aus. Wenn auf der Geige kein Ton mehr gespielt wird, kann man für einen bestimmten Zeitraum noch die Reflexionen wahrnehmen, die an Oberflächen wie Wänden, Decken, Böden usw. stattfinden. Eine beispielhafte Illustration des Schallwegs zeigt Abb. 3.1. Nach etwas Zeit haben diese Reflexionen bzw. deren Energie so stark abgenommen, sodass der Klang komplett verstummt.

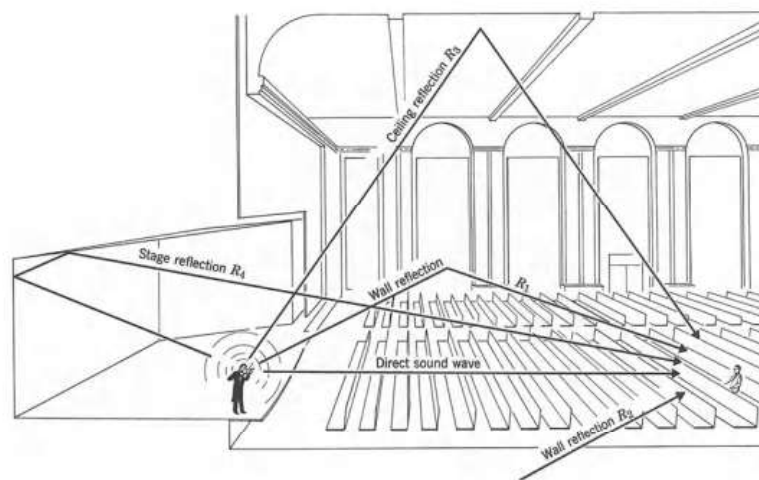


Abbildung 3.1: Beispielhafte Illustration des Schallwegs in den ersten 80 Millisekunden [Beranek 2004, S. 22]

In der Akustik wird der Zeitraum des „Nachklingens“ als Nachhallzeit (reverberation time, RT) bezeichnet, welche eine zentrale Größe der Raumakustik darstellt. Die wichtigste, technische Definition beschreibt diese jene Dauer nach Beenden einer Schallanregung des Raums, bis der zugehörige Schalldruck um 60 dB abgefallen ist. Die Abb. 3.2 stellt eine Veranschaulichung dieser Definition dar. Typischerweise liegt die Nachhallzeit bei Konzertsälen zwischen 1,8-2 Sekunden im Bereich der Mittelfrequenzen (350-1400 Hz). Die Nachhallzeit kann, neben der Vermittlung eines Raumeindrucks, dem Klang Fülle verleihen und z.B. Einzeltöne durch das zeitliche Verschwimmen miteinander verbinden. KomponistInnen haben diese Eigenschaften durchaus in

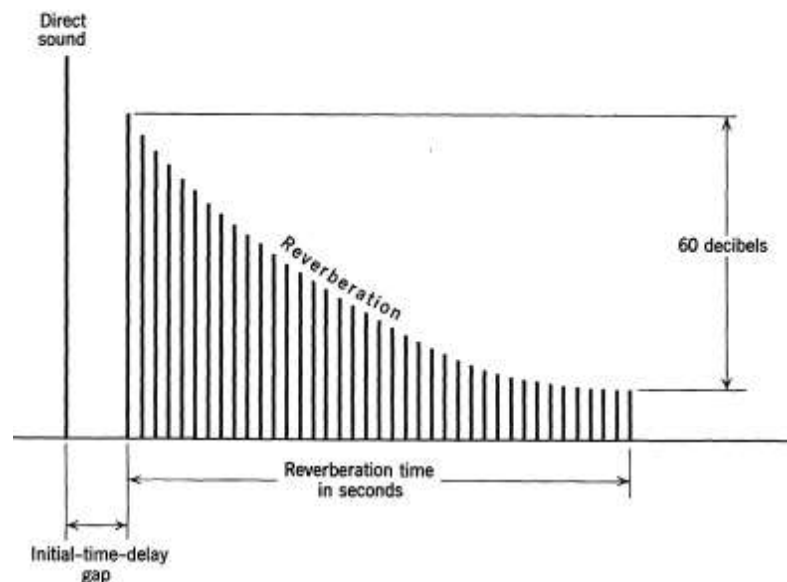


Abbildung 3.2: Veranschaulichung der Definition der Nachhallzeit RT_{60} [Beranek 2004, S. 22]

ihre Stücke miteinbezogen und auch das Publikum reagiert auf z.B. zu langen/kurzen Nachhall für eine bestimmte musikalische Aufführung.

Direktschall, Erstreflexionen, Nachhall

Direktschall bezeichnet jenen Schallanteil, der sich vom Instrument ausbreitet und unreflektiert – also direkt – am Ohr der HörerInnen ankommt. Erstreflexionen sind jener Schallanteil, der nach dem Direktschall, jedoch noch innerhalb eines Zeitraums von 80 Millisekunden gehört wird. Reflexionen und Klänge danach entsprechen dem Nachhall.

Frühe Abklingzeit (Early Decay Time, EDT)

Die frühe Abklingzeit nimmt bei der subjektiven Beschreibung der Halligkeit eines Raumes einen wichtigen Stellenwert ein, da hier jene Zeit beschrieben wird, in der das Schallereignis nach Anspielen um 10 dB abgesunken ist. Dieser Zeitraum ist wesentlich für die unmittelbare Wahrnehmung der Raumakustik eines Aufführungsortes. Verbunden mit einer Multiplikation um den Faktor 6 können EDT und RT_{60} miteinander verglichen werden.

Geschwindigkeit aufeinanderfolgender Töne

Das gewählte Tempo beim Anspielen von aufeinanderfolgenden Tönen interagiert direkt mit den Reflexionen bzw. Reflexionszeiten eines Raumes. Wie oben beschrieben, kann dadurch Klangfülle entstehen, aber auch eine gewisse Unschärfe auftreten. Ist ein Stück zu schnell für eine bestimmte Nachhallzeit, kann es passieren, dass der Nachhall des ersten Tons den nachfolgenden Ton überdeckt. Ohne Nachhallzeit würde dies, ähnlich den Bedingungen im Außenbereich, nicht vorkommen.

Definiertheit (oder Klarheit)

Definiertheit spielt sowohl in der horizontalen Dimension, der Aufeinanderfolge von Tönen, als auch in der vertikalen Dimension, dem gleichzeitigen Erklingen, eine wichtige Rolle. Es stehen eine Vielzahl an kompositorischen und spieltechnischen Mitteln zur Verfügung, um die horizon-

tale Definiertheit zu beeinflussen. Diese steigt für niedrigere Nachhallzeiten an. Ähnlich verhält es sich bezogen auf die vertikale Definiertheit. Die Raumeigenschaften müssen also spieltechnisch miteinbezogen werden, um das gewünschte Maß zu erreichen. Auch hier wird klar, dass nicht jeder Raum für jedes Stück geeignet ist: Gregorianischer Choral oder Bachs Toccata in D-Moll werden sich immer erst in eine halligen Umgebung, wie z.B. Kirchen, gut entfalten können, während bei schnellen Läufen von Mozarts Pianokonzerten die erwünschte Klarheit niedrige Nachhallzeiten fordert.

Resonanz

Resonanz und Nachhall werden häufig von MusikerInnen miteinander vermischt, um bestimmte raumakustische Eigenschaften zu beschreiben. Der Begriff sollte auch nicht mit Anhebung der Lautstärke verwechselt werden, wie z.B. beim Geigenkorpus, der eigentlich nur mit ganz bestimmten Frequenzen in Resonanz gehen kann, jedoch die Saitenschwingungen „vieler“ Frequenzen verstärkt. Ein altbekanntes Beispiel für Resonanzphänomene ist das Glas, welches durch eine kraftvolle Sopranstimme zerspringt. Objekte bzw. Körper sind auf molekularer Ebene immer in Bewegung, wodurch sich bei ein solcher bei einer bestimmten Frequenz, der Resonanzfrequenz, „natürlich“ mitbewegt bzw. vibriert.

Präsenz (räumliche Intimität) und Anfangszeitlücke (Initial Time Delay Gap)

Wie intim bzw. präsent ein Raum klingt, hängt vorwiegend von dessen physischer Größe ab. Der Eindruck wird durch die zeitliche Verzögerung zwischen Direktschall und dessen erster Reflexion(en) am HörerInnenohr bestimmt. Ist diese Verzögerung, genannt Anfangszeitlücke, kurz, klingt das Schallereignis präsent. In Abb. 3.2 ist dieser Zeitabschnitt mit *initial-time-delay gap* gekennzeichnet und liegt in den besten Konzertsälen bei etwa 25 ms. Da die ersten Reflexionen in der Regel von Balkon und Seitenwänden stammen, sollte ein Saal für einen solchen Zielwert eher schmal und mit nahe zueinanderstehenden, parallelen Wänden gebaut sein. Bei hohen Sälen können Paneele an der Decke dabei behilflich sein, die Erstreflexionen gezielt früher beim Publikum ankommen zu lassen.

Lebendigkeit und Mittenfrequenzen

Räumlichkeiten mit wenig oder ohne Nachhall werden oft als „tot“ oder „trocken“ bezeichnet, während gut wahrnehmbarer Hall oft mit subjektiv-lebendigem Klangeindruck verbunden wird. Ein wichtiges Maß zur Charakterisierung dieser Lebendigkeit ist daher die Nachhallzeit bei den Mittenfrequenzen (350-1400 Hz), die im Konzertsaal bei 1,5-2,2 s und im Opernhaus zwischen 1,2 und 1,6 s liegt.

Räumlichkeit

Im typischen Schuhkarton-Konzertsaal entsteht durch den relativ hohen, eher frühen Anteil an Seitenschall von Wänden und Balkonen ein Klang, der oft wesentlich größer als das Instrument bzw. die Quelle selbst wirkt. Wir nehmen das Ereignis als besonders räumlich wahr, da ein Hauptanteil der Rauminformationen in den ersten 80 ms vom lateralen Schalleinfall bestimmt wird. Unter anderem bietet der Binaural Quality Index (BQI) hierfür eine Messgröße, indem er die Verhältnisse innerhalb und außerhalb dieser Zeit in Beziehung setzt. Zusätzlich hat auch die Bassbetonung des Raumes einen Anteil an jenem Eindruck, der als räumlich empfunden wird.

Wärme

Dieser Begriff wird allgemein mit der Klarheit bzw. Definition des Bassbereichs bei voller Or-

chesterlautstärke in Beziehung gebracht. In der Akustik wird als Messwert der Schalldruckpegel eines 125-Hz-Tons über einen standardisierten Lautsprecher herangezogen. MusikerInnen beschreiben zu viel Betonung im Bassbereich mit dem Adjektiv *dunkel*.

Zuhörendeneinhüllung

Der Begriff „Listener envelopment“, frei übersetzt Einhüllung der ZuhörerInnen, beschreibt, in welchem Ausmaß HörerInnen vom Nachhall allseitig eingehüllt werden. Es soll beschrieben werden, wie viel Nachhall aus allen Richtungen, und nicht nur aus eine beschränkte Anzahl an reflektierenden Flächen, ankommt.

Lautheit und Lautstärke

Lautstärke hängt stark vom subjektiven Empfinden einer Person ab. Es gelingt allerdings mit kalibrierten Messgeräten die Lautheit von Schallereignissen zu messen und zu vergleichen. Im Konzertsaal sind hierbei wieder die Komponenten Direktschall und Nachhall zu betrachten, die gemeinsam den subjektiven Höreindruck prägen. In der Regel wird ein Saal mit höherer Nachhallzeit lauter empfunden als ein trockener Raum.

Timbre und Klangfarbe

Das Timbre ist klangliches Charakteristikum eines bestimmten Instrumentalklangs. Die Klangfarbe hingegen beschreibt die Balance zwischen Höhen, Mitten und Tiefen sowie zwischen den einzelnen Orchestersektionen. Ein Aufführungsort kann durch Reflexionsmuster (z.B. an der Decke) und Absorption (z.B. Dämpfung der Höhen) die Klangfarbe stark beeinflussen.

Akustische Blendung (Glare)

In Analogie zur Blendung in der Optik kann ein Raum mit flachen und glatten Oberflächen einen schroffen, schrillenden Klangeindruck erwecken. Feine Unregelmäßigkeiten, Ornamente (wie z.B. im barocken Stil) oder Aufrauung kann solche Phänomene abmildern.

Brillanz

Ein Klang wird als brillant beschrieben, wenn dieser hell, klar und reich an Harmonischen ist. Der Höhenbereich sinkt hier nicht allzu schnell ab. Bei starker Bedämpfung, z.B. bei vielen Teppichen und Vorhängen, kann der Klang schnell an Brillanz verlieren.

Balance

Eine gute Gesamtbalance, also ein passendes Verhältnis zwischen Instrumentensektionen und SolistInnen, ist sowohl von musikalischen, aufstellungstechnischen als auch raumakustischen Faktoren abhängig. Reflektierende Flächen im Bühnenbereich, welche bestimmte Elemente überbetonen, können schädlich für die Gesamtbalance sein. Im Opernhaus ist jedoch eine Hervorhebung der SängerInnen durchaus erwünscht.

Verschmelzung

Die Art, wie der Klang einzelner Instrumente miteinander verschmilzt, sodass er vom Publikum als harmonisch empfunden wird, wird vorwiegend von der Orchesterplatzierung und von den Reflexionseigenschaften der Bühne bestimmt.

Ensemble

Dieser Begriff bezieht sich auf das Zusammenspiel der MusikerInnen. Dies ist stark abhängig davon, wie gut sich die einzelnen Personen selbst und gegenseitig hören bzw. sehen können.

Attack (Unmittelbarkeit)

Für MusikerInnen ist es wichtig, wie schnell der Raum auf das Anspielen einer Note klanglich antwortet. Dies ist vor allem von der Zeit der Erstreflexionen, die wieder auf die Bühne treffen, abhängig. Ist diese Zeit zu lang, kann das als störender Echoeffekt das Spiel irritieren.

Textur

Textur beschreibt den subjektiven HörerInneneindruck der frühen Reflexionsmuster. Diese Patterns sollten bei klanglich hochwertigen Aufführungsorten vielzählig, mehr oder weniger einheitlich, aber nicht präzise äquidistant in ihrem zeitlichen Verlauf beim Publikum eintreffen. Nur so vermeidet man das Dominieren bestimmter Muster.

Echos

Echos beschreiben eine starke Reflexion mit bestimmter Verzögerung (ab Echschwelle), welche auf und vor der Bühne als störend empfunden wird. Hohe Decken und kuppelartige Rückwände können Echos bewirken. Besonders in Räumen mit kurzen Nachhallzeiten können störende Echos schnell auftreten.

Dynamikumfang und Hintergrundlärm

Der Dynamikumfang beschreibt jenen Lautstärkebereich, in welchem Musik in einem Saal wahrgenommen und aufgeführt werden kann. Er erstreckt sich von jener Lautstärke, die gerade noch das Hintergrundgeräusch (z.B. Belüftung oder Publikum) verdeckt, bis zur lautesten Stelle einer Aufführung.

Nachteilhafte Ausstattung bezüglich der Tonqualität

Metallische Oberflächen, optische Verzierungen oder Orgelpfeifen sind beispielhafte Raumobjekte, die sich nachteilig auf die Raumakustik auswirken können. Selbst in den besten Konzertsälen gibt es vereinzelte Plätze, auf welchen durch das Zusammentreffen architektonischer und dekorativer Gegebenheiten Phänomene, wie eine empfundene Lokalisationsverschiebung, auftreten können.

Klangliche Einheit im Publikumsbereich

Ein Hauptziel bei der Gestaltung eines Konzertsaals ist es, allen BesucherInnen im gesamten Publikumsbereich ein möglichst einheitliches klangliches und musikalisches Bild einer Aufführung zu vermitteln. Leider gibt es immer wieder Plätze und Bereiche, in denen Reflexionen und Echos das akustische Ereignis trüben können.

Beranek fasst die klanglichen Qualitäten in Bezug auf raumakustische Parameter bzw. Auswirkungen in Form eines Baumdiagramms zusammen (Abb. 3.3).

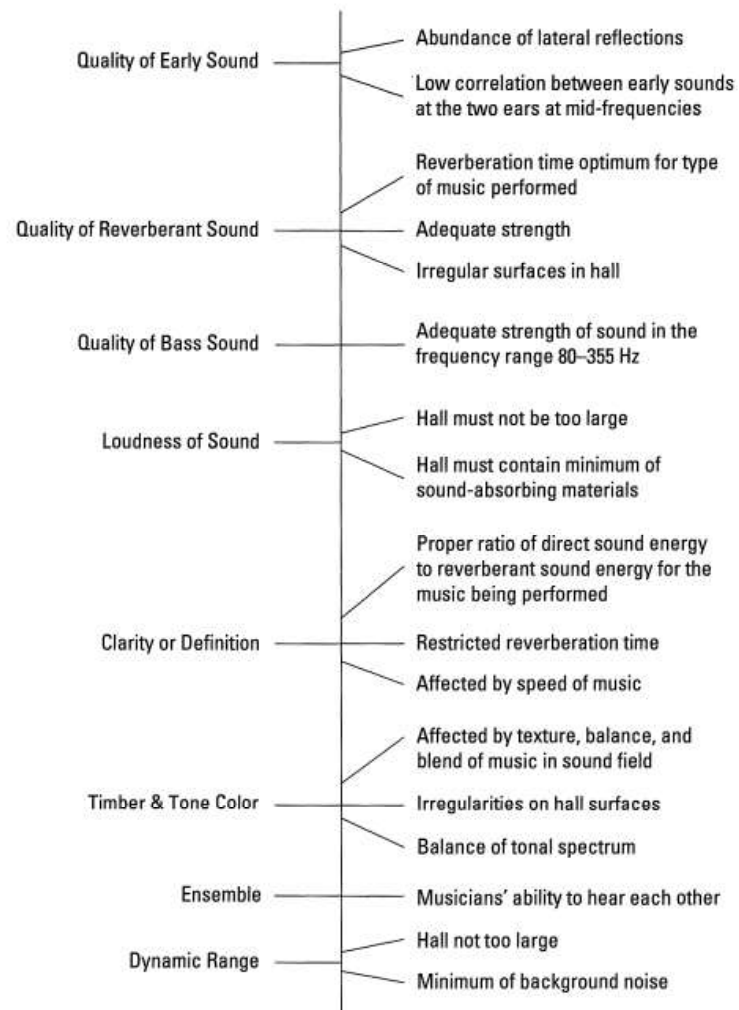


Abbildung 3.3: Zusammenfassendes Baumdiagramm zu den Auswirkungen der Raumakustik auf musikalische Qualitäten [Beranek 2004, S. 34]

3.2 Aufführungsorte für Rock- und Popmusik

Genreabhängigkeit der Raumakustik

Es scheint allgemein Übereinstimmung darüber zu herrschen, dass Rockmusik und klassische Orchestermusik so etwas wie die Gegenpole einer breiten Palette an musikalischen Stilen der euro-amerikanisch geprägten Musikkultur darstellen. Neben musikalischen Strukturen, Zielgruppen und konträrer Klangästhetik unterscheiden sich auch die akustischen Anforderungen an Umgebungen für Live-Performances stark. Ein herausragend klingender und für klassische Aufführungen konzipierter Konzertsaal wird die Ansprüche seitens Tontechnik, Publikum und Mitglieder einer *Band* ohne enormen Zusatzaufwand eher selten erfüllen können. Um diesen Umstand näher zu erfassen, hat sich *Niels Werner Adelman-Larsen* in *Rock and Pop Venues* [Adelman-Larsen 2014] mit dem akustischen und architektonischen Anforderungen an Aufführungsplätzen für Rock und Pop ähnlich detailliert wie Beranek auseinandergesetzt. Einige grundlegende Erkenntnisse über die akustischen Ansprüche in Rock und Pop bzw. Unterschiede zur Konzeption klassischer Konzerthäuser werden an dieser Stelle zusammengefasst.

Da bei einem Rock- bzw. Popkonzert grundsätzlich alle Quellen verstärkt über Lautsprecher (PA, engl.: *public adress*) an das Publikum weitergegeben werden, stehen TontechnikerInnen vor den Aufgaben, die einzelnen Elemente entsprechend abzunehmen und entsprechend abzumischen. Das Anfertigen von Mixes, welche für die MusikerInnen auf der Bühne und für den Publikumsbereich zufriedenstellend sein müssen, wird als eigene Kunstform angesehen. Die einzelnen Bestandteile bzw. Instrumenten(gruppen) sollen dabei möglichst jeweils einen eigenen Platz im Frequenzspektrum einnehmen und im Gesamtbild einen musikalischen, transparenten Mix ergeben. Dabei müssen für Musizierende auf der Bühne, die oftmals mit In-Ear-Monitorsystemen arbeiten, andere Mixes angefertigt werden, wie für das Publikum, welches sich von einem Rock/Pop-Konzert zumeist Pegel von über 90 dB-SPL erwartet. Auch bei der Beschallung von Hallen und Stadien, die über 10.000 Personen fassen können, wirkt der Raum wie ein nichtlineares System der akustischen Übertragungskette, welcher durch geometrische und materielle Eigenschaften den Mix stark beeinflusst. Das in der Regel nichtlineare Frequenzantwortverhalten des Raumes führt zum obligat erscheinenden Einsatz einer auf den Aufführungsort abgestimmten Entzerrung (*house-EQ*). Doch die Herausforderung der Raumakustik liegt hier nicht in der Pegel-Domäne sondern vielmehr in der Zeit-Domäne. Einige Frequenzen werden innerhalb kürzester Zeit ausklingen, während andere Frequenzbereiche über längeren Zeitraum das akustische Gesamtbild beeinflussen. Diese zeitlichen Effekte können Maskierungen, Über- bzw. Unterbetonung u. dgl. zur Folge haben, welche die ursprünglich ausgesandte, musikalische Botschaft bis hin zur Unkenntlichkeit manipulieren. Rumpeln, schwammige Klänge und textliche Unverständlichkeiten sind die Folge, welche den musikalischen Genuss trüben. Vor allem betroffen sind tiefere Frequenzen, welche in Rock und Pop hohe Wichtigkeit und auch hohe Pegel einnehmen. Der zunächst auf der Hand liegende Umkehrschluss, Aufführungsorte so trocken wie möglich zu gestalten, führt jedoch zu einer unbefriedigenden Konzerterfahrung. Wie Adelman-Larsen feststellt, gibt es einen kleinen Bereich für vorgeschlagene Nachhallzeiten, welche abhängig von Volumen und Frequenzband für alle Beteiligten ein zufriedenstellendes Konzerterlebnis ermöglichen [Adelman-Larsen 2014, vgl. S. 35-40].

Raumakustische Begrifflichkeiten in Rock und Pop

Ähnlich wie Leo Beranek zunächst Begriffe definiert, welche dazu dienen das subjektive Empfinden und messbare Eigenschaften zusammenzuführen (vgl. Abschnitt 3.1), fasst auch Adelman-Larsen einige objektive Parameter und Gütemaße der Raumakustik zusammen. Dabei weist er vereinzelt auf eventuell notwendige Adaption von Zielwerten hin, da solche Werte üblicherweise für Klassik bzw. Sprache ermittelt wurden, aber für Pop und Rock noch nicht hinreichend

adaptiert worden sind. Im nachfolgenden Abschnitt soll vorwiegend auf die Unterschiede zu typischen Zielwerten hingewiesen werden. Für genauere Definitionen der einzelnen Gütemaße sei auf die entsprechenden Normen unter Kapitel 1 dieser Arbeit verwiesen.

EDT, Nachhallzeit, Lebendigkeit und Halligkeit

Grundsätzlich sind diese Größen nicht anders definiert. T_{30} gilt auch in Rock und Pop als eine der wichtigsten Größen in der Raumakustik, es sei aber erwähnt, dass ein 30-dB-Abfall von -5 dB bis -35 dB in der Praxis aufgrund von Maskierung kaum Relevanz besitzt. Für die Beschreibung von Lebendigkeit und Halligkeit scheint auch in Rock und Pop die frühe Abklingzeit (EDT) besser geeignet zu sein, um das Empfinden der ZuschauerInnen objektiv zu beschreiben. Das Thema Nachhallzeit wird ausführlicher in Abschnitt (3.2) behandelt.

C_{80} , D_{50} , Erstreflexionen, Klarheit und Intimität

Erstreflexionen und Verhältnisse von früh-zu-spät eintreffender Energie ist ebenfalls von Wichtigkeit. Adelman-Larsen empfiehlt allerdings kürze Zeitabschnitte, wie z.B. die 50 ms von D_{50} bzw. C_{50} bzw. 80 ms von C_{80} (Klarheitsmaß für Musik), zu betrachten. Grund dafür sind die oftmals stark synkopierten Events in Rock und Pop. In 50 ms legt eine Schallwelle immerhin bereits 17 m zurück bzw. bewegt sich jeweils 8 m von einer reflektierenden Oberfläche und wieder zurück.

LF, Einhüllung und Lateralreflexionen

Durch (seitliche) Reflexionen von Begrenzungsflächen erleben ZuhörerInnen das Gefühl vom Klang eingehüllt zu sein. Trotz fehlender Studien wird angenommen, dass dieses Gefühl seitens MusikerInnen und Publikum auch in Rock und Pop erwünscht ist. Konträr dazu ist zu erkennen, dass TontechnikerInnen beim Erstellen eines Mixes generell die Klarheit gegenüber der klanglichen Einhüllung bevorzugen [Adelman-Larsen 2014, S.31].

Subjektiver Schallpegel, Stärkemaß G

Vor allem für von der Bühne weiter entfernte Publikumsfläche ist Konzertsaal eine Verstärkung durch die Räumlichkeit erwünscht. Diese kann mittels dem Stärkemaß G (*room gain*) ausgedrückt werden. Die Größe ist für Rock- und Popkonzerte, welche in der Regel verstärkt dargeboten werden, nicht von Relevanz. Eventuell kann etwas Zugewinn im 63-Hz-Oktavband Vorteile bringen.

Bassverhältnis, Wärme

Im sinfonischen Aufführungskontext und in der akustischen Gestaltung von Konzerthäusern wird generell eine höhere Nachhallzeit im unteren Frequenzbereich bevorzugt und mit subjektiven Begriff *Wärme* in Verbindung gebracht. Beranek definiert den Begriff des Bassverhältnisses mit:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1k}} \quad (3.1)$$

In Pop und Rock hat die Betrachtung dieses Verhältnis jedoch keine Relevanz. Grundsätzlich sollte vor allem das Verhältnis des 63-Hz- bzw. 125-Hz-Oktavbands zu den Mittenfrequenzen betrachtet werden.

ST, Unterstützung, Ensemble

Diese oft auch als Bühnenparameter bezeichneten Größen (ST , *Support*) betrachten die zu den Musizierenden auf die Bühne zurückkehrende Energie. Hierbei werden die frühen (ST_{early} , 20-100 ms) und späteren Reflexionen (ST_{late} , 100-1000 ms) im Vergleich zum Direktschall betrachtet. Diese Parameter geben Aufschluss darüber, wie gut sich die MusikerInnen auf der Bühne selbst und im gemeinsamen Klangbild wahrnehmen können (Ensemble). Adelman-Larsen schlägt hier die Betrachtung der Differenz, in dieser Arbeit als ST_{diff} bezeichnet, vor:

$$ST_{diff} = ST_{late} - ST_{early} \quad (3.2)$$

Ist diese Differenz zu niedrig ($\ll 3$ dB), entsteht der Eindruck der Entkopplung der Bühnen vom Auditorium, welcher in der Regel als nachteilhaft angesehen wird. Generell sollte ST_{early} die dominantere Größe sein. Auch wenn auf der Bühne in der Regel vielfältige Monitoring-Möglichkeiten zur Verfügung stehen, hat dieser Parameter auch in Rock und Pop Relevanz, da sich Musizierende besser vom eigenen Klang und von jenem der Mitmusizierenden bei höheren Werten von ST_{early} eingehüllter füllen.

Herkunft der Daten

Adelman-Larsen stellte auf Basis von Interviews und Messungen einige Empfehlungen für die akustische Gestaltung von Aufführungsorten für Rock- und Popmusik zusammen. Neben der allgemeinen Publikumsbewertung wurden sowohl MusikerInnen als auch ToningenieurInnen zu ihren Vorlieben und Abneigungen befragt. Die so erhaltenen Präferenzen wurden mit akustischen Messdaten unterschiedlicher Veranstaltungsorte in Beziehung gesetzt.

Für die Aufführung von Rock- und Pop-Konzerten zwischen 1950-1970, standen zumeist umgebaute Kinos, Fabriken sowie Clubs und Bars zur Verfügung. Spätestens in den 1990ern haben sich aufgrund der Popularität ganze Stadien etabliert. Im Laufe der Zeit wurden beim Errichten von Veranstaltungsorten oft typische Fehler begangen. Auch wenn vermehrt akustisches Fachwissen angewandt wurde, litt die Planung mancher Veranstaltungsorte darunter, dass die Anforderungen von verstärkter Pop/Rock-Musik mit jenen des typischen Konzertsaaes gleichgesetzt wurden. Die oftmals empfohlene Anhebung der Nachhallzeit unter 250 Hz mag im klassischen Konzertsaal zwar für angenehme, klangliche Wärme sorgen - beim verstärkten Pop/Rock-Sound ist das jedoch unerwünscht und unmittelbar mit den akustischen Hauptproblemen solcher Veranstaltungsorte verbunden. Zudem wird das 250-Hz-Band im Pop und Rock eher der Tiefmitten Region als dem Bassbereich zugeordnet.

Empfohlene Nachhallzeiten

Grundsätzlich weisen Aufführungsorte, welche als angenehm empfunden werden, für die Nachhallzeit T_{30} in den Oktavbändern 63 Hz und 125 Hz wesentlich kürzere Werte auf, als schlecht beurteilte. Besonders kritisch erachtet Adelman-Larsen das 125-Hz-Oktavband; das 63-Hz-Oktavband kann wiederum höher als das 125-Hz-Oktavband sein.

Die Abb. (3.4) zeigt für Hallen bis 7 000 m³ Volumen einen linearen Zusammenhang zwischen T_{30} (für Oktavband-Mittelwerte von 125 Hz bis 2 kHz). Bei höherem Volumen wird der Zusammenhang exponentiell, wie in Abb. (3.5) dargestellt.

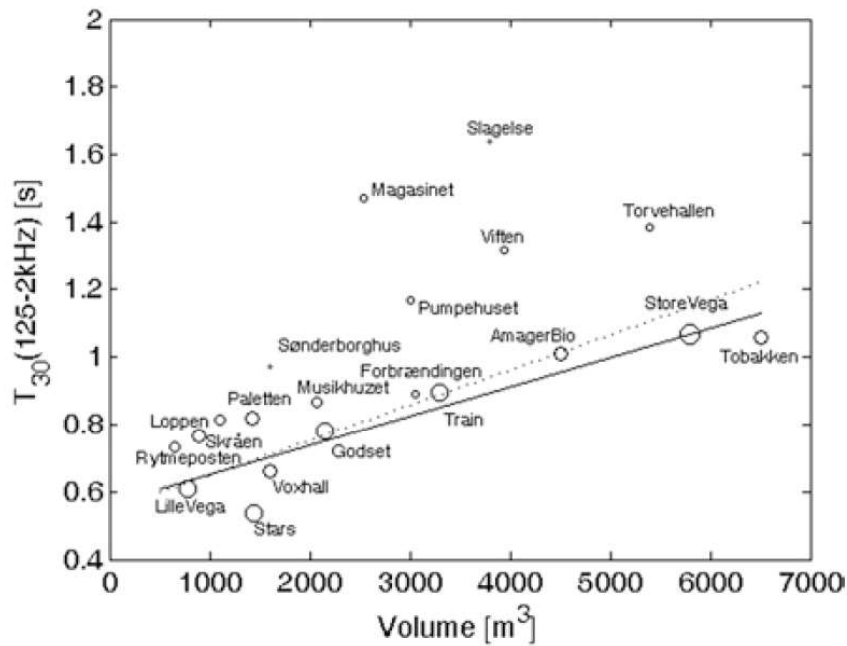


Abbildung 3.4: Empfohlene Nachhallzeit T_{30} (unbesetzt), gemittelt in 125 Hz bis 2 kHz Oktavbändern, abhängig vom Volumen. Die punktierte Linie beschreibt die Werte für Miteinbeziehung des 63-Hz-Bands. Die eingetragenen Worte sind Namen der untersuchten Aufführungsorte des Autors [Adelman-Larsen 2014, S. 123].

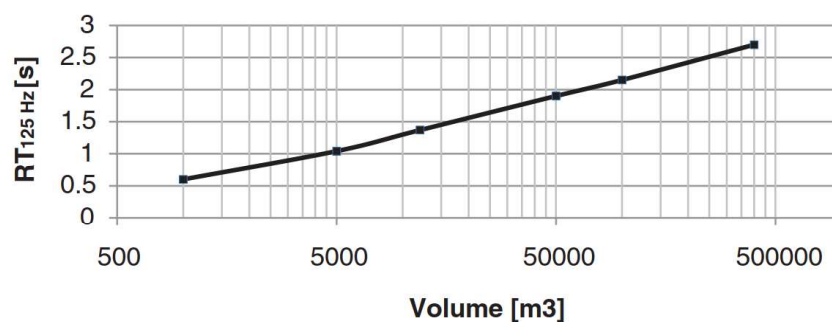


Abbildung 3.5: Für Volumina über 5000 m^3 steigt die Beziehung zur Nachhallzeit T_{30} im 125-Hz-Band exponentiell an [Adelman-Larsen 2014, S. 128].

Wie in Abb. (3.6) ersichtlich, kann eine Überhöhung im Bereich von 50-80 Hz im Ausmaß des 1,8-fachen (50 Hz) bis 1,2-fachen (80Hz) des 125-Hz-Bands auch unterstützend wirken und toleriert werden. Tendenziell können die Nachhallzeiten bei höheren Frequenzen um einiges höher sein. Dies ist förderlich für die Dynamikempfindung und steht in Kontrast zur typischen Akustikgestaltung von Aufführungsorten für klassische Musik.

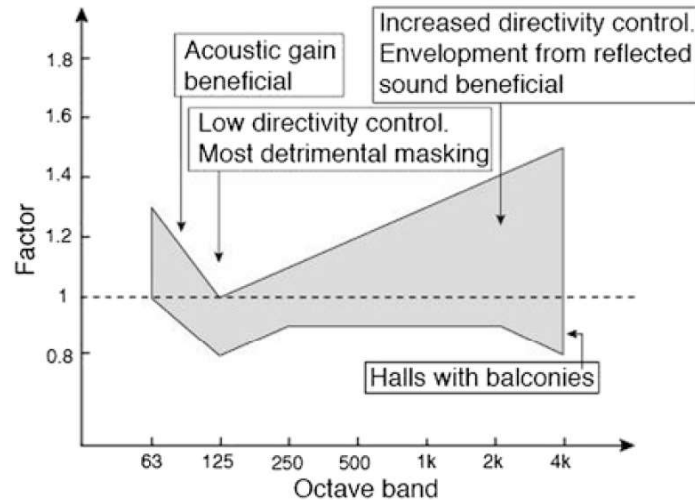


Abbildung 3.6: Empfohlene Nachhallzeiten T_{30} im Toleranzband abhängig vom Frequenzband. Die Darstellung beschreibt das Verhältnis vom 125-Hz-Oktavband zu den anderen, gelisteten Bändern [Adelman-Larsen 2014, S. 124].

In den nachfolgenden zwei Abschnitten werden eine Auswahl an Konzerthäusern in Österreich sowie eine Auswahl prominenter Spielstätten weltweit vorgestellt. Es werden baulichen Hintergründe, Material und eventuelle Sanierungen, beteiligte Personen und die generelle Rezeptionen vorgestellt. Gleichzeitig werden verfügbare technische Parameter aufgelistet. Einige Konzerthäuser erfüllen messtechnisch oder architektonisch nicht immer alle Vorgaben, die in den vorhergehenden Abschnitten im Zusammenhang mit *guter Akustik* genannt wurden. Dennoch können diese generell als beliebt eingestuft werden. Das zeigt, dass die wahrgenommene Raumakustik nicht immer zahlenmäßig in ihrer Vollständigkeit erfasst werden kann.

3.3 Auswahl an Konzerthäusern in Österreich

Die nachfolgende Auswahl an Konzerthäusern basiert, sofern nicht anders angegeben, auf Informationen nach dem Werk von Beranek [Beranek 2004].

3.3.1 Salzburg: Großes Festspielhaus

Das Große Festspielhaus in Salzburg zählt zu den größeren Konzertsälen in Europa und dient als Spielstätte für Konzert, Oper und Drama. Der Saal wird regelmäßig von europäischen sowie internationale Größen bespielt. Zur klanglichen und teils ästhetischen Verbesserung wurden 1979 und 1993 Umbaumaßnahmen vorgenommen, die akustische Vorteile für MusikerInnen und Publikum brachten. Beliebte Platzwahl ist vor allem der Balkon. Es gibt allerdings unvorteilhafte Plätze im Parterre, da durch die nach außen hin abgeschrägten Wände seitliche Schallreflexionen vorne wenig, vor allem aber im hinteren Bereich und am Balkon ankommen.

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	26. Juli 1960
Architektur	Clemens Holzmeister
Akustik	G. A. Schwaiger
Anzahl der Sitzplätze	2 158
Volumen	15 500 m ³ Konzert, 14 020 m ³ Oper
Bühnenbreite	100 m
Bühnentiefe	25 m
Portalbreite	30 m
Portalhöhe	9 m
Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen	1,5 s

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Putz
- Seitenwände: Putz, dünne Holzplatten/bretter, Holzfaser
- Rückwände: Konvexe Holzpaneele
- Boden: Holz mit Korkunterlage im Publikumsbereich, Teppiche
- Orchestergraben: Holzvertäfelung

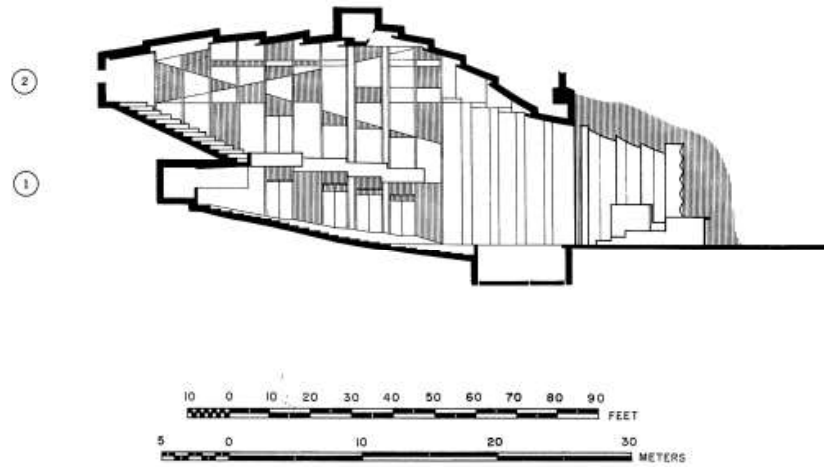


Abbildung 3.7: Seitenansicht [Beranek 2004, S. 171]

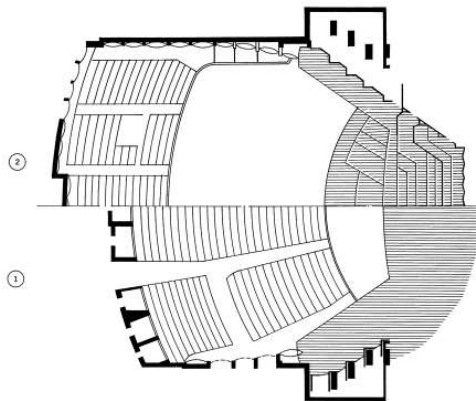


Abbildung 3.8: Grundriss [Beranek 2004, S. 171]

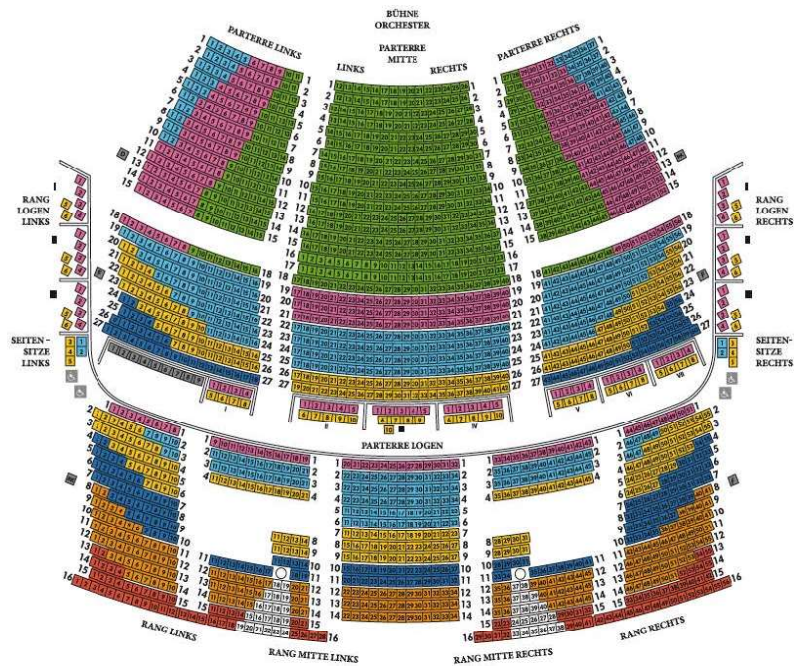


Abbildung 3.9: Platzverteilung



Abbildung 3.10: Bestuhlung, Decken und Seitenwände



Abbildung 3.11: Bühnenbereich

3.3.2 Wien: Großer Musikvereinssaal

Der Große Musikvereinssaal gilt als eine der prominentesten Spielstätten Europas und wird auch klanglich von allen Seiten geschätzt. Die Raumakustik wird mit Adjektiven wie voll und reichhaltig beschrieben. Der Saal wird tendenziell als eher laut eingestuft und von Beranek mit der Boston Symphony Hall verglichen. Neben großem Lob äußerte Herbert von Karajan auch Kritik: schnell aufeinanderfolgende Töne würden rasch ineinander verschwimmen und der akustische Unterschied zwischen Probe und Konzertsituation mit Publikum sei zu groß.

Auf der offiziellen Homepage der Spielstätte ist vermerkt, dass die gelobte Saalakustik nicht auf raumakustischer Empirie basiert, allerdings sei im Laufe der Zeit das optimale Klangverhalten wissenschaftlich bestätigt worden.¹

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	6. Jänner 1870
Architektur	Theophil Ritter von Hansen
Anzahl der Sitzplätze	1598 (Große Bühne) 1021 (Kleine Bühne)
Volumen	15 000 m ³ Konzert
Saalabmessungen	48,80 Meter lang, 19,10 Meter breit und 17,75 Meter hoch
Nachhallzeit	2 s bei Vollbesetzung

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Putz auf Fichtenholzplanken, am Dachstuhl aufgehangen
- Seiten- und Rückwände: Vorwiegend Putz, wenig Holz und hölzerne Türen
- Boden: Holz auf Hohlraum
- Orchestergraben: Holz

¹ vgl. Der Große Musikvereinssaal; <https://www.musikverein.at/der-grosse-musikvereinssaal>; abgerufen am 12.03.2018.

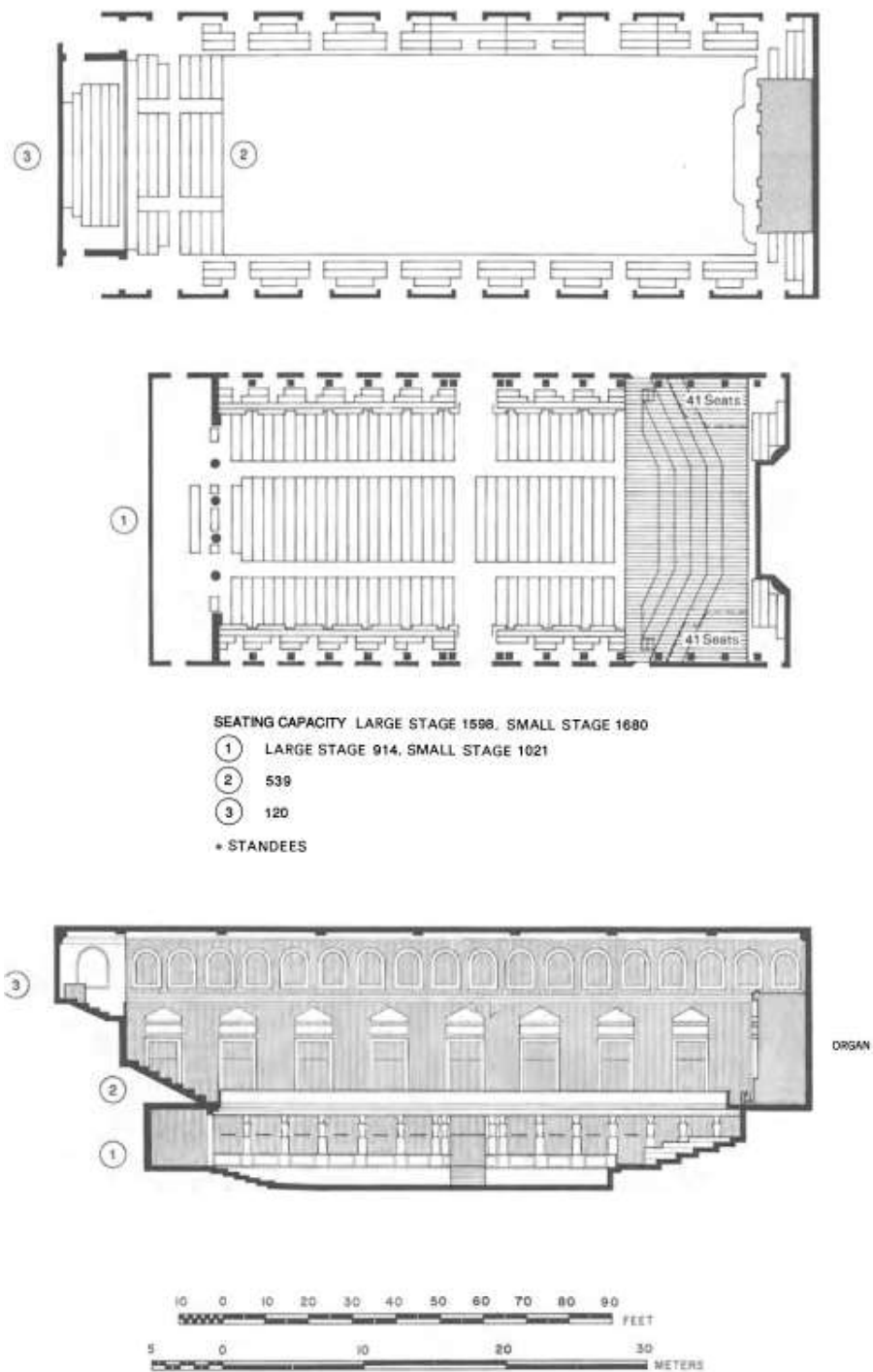
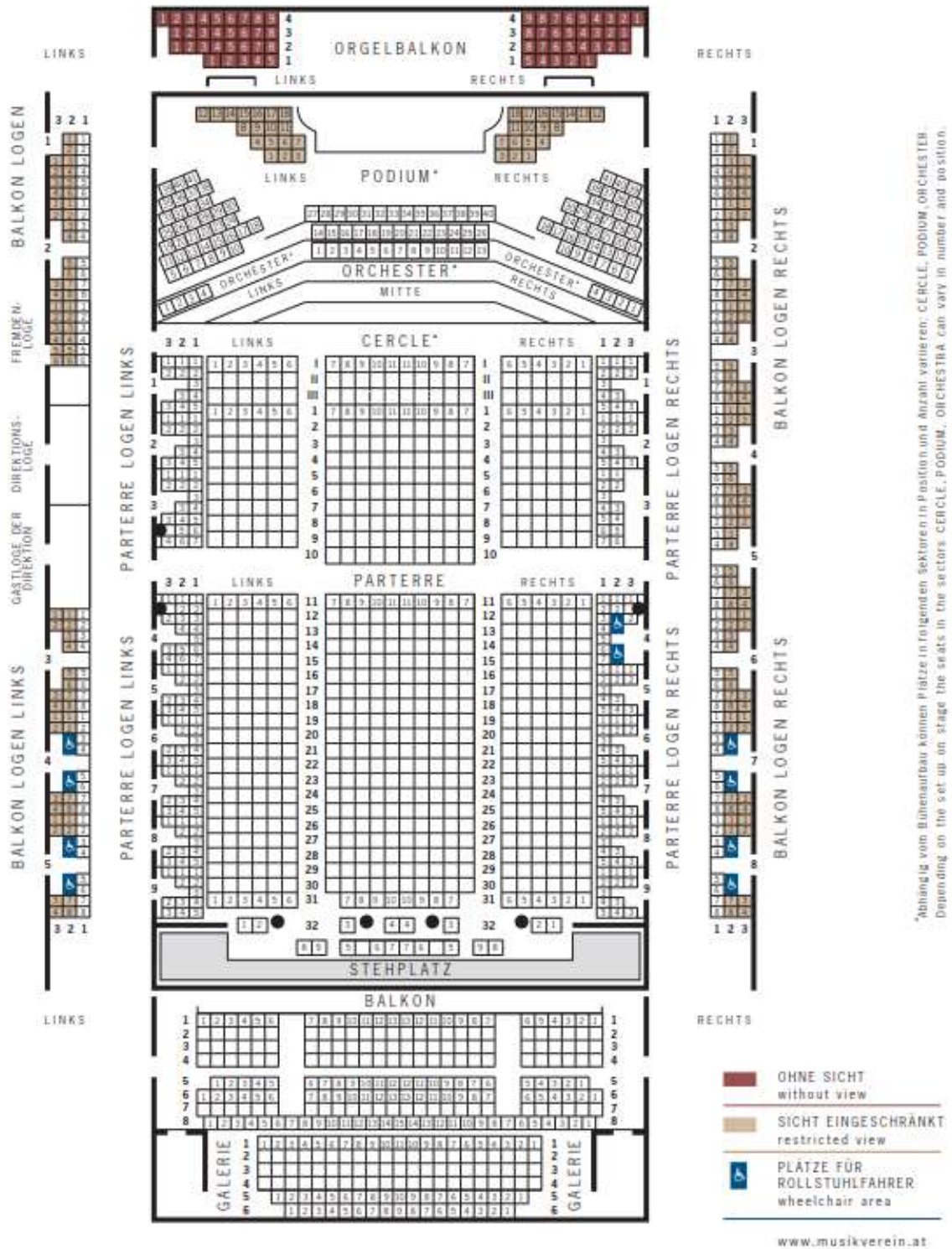


Abbildung 3.12: Grundrisse (1) Großer Saal (2) Kleiner Saal und Seitenansicht [Beranek 2004, S. 175]



*Abhängig vom Bühnenaufbau können Plätze in folgenden Sektoren in Position und Anzahl variieren: CERCLE, PODIUM, ORCHESTER. Depending on the set-up on stage the seats in the sectors CERCLE, PODIUM, ORCHESTER can vary in number and position.

Abbildung 3.13: Sitzplan Großer Saal



Abbildung 3.14: Balkonsicht Richtung Bühne und Orgel



Abbildung 3.15: Verzierungen der Balkone und Seitenwände

3.3.3 Wien: Konzerthaus

Beim Wiener Konzerthaus handelt es sich um einen Helmer & Feller-Bau, basierend auf Plänen des Architekten Ludwig Baumann.² Gemeinsam mit dem Musikvereinssaal und der Staatsoper ist das Konzerthaus für den guten Ruf der Musikszene in Wien mitverantwortlich. Im Konzerthaus befinden sich 4 Säle, wobei der Große Saal als der prominenteste gilt. Dieser wurde früher u.A. als zu hallig kritisiert. Zwischen 1997-2000 wurde im Zuge einer Sanierung auch eine akustische Sanierung vorgenommen, bei welcher die Nachhallzeiten vor allem im unteren Frequenzbereich reduziert wurden. Heute ist das Konzerthaus eine beliebte Spielstätte bei Publikum, DirigentInnen und MusikerInnen.

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1913, saniert 2000
Architektur	L. Baumann, H. Helmer, F. Fellner
Architektur Sanierung (1997-2000)	H. Puchhammer
Akustik Sanierung (1997-2000)	K. Müller (Müller BBM)
Anzahl der Sitzplätze	1 865 (1 116 Parterre)
Volumen	16 600 m ³
Nachhallzeit (vollbesetzt) vor Sanierung	125 Hz 2,7 s und 500 Hz 2 s
Nachhallzeit (vollbesetzt) nach Sanierung	125 Hz 2,3 s und 500 Hz 1,95 s

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Schilf-verstärkter Gipsputz auf Holzrahmen
- Seitenwände: Gipsputz auf Holz vor 8-cm-Luftspalt zu Betonwand
- Rückwände: Perforiert, Metall-Luftspalt-Ziegelmauer
- Boden: Parkett auf Sperrholz, tlws. Teppiche am Gang und Publikumsbereich
- Orchestergraben: Holz, teilweise veränderbar

² vgl. Wiener Konzerthaus Backstage; <https://konzerthaus.at/konzert/eventid/55573>; abgerufen am 01.04.2018.

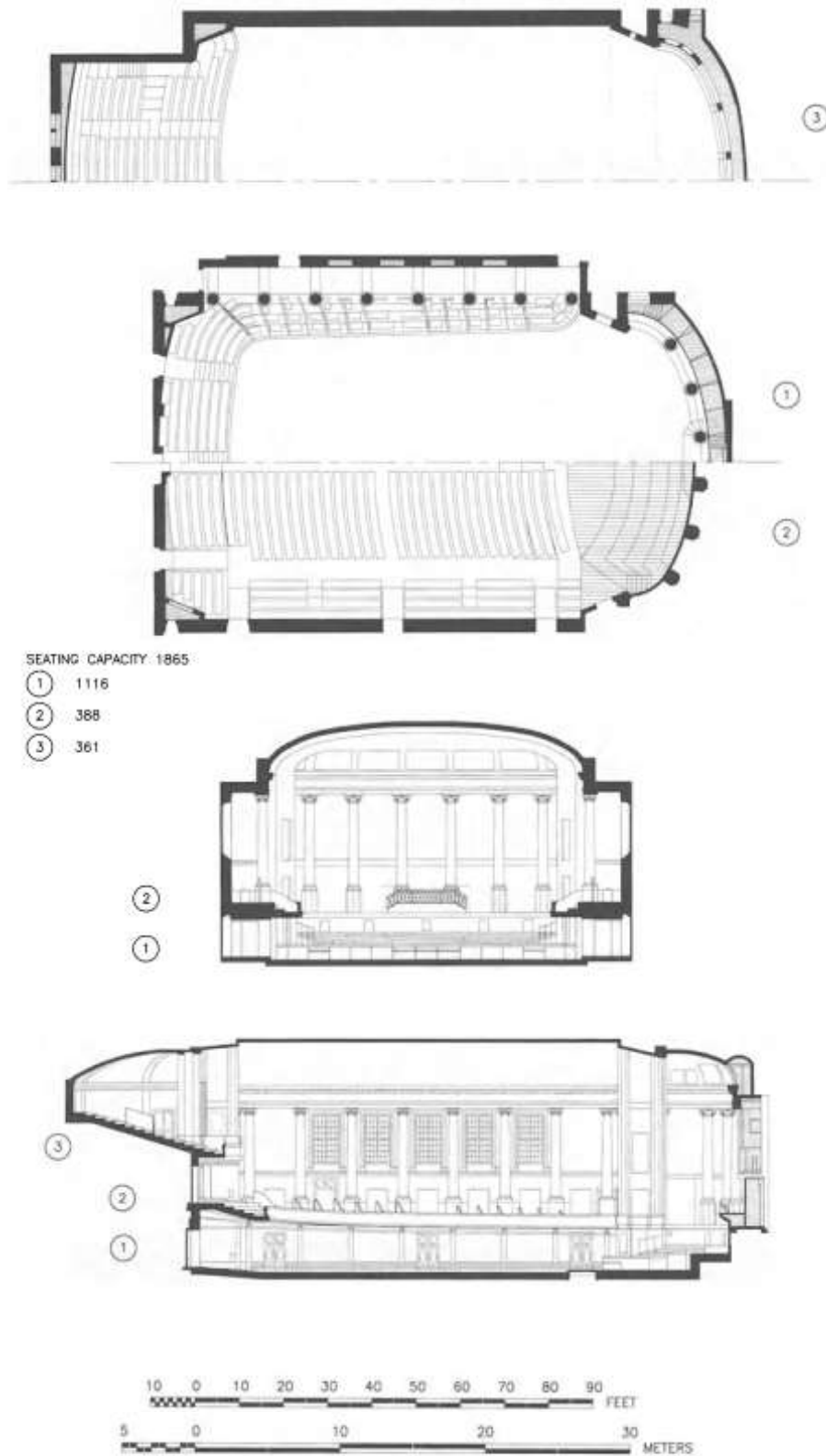


Abbildung 3.16: Grundriss, Frontalansicht und Seitenansicht Wiener Konzerthaus [Beranek 2004, S. 179]

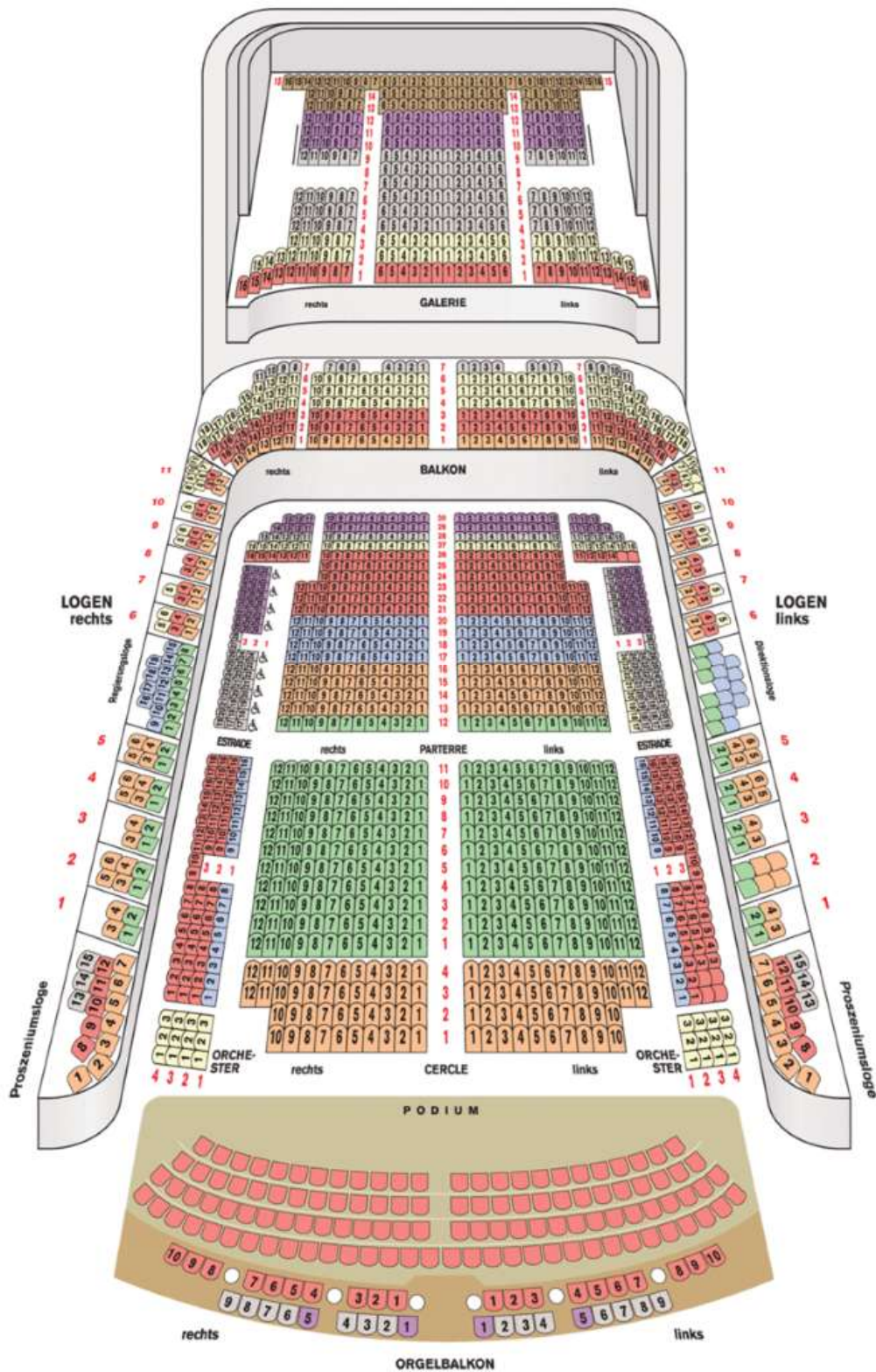


Abbildung 3.17: Sitzplan Wien Konzerthaus



Abbildung 3.18: Sicht Richtung Bühne vom hinteren Publikumsbereich



Abbildung 3.19: Gestaltung der Decken und Seitenwände

3.3.4 Wien: Staatsoper

Beranek bezeichnet die Staatsoper in Wien als eher *kleine* (im internationalen Vergleich), laute und lebendige Oper mit guter Sprachverständlichkeit. Die vernehmbare Klarheit und Direktheit in der Akustik ist vor allem auf die kurze ITDG zurückzuführen. Die Oper wurde während des Zweiten Weltkriegs zerstört und nach einem Wiederaufbau 1955 unter der Leitung von Erich Boltenstern neu eröffnet. Die Logenbrüstungen, welche aus Eisenbeton bestehen, wurden aus akustischen Gründen nachträglich mit Holz verkleidet. Das Opernhaus selbst sieht einen raumakustischen Vorzug in der einzigartigen Brillanz der Spielstätte [Online-Artikel ohne Verf. ohne Jahr].

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1869, Eröffnung nach Wiederaufbau 1955
Architektur	A.S. v. Siccardsburg und E. v.d. Nuell
Architektur Wiederaufbau (1955)	E. Boltenstern
Akustik Wiederaufbau (1955)	G. Schwaiger
Anzahl der Sitzplätze	1 709
Volumen	10 665 m ³
Nachhallzeit (vollbesetzt)	500 Hz 1,4 s

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Putz
- Wände: Fresken, Damasten teils auf Holz, teils geschützt durch Plexiglas
- Boden: PVC auf Beton (Balkon, Galerie), Holz
- Orchestergraben: Holz

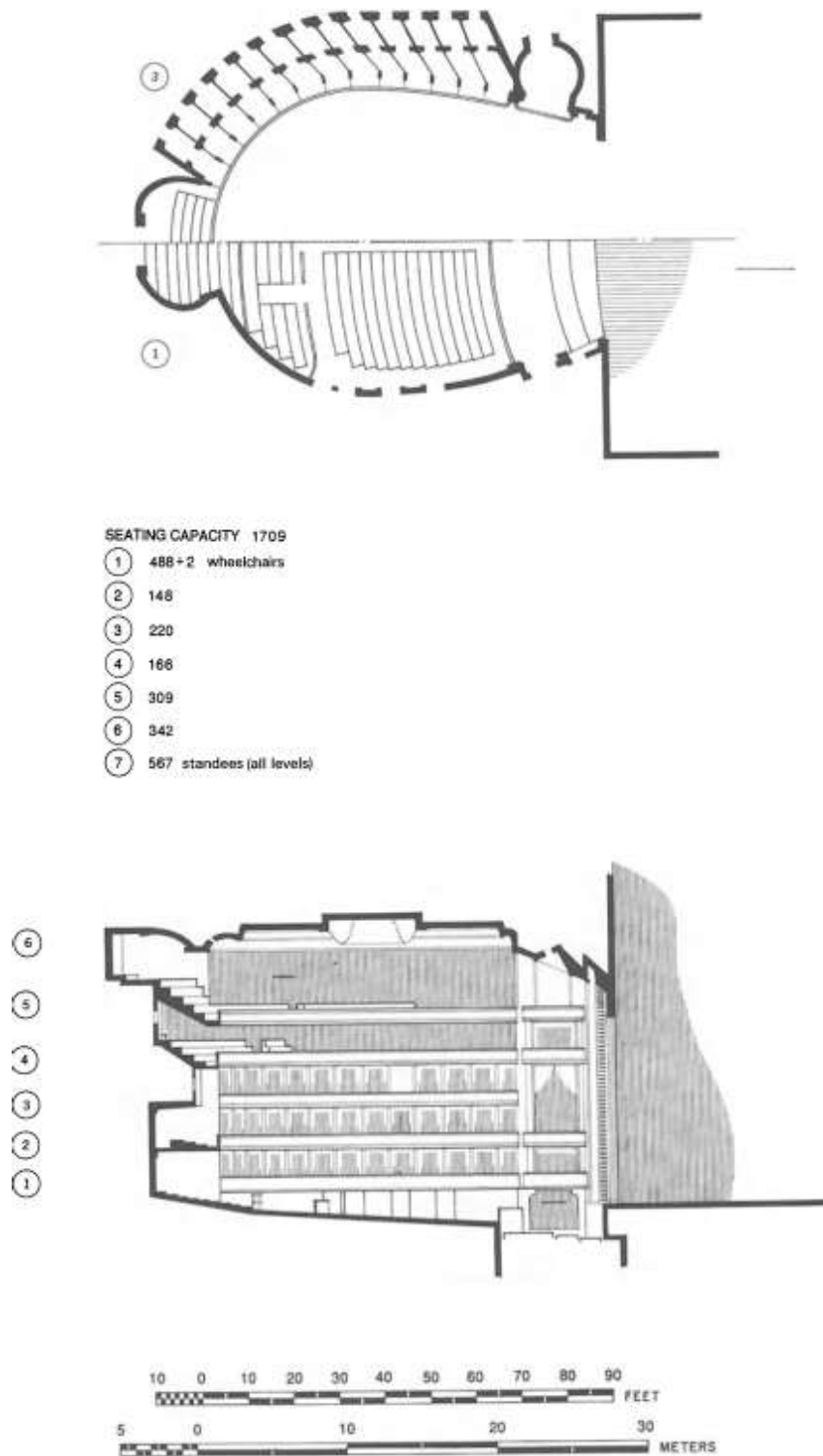


Abbildung 3.20: Grundriss und Seitenansicht Wiener Staatsoper [Beranek 2004, S. 183]



Abbildung 3.22: Sicht Richtung Publikumsbereich vom hinteren Bühnenbereich



Abbildung 3.23: Gesamtansicht von Balkon

3.4 Auswahl an Konzerthäusern weltweit

Die nachfolgende Auswahl an Konzerthäusern basiert, sofern nicht anders angegeben, auf Informationen nach dem Werk von Beranek [Beranek 2004].

3.4.1 Berlin, Deutschland: Philharmonie

"Der Saal ist wie ein Tal gedacht, auf dessen Sohle sich das Orchester befindet, umringt von aufsteigenden Weinbergen", schreibt Architekt Hans Scharoun im Programmheft zur Eröffnung 1963 und spricht hierbei die damals neuartige und einzigartige Konzeption der Spielstätte an [Tietz 2007, S. 18]. Die untypische Bauform der Philharmonie Berlin zeichnet sich durch die mittige Platzierung der Bühne aus, welche somit von den ZuhörerInnen umgeben ist. Dies ermöglicht einen geringen Maximalabstand zwischen Publikum und MusikerInnen von maximal 30 Meter. Das Konzept wird auch als *music in the center* bzw. Weinberg-Design bezeichnet.

Der Saal ist asymmetrisch und basiert auf der versetzten Anordnung von drei übereinanderliegenden Fünfecken. Auch akustisch stellte diese Gestaltung eine untypische Aufgabenstellung dar. Es besteht die Möglichkeit die Akustik im unteren Frequenzbereich zu variieren. Dazu sind 136 adjustierbare, pyramidenförmige, tieffrequent abgestimmte Resonatoren gepaart mit Diffusoren auf der Decke angebracht. Die eher untypische Außengestaltung der Spielstätte rührt daher, dass im Planungsprozess vor allem die akustischen Anforderungen bedient wurden, und sich die Außenform somit aus diesen ergibt. Im Rahmen der Architektur der Philharmonie wurde eng mit Akustikexperten wie Lothar Cremer zusammengearbeitet. Der akustische Planungsprozess umfasste unter anderem ein maßstabgetreues Minitaurabbild der Philharmonie inkl. der Erstellung eines Echogramms mittels Knallimpuls zur Einschätzung des Aufkommens von Flat-terechos [Cremer 1965].

Der Klang des Saales wird als ausbalanciert, lebendig und klar beschrieben. Allerdings gibt es, bedingt durch die ausgeprägte Richtcharakteristik von Blechbläsern, einige weniger ausgewogene Plätze. Zudem reflektiert ein großer Anteil des Klaviers in hohen Registern überwiegend in gerader Richtung hin zum größeren Publikumsbereich.

Die Berliner Philharmonie ist technisch so ausgestattet, dass Konzerte in 4K/HDR-Video und Hi-Resolution-Audio (seit 2017/18) aufgezeichnet bzw. übertragen werden können. Das Konzept wird *Digital Concert Hall* (DCH) genannt und wurde 2008 eingerichtet, um Inhalte als Stream bereitzustellen und zu archivieren [Online-Artikel ohne Verf. 2018, Goert 2008].

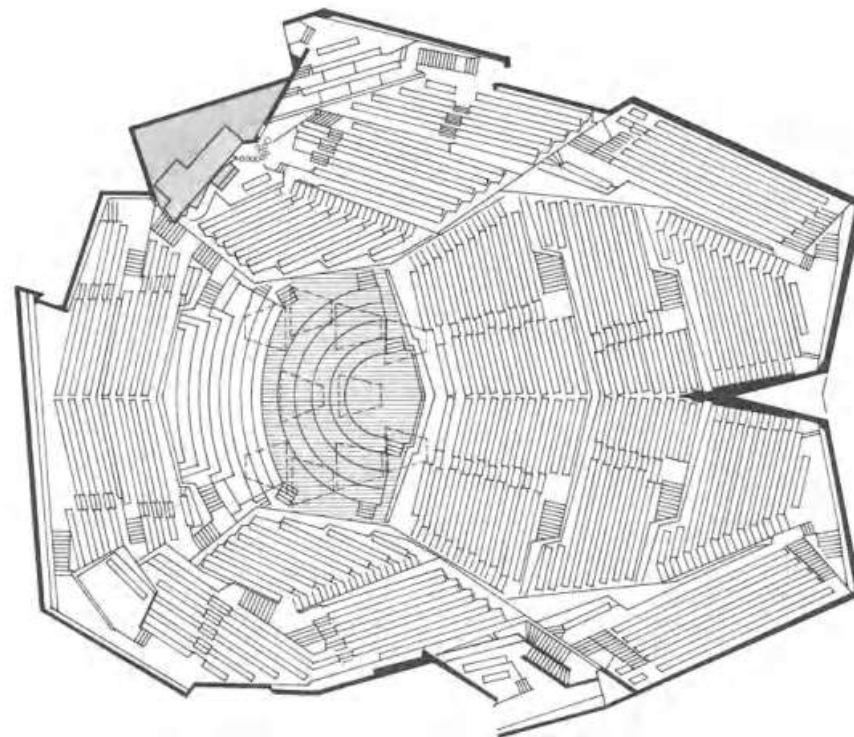
Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1963
Architektur	H. Scharoun
Akustik	L. Cremer, J. Nutsch
Anzahl der Sitzplätze	2 218
Volumen	21 000 m ³
Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen	1,9 s (vollbesetzt)

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Kalkstein-Putz, teils auf Metallkonstruktion abgehängt. Oben beschriebene Elemente zur Variation der Raumakustik
- Seitenwände: Dünne Holzpaneele vor Luftspalt, Brüstungen aus Jura-Kalksteinputz
- Bühnen-Seitenwände: Reflektoren in Richtung MusikerInnen
- Rückwände: Konvexe Holzpaneele

- Bühnenboden: Holzboden mit Luftspalt
- Boden: Eichenparkett auf Asphaltplatten



SEATING CAPACITY 2218 + 120 chorus

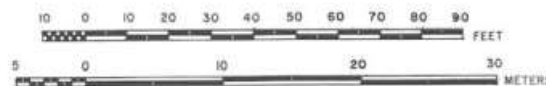
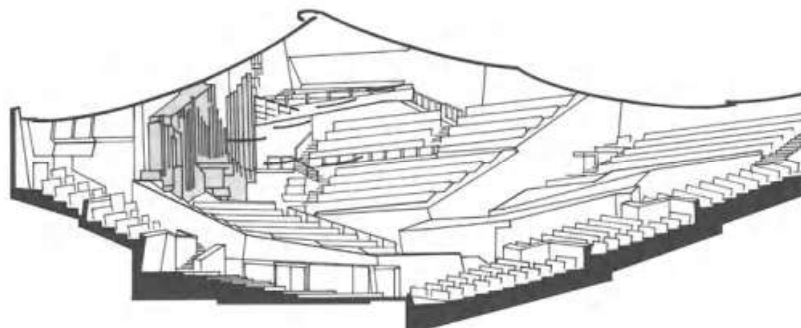


Abbildung 3.24: Grundriss und Seitenansicht Berlin Philharmonie [Beranek 2004, S. 299]

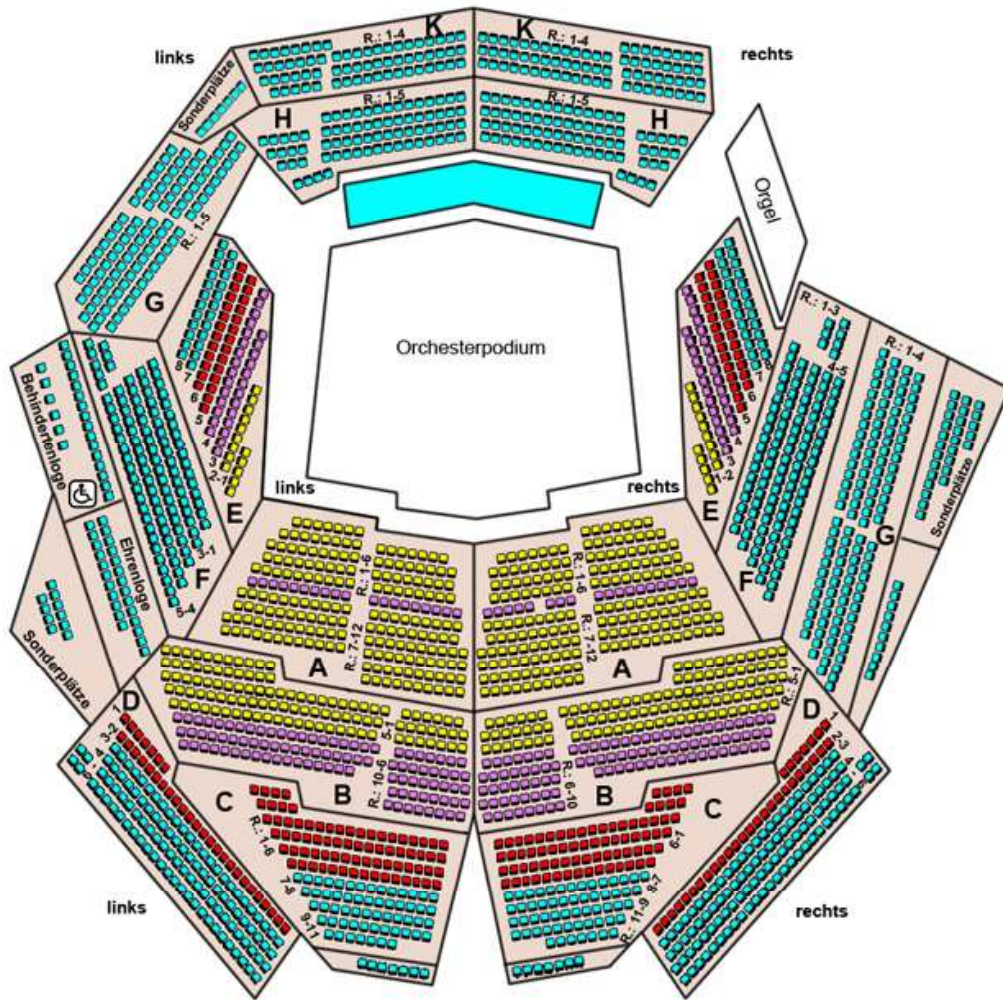


Abbildung 3.25: Saalplan Philharmonie Berlin



Abbildung 3.26: Sicht auf Bühne aus vorderer Reihe des Publikumsbereichs



Abbildung 3.27: Sicht aus hinterer Reihe des Publikumsbereichs

3.4.2 Bayreuth, Deutschland: Richard-Wagner-Festspielhaus

Das Festspielhaus Bayreuth ist nach Komponist Richard Wagners einzigartigen Vorstellungen von Klang und Architektur eines Opernhaus erstellt und benannt worden. Wagners Wünsche wurde 1876 Realität und ließen eines der unkonventionellsten Opernhäuser entstehen. Die sehr spezielle Akustik wird kontrovers diskutiert [Barron 1993, S. 352-354]. Der Publikumsbereich eröffnet sich nach oben hin fächerartig und erinnert optisch an ein altgriechisches Amphitheater. Die Seitenwände selbst sind parallel ausgeführt und die Raumhöhe ist überdurchschnittlich hoch gehalten. Das Orchester ist für die ZuhörerInnen nicht sichtbar in einem Orchestergraben (laut Richard Wagner: *Mystischer Abgrund*) unter der Bühne positioniert und soll durch die Unsichtbarkeit sowie durch atypisches Timbre die Bühnenillusion im Auditorium verstärken und das Erlebnis mystifizieren. Nur aus einzelnen Schlitzern kann der Klang direkt und gezielt nach außen dringen, wodurch Stimmen und Drama im Vordergrund stehen, während der Orchesterklang eher nachrangig ist. DirigentInnen erkennen einen Vorteil in der guten Hörbarkeit am Podium sowie an der Tatsache, dass das Orchester hohe Dynamikbereiche bespielen kann ohne Gefahr zu laufen, die VokalistInnen zu übertönen. Zusätzlich wurde über die Jahre mit unterschiedlichen Öffnungszuständen bzw. Perforierungen am Schalldeckel experimentiert, welcher das Orchester verbirgt.

Heute wird die Spielstätte primär für Aufführungen von Wagners Opern verwendet.

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1876
Architektur	Brueckwald, O.
Anzahl der Sitzplätze	1 800
Volumen	10 308 m ³
Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen	1,55 s

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Gips auf Schilf, Holz und Holzdekorationen
- Seiten- und Rückwände: Gips auf Ziegel oder Holzlatten, Säulen und Kapitelle sind aus Hartholz.
- Bühnenrückwand: Wellasbestplatten

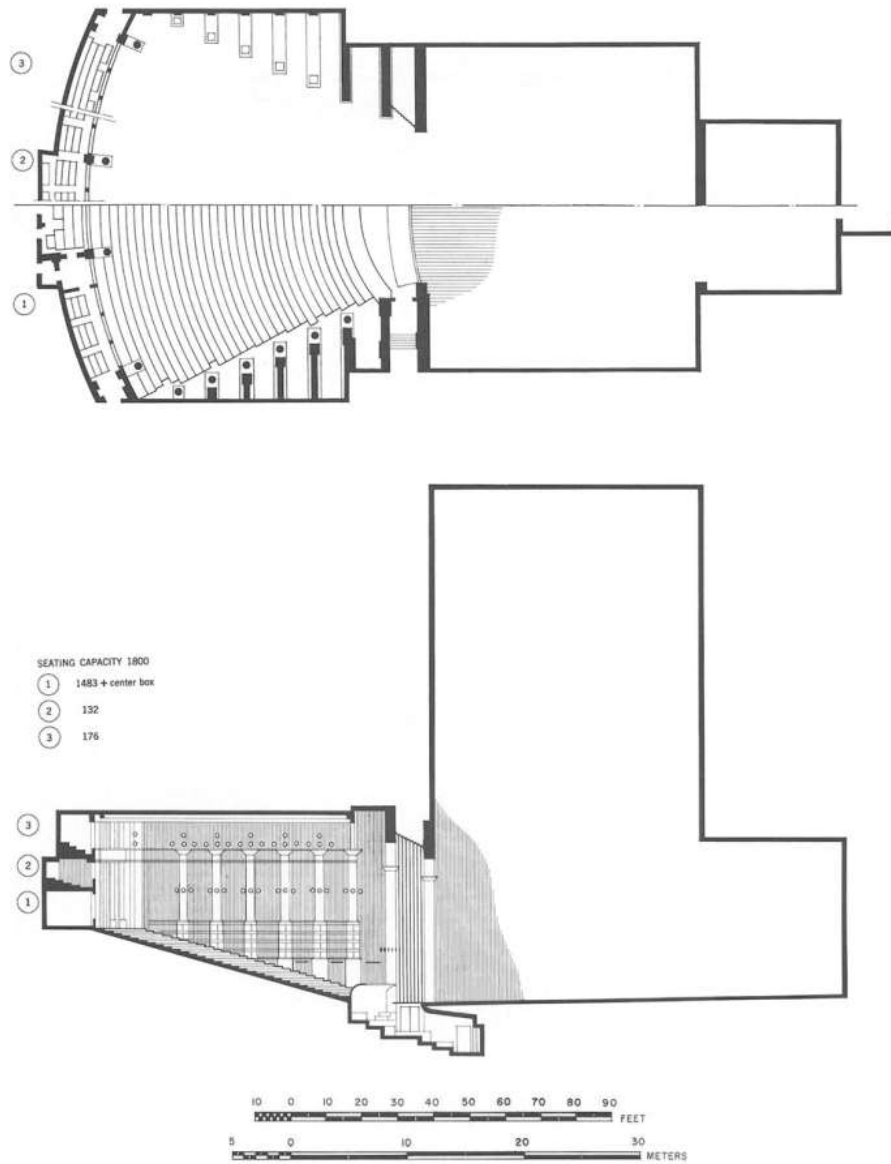


Abbildung 3.28: Grundriss und Seitenansicht Richard-Wagner-Festspielhaus [Beranek 2004, S. 284]

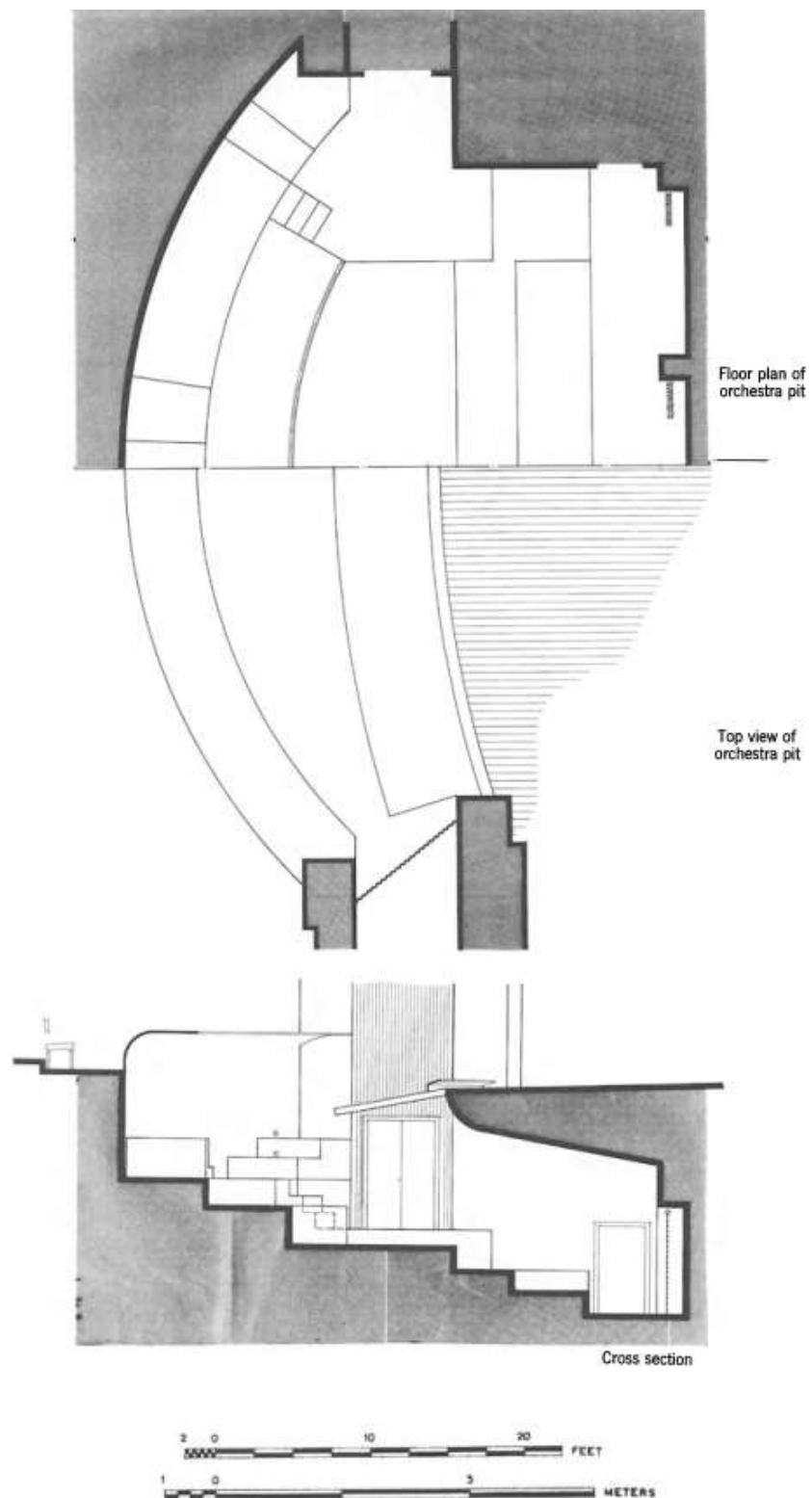


Abbildung 3.29: Orchestergraben Richard-Wagner-Festspielhaus [Beranek 2004, S. 285]

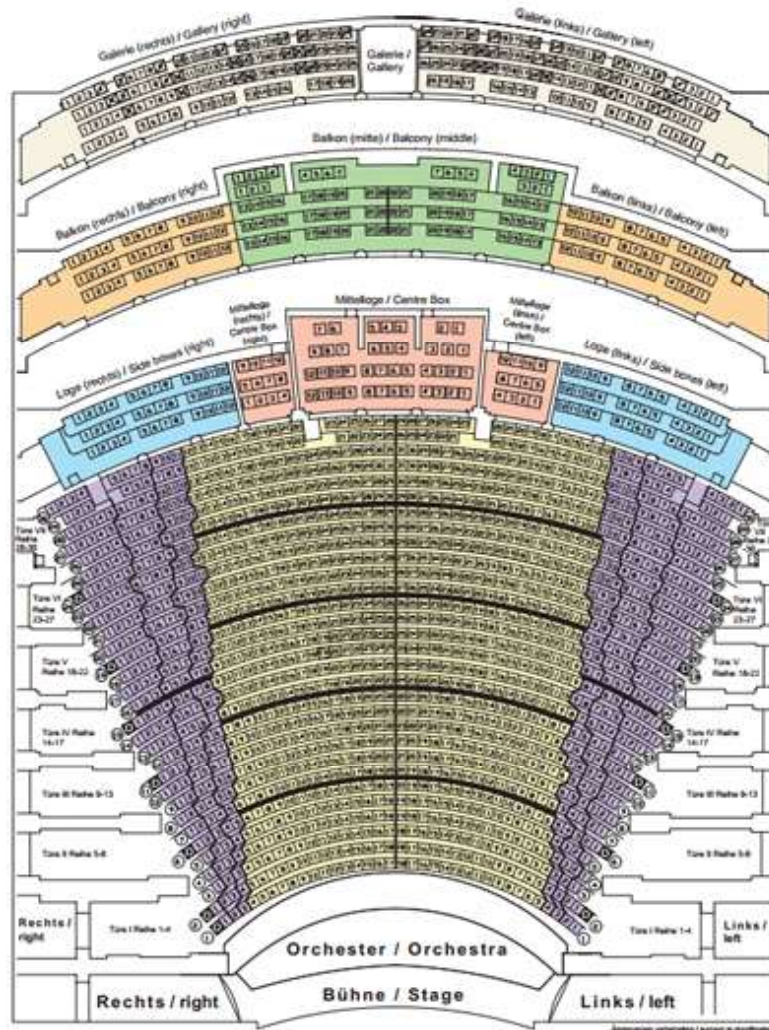


Abbildung 3.30: Saalplan Festspielhaus Bayreuth

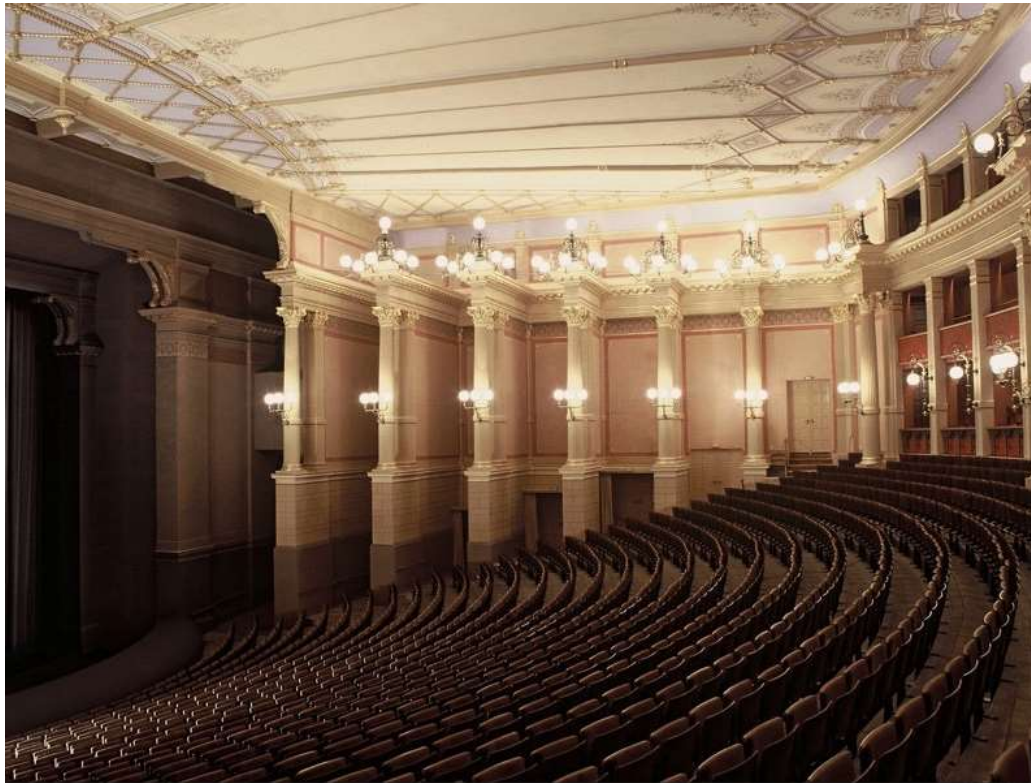


Abbildung 3.31: Seitenwand, Decke und Publikumsbereich



Abbildung 3.32: Orchestergraben "Mystischer Abgrund"

3.4.3 Boston, USA: Boston Symphony Hall

In seinem Werk bezieht sich Beranek an einigen Stellen immer wieder auf die Akustik der Boston Symphony Hall [Beranek 2004]. Auch wichtige Dirigierpersönlichkeiten wie von Karajan, Berstein oder De Preist sehen in diesem Konzertsaal einen der besten der Welt - oder zumindest den hervorstechendsten in den USA. Schuhkartonform, Optik und Akustik erinnern an den rund 1000 Plätze weniger umfassenden Großen Musikvereinsaal in Wien. Der Klang wird generell als klar, lebendig und brillant beschrieben. Vor allem aber zeichnet sich der Saal durch eine hohe Lautstärke aus. Durch die Höhe entfaltet sich der Klang weitläufig in allen Richtungen und es wird ZuhörerInnen zufolge ein starkes Gefühl des Eingehülltseins von Klang erwirkt.

Beranek beschreibt die Grundkomponenten der Akustik dieser Spielstätte wie folgt: Schuhkartonform nach Vorbild des Leipziger Gewandhauses, Deckenhöhe nach Sabines Formel für die Nachhallzeit, Vermeiden großflächiger Holzeinrichtungen zum Erhalt der Energie bei Bassfrequenzen sowie weitläufige Diffusion durch Nischen, Statuen und Deckenverzierungen bzw. -kassen.

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1963
Architektur	Architekturbüro McKim, Mead, and White
Akustik	Sabine, W. C., Renovierung durch Acentech 2006
Anzahl der Sitzplätze	2 218
Volumen	8 750 m ³
Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen	1,85 s (vollbesetzt)

Materialien und Konstruktion:

- Decke: 1,9 cm Gipsdecke auf Metallgitter
- Wände: 30 % Gips auf Metallgerüst, 50 % allg. Mauerwerk, 20 % 1,25-2,5-cm dickes Holz (inkl. Bühnenwände, Balkonfronten, teils auf Gusseisenmustern)
- Bühnenboden: Überwiegend Holz auf hohem Luftspalt
- Boden: Überwiegend Holz, teils dünne Teppiche in den Gängen

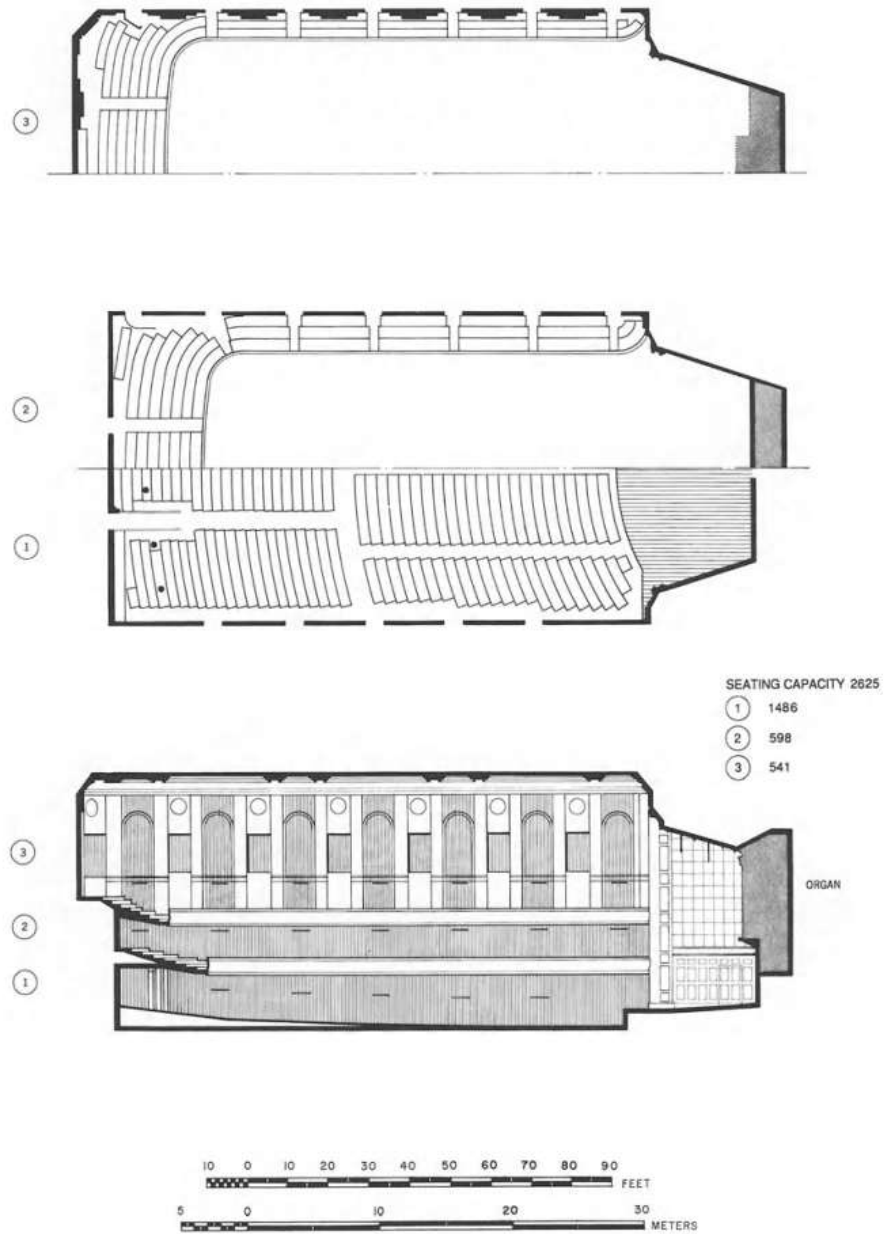


Abbildung 3.33: Grundriss und Seitenansicht Boston Symphony Hall [Beranek 2004, S. 49]

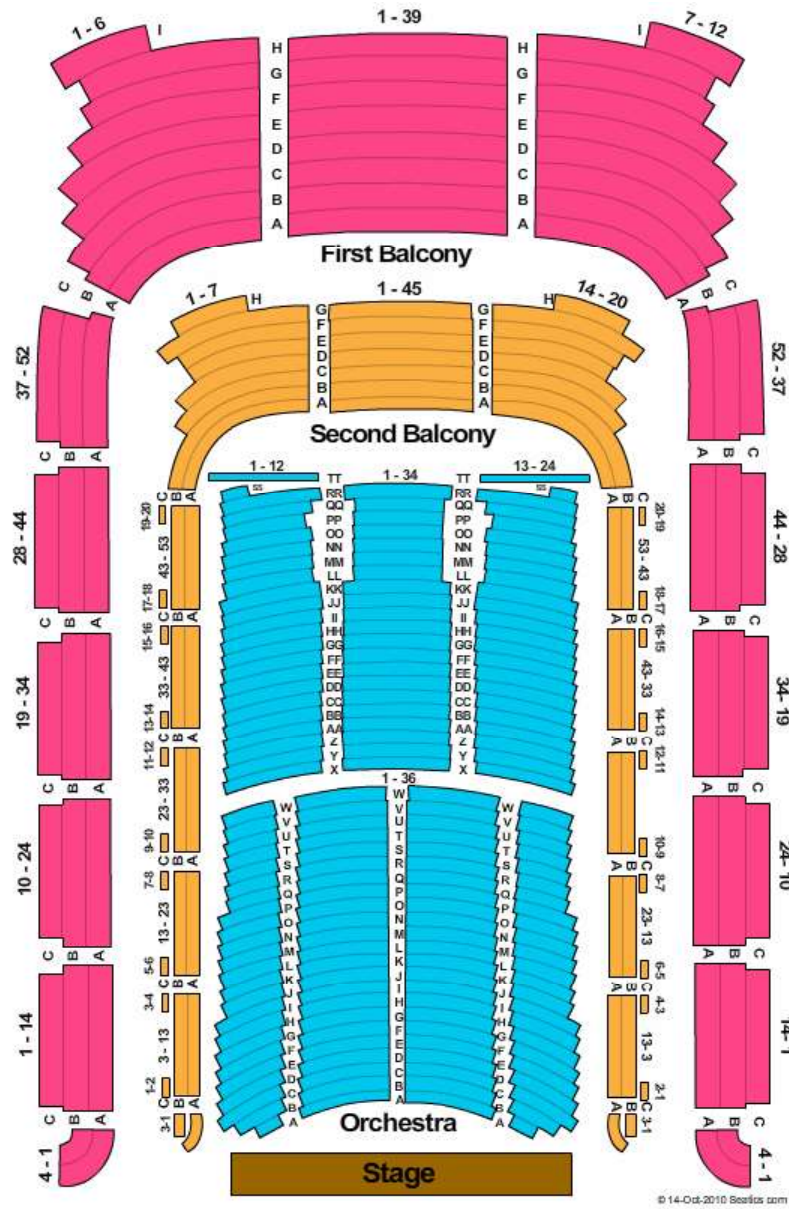


Abbildung 3.34: Saalplan Boston Symphony Hall



Abbildung 3.35: Sicht auf Bühne aus mittlerem Publikumsbereich

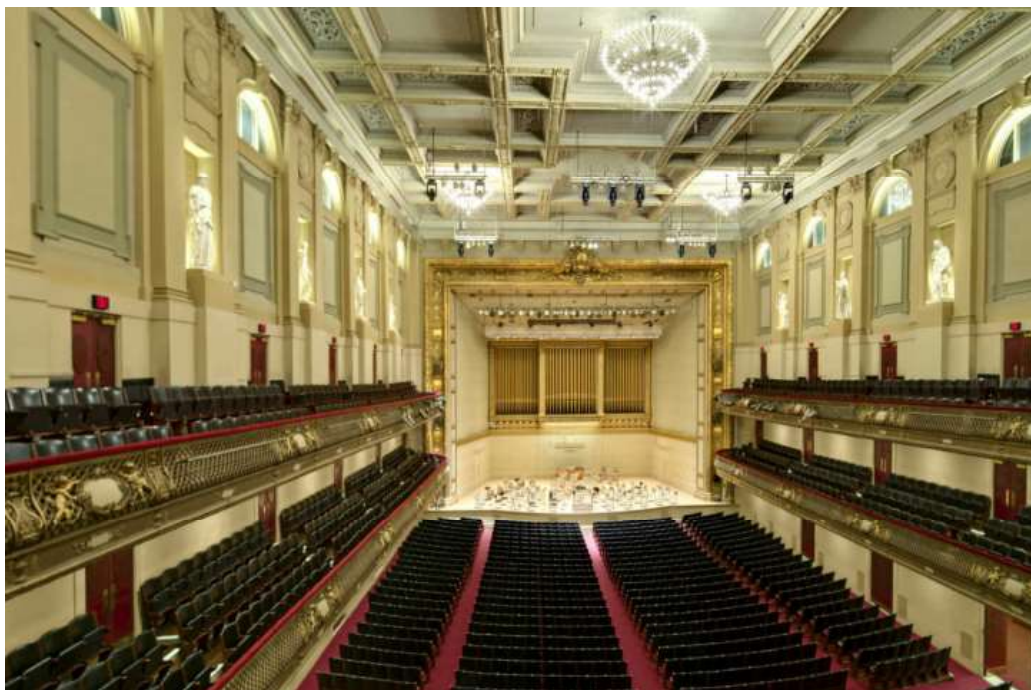


Abbildung 3.36: Sicht Richtung Bühne aus hinterem Balkonbereich

3.4.4 Luzern, Schweiz: Kultur- und Kongresszentrum

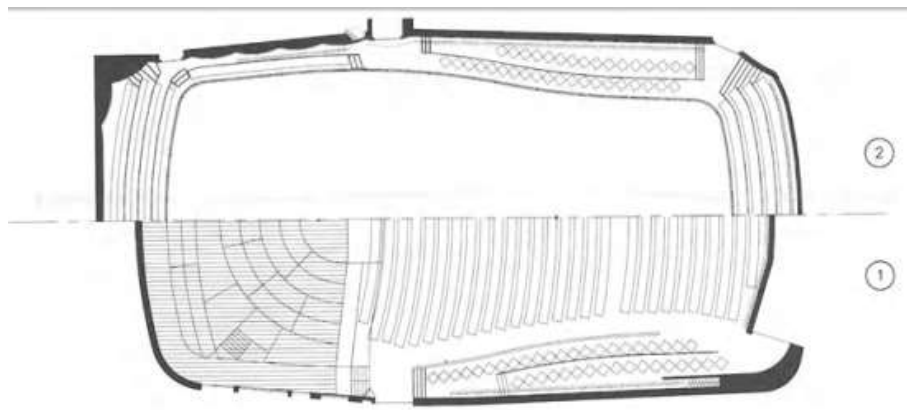
Der Konzertsaal im Luzerner Kultur- und Kongresszentrum genießt den Ruf, eine der besten, neueren Konzertsäle zu sein. Ähnlich dem Großen Musikvereinssaal in Wien ist der Saal schu-kartonförmig, allerdings umgeben von einer rund 6 200 m³ Hallkammer, welche etwa die Hälfte des Saales umgibt. Diese angekoppelte Räumlichkeit ist über 50 Türen (rund 2,4 m Breite, bei einer Höhe von 3 m bis 6 m) mit dem Hauptsaal verbunden, wodurch eine Regulierung der Nachhallzeit möglich wird (vgl. Abb. 3.38). Die Türen bestehen aus Beton und konvex geformten Diffusorpanelen. Die hängende akustische Überdachung wirkt als imposantes Markenzeichen des Saales und kann in der Höhe variiert werden. Die Einrichtung zur Variation der Raumakustik ermöglicht maximal 1 650 m² zusätzlich akustisch wirksame Flächen einzusetzen.

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1999
Architektur	AJN Architectures Jean Nouvel
Akustik	ARTEC Consultants, Inc.
Anzahl der Sitzplätze	1 898
Volumen	17 823 m ³
Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen	1,85 s (vollbesetzt)

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Beton
- Überdachung: Schallreflektierende Oberflächen aus Holz, wabenförmige Befestigung auf Unterbau aus Sperrholz
- Seitenwände: Beton mit Diffusorpanelen aus Gips
- Bühnenboden: Nut-und-Federbretter aus Kiefernholz
- Boden: Nut-und-Federbretter aus Kiefernholz verklebt mit Betonboden



SEATING CAPACITY 1892

- ① 778
- ② 352
- ③ 214
- ④ 234
- ⑤ 314

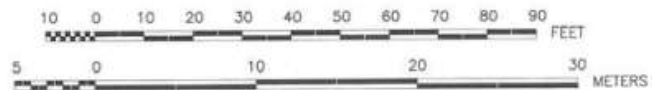
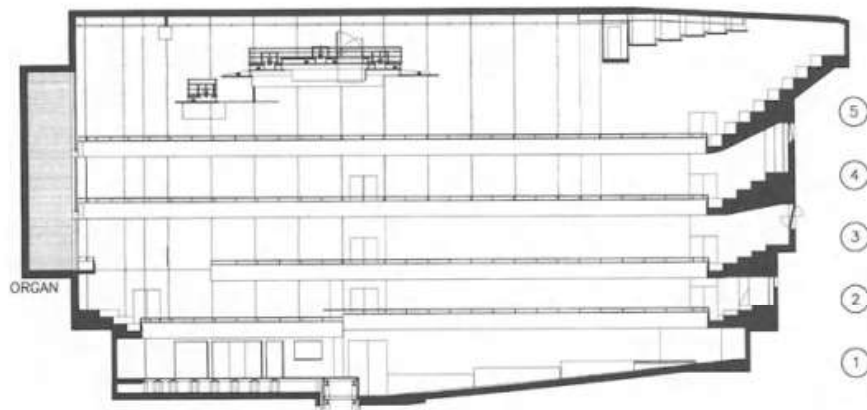


Abbildung 3.37: Grundriss und Seitenansicht, Kultur- und Kongresszentrum Luzern [Beranek 2004, S. 466]

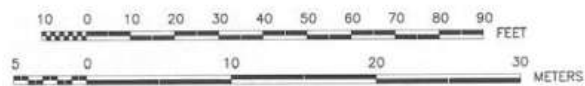
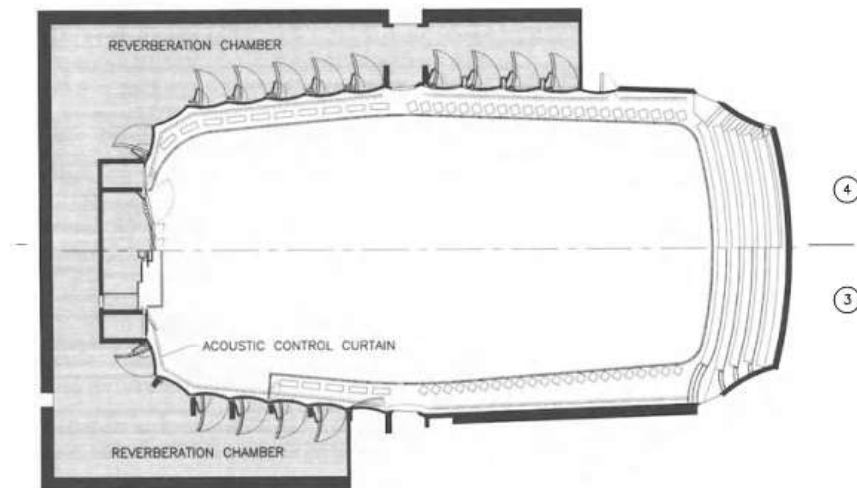
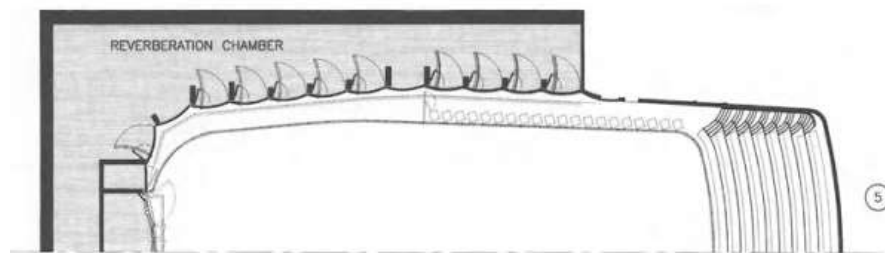


Abbildung 3.38: Grundriss mit Nachhallkammern, Kultur- und Kongresszentrum Luzern [Beranek 2004, S. 467]

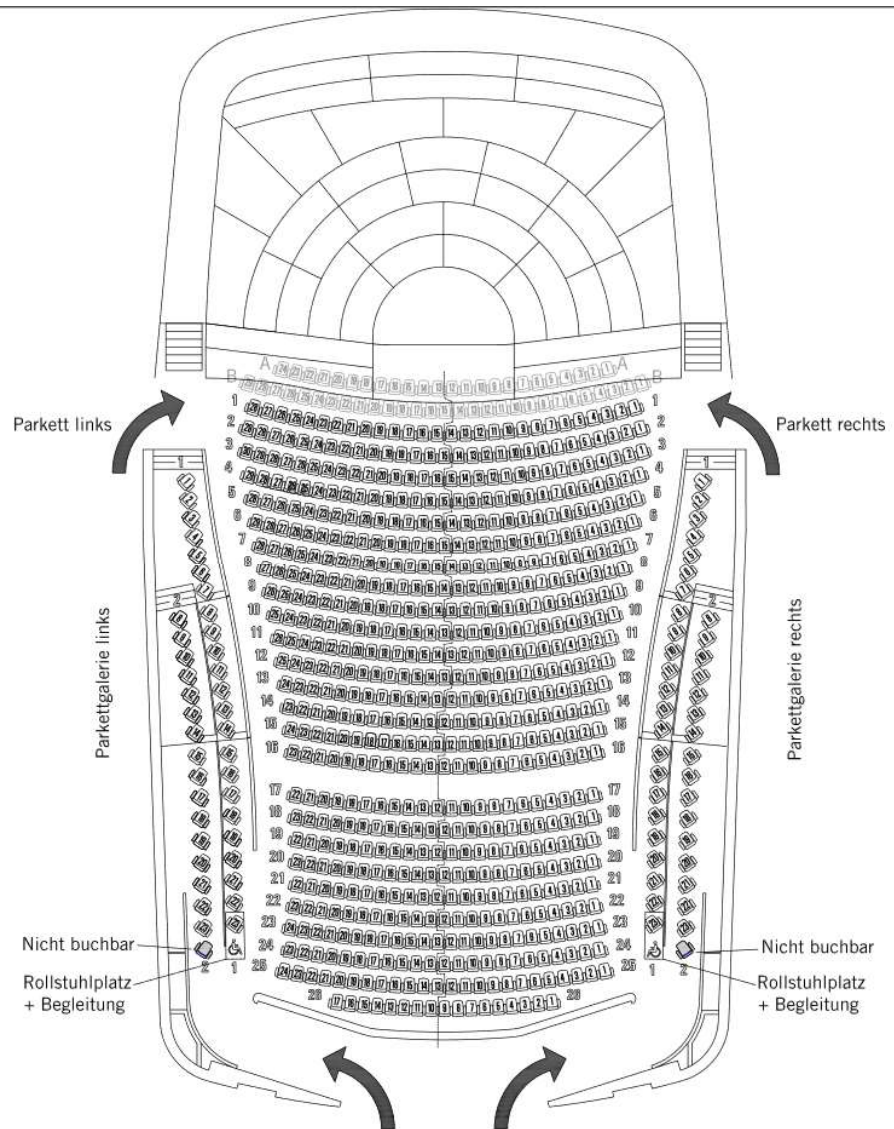


Abbildung 3.39: Saalplan Konzertsaal Luzern



Abbildung 3.40: Sicht von Bühne Richtung Publikumsbereich



Abbildung 3.41: Sicht aus seitlichem Publikumsbereich

3.4.5 Sydney, Australien: Concert Hall of the Sydney Opera House

Das Sydney Opera House stellt eines der wichtigsten Bauwerke der Architektur des 20. Jahrhunderts dar und ist gleichzeitig ein prominentes Wahrzeichen von Australien bzw. der Stadt Sydney. Der Konzertsaal bzw. die *Concert Hall* ist die sitzplatzmäßig größte Räumlichkeit von insgesamt fünf Theatern im Opernhaus. Die Decke ist 25 m hoch und stellt durch die spezielle Formgebung auch zwei Drittel der Seitenwände dar. Die Konstruktion ist überwiegend mit Birkenperrholz vertäfelt, die unteren Wandabschnitte und die Bühne sind mit Paneelen aus dunklem Hartholz ausgestattet. Die genannten Vorrichtungen dienen vorwiegend der Steuerung früher Reflexionen. Um deren Anteil für Publikum und Orchester weiter zu erhöhen, befinden sich an der Decke hängend weitere Birkenperrholzpaneele sowie 21 höhenverstellbare Ringe aus Acryl (*acoustic clouds*). Der Publikumsbereich selbst ist verglichen mit üblichen Konzertsaaldesigns stark geneigt (vgl. Abb. 3.42).

Wenn auch Beranek die Akustik der Spielstätte schätzt, so wird bereits seit einigen Jahren mit Reflektorprototypen und Ähnlichem experimentiert, da die akustischen Bedingungen bei einigen Personen weniger beliebt sind [Claringbold und Taylor 2010, S. 6ff]. Insbesondere MusikerInnen beklagen oft schlechte akustische Verhältnisse auf der Bühne. Im Rahmen der bereits laufenden Sanierungsmaßnahmen des gesamten Hauses ist für 2019 auch die akustische Erneuerung des Konzertsaals und des Opernsaals durch ein deutsches Unternehmen geplant [Online-Artikel ohne Verf. 2017].

Eckdaten:

Eröffnungsdatum	1973
Architektur	Utzon, J. und Hall P.
Akustik	Jordan, V. L. und Jordan, N. V.
Anzahl der Sitzplätze	2 696
Volumen	24 600 m ³
Nachhallzeit bei Mittenfrequenzen	2,0 s (vollbesetzt)

Materialien und Konstruktion:

- Decke: Birkenperrholz inkl. 66 % Seitenwände, Akus. Reflektoren
- Seitenwände: Paneele aus geschichtetem Hartholz
- Boden, Bühnenboden: Holz

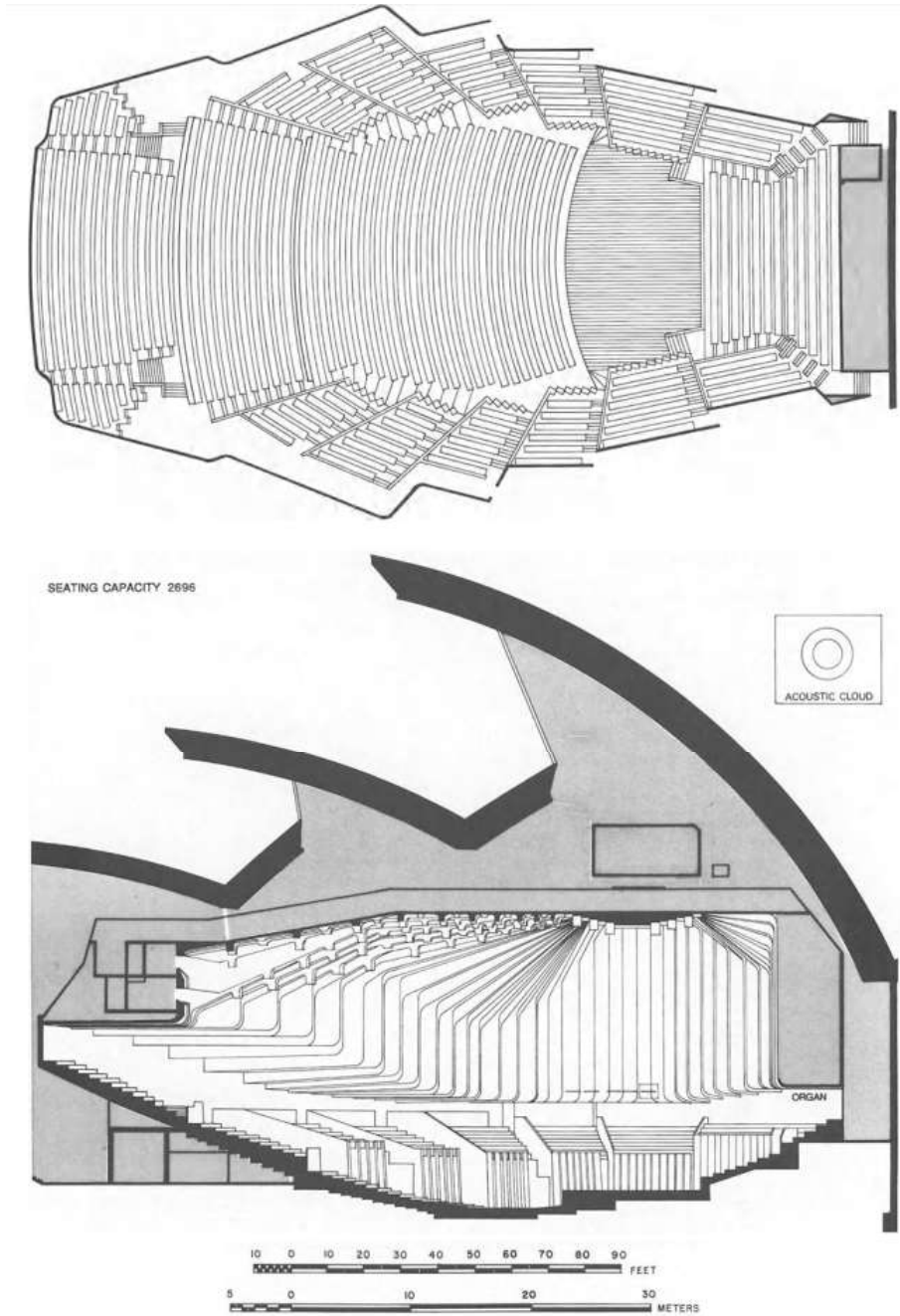


Abbildung 3.42: Grundriss und Seitenansicht, Konzertsaal des Sydney Opera House[Beranek 2004, S. 167]

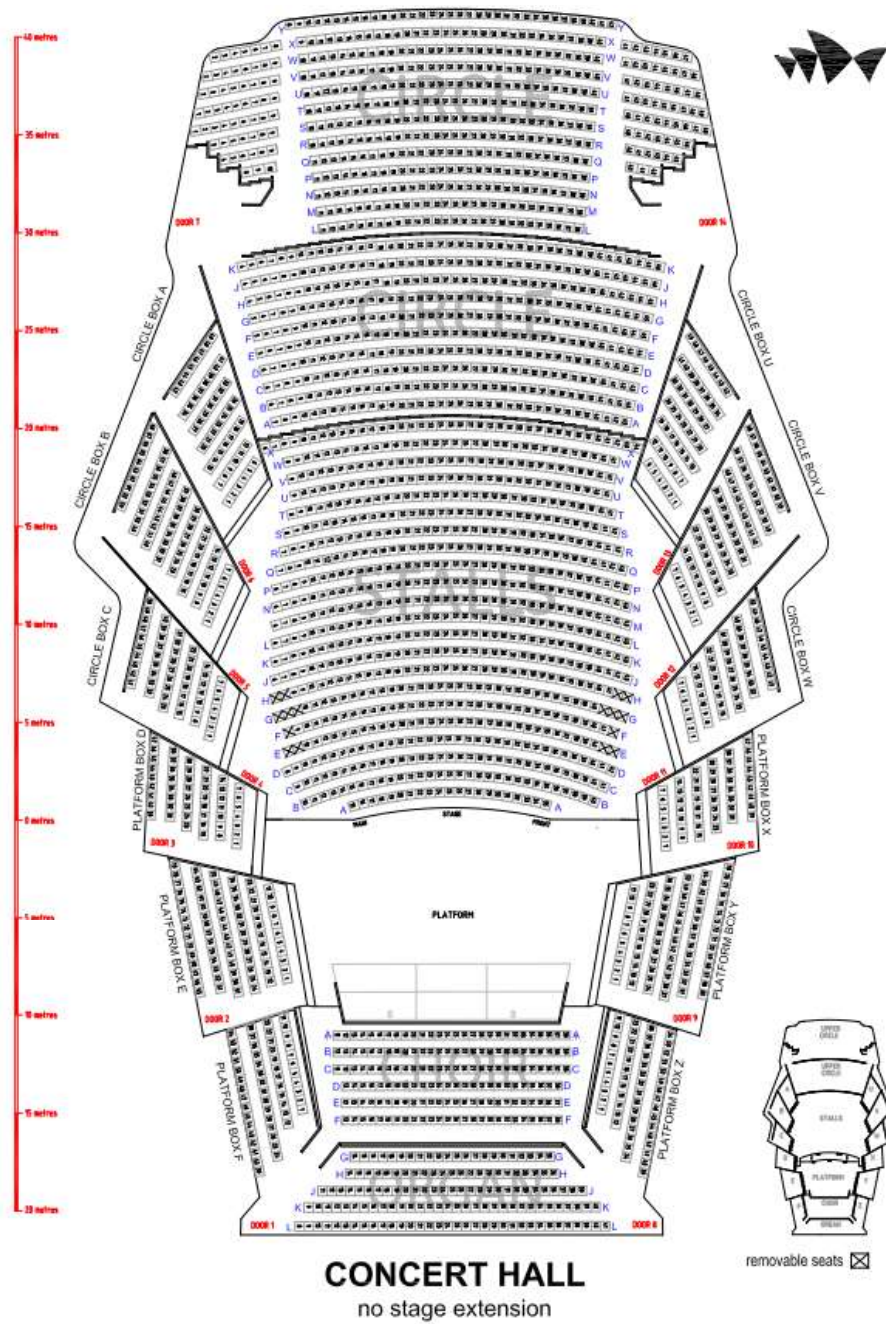


Abbildung 3.43: Saalplan des Sydney Opera House



Abbildung 3.44: Sicht vom hinteren Publikumsbereich in Richtung Bühne inkl. 'acoustic clouds'



Abbildung 3.45: Sicht vom hinteren Publikumsbereich in Richtung Bühne inkl. Beschallungsanlage

4 Verarbeitung von Raumimpulsantworten

Die Raumimpulsantwort ist eine wichtige Messgröße die es erlaubt, eine Vielzahl an raumakustischen Parametern aus einer einzelnen Messung heraus zu extrahieren. Das nachfolgende Kapitel zeigt ein Tool, welches zur Ermittlung solcher Parameter entwickelt wurde. Zudem werden mögliche Störeinflüsse aufgezeigt und Ansätze zur Kompensation dieser erläutert. Wie man Impulsantworten auswerten kann und welche Bedeutung die erhaltenen Größen haben, wird auf Basis von drei Beispiel-Impulsantworten abgehandelt.

4.1 Berechnungen mittels Impulsantwort

Dieser Abschnitt der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Auswertung von Raumimpulsantworten mittels der Mathematiksoftware Mathworks MATLAB. Hierbei wurde ein Tool inkl. grafischer Benutzeroberfläche (GUI) erstellt, welches die Berechnungen und Darstellungen typischer Parameter der Raumakustik aus Impulsantworten ermöglicht. Implementiert wurden:

- Berechnung der Nachhallzeiten T_{20} , T_{25} , T_{30} , T_{40} in Oktav- und Terzbändern
- Truncationalgorithmus zur Verringerung der Auswirkung von Störgeräuschen bei der Berechnung der Nachhallzeit entsprechend [Lundeby et al. 1995]
- Gütemaße und Bühnenmessgrößen implementiert nach ISO 3382-1 [ISO 3382-1 engl. 2009] sowie die in der Abb. 4.1 unter *Measures* ersichtlichen Größen

Die entsprechenden Programmcodes befinden sich im Anhang unter Kapitel 6.1.

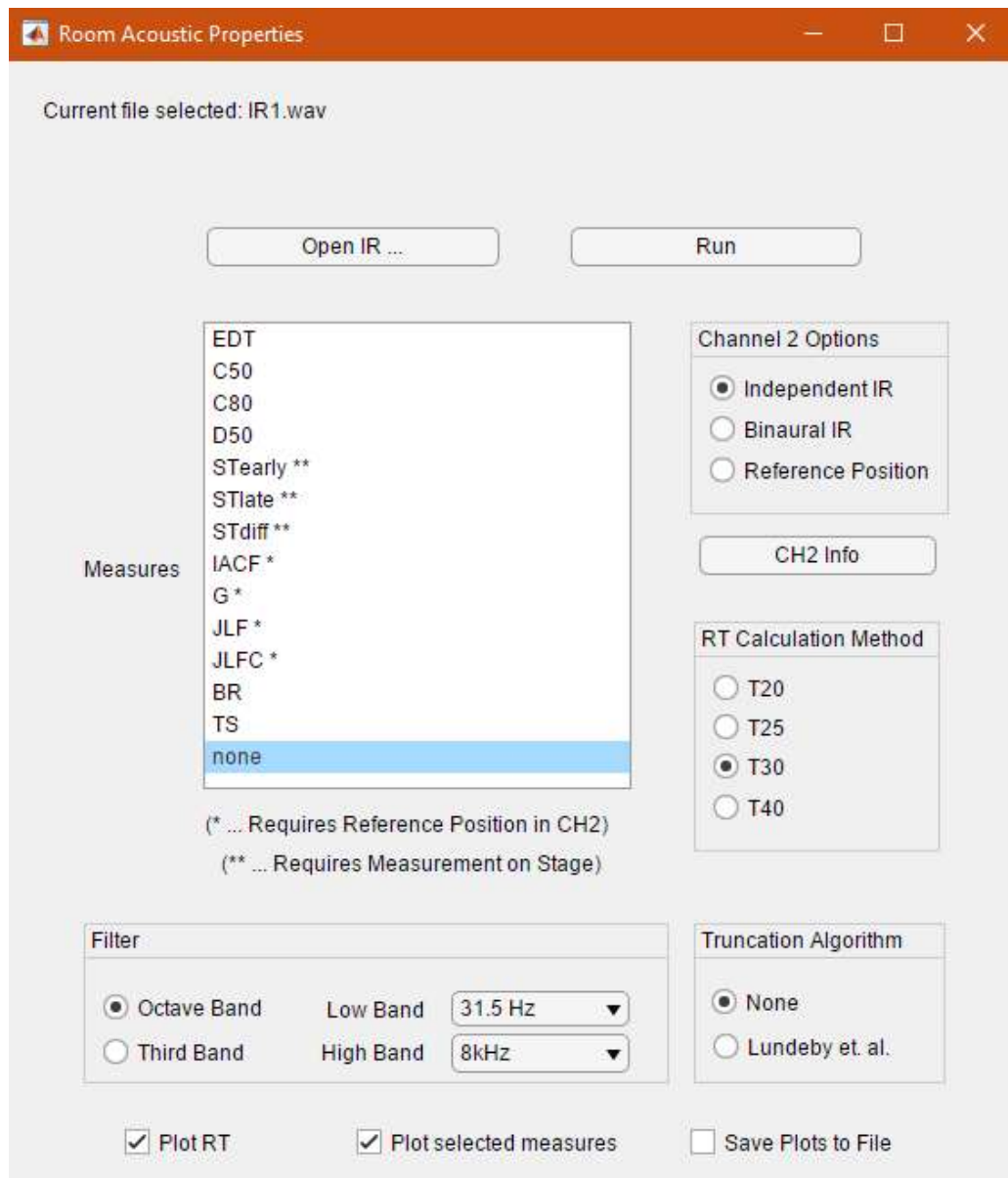


Abbildung 4.1: GUI-Startfenster des MATLAB-Tools

4.1.1 Schröder Rückwärtsintegration zur Berechnung der Nachhallzeit

Die Impulsantwort ist im Allgemeinen eine wichtige Größe bei der Betrachtung von LTI-Systemen und kann in der Raumakustik direkt für vielerlei Betrachtungen herangezogen werden. Die Impulsantwort $h(t)$ beschreibt das Verhalten (bzw. die Stoßantwort) eines Systems auf ein bestimmtes Eingangssignal $s(t)$, in der Regel ein Diracimpuls. Das ausgangsseitige Signal $g(t)$ kann beschrieben werden als folgendes Integral bzw. Faltungsoperation [Möser 2010, S. 540]:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t - \tau)d\tau = s(t) * h(t) \quad (4.1)$$

Ist die (Raum)Impulsantwort $h(t)$ eines Raumes bekannt, so kann mittels der Schröder Rückwärtsintegration direkt die Nachhallzeit, frei von statistischen Nebeneffekten, ermittelt werden:

$$E(t) = \int_0^{\infty} h^2(\tau)d(\tau) = \int_{\infty}^t h^2(\tau)d(-\tau) \quad (4.2)$$

Die Abbildung 4.2 zeigt grafisch die einzelnen Schritte der Schröder Rückwärtsintegration für eine Beispielimpulsantwort, beginnend bei einer eingelesenen Impulsantwort, Quadrierung, Normierung und abschließender Rückwärtsintegration (inkl. Normierung), durch welche man die Abklingkurve erhält.

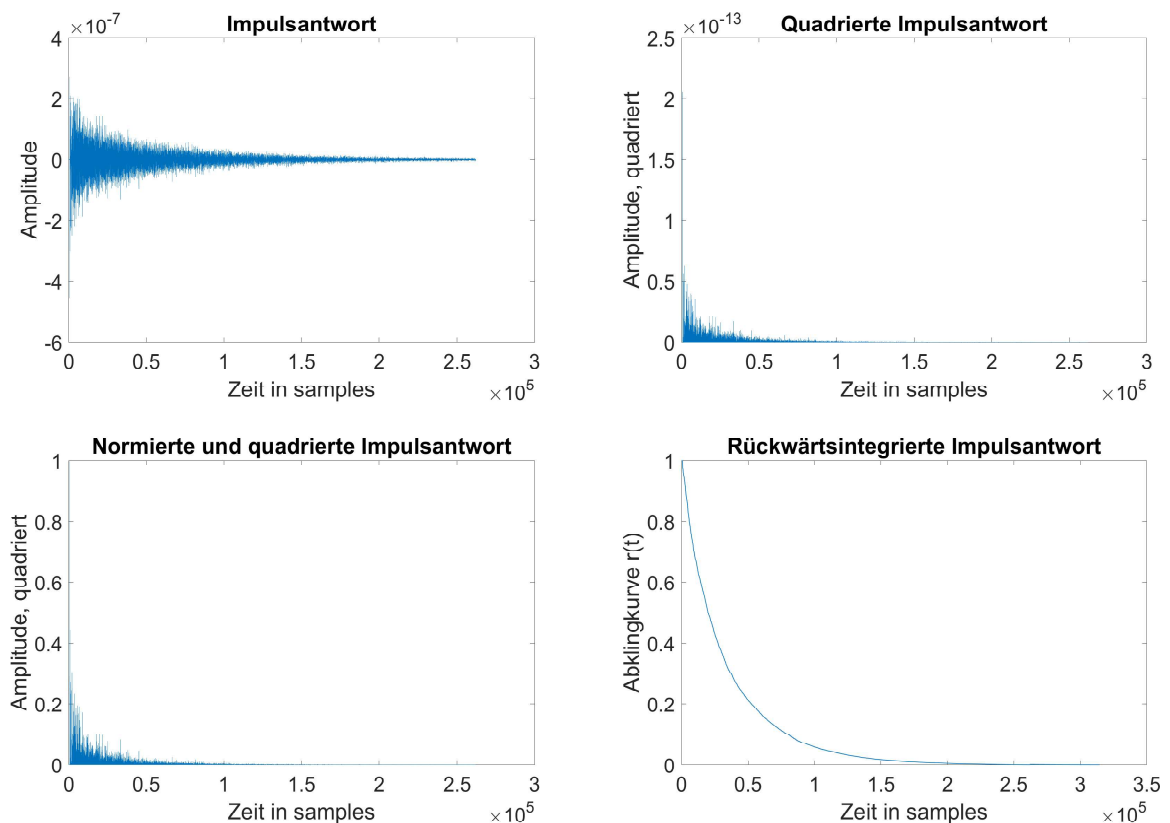


Abbildung 4.2: Schritte der Schröder Rückwärtsintegration für eine Beispielimpulsantwort

4.1.2 Truncation- und Kompensationsalgorithmen zur störgeräuschreduzierten Auswertung gemessener Raumimpulsantworten

Wie aus Gleichung (4.2) hervorgeht, liegt eine Integralgrenze der Rückwärtsintegration im Unendlichen. In der Praxis verfügt man jedoch über eine endliche Impulsantwort und auch das

Intervall muss daher innerhalb endlicher Grenzen festgelegt werden. Das bloße Abschneiden der Impulsantwort führt zu einem systematischen Fehler, da die Energie zwischen diesem festgelegten Endpunkt und der (theoretischen) Unendlichkeit nicht berücksichtigt werden kann. Zudem führen Störgeräusche bzw. Rauschen (*background noise BGN, ambient noise*), welche in innerhalb der Messkette und in der Umgebung entstehen, zur Beeinflussung des Messergebnisses.

Diverse Methoden zur Rauschunterdrückung (*noise compensation methods*) sind daher bereits seit längerer Zeit wichtige Themen im wissenschaftlichen Diskurs bezüglich der Verarbeitung von Raumimpulsantworten [Chu 1978, Faiget et al. 1998, Katz 2004, Kürer und Kurze 1967, Lundebj et al. 1995]. In den Jahren 2013/14 verglichen Guski und Vorländer die Effekte fünf verbreiteter Methoden [Guski und Vorländer 2014], 2018 publizierten Ćirić und Janković ebenfalls einen Vergleich gängiger Truncation-Algorithmen basierend auf nichtlinearen Abklingmodellen [Ćirić und Janković 2018].

Die ISO 3382 [ISO 3382-1 engl. 2009] beinhaltet insgesamt drei unterschiedliche Methoden, welche zur Störgeräuschkompensation angewandt werden dürfen. **Standardmäßig** wird als obere Grenze der Integration die Länge der Impulsantwort t_{IR} herangezogen:

$$E(t) = \int_0^{t_{IR}} h^2(\tau) d(\tau) \quad (4.3)$$

Der so entstehende Fehler erhöht sich mit der Dauer der aufgezeichneten Impulsantwort und führt in der Regel zu einer Überschätzung der interessierenden Werte. Vor allem der hintere Teil der Energieabklingkurve (EDC) ist hiervon betroffen.

Eine weitere, zugelassene und verbreitete Methode ist das **Abschneiden an einem Schnittpunkt** t_i (intersection time) zwischen Signal der Impulsantwort und konstantem Hintergrundrauschen (*constant noise floor*) [Faiget et al. 1998, Lundebj et al. 1995]. Der Fehler verglichen mit Gleichung (4.3) kann drastisch verringert werden [Guski und Vorländer 2014].

$$E(t) = \int_0^{t_i} h^2(\tau) d(\tau) \quad (4.4)$$

Allerdings führt das Abschneiden zu einer Unterschätzung des hinteren Teils der Abklingkurve, welche dadurch gegen $-\infty$ strebt.

Ein ebenfalls zulässiger und viel genutzter Vorschlag, den durch Abschneiden entstehenden, systematischen Fehler weiter zu verringern, wurde von Lundebj et al. 1995 [Lundebj et al. 1995] veröffentlicht. Hierbei wird die in der Berechnung fehlende Energie nach dem Schnittpunkt t_i abgeschätzt. Unter Annahme eines weiterhin exponentiellen Abklingens wird anhand einer abgeschätzten Steigung der Kompensationsterm C_{comp} errechnet (vgl. Abb. 4.3).

$$E(t) = \int_0^{t_i} h^2(\tau) d(\tau) + C_{comp} \quad (4.5)$$

Der evaluierbare Dynamikumfang ist somit nur mehr an die SNR der Impulsantwort gebunden. Wie Guski und Vorländer anführen, kann der entstehende Fehler signifikant verringert werden und führt nur zu einer leichten Überschätzung des hinteren Teils der Abklingkurve [Guski und Vorländer 2014].

Eine weitere Methode, die allerdings nicht in Übereinstimmung mit der ISO 3382 angewandt

werden darf, wurde von Chu 1978 beschrieben [Chu 1978]. Bei dieser Methode wird das **Hintergrundrauschen** N_{est} **geschätzt und vor Rückwärtsintegration von der Impulsantwort abgezogen**.

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} (h^2(\tau) - N_{est}^2) d\tau \quad (4.6)$$

Durch Subtrahieren des geschätzten Hintergrundrauschens kann angenommen werden, dass der verbleibende Rauschanteil eine Varianz von Eins besitzt (zero mean). Bei dieser Methode verringert sich der Fehler durch die zeitliche Mittelung während der Integration. Dies funktioniert für den frühen Teil der Abklingkurve, in welchem die Signalenergie dominiert. Der spätere Teil kann bei dieser Variante nicht korrekt berücksichtigt werden. Hier strebt die Abklingkurve wiederum gegen $-\infty$ und ihr Verlauf ist nicht mehr monoton. Abhilfe schafft hier wiederum Abschätzung und Addition eines Korrekturterms C_{comp} .

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} (h^2(\tau) - N_{est}^2) d\tau + C_{comp} \quad (4.7)$$

Der Korrekturterm C_{comp} kompensiert die Unterschätzung der Energie im späteren Teil (vgl. Abb. 4.4).

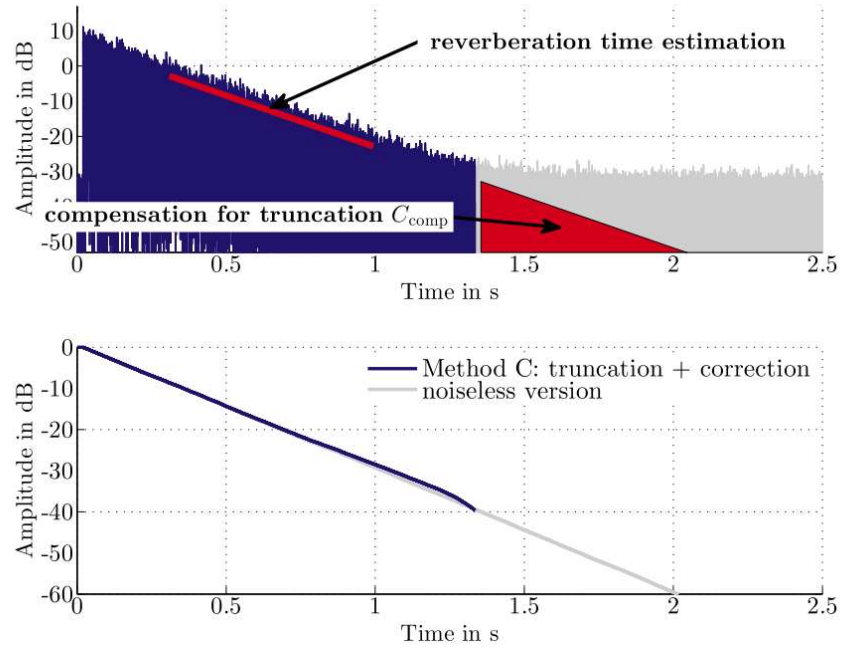


Abbildung 4.3: Impulsantwort mit zugehöriger Energieabklingkurve bei Abschneiden und Addieren eines Kompensationsterms nach Lundebý et al. [Guski und Vorländer 2014, S. 322]

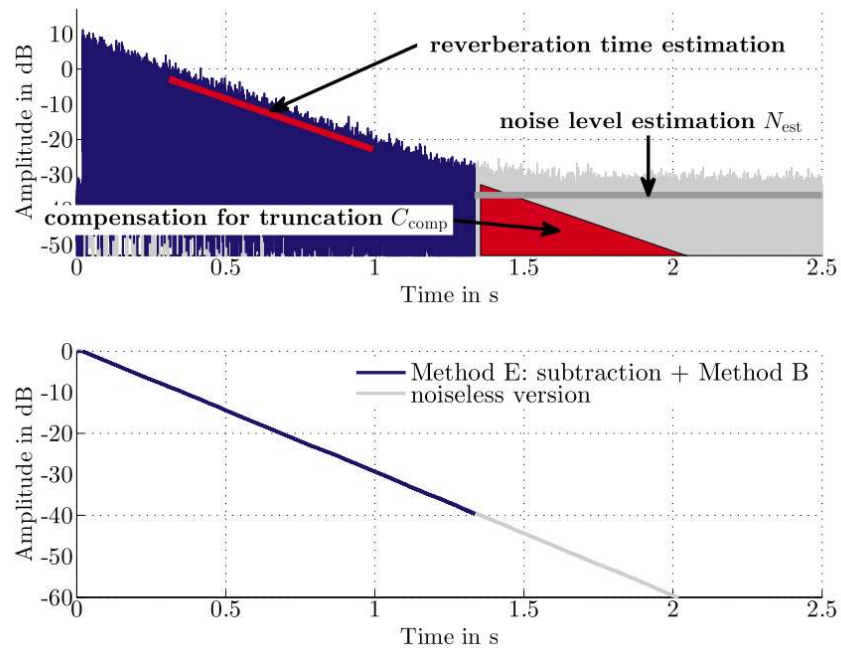


Abbildung 4.4: Impulsantwort mit zugehöriger Energieabklingkurve bei Abschneiden und Addieren eines Kompensationsterms nach Chu [Chu 1978] bzw. Guski et al. [Guski und Vorländer 2014, S. 323]

Truncation-Algorithmus nach Lundeby et al. 1995

Beim Truncation-Algorithmus nach Lundeby wird der Schnittpunkt mittels eines iterativen Verfahrens ermittelt. Dieses umfasst die folgenden zehn Punkte:

1. Mittelung der quadrierten Impulsantwort in Zeitintervallen zwischen 10-50 ms
2. Abschätzen des Hintergrundrauschens (BGN) basierend auf den letzten 10 % der Impulsantwort
3. Ermitteln der Steigung zwischen 0 dB und 5-10 dB über dem abgeschätzten BGN mittels linearer Regression
4. Gewinn eines vorläufigen Schnittpunkts
5. Festlegen von neuen Mittelungsintervallen, wobei 3-10 Intervalle pro 10 dB Abfall verwendet werden sollen
6. Neuerliche Mittelung auf Basis der vorher gewonnenen Intervalle
7. Neuerliches Abschätzen des BGN auf Basis eines Abfalls von 5-10 dB unter dem Schnittpunkt
8. Abschätzen der Steigung des späten Abklingvorgangs mittels linearer Regression, wobei ein Dynamikbereich von 10-20 dB beginnend bei 5-10 dB über dem Pegel des BGN evaluiert werden soll
9. Gewinn eines Schnittpunkts
10. Wiederholung der Schritte 7-9 bis zur Konvergenz des Schnittpunkts

Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass fünf Iterationen in allen Fällen ausreichend sind.

Truncation-Algorithmus Noise Substraction nach Chu bzw. Guski et al. 2013

Diese Variante kann nur unter zwei Voraussetzungen angewandt werden:

- das Störrauschen muss akkurat geschätzt werden können
- das Störgeräusch muss stationär sein

Im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit konnte der Algorithmus nicht implementiert werden. Entsprechende Schätzung und Subtraktion des Störgeräusches führten zu nicht-signifikanten Änderungen, obwohl die Einflüsse von Störgeräuschen bei gegebenen Impulsantworten vorhanden sein müssten.

4.1.3 Auswertung der gegebenen Impulsantworten

Erstbetrachtung

Für die Aufgabenstellung waren drei unterschiedliche Impulsantworten im WAV-Format (48 kHz, 2 Kanäle, 32-bit-float) gegeben:

1. Odiff-empty-M12L1.wav
2. Odiff-15abs-M12L1.wav
3. Odiff-15abs3D-M12L1.wav

Entsprechend dieser Reihenfolge werden die drei Impulsantworten nachfolgend mit *IR1*, *IR2* bzw. *IR3* bezeichnet. Alle drei Dateien weisen dieselbe Größe bzw. Länge auf. Um einen groben Überblick vom vorliegenden Material zu erhalten, wurde die einzelnen Dateien zunächst in einem Audioeditor angehört. Dazu mussten diese um teils über 120 dB angehoben (normalisiert) werden. Es fällt auf, dass *IR1* in einer Umgebung mit langer Nachhallzeit aufgezeichnet wurde, während der Nachhall bei *IR2* und *IR3* wesentlich kürzer ist. Vernehmbar ist zudem Hintergrundrauschen sowie Artefakte, welche bereits vor Ende des Abklingvorgangs hörbar sind. Betrachtet man die Wellenformdarstellung der einzelnen Impulsantworten, kann die Beobachtung bezüglich der Nachhallzeiten bestätigt werden. Auch hier ist die sehr geringe Aussteuerung der Dateien sichtbar.

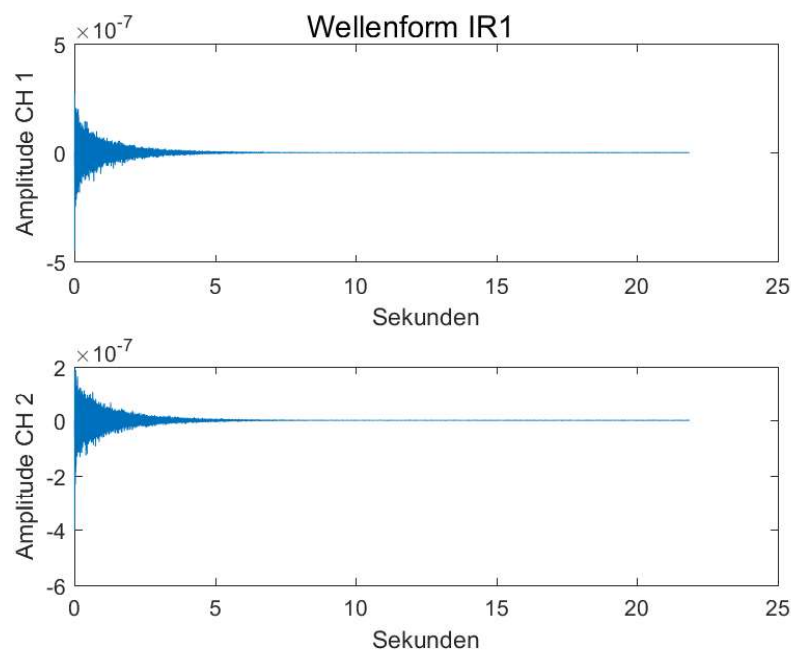


Abbildung 4.5: Wellenform IR1

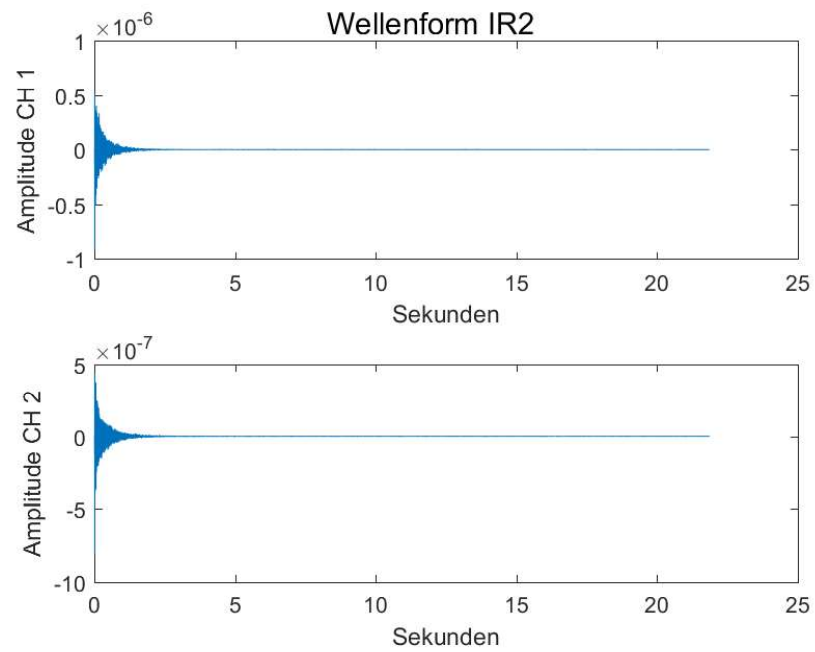


Abbildung 4.6: Wellenform IR2

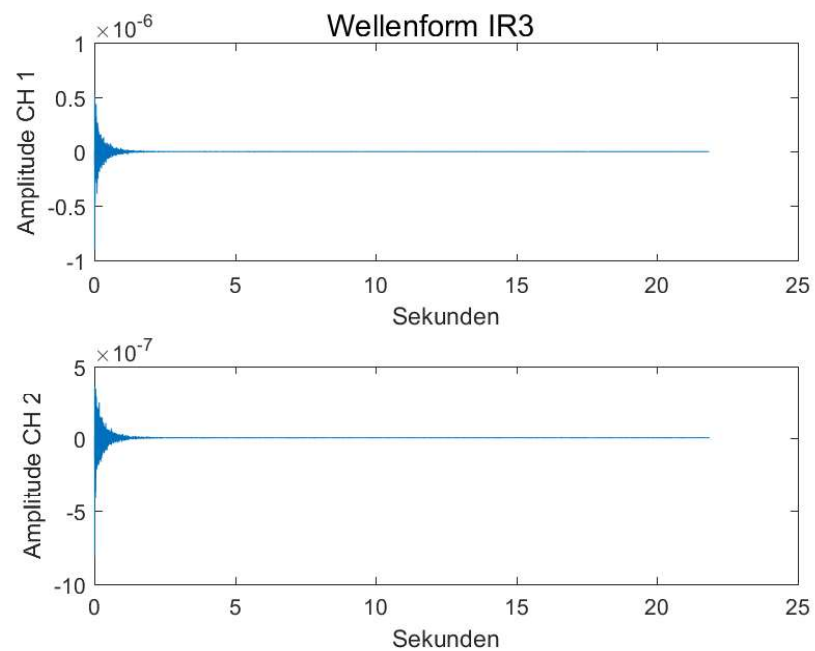


Abbildung 4.7: Wellenform IR3

Schröder Rückwärtsintegration

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt der quadrierten Impulsantwort (links) und einen Vergleich zwischen der Rückwärtsintegration mit Wahl der Integrationsgrenze basierend auf dem Lundeby-Algorithmus (mit Truncation, rot) sowie auf der Länge der Impulsantwort (ohne Truncation, blau). Zudem sind die mittels linearer Regression ermittelten Steigungen zur Berechnung der Nachhallzeit, aufgrund des signifikant sichtbaren Ergebnisses T_{40} , dargestellt. Der Vergleich wurde beispielhaft für IR1, CH1 bei 125-Hz-Oktavbandfilterung vorgenommen (Abb. 4.8). Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass es ohne Truncation zu einem höheren Wert für die Nachhallzeit kommt ($T_{40} = 24,31$ s) als mit jener von Lundeby et al. ($T_{40} = 22,66$ s). Die quadrierte, integrierte Impulsantwort bewegt sich zeitlich früher gegen $-\infty$, somit ergibt sich bei der Berechnung der Nachhallzeit mittels linearer Regression auch ein steilerer Verlauf der Steigung und dadurch niedrigere Zeitwerte.

Diese Steigung kann aber nicht immer Aufschluss über den Verlauf der Abklingkurve geben. Ein Phänomen, welches in den nachfolgenden Beispielen einige Male erkennbar sein wird, ist die Fehlanpassung der Regressionsgeraden an die Abklingkurve im gegebenen Auswertungsbereich, wie nachfolgend Abb. 4.9 zeigt. Durch schlechten Signal-Rausch-Abstand und die bereits sehr rasch und steil abfallende Abklingkurve im jeweiligen Frequenzband kann vereinzelt ein realistischer Wert in den Grenzen für T_{30} im oberen Frequenzbereich nicht mehr ohne manuelle Anpassung der Ausgleichsgeraden ermittelt werden. Der schnelle Abfall hat eine flache Steigung der Regressionsgeraden zur Folge, was so zu einer starken Überschätzung der Nachhallzeiten führt. Da beim Truncation-Algorithmus nach Lundeby et al. ebenfalls Steigungen mittels linearer Regression ermittelt werden, wirkt sich dies auch auf die Ermittlung der optimalen Integrationsgrenzen aus. Eine entsprechende Fehlerbehandlung musste daher im Programmdurchlauf des Algorithmus berücksichtigt werden.

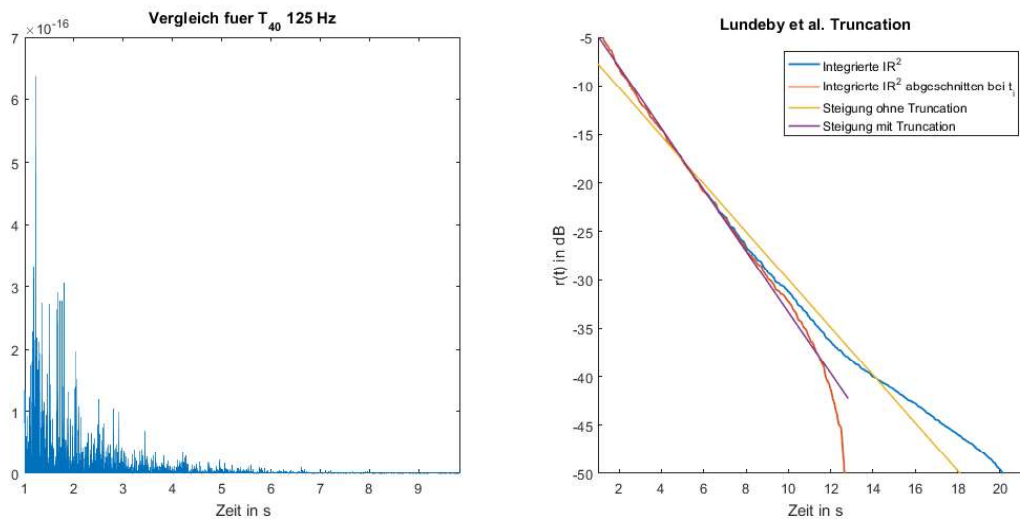


Abbildung 4.8: Links: Quadrierte Impulsantwort. Rechts: Veranschaulichung der Wahl der Integrationsgrenze und Auswirkung auf die Bestimmung der Nachhallzeit T_{40} . Beispiel: IR1, CH1 125-Hz-Oktave, T_{40}

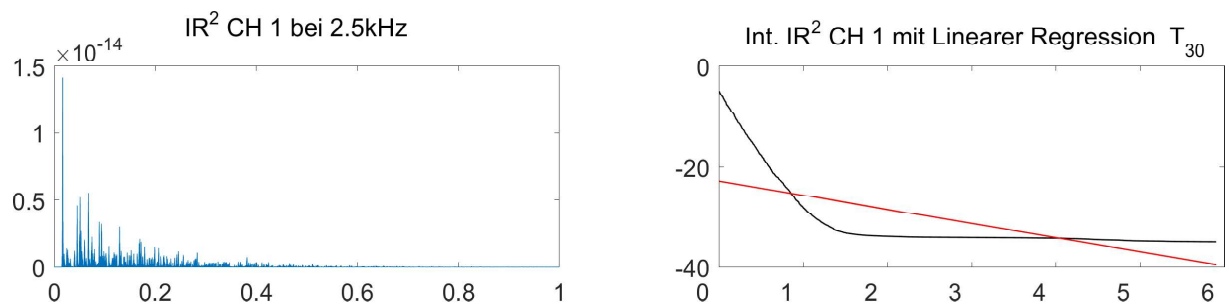


Abbildung 4.9: Fehlanpassung der Regressionsgeraden bei IR2 CH1 für 2,5-kHz-Terzband. Links: Quadrierte Impulsantwort. Rechts: Abklingvorgang durch Integration und zugehörige Regressionsgerade (rot)

Nachhallzeiten ohne Truncation

Bei dieser Variante entspricht die sich idealerweise im Unendlichen befindliche Integrationsgrenze der Schröder Rückwärtsintegration der Länge der Impulsantwort (vgl. Gleichung (4.3)). In vielen Frequenzbändern führt ein schlechter Signal-Rausch-Abstand bei der Nachhallzeitberechnung T_{40} zu unbrauchbaren Ergebnissen. Da die vorliegenden Beispiel-Impulsantworten diese Problematik aufweisen, musste für die nachfolgenden Berechnungen auf die Auswertungen für T_{40} , sowohl bei Filterung in Oktavbändern als auch Terzbändern, verzichtet werden.

Bei T_{30} führt die SNR ab 10 kHz zu unbrauchbaren Werten bei Oktavbandfilterung. Bei Terzbandfilterung kann T_{30} bereits ab 8 kHz, teils sogar vorher, nicht mehr richtig berechnet werden. Daher wurde zu Gunsten der Vergleichbarkeit aller Impulsantworten ein Bereich von 31,5 Hz bis 8 kHz gewählt und gegebenenfalls vereinzelt keine Werte ermittelt.

IR1

Grundsätzlich ähneln die Verläufe für T_{20} und T_{25} einander stark und entsprechen typischen Erwartungshaltungen. Die längsten Nachhallzeiten ergeben sich bei tiefen Frequenzen und für die größeren Auswertungsbereiche T_i . Vor allem bei Oktavbandfilterung führen die unterschiedlichen Berechnungsgrenzen zu eher kleineren Abweichungen. Anders ist es bei den unterschiedlichen Kanälen der Impulsantworten. Es ist bekannt, dass CH1 und CH2 zwei unterschiedlichen Positionen im selben Raum entsprechen. Da der Verlauf der Nachhallzeiten beider Positionen erst ab 125 Hz (bzw. ab ca. 80 Hz in Terzbändern) relativ ähnlich ist, kann als Erklärung bzw. Ursache von stehenden Welle ausgegangen werden, welche zum starken Unterschied in den tieferen Frequenzbändern geführt haben könnten. Besonders gut ist dies in der Terzbandbetrachtung zu erkennen, wo Maxima bei 40 Hz sowie zwischen 100 und 125 Hz vorliegen. Starke Einbrüche sind hingegen im 63-Hz- und 80-Hz-Band abzulesen.

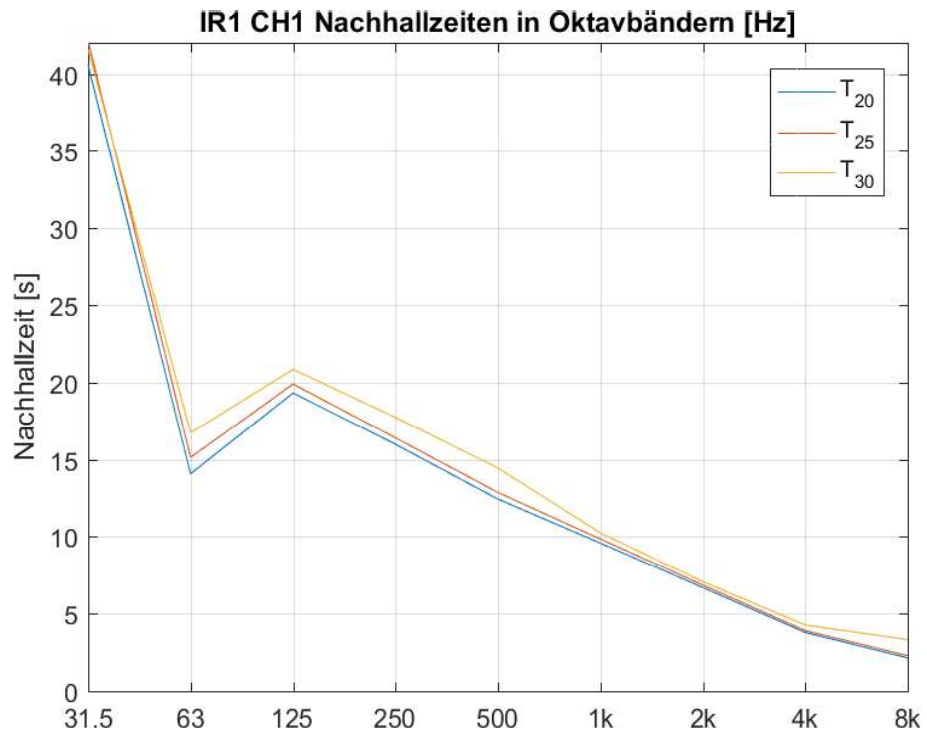


Abbildung 4.10: Nachhallzeiten in Oktavbändern für IR1 Position 1

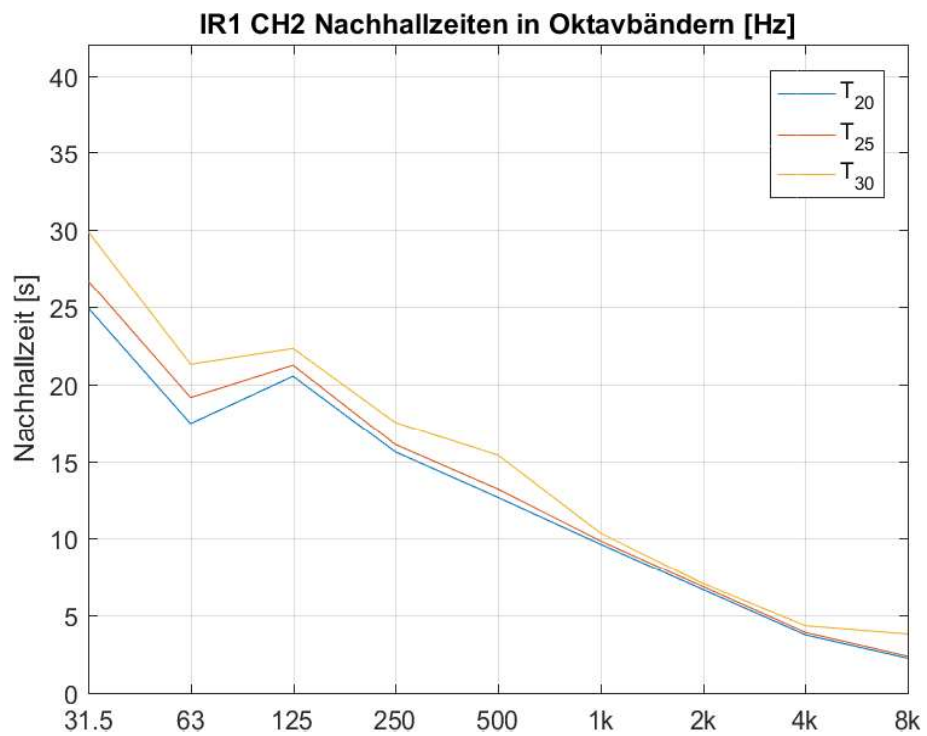


Abbildung 4.11: Nachhallzeiten in Oktavbändern für IR1 Position 2

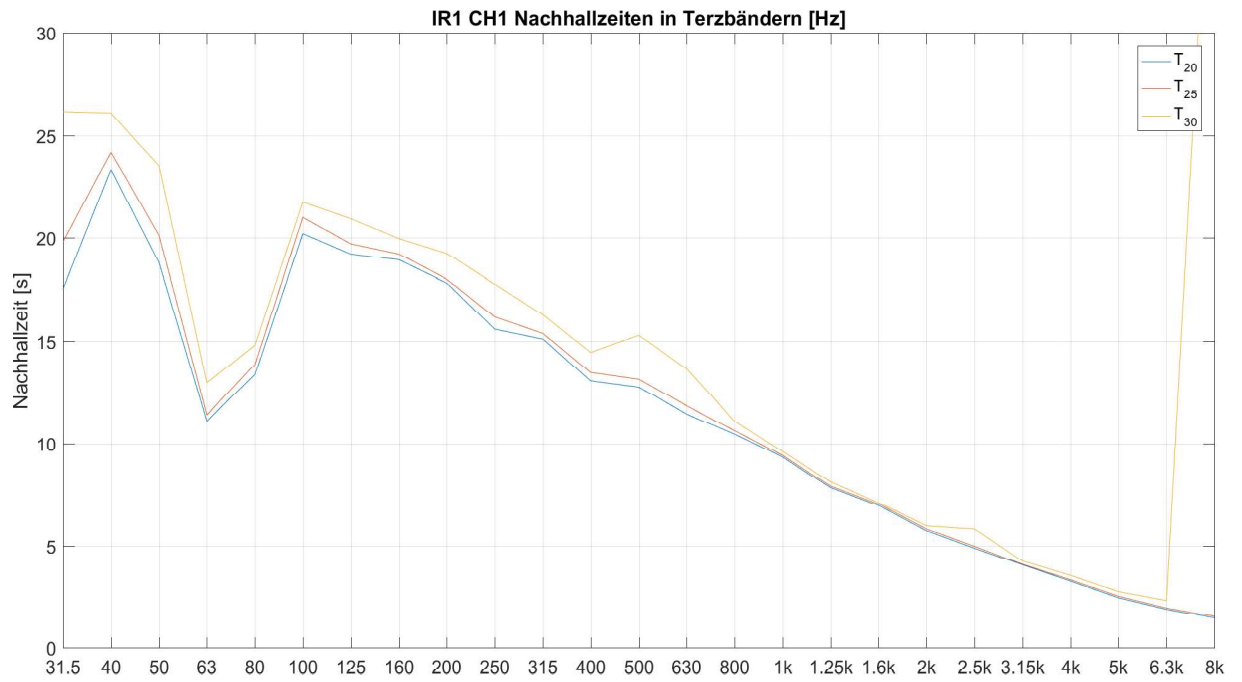


Abbildung 4.12: Nachhallzeiten in Terzbändern für IR1 Position 1

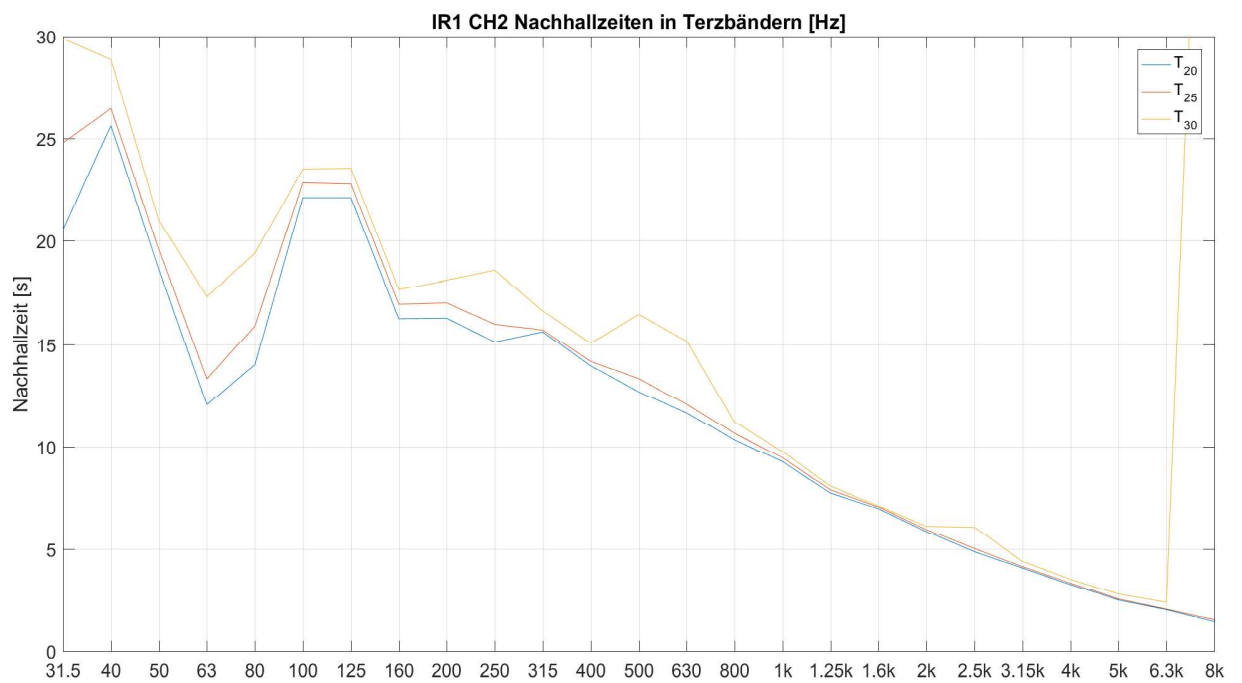


Abbildung 4.13: Nachhallzeiten in Terzbändern für IR1 Position 2

IR2

Wie aus der Erstabstrachtung hervorgehend bestätigt sich, dass für IR2 kürzere Nachhallzeiten zu erwarten sind. Zudem ist die Mode in den Bändern 100 Hz und 125-Hz weniger ausgeprägt. Es liegt weiterhin ein Maximum in Richtung 40-Hz-Band vor.

Die untypischen Spitzen und Ausreißer bei der Berechnung von T_{30} signalisieren, dass es hier erstmals zu eindeutigen Fehlberechnungen kommt, insbesondere bei Terzbandfilterung. Bei Oktavbandfilterung ist offensichtlich nur das 8-kHz-Band betroffen, welches einen unrealistisch hohen Nachhallzeitwert aufweist. Zudem kommt es bei den Terzbändern 500 Hz bzw. 2,5 kHz zu extremen Spitzen.

Bemerkenswert ist auch der Vergleich von Oktav- und Terzbandfilterung. Bei Oktavbandfilterung von IR2 in Position 2 weist das 500-Hz-Band eine auffällig erhöhte Nachhallzeit auf (Abb. 4.15). Betrachtet man das gleiche Band bei Terzfilterung (Abb. 4.17), so ist zu erkennen, dass hier wiederum eine unrealistisch hohe Spitze vorliegt. Das deutet darauf hin, dass die Nachhallzeit eigentlich kürzer sein sollte, als für T_{30} bei Oktavbandfilterung abgebildet. Die Verläufe von T_{20} und T_{25} deuten ebenfalls darauf hin. Betrachtet man die Anpassung der Regressionsgerade für dieses Band, bestätigt sich die Annahme. Dies gilt auch für die weiteren Bänder mit starken Abweichungen.

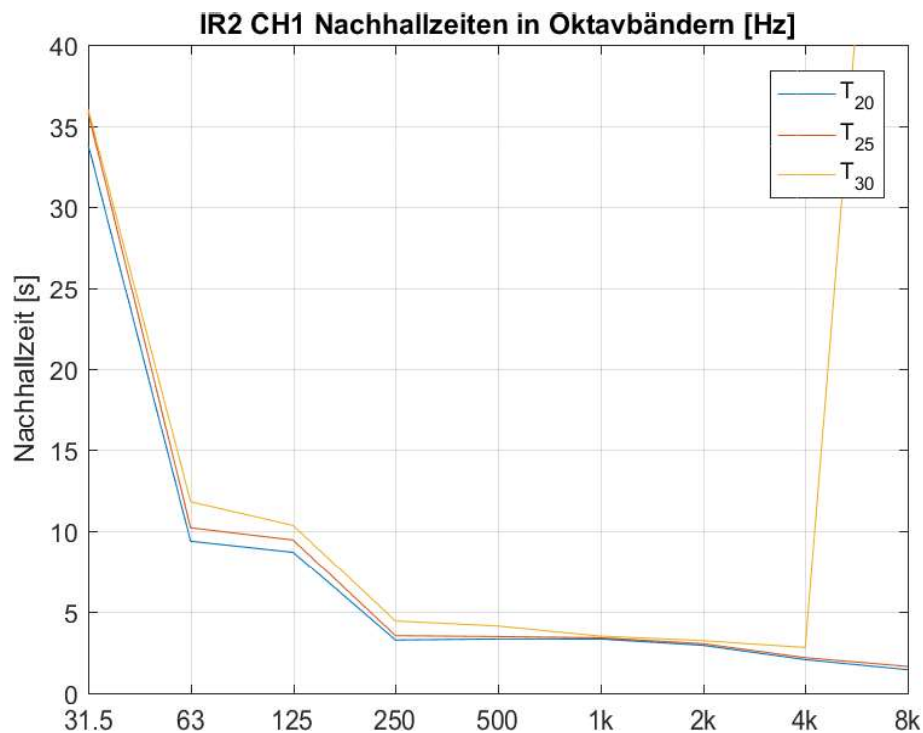


Abbildung 4.14: Nachhallzeiten in Oktavbändern für IR2 Position 1

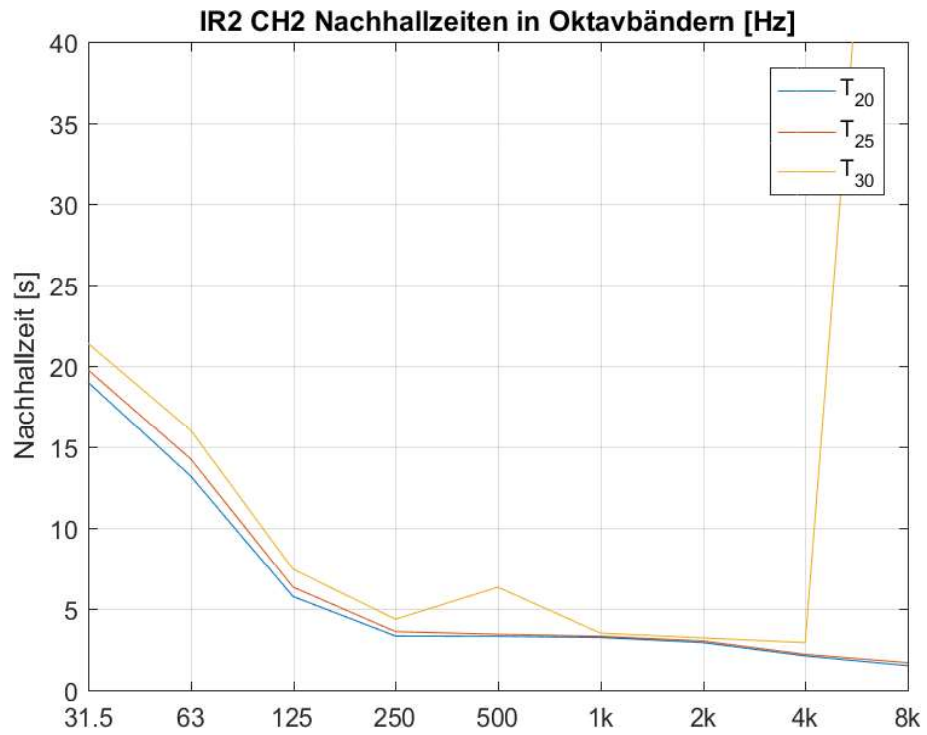


Abbildung 4.15: Nachhallzeiten in Oktavbändern für IR2 Position 2

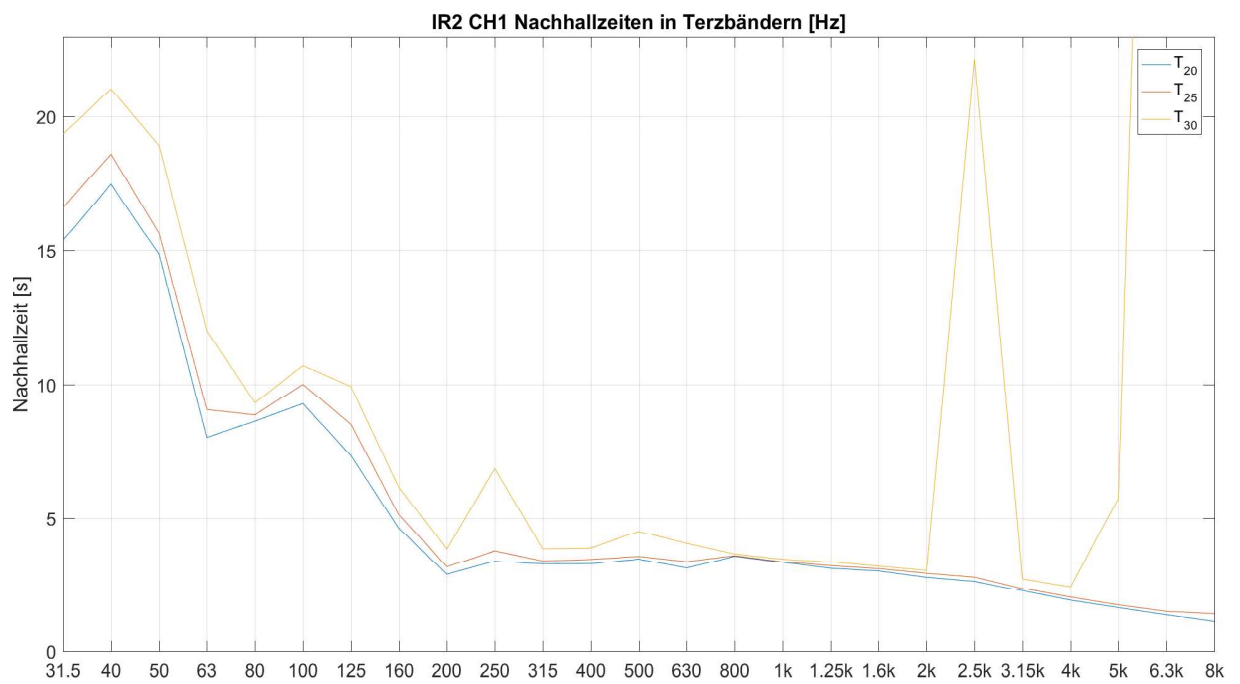


Abbildung 4.16: Nachhallzeiten in Terzbändern für IR2 Position 1

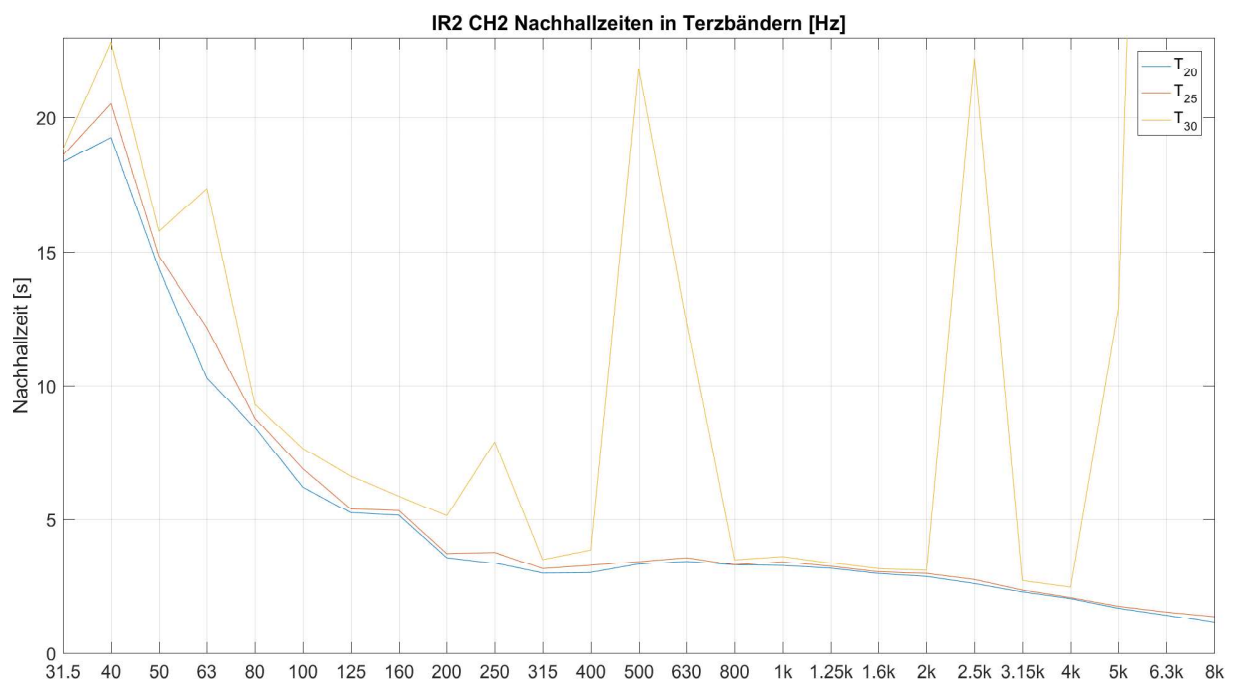


Abbildung 4.17: Nachhallzeiten in Terzbändern für IR2 Position 2

IR3

Generell liefert IR3 an Position 2 im Vergleich zu den vorherigen Impulsantworten die niedrigsten Nachhallzeiten. Auch zwischen 31,5 Hz und 63 Hz konnte, mit Ausnahme auf Position 1 bei 31,5 Hz, die Nachhallzeit unter 20 Sekunden gesenkt werden. Im Vergleich zu IR1 tritt die durch Moden entstehende Berg-Tal-Berg-Abfolge nicht mehr auf. Für die Berechnung von T_{30} an Position 2 bei Terzbandfilterung kommt es, wie in Abb. 4.21 ersichtlich, bei 63 Hz zu einer Spitze, die sich auch als leichte Überhöhung bei der Oktavbandfilterung an selbiger Position bemerkbar macht. Betrachtet man wiederum das Fitting der Regressionsgerade auf die zugehörige Abklingkurve, so ist von einer Fehlberechnung auszugehen.

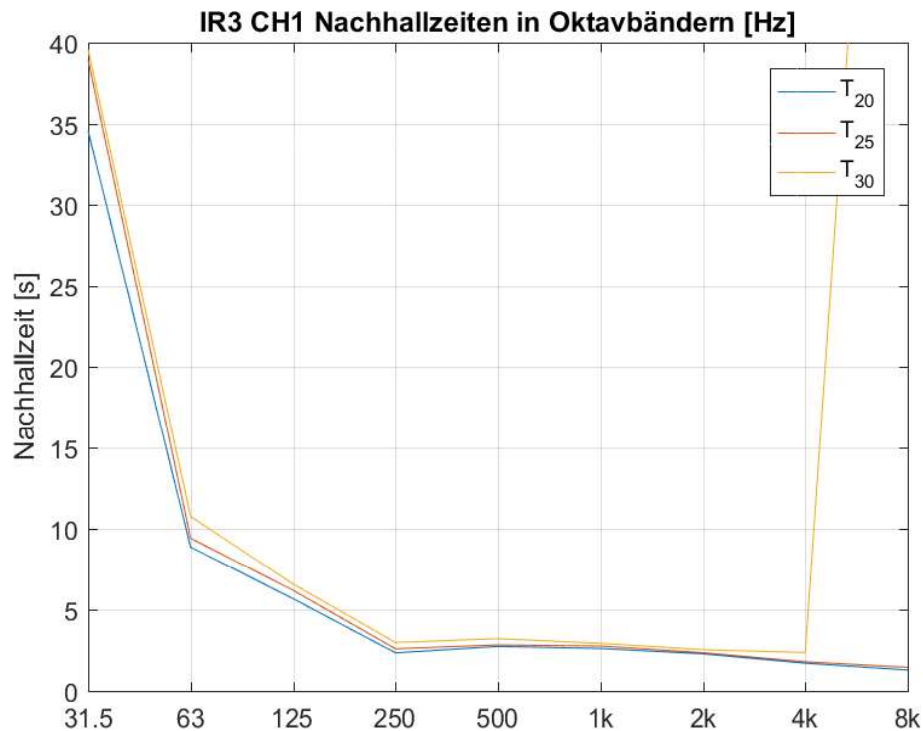


Abbildung 4.18: Nachhallzeiten in Oktavbändern für IR3 Position 1

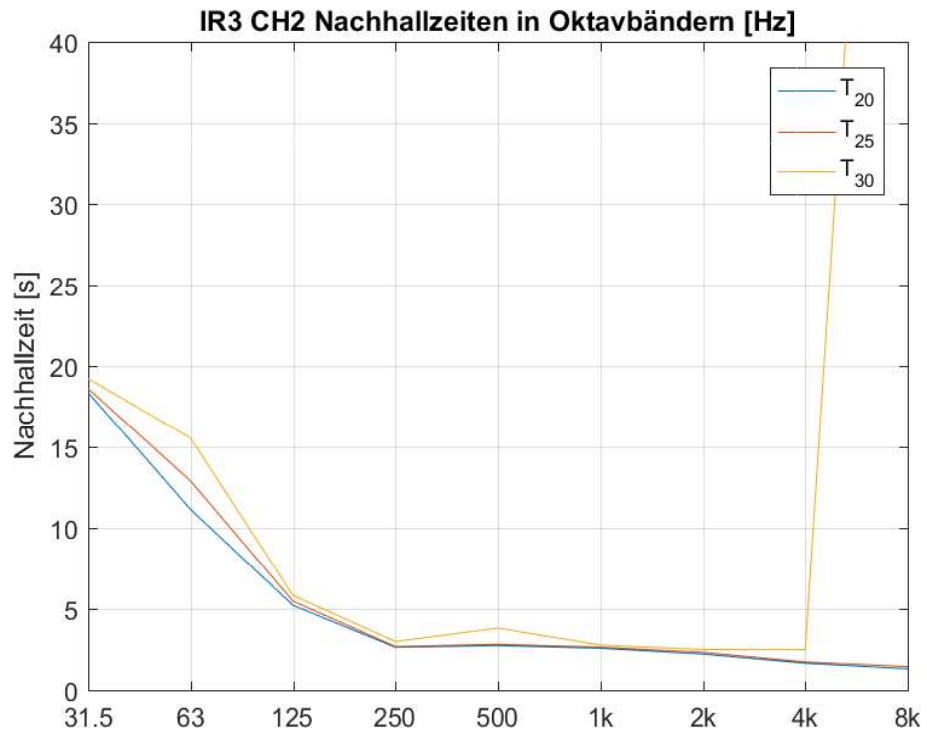


Abbildung 4.19: Nachhallzeiten in Oktavbändern für IR3 Position 2

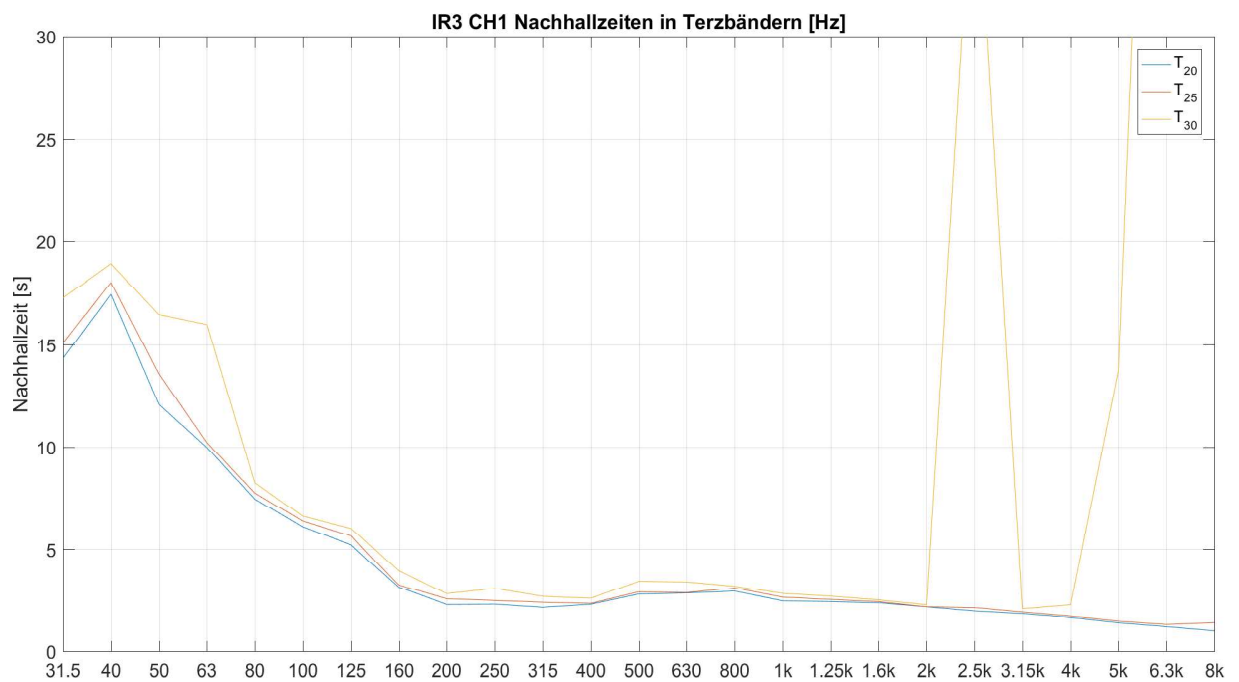


Abbildung 4.20: Nachhallzeiten in Terzbändern für IR3 Position 1

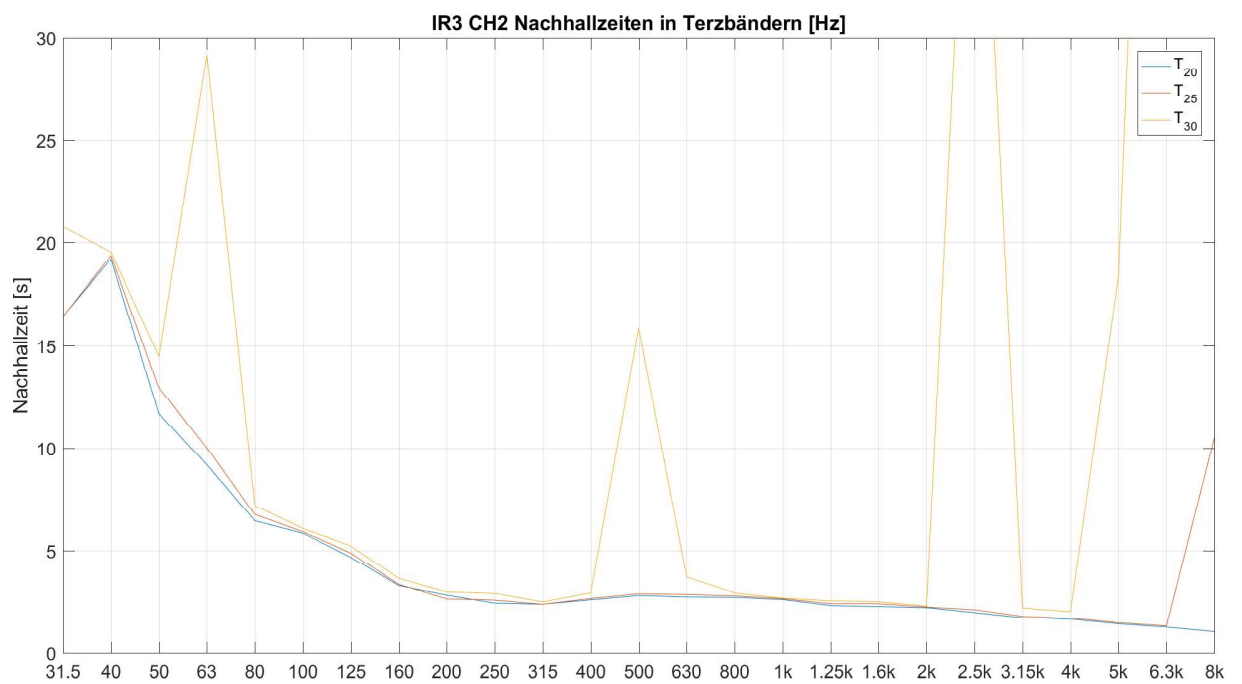


Abbildung 4.21: Nachhallzeiten in Terzbändern für IR3 Position 2

Nachhallzeiten mit Truncation

Bei dieser Nachhallzeitberechnung wurde das Verfahren nach Lundeby et al. entsprechend 4.1.2 angewandt, um anstelle der Länge der Impulsantwort eine im Bezug auf Signal-Rausch-Abstand sinnvolle Integrationsgrenze zu finden. Die nach Lundeby et al. wählbaren Parameter wurden nach Vorbetrachtungen für die gegebenen Impulsantworten wie folgt gesetzt:

- Zeitintervall Schritt 1: 35 ms
- Sicherheitsabstand über BGN-Level: 5 dB
- Intervallanzahl Schritt 5: 3 Intervall pro 10 dB
- Sicherheitsabstand über Schnittpunkt: 7 dB

Allgemein zeigt sich, dass im Vergleich zur Nachhallzeitberechnung ohne Truncation die unterschiedlichen Auswertungsbereiche T_i mit Truncation wesentlich weniger voneinander abweichen. Zudem bestätigt sich, dass die Nachhallzeiten mit Truncation kürzer ausfallen. Dies gilt auch für tiefe Frequenzen: im 31,5-Hz-Band liefert der Algorithmus immer signifikant niedrigere Nachhallzeiten. Zum Zweck der Vergleichbarkeit wurde der Nachhallzeitverlauf ohne Truncationalgorithmus zusätzlich in strichlierter Form in die nachfolgenden Abbildungen eingebunden.

IR1

Die offensichtlich stärkste Abweichung zwischen den Varianten mit und ohne Truncation tritt an beiden Positionen für das 31,5-Hz-Band auf. Die Nachhallzeiten nach Lundeby et al., bezeichnet mit $T_{i,L}$, errechnen sich für Position 1 auf etwas mehr als den halben Wert der Nachhallzeiten ohne Truncation. Die einzelnen Auswertungsbereiche $T_{i,L}$ weisen generell eine geringe Abweichung auf, am größten ist diese zu tieferen Frequenzen hin. Weiterhin errechnen sich für T_{30} die höchsten Werte. Zwischen 1 kHz und 4 kHz treten nahezu keine Abweichungen unter allen Berechnungsmethoden auf. Es zeichnen sich bei Truncation niedrigere Nachhallzeiten $T_{i,L}$ für das 8-kHz-Band ab. Der Unterschied zwischen den einzelnen Positionen von CH1 bzw. CH2 bleibt erhalten. Ebenso ausgeprägt bleiben der leichte Abfall zum 63-Hz-Band hin und der leichte Anstieg in Richtung 125-Hz-Band.

IR1 CH1 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Oktavbändern [Hz]

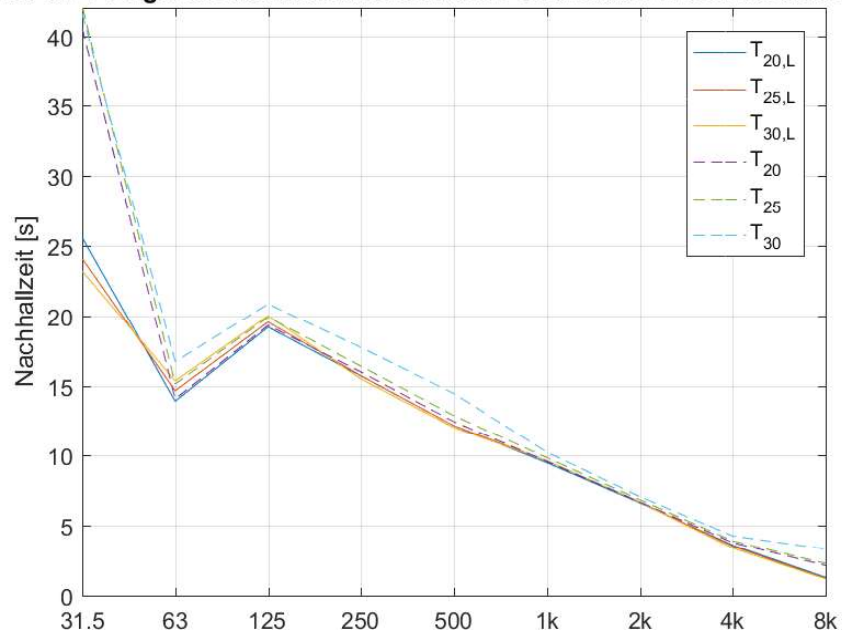


Abbildung 4.22: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Oktavbändern für IR1 Position 1

IR1 CH2 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Oktavbändern [Hz]

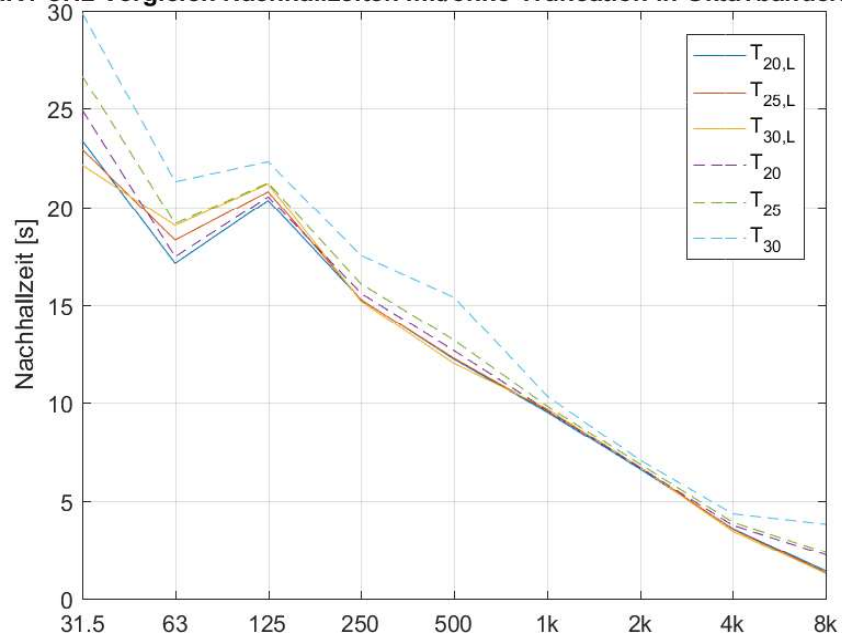


Abbildung 4.23: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Oktavbändern für IR1 Position 2

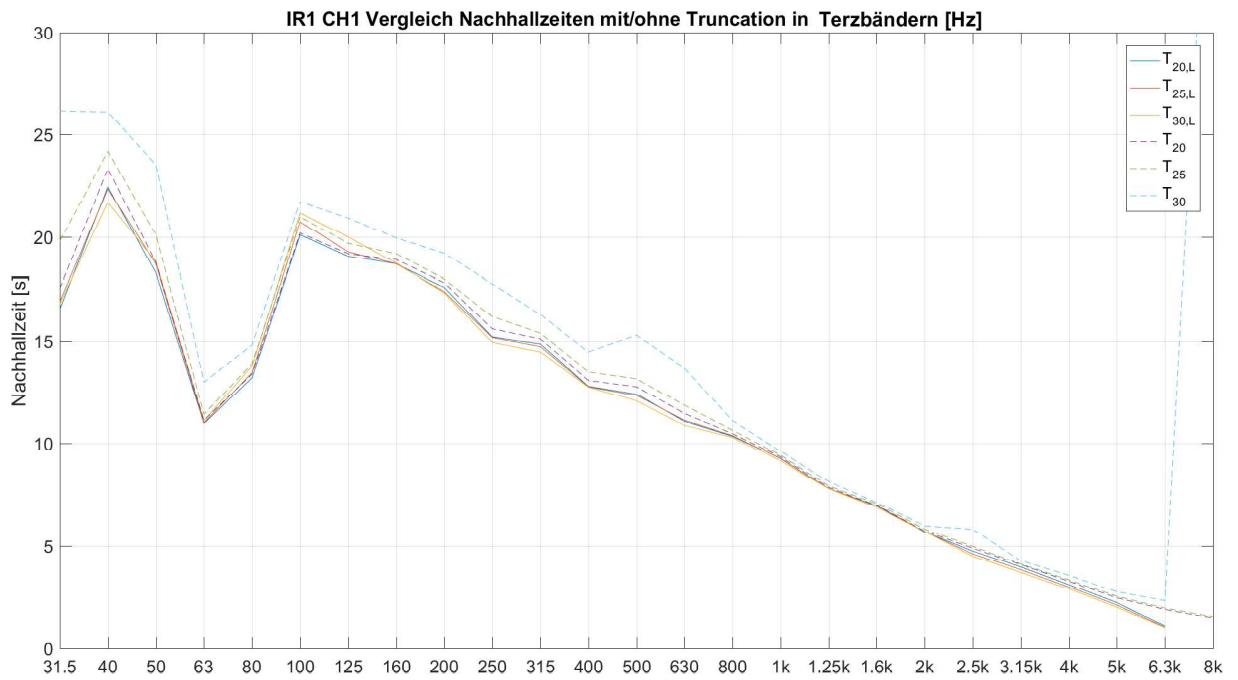


Abbildung 4.24: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Terzbändern für IR1 Position 1

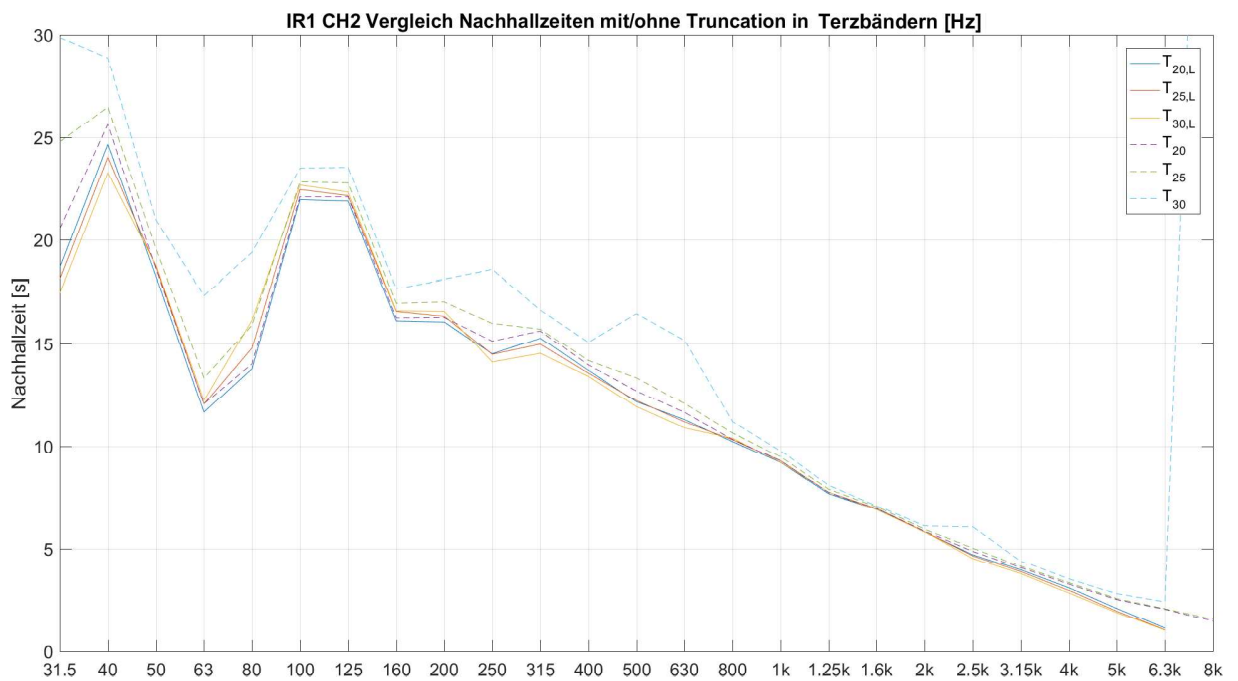


Abbildung 4.25: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Terzbändern für IR1 Position 2

IR2

Für IR2 kommt es, insbesondere im tieffrequenten Bereich, zu wesentlich weniger Abweichungen zwischen der Berechnung mit und ohne Truncation. Vor allem für Position 1 sind die Verläufe relativ ähnlich. Für das 8-kHz-Band kann in Oktavbändern aufgrund der mangelnden SNR keine Integrationsgrenze nach Lundeby ermittelt werden. Es kann somit keine Vergleichsaussage in diesem Band getroffen werden. Bei Terzbandfilterung trifft dies bereits auf das 6,3-kHz-Band zu. Zu den stärksten Abweichungen kommt es bei 31,5 Hz an Position 1. Tendenziell nehmen Abweichungen mit höheren Frequenzen hin ab. Der Truncation-Algorithmus gleicht zudem den im obigen Abschnitt beschriebenen Fehler in Position 2, der bei der Berechnung von T_{30} im 500-Hz-Band entsteht, aus. Relativ ident sind die Verläufe bei Filterung in Terzbändern zwischen 800 Hz und 2 kHz. Darüber bzw. darunter ergeben die Berechnungen immer leicht niedrigere Werte.

IR2 CH1 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Oktavbändern [Hz]

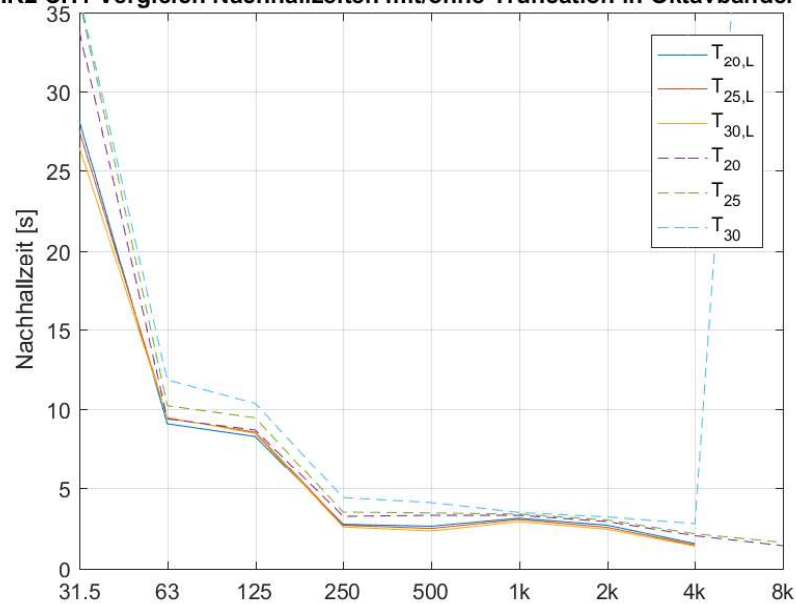


Abbildung 4.26: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Oktavbändern für IR2 Position 1

IR2 CH2 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Oktavbändern [Hz]

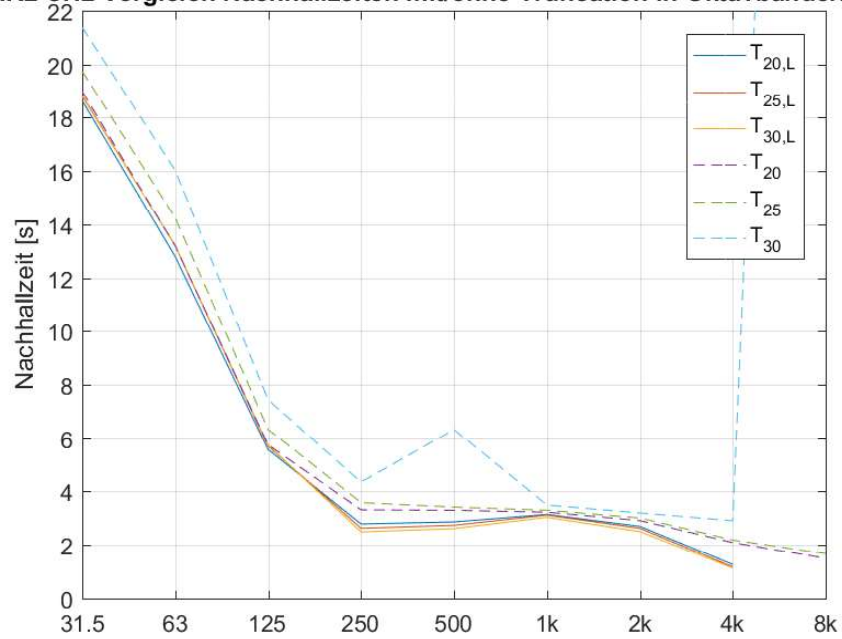


Abbildung 4.27: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Oktavbändern für IR2 Position 2

IR2 CH1 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Terzbändern [Hz]

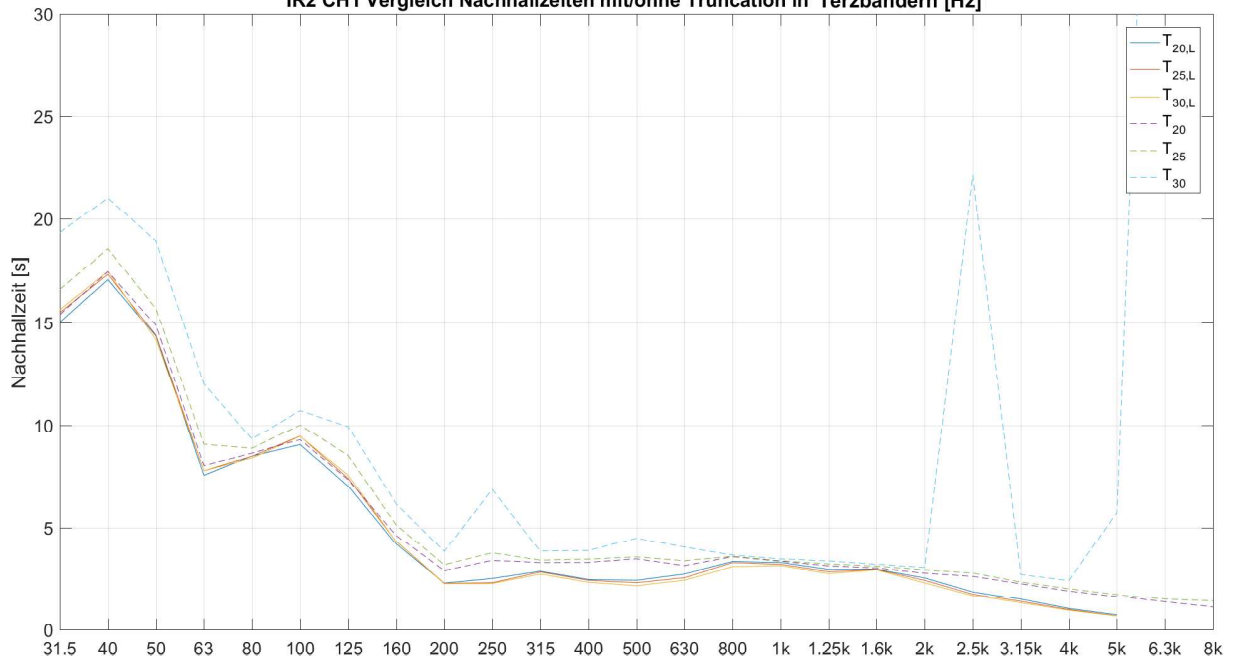


Abbildung 4.28: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Terzbändern für IR2 Position 1

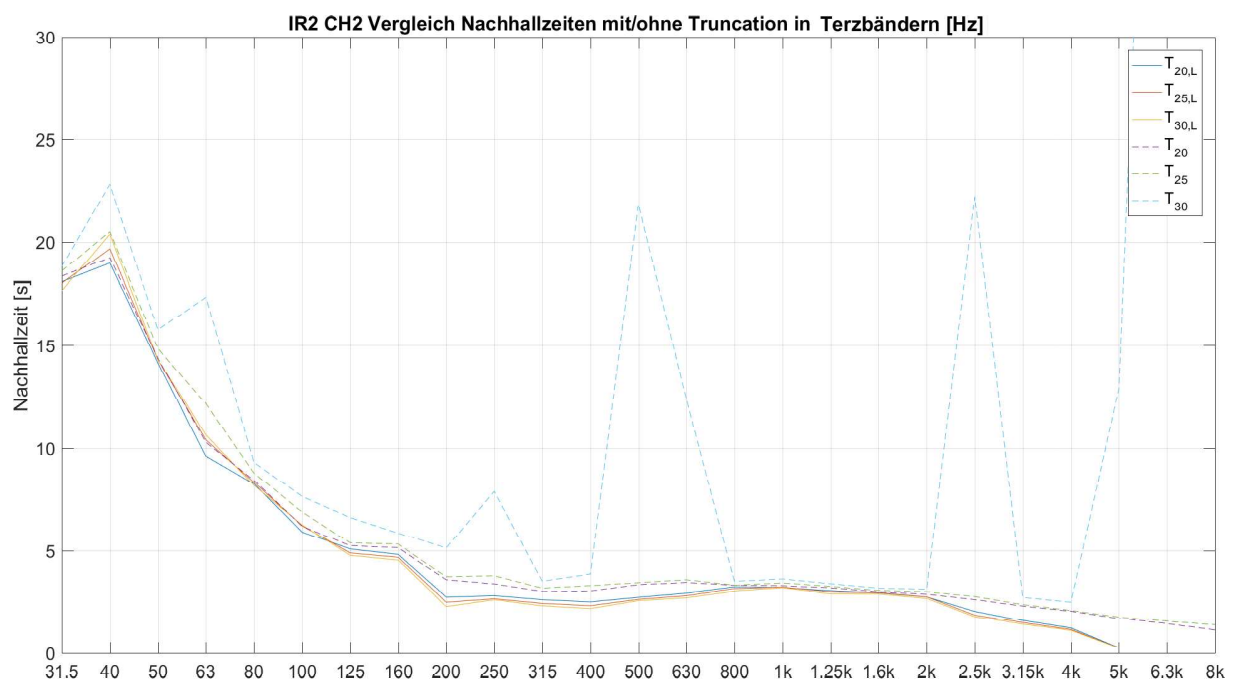


Abbildung 4.29: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Terzbändern für IR2 Position 2

IR3

Der Vergleich bestätigt die Aussagen über die Nachhallzeiten von IR2. Allerdings kommt es bei Position 1 zu einem ähnlich starken Unterschied in der Berechnung des 31,5-Hz-Bands. Die erhöhte Nachhallzeit T_{30} für das 63-Hz und 500-Hz-Band besitzt auch für diese Impulsantwort den Charakter eines Ausreißers. Wiederum kann für beide Positionen bei Oktavbandfilterung keine Vergleichsaussage bezüglich des 8-kHz-Bands getroffen werden. Gleiches gilt bei Terzbandfilterung ab dem 5-kHz-Band: Hier kann der Truncationalgorithmus aufgrund mangelnder SNR nicht mehr zur Ermittlung einer sinnvollen Integrationsgrenze eingesetzt werden. Es ist ab dem 2-kHz-Band allerdings ein eindeutiger Trend in Richtung sehr kurzer Nachhallzeiten abzulesen, was auch die Betrachtung der Regressionsgeraden in diesem Bereich bestätigen.

IR3 CH1 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Oktavbändern [Hz]

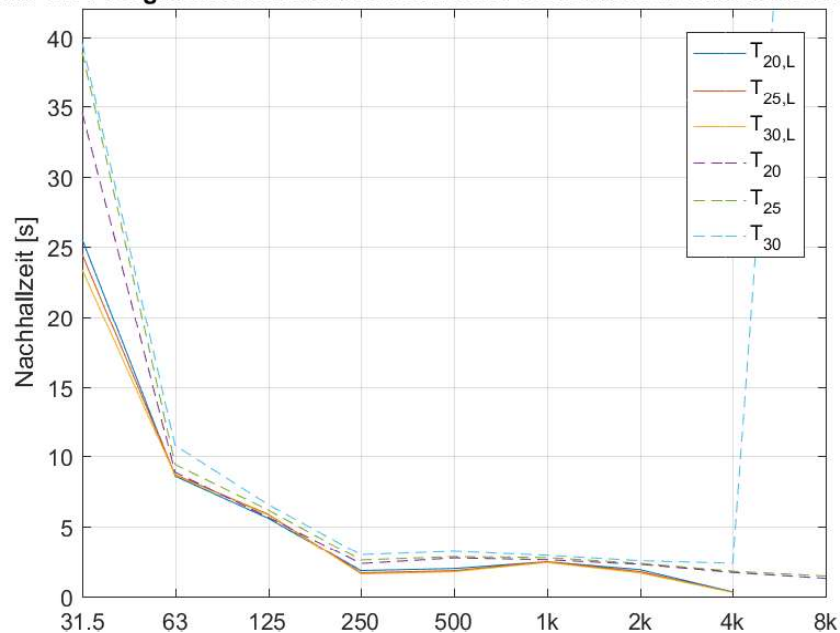


Abbildung 4.30: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Oktavbändern für IR3 Position 1

IR3 CH2 Vergleich Nachhallzeiten mit/ohne Truncation in Oktavbändern [Hz]

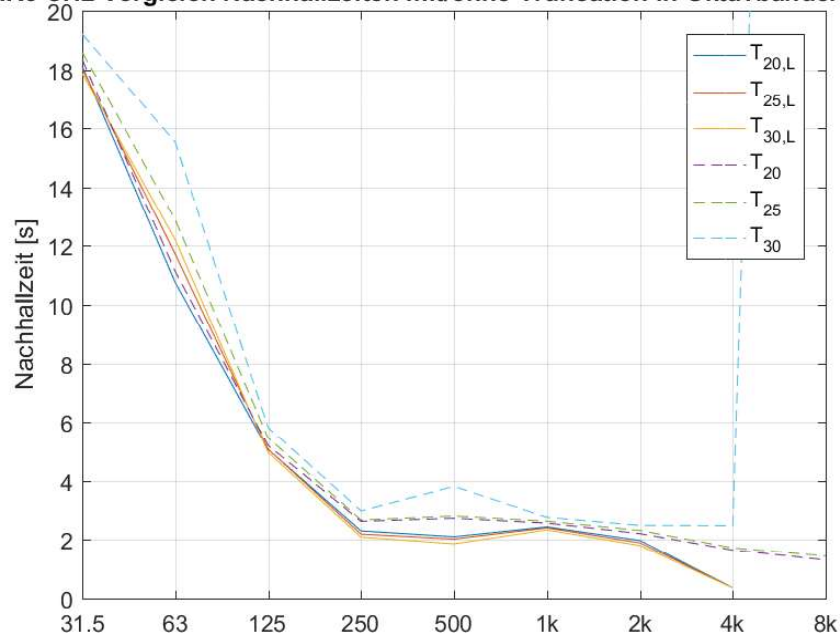


Abbildung 4.31: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Oktavbändern für IR3 Position 2

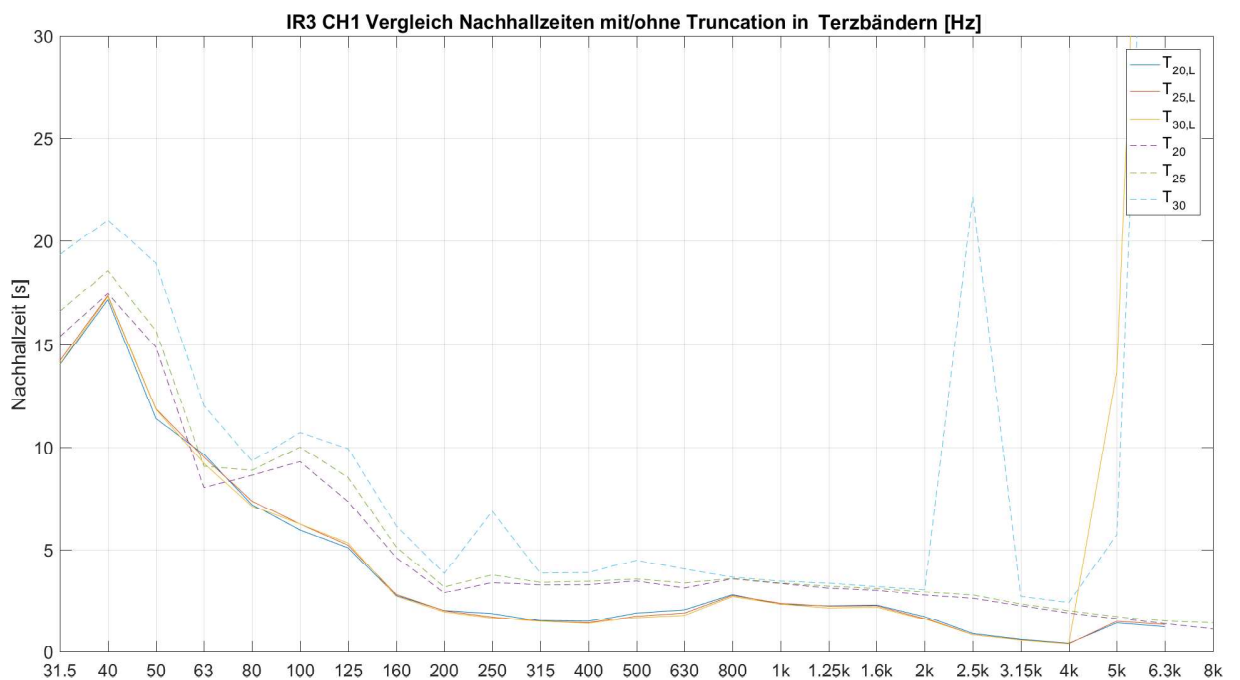


Abbildung 4.32: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Terzbändern für IR3 Position 1

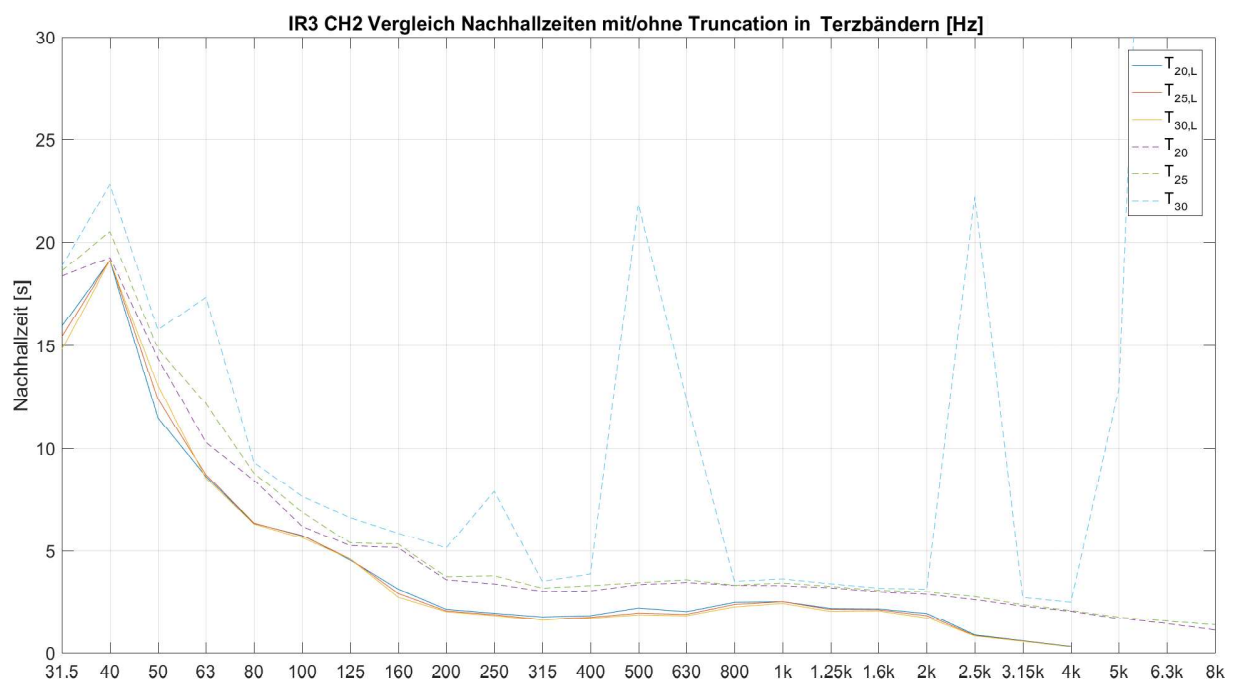


Abbildung 4.33: Nachhallzeiten nach Lundeby et al. im Vergleich in Terzbändern für IR3 Position 2

Raumakustische Gütemaße

Die mit den gegebenen Impulsantworten erhebbaren Gütemaße wurden entsprechend der bestehenden Normen berechnet:

Gütemaß	IR1 (CH 1 / CH 2)	IR2 (CH 1 / CH 2)	IR3 (CH 1 / CH 2)
BR	1,56 / 1,55	1,94 / 1,20	1,56 / 1,34
C_{50}	-13,92 dB / -12,16 dB	-7,05 / -6,41 dB	-6,78 dB / -4,00 dB
C_{80}	-10,84 dB / -10,13 dB	-3,19 dB / -3,65 dB	-2,73 dB / -1,66 dB
D_{50}	3,93 % / 5,84 %	16,52 % / 19,01 %	17,60 % / 28,88 %
EDT	12,9 s / 12,9 s	2,58 s / 2,58 s	2,28 s / 2,22 s
$t_{S,Sprache}$	0,44 s / 0,45 s	0,15 s / 0,16 s	0,13 s / 0,13 s
$t_{S,Musik}$	0,67 s / 0,67 s	0,23 s / 0,22 s	0,18 s / 0,18 s

Bassverhältnis, Bassratio BR

Das Bassverhältnis sollte für Konzertsäle im Bereich $1,1 < BR < 1,3$ liegen. Dieses Kriterium können IR2 sowie IR3 jeweils an Position 2 erfüllen. Für Sprache sollte dieses Verhältnis kleiner 1 sein, was hier nicht erreicht wird.

Deutlichkeitsmaß C_{50}

Für eine sehr gute Sprachverständlichkeit sollte $C_{50} > 2$ dB erfüllt sein. Gerade noch ausreichend ist die Verständlichkeit bei $C_{50} > -8$ dB, was bei IR2 und IR3 an allen Positionen erfüllt ist.

Klarheitsmaß C_{80}

Die Durchsichtigkeit von Musik nimmt für $C_{80} > 0$ dB zu. Allerdings erreicht man die für einen Konzertsaal vorteilhafte Einhüllung von ZuhörerInnen im Bereich $0 \text{ dB} > C_{80} > -3$ dB. Hier liegen wiederum die Werte für IR2, aber insbesondere für IR3 im vorgeschlagenen Bereich.

Deutlichkeit D_{50}

Für die Deutlichkeit wird durch einen stärkeren Anteil an früher Energie verbessert. Daher sind Werte für $D_{50} > 50\%$ für eine gute Sprachverständlichkeit notwendig. Diese Grenze kann allerdings von keiner gemessenen Impulsantwort überschritten werden.

Frühe Abklingzeit, Anfangsnachhallzeit, Early Decay Time EDT

Die Frühe Abklingzeit ist vor allem bezüglich der subjektiven Wahrnehmung von Halligkeit aussagekräftig. Die errechneten Werte zeigen, dass bei IR1 eine wesentlich längere EDT vorliegt, als bei IR2 oder IR3. Diese Impulsantworten gehören daher zu weniger hallig wahrgenommenen Räumlichkeiten als IR1. Zudem zeigen sich auch zwischen den einzelnen Messpositionen kaum Schwankungen bei diesem Gütemaß. Ein Vergleich zwischen EDT und T findet sich in Tabelle 4.1.3.

Schwerpunktzeit, Centre Time t_S

Die Schwerpunktzeit ist aus dem Flächenschwerpunktsatz abgeleitet und ist ein Maß für zeitliche Lage hoher Leistungen. Günstige Schwerpunktzeiten für Sprache $60 \text{ ms} < t_{S,Sprache} < 80 \text{ ms}$ (gemittelt in Oktavbändern zwischen 500 Hz und 4 kHz), für Musik $70 \text{ ms} < t_{S,Musik} < 150 \text{ ms}$

(Werte für die 1kHz-Oktave) [Weinzierl 2008, S. 197]. Für Musik kann dieses Kriterium zumindest bei IR3 ansatzweise erfüllt werden, bei den restlichen Messpositionen liegen die Leistungen gegenüber den günstigen Fällen zeitlich verspätet.

Vergleich von EDT und T

Die Werte für die EDT wurden entsprechend der Norm für die Mittenoktavbänder 500 Hz und 1 kHz ausgewertet und anschließend gemittelt. Vergleicht man nun jene Werte der EDT mit jener der Nachhallzeiten, (gemittelte Werte der Mittenoktavbänder) T_i , können große Abweichungen auf Welligkeiten bzw. nichtlineare Verläufe der Abklingkurven hinweisen. In der nachfolgenden Tabelle wurde die Differenz zwischen EDT und der jeweiligen Nachhallzeit T_i gebildet. Ist die Differenz klein, stimmen die subjektive Wahrnehmung und der Wert für die errechnete Nachhallzeit gut überein. Negative Vorzeichen bedeuten, dass die EDT niedriger errechnet wurde, als die jeweilige Nachhallzeit. Das deutet darauf hin, dass das Empfinden für Halligkeit hier durchaus geringer ist, als es der bloße Wert für die Nachhallzeit vermuten lässt. Umgekehrtes gilt bei positivem Vorzeichen.

Impulsantwort	$EDT - T_{20}$ (s)	$EDT - T_{25}$ (s)	$EDT - T_{30}$ (s)
IR1 (CH 1 / CH 2)	1,90 / 1,76	1,55 / 1,38	0,56 / 0,03
IR2 (CH 1 / CH 2)	-0,74 / -0,69	-0,85 / -0,78	-1,23 / -2,33
IR3 (CH 1 / CH 2)	-0,38 / -0,43	-0,51 / -0,50	-0,78 / -1,07

Generell wird der zugehörige Raumeindruck für $IR1$ subjektiv halliger erscheinen, als es die Nachhallzeiten vermuten. Für $IR1$ an Position 2 stimmen EDT und T_{30} relativ gut überein. Die schlechteste Übereinstimmung liegt beim Vergleich für EDT und T_{20} bei $IR1$ vor. Die Differenzbildung bestätigt die stärkere Krümmung der Abklingkurven insbesondere für $IR1$ bei kleineren Auswertungsbereichen für T und für $IR2$ bzw. $IR3$ bei größeren Auswertungsbereichen für T .

4.2 Fazit und Ausblick

Verfügt man über fertige Impulsantworten, können mittels eines Softwarepakets wie Matlab Schritte wie Filterung, Rückwärtsintegration und lineare Regression relativ rasch durchgeführt werden. Gleiches gilt für die Ermittlung von Gütemaßen und diversen anderen Messgrößen. Beim Bedarf die Verarbeitung universaler und ohne offensichtliches Editieren des Programmcodes zu ermöglichen, kann eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) Abhilfe schaffen.

Die programmiertechnische Umsetzung der Kompensationsalgorithmen, welche den Einfluss von Störanteilen minimieren, gestaltet sich als etwas herausfordernd. In den meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden die Abhandlungen zwar mathematisch bzw. theoretisch gut diskutiert, es fehlt allerdings an Details, welche die Umsetzung für rechnerbasierten Einsatz erleichtern würden. Zudem sei angemerkt, dass die Anwendung von Algorithmen, wie z.B. nach Lundeby et al., ohne höheren Programmieraufwand zu langen Wartezeiten führen können. Dies fällt vor allem dann ins Gewicht, wenn mehrere Bänder und Kanäle ausgewertet sollen, da sich hier die Wartezeiten der zeitaufwendigen Operationen, wie schrittweise Mittelungen, aufsummieren.

Das vorliegende Tool könnte hinsichtlich der Rechneffizienz durch Parallelisierung weiter optimiert werden, da Matlab standardmäßig für einfache for-Schleifen nur einen CPU-Thread nutzen kann. Interessant wäre auch eine Umsetzung der Auswirkung auf die Nachhallzeit mittels jener Kompensationsenergie, welche nach Lundeby ermittelt wird. Eine Implementierung der Störgeräusch-Subtraktion basierend auf [Chu 1978] könnte das Tool um einen wichtigen Bereich ergänzen. Weitere Zusatzoptionen wären denkbar und hilfreich:

- Vergleichsgeraden basierend auf optimalen Nachhallzeiten bzw. anzustrebenden Werten nach Norm
- Formel zur Nachhallzeitberechnung entsprechend relevanter Normen auf Basis der Raumgeometrie
- Automatisiert erstellte Zusammenfassung interessierender Ergebnisse (z.B. für Ausdruck)
- Individuelle Auswertungsbereich für Gütemaße und Messgrößen