TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Fakultät I

Institut für Sprache und Kommunikation
Fachgebiet Audiokommunikation

Zur Standardisierung der Akustik musikalischer Aufführungsräume

Magisterarbeit

vorgelegt von

Stefan Kaak

[redacted]

03. Januar 2013

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Zweigutachter: Dr. Volker Straebel

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt gegenüber der Fakultät I der Technischen Universität Berlin, dass die vorliegende, dieser Erklärung angefügte Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Ich reiche die Arbeit erstmals als Prüfungsleistung ein.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich, dass ich über fachübliche Zitierregeln unterrichtet worden bin und verstanden habe. Die im betroffenen Fachgebiet üblichen Zitiervorschriften sind eingehalten worden. Eine Überprüfung der Arbeit auf Plagiate mithilfe elektronischer Hilfsmittel darf vorgenommen werden.

Berlin, 02. Januar 2013

Stefan Kaak

Zusammenfassung

Die Wissenschaft der Raumakustik besteht seit mehr als 100 Jahren, in denen zahlreiche Erkenntnisse zusammengetragen wurden. Die Akustik eines musikalischen Aufführungsraumes lässt sich heute mit zufriedenstellender Genauigkeit durch raumakustische Modelle voraus bestimmen. Mit der Forschung geht auch ein Standardisierungsprozess einher. Diese Arbeit vollzieht diese Entwicklung raumakustischer Vorgaben nach. Im Fokus stehen dabei aus der Raumimpulsantwort abgeleitete Schallfeldmessgrößen, raumakustische Kriterien, welche verschiedene Aspekte der Hörsamkeit beschreiben und mit der subjektiven Wahrnehmung der Raumakustik korreliert sind. Es werden zunächst die Kriterien ermittelt, welche in den Standardisierungsprozess eingeflossen sind. Anhand von Fachliteratur wird die Entwicklung dieser Kriterien nachvollzogen, empfohlene Richtwerte werden erfasst. In einem letzten Schritt werden Forschung und Standardisierung miteinander in Beziehung gesetzt und die Ausprägung der Standardisierung wird diskutiert. Abschließend wird ein zeitlicher Wandel der Vorstellung, was eine eine gute Akustik ausmacht, beschrieben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Methodik **3**

2.1 Überlegungen zur Vorgehensweise 3

2.2 Quellen 4

2.2.1 Normen und Standards 4

2.2.2 Überblicksdarstellungen 6

2.2.3 Einzeluntersuchungen 7

2.3 Raumakustische Parameter 9

2.3.1 Nachhallzeit 9

2.3.2 Deutlichkeit 10

2.3.3 Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient 11

2.3.4 Schwerpunktzeit 12

2.3.5 Frühe Abklingzeit 12

2.3.6 Klarheitsmaß 13

2.3.7 Stärkemaß 14

2.3.8 Frühe und späte Seitenschallgrade 14

2.3.9 Frühe und späte Unterstützung 16

3 Ergebnisse **19**

3.1 Normen und Standards 19

3.1.1 USA, Circular of the NBS, 1926 19

3.1.1.1 Architectural Acoustics, 1926 20

3.1.1.2 Architectural Acoustics, 1930 21

3.1.1.3 Architectural Acoustics, 1931 21

3.1.1.4 Architectural Acoustics, 1938 22

3.1.2 Österreich, ÖNORM B8115-3, 1949 22

3.1.3 BRD, DIN 52216, 1965 23

3.1.4 BRD, DIN 18041, 1968 24
3.1.4.1 DIN 18041:1968-10 24
3.1.4.2 DIN 18041:2004-05 25
3.1.5 DDR, TGL 10687/04, 1970 27
3.1.5.1 TGL 10687/04, 1970 28
3.1.5.2 TGL 10687/04, 1981 28
3.1.5.3 TGL 10687/04, 1982 30
3.1.6 ISO 3382, EN ISO 3382 und DIN EN ISO 3382, 1975 30
3.1.6.1 ISO 3382:1975 31
3.1.6.2 ISO 3382:1997 31
3.1.6.3 ISO 3382-1:2009-07 33
3.2 Einzeluntersuchungen 37
3.2.1 Watson, 1924-1927 37
3.2.2 Bagenal, 1925 40
3.2.3 Lifshitz, Beljajew, 1925-1932 40
3.2.4 Sabine, P. E., 1928 42
3.2.5 Schuster und Waetzmann, 1929 43
3.2.6 Bell Telephone Laboratories, 1930-1947 45
3.2.7 Békésy u. a., Ungarn, 1931-1954 48
3.2.8 Knudsen und Rettinger, 1931-1954 51
3.2.9 Furrer, 1942 52
3.2.10 Winckel, 1950-1958 53
3.2.11 Parkin u. a., 1952-1953 55
3.2.12 Kuhl, 1954-1978 56
3.2.13 Reichardt u. a., Technische Universität Dresden, 1954-1981 58
3.2.14 Beranek u. a., 1955-2000 60
3.2.15 Nickson und Muncey, 1953-1959 63
3.2.16 Shankland u. a., 1960-1968 64
3.2.17 Hawkes und Douglas 1971 64
3.2.18 Drittes Physikalisches Institut der Universität Göttingen,
Meyer, E. u. a., 1956-1982 65
3.2.19 Lehmann und Wilkens, 1975-1980 69
3.2.20 Jordan, 1981 70
3.2.21 Gade, 1989 71
3.2.22 Fasold und Stephenson, 1993 71

3.2.23 Bradley und Soulodre, 1994-2000 72
3.2.24 Choi und Fricke, 2005 74
3.3 Monographien und Sammelbände 75
3.3.1 1920 bis 1949 75
3.3.2 1950 bis 1979 83
3.3.3 1980 bis 2009 108

4 Diskussion 135
4.1 Mittlere Nachhallzeit 135
4.1.1 Empfehlungen aus der Wissenschaft 135
4.1.2 Standardisierung 154
4.2 Frequenzverlauf der Nachhallzeit 156
4.2.1 Empfehlungen aus der Wissenschaft 156
4.2.2 Standardisierung 159
4.3 Sonstige raumakustische Kriterien 161
4.3.1 Deutlichkeit D und Klarheitsmaß für Sprache C_{50} 161
4.3.2 Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient IACC 162
4.3.3 Schwerpunktzeit t_S 163
4.3.4 Frühe Abklingzeit EDT 165
4.3.5 Klarheitsmaß für Musik C_{80} 167
4.3.6 Stärkemaß G 168
4.3.7 Frühe und späte Seitenschallgrade LF, LFC und LG 170
4.3.8 Frühe und späte Unterstützung 172
4.4 Veränderung der Vorstellung über eine „gute Akustik“ 173
4.5 Fazit 175

Normen und Standards 177

Literaturverzeichnis 179

A Liste der Empfehlungen 191

B Abbildungsverzeichnis 199

C Tabellenverzeichnis 203

Abkürzungverzeichnis

AKF	Auto-Korrelationsfunktion
AST	Österreichisches Normungsinstitut
ASW	Scheinbare Schallquellenbreite
BQI	Binaural Quality Index
C_{50}	Klarheit für Sprache
C_{80}	Klarheit für Musik
CEN	Europäisches Komitee für Normung
D_{50}	Deutlichkeit
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDT	Frühe Abklingzeit
G	Stärkemaß
IACC	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient
IACF	Interauraler Kreuzkorrelationsfunktion
ISO	Internationale Organisation für Normung
J_{LF}	Früher Seitenschallgrad, ISO 3382-1:2009-07
J_{LFC}	Früher Seitenschallgrad, ISO 3382-1:2009-07
LEV	Zuhörereinhüllung
LF	Früher Seitenschallgrad nach Barron, engl.: Lateral Fraction
LFC	Früher Seitenschallgrad nach Kleiner, engl.:Lateral Fraction Coefficient

LG	Später Seitenschallgrad
L_J	Später Seitenschallgrad, ISO 3382-1:2009-07
$L_{J,avg}$	Später Seitenschallgrad, ISO 3382-1:2009-07
NBS	National Bureau of Standards
NIST	National Institute of Standards and Technology
ÖNORM	Österreichische Norm
SCIE	Science Citation Index Expanded
ST1	Support 1
ST_{early}	Frühe Unterstützung
ST_{late}	Späte Unterstützung
TC	Technisches Komitee der ISO
t_S	Schwerpunktzeit
TU Berlin	Technische Universität Berlin
T	Nachhallzeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPn	Versuchspersonen

1 Einleitung

Der Beginn der Raumakustik als wissenschaftliche Disziplin wird durch die Untersuchungen von Walter C. Sabine eingeleitet. In seinen Studien der Akustik von Sälen und Räumen der Harvard Universität Ende des 19. Jahrhunderts formuliert Sabine die Nachhallzeit, ein raumakustisches Kriterium, das auch heute noch elementare Bedeutung zur quantitativen Beschreibung der Raumakustik besitzt. Sein Forschungsgegenstand, die Nachhalltheorie und die Absorptionseigenschaften verschiedener Materialien, wird von der Forschungswelt aufgegriffen. Diverse Wissenschaftler widmen sich nach Sabine der Optimierung der Bestimmung der Nachhallzeit und der Absorptionskoeffizienten.

Neben der Bestimmung der Absorption und der Nachhallzeit eines Raumes rückt auch die Frage nach der optimalen Akustik großer Auditorien in den Mittelpunkt. Im Gegensatz zur relativ einfachen Objektivierbarkeit der Sprachverständlichkeit lassen sich für die Rezeption musikalischer Darbietungen keine allgemeingültigen Regeln aufstellen. Die Hörsamkeit wird zunächst auf das Vorhandensein einer optimalen Nachhallzeit beschränkt. Zahlreiche Erkenntnisse ergänzen das raumakustische Verständnis und führen zu dem Schluss, dass neben der Nachhallzeit weitere Aspekte die Hörsamkeit eines Raumes beeinflussen.

Genaue Untersuchungen zur subjektiven Beurteilung der Akustik von musikalischen Aufführungsräumen ab etwa 1950 führen zu der Erkenntnis, dass die subjektive Wahrnehmung der Raumakustik ein mehrdimensionaler Prozess ist und die Nachhallzeit für die Beurteilung gar eine untergeordnete Rolle einnimmt. Die Forschung mündet in der Formulierung weiterer raumakustischer Parameter, die das Schallfeld in einem Raum energetisch, räumlich oder zeitlich beschreiben. Aus kompositorischer Sicht behält die Nachhallzeit dennoch bis heute einen gewissen Status, obwohl diverse subjektive raumakustische Kriterien nachgewiesen und mit den weiteren objektiven Messgrößen besser korreliert sind.

Mit der Forschung und den daraus erhaltenen Erkenntnissen geht auch eine Standardisierung einher, welche spätestens seit Ende des 20. Jahrhunderts weitere raumakustische

Kriterien berücksichtigt.

Das Ziel dieser Magisterarbeit wird es sein, die historische Entwicklung raumakustischer Vorgaben für musikalische Aufführungsräume chronologisch nachzuvollziehen. Dazu wird ein Zusammenhang zwischen den wichtigen raumakustischen Untersuchungen und den daraus resultierenden Vorgaben und Standards hergestellt. Insbesondere sollen Kontinuität und Konsens der Forschung und Standardisierung bezüglich der Vorstellung einer guten Akustik zum Ausdruck kommen. Ob und wie diese beiden Aspekte über den Verlauf der Forschung und Entwicklung der Vorgaben ausgeprägt sind, soll gezeigt werden.

Um das formulierte Ziel der Magisterarbeit umzusetzen, wird die Arbeit in drei Kernkapitel gegliedert. In Kapitel 2 wird die Methodik beschrieben. Im Abschnitt 2.2 werden zunächst die Recherche und die Quellen hinsichtlich Zugänglichkeit und Relevanz beschrieben. Eine kurze Schilderung des historischen Hintergrundes sowie eine theoretische Aufarbeitung der für diese Arbeit relevanten raumakustischen Parameter folgt im Anschluss im Unterkapitel 2.3.

Kapitel 3 verarbeitet den Inhalt der Quellen. Das Kapitel ist in drei Abschnitte gegliedert, in denen der Weg von Forschung zur Standardisierung aufgearbeitet wird. Zunächst wird die Standardisierung chronologisch und inhaltlich erschlossen (Abschnitt 3.1). Inhaltlich relevant sind hier vorwiegend Richtlinien in Bezug auf raumakustische Parameter zur Charakterisierung oder Prädiktion der Akustik musikalischer Aufführungsräume. In Abschnitt 3.2 wird die Forschungsliteratur in Form von Fachzeitschriftenartikeln, die auch teilweise in Abschnitt 2.3 betrachtet werden, auf Empfehlungen bezüglich der Parameter durchsucht. Abschnitt 3.3 beschreibt Überblicksdarstellungen in Form von Monographien und Sammelbänden, die sich mit den raumakustischen Parametern auseinandersetzen. Relevant sind quantitative Empfehlungen bezüglich der Parameter und Aussagen über die Beschaffenheit einer optimalen Akustik musikalischer Aufführungsräume.

In einer abschließenden Diskussion in Kapitel 4 werden die gesammelten quantitativen raumakustischen Empfehlungen und Richtlinien ausgewertet und miteinander verglichen. Eine chronologische Entwicklung der Vorgaben wird anhand der Empfehlungen aus Forschung und Wissenschaft nachvollzogen. Die Vorstellung darüber, was eine gute Akustik ausmacht, wird resümiert, insofern sich dies aus der betrachteten Literatur erschließen lässt.

2 Methodik

2.1 Überlegungen zur Vorgehensweise

Der Ausgangspunkt zur Aufarbeitung der Entwicklung raumakustischer Vorgaben sind die Vorgaben selbst. Diese drücken sich vorwiegend in Standards und Normen aus, in denen objektive Messgrößen zur quantitativen Erfassung verschiedener raumakustischer Qualitäten spezifiziert werden. Daher liegen die ersten Schritte dieser Arbeit in der Recherche der wesentlichen Standards und der Erfassung der darin aufgeführten raumakustischen Parameter. Zugleich wird dadurch das Themengebiet eingrenzt: Die standardisierten Messgrößen bilden die Menge der hier behandelten im Kontrast zur Masse an über den Verlauf der Forschung vorgeschlagenen Parametern.

Einem Nachvollziehen der Entwicklung dieser Vorgaben sind vier Fragen vorangestellt, diese Anordnung stellt keine Reihenfolge dar:

(1) Aus welchen raumakustischen Untersuchungen resultieren die standardisierten Parameter?

(2) Welche quantitativen Empfehlungen bezüglich der Parameter lassen sich aus diesen Untersuchungen oder Folgeuntersuchungen ableiten bzw. herausfiltern?

(3) Welche weiteren Empfehlungen existieren in Überblicksdarstellungen (Monographien und Sammelbänden)?

(4) Lässt sich eine Vorstellung einer 'guten Akustik' aus der betrachteten Literatur ableiten und wie ist diese ausgeprägt?

Die der Arbeit zugrunde liegende Methode ist eine Quellenrecherche. Es lassen sich drei Typen von Quellen abgrenzen, die für die Arbeit relevant sind:

- Normen und Standards
- Aufsätze in Fachzeitschriften (Einzeluntersuchungen)
- Monographien und Sammelbände (Überblicksdarstellungen)

2.2 Quellen

2.2.1 Normen und Standards

Recherche

In erster Linie galt das Interesse der internationalen Standardisierungsorganisation ISO, der europäischen Organisation CEN, dem Deutschen Institut für Normung DIN sowie US-amerikanischen Standards. Die Suche wurde auf Richtlinien und Empfehlungen des VDI, des Österreichischen Normungsinstitutes AST sowie auf sonstige ins Englische übersetzte nationale Standards erweitert.

Die Recherche der Normen und Standards wurde systematisch mittels der Referenz-Datenbank Perinorm (Per, 2012) durchgeführt, welche die Bibliothek der TU Berlin zur Verfügung stellt. Die Datenbank bietet eine umfangreiche Suchfunktion, mit der nationale Standards von 23 Ländern sowie europäische und internationale Normen recherchiert werden können. Des Weiteren wurde die Suche nach US-amerikanischen Standards über eine Liste im Anhang von (Bies u. Hansen, 2003) fortgesetzt. Motivation hierfür waren die Menge und Unübersichtlichkeit der Suchergebnisse in der Perinorm-Datenbank, da alle Fassungen und Entwürfe der zu den Suchkriterien passenden Richtlinien aufgeführt werden. Über diesen Weg ließen sich auch in anderen Monographien oder Sammelbänden Standards recherchieren, die nicht in der Perinorm-Datenbank enthalten sind.

Zugänglichkeit

Die Zugänglichkeit internationaler und nationaler Normen ist sehr unterschiedlich. Sämtliche oben genannte Normen lassen sich über Perinorm recherchieren. Neben der Dokumentennummer und dem Titel bietet die Datenbank umfangreiche Informationen, wie bspw. dem Status, der internationalen Übereinstimmung oder der Inhaltsangabe. Dadurch kann die Relevanz der jeweiligen Norm für diese Arbeit abgeleitet werden.

Richtlinien des DIN sind über Perinorm im Volltext verfügbar, insofern sie den Status einer gültigen Norm besitzen. Dies schließt auch internationale und europäische Richtlinien ein, die in das DIN-Regelwerk übernommen wurden. Bei zurückgezogenen DIN-Richtlinien verweist Perinorm in der Regel auf Normen-Sammelbände (DIN-Taschenbuch),

in denen diese abgedruckt sind. Die Verfügbarkeit dieser Sammelbände über die Bibliothek der TU Berlin ist allerdings eingeschränkt, so dass bei der Recherche in zwei Fällen auf das DIN-Normen-Archiv der Zentral- und Landesbibliothek Berlin ausgewichen werden musste.[1]

Internationale Richtlinien sind mit Hilfe von Perinorm nur recherchierbar. Dies schließt jedoch Informationen über den Beschaffungsweg nicht mit ein. Sammelbände, in denen die Normen abgedruckt sind, sind dem Verfasser trotz umfassender Recherche unbekannt. Insbesondere ließ sich für ein Dokument[2] kein Zugang erschließen, während die Folgeversionen durch die europäische und deutsche Ratifizierung über die oben beschriebenen Wege verfügbar waren.

Richtlinien weiterer nationaler Normungsinstitute sind über Perinorm nur durch käufliche Erwerbung zugänglich. Davon wurde im Rahmen dieser Magisterarbeit abgesehen. Dies betraf mehrere Richtlinien, von denen zumindest eine[3] für die nähere Betrachtung interessant gewesen wäre. Des Weiteren umfasst die Perinorm-Datenbank die Datensätze ehemaliger Staaten, wie der DDR oder der Sowjetunion, nicht. Der Zugang zu DDR-Normen ist teilweise durch das Bundesarchiv gegeben. Allerdings müssen Dokumentennummer und Titel zunächst bekannt sein, damit eine Anfrage in diesem Archiv bearbeitet werden kann.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass nahezu alle relevanten Standards im Volltext erschlossen werden konnten. Die Gesamtheit aller über Perinorm recherchierbaren Richtlinien inklusive der verschiedenen Versionen kann durch internationale und sachliche Übereinstimmungen in redundant und distinktiv unterteilt werden. Die Tatsache, dass die wichtigen internationalen Richtlinien in das deutsche Normen-Regelwerk übernommen wurden, ermöglicht und vereinfacht ihre Zugänglichkeit. Einige Richtlinien, die nicht im Volltext erschlossen werden konnten, wurden gleichzeitig anhand ihres Perinorm-Eintrages bzw. durch ihren Titel als inhaltlich irrelevant eingestuft.[4] Zu den Richtlinien, für die kein Zugang erschlossen werden konnte, deren mögliche Relevanz sich jedoch durch Literaturverweise andeutete, zählen folgende:

- TGL 10687/04 Ausgabe 1970 und 1982,

[1] Dabei handelte es sich um den Norm-Entwurf DIN 18041:2003-04 und die zurückgezogene Richtlinie DIN EN ISO 3382:2000-03.

[2] Die erste Ausgabe der ISO 3382:75-12

[3] ÖNORM B-8115-3 - Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik

[4] ÖNORM B 8115-3 (Ausgaben 1996 bis 2005), ISO 3382:75-12, GOST 24146-80

- ÖNORM B 8115, alle Ausgaben

Darüber hinaus ist nicht bekannt, ob weitere Versionen der TGL 10687/04 existieren.

2.2.2 Überblicksdarstellungen

Diese Literatur ist in Form von Monographien und Sammelbänden gegeben. Es handelt sich dabei um Werke, in denen ein oder mehrere Autoren ihre Forschungserkenntnisse oder die Erkenntnisse anderer zusammenfassen. Dabei hat die Literatur nicht immer sekundären Charakter. Während es üblich ist, Forschungsergebnisse einzelner Untersuchungen in Form von wissenschaftlichen Aufsätzen in Fachzeitschriften zu publizieren, gibt es auch Beispiele, in denen Wissenschaftler ihre Erkenntnisse gesammelt als Monographie veröffentlichen. Bei der Durchsicht dieser Medien lassen sich zwei Schwerpunkte unterscheiden: Zum einen interessieren quantitative Empfehlungen bezüglich der in die Standardisierung aufgenommenen Parameter. Durch die Nähe dieses Schwerpunkts zur Standardisierung wird hierauf der Fokus liegen. Zum anderen ist die Entwicklung oder die Veränderung der Vorstellung interessant, was eine gute Akustik ausmacht, sofern dieser Sachverhalt in der gewählten Literatur zum Ausdruck kommt. Problematisch dabei ist, dass es sich nicht vorher einschätzen lässt, welchen Umfang diese Quellenrecherche benötigt. Die Menge der verfügbaren Literatur ist sehr groß und die Publikationsjahrgänge reichen zeitlich sehr weit zurück, in etwa bis in das frühe 20. Jahrhundert.

Recherche

Die Literaturrecherche wird systematisch durchgeführt. Das bedeutet, dass Bibliotheksdatenbanken mit geeigneten Stichworten, wie 'architectural acoustics' oder 'room acoustics', durchsucht werden. Vorrangig wird hierzu zunächst auf die Datenbank der Bibliothek der TU Berlin zurückgegriffen. Darüber hinaus stehen bei Bedarf Datenbanken weiterer Universitäten Berlins sowie die Datenbanken des Fernleiheportals KOBV für die Recherche zur Verfügung. Sicher werden sich auch in den herangezogenen Publikationen durch Literaturverweise weitere geeignete Publikationen recherchieren lassen.

Zugänglichkeit

Die Monographien und Sammelbände lassen sich zum Großteil über die Bibliothek der TU Berlin leihen. Doch sind hier nicht alle relevanten bzw. zunächst recherchierten Publikationen zugänglich. Für diese lässt sich in der Regel ein Zugang über das Fernleiheportal des KOBV erschließen.

2.2.3 Einzeluntersuchungen

Die Ergebnisse einzelner oder einer Folge von Untersuchungen wurden in Form von wissenschaftlichen Aufsätzen in Fachzeitschriften, aber auch in Dissertationen publiziert. Es werden diejenigen Untersuchungen betrachtet, deren Ergebnisse sich in der späteren Standardisierung wiederfinden.

Recherche

Auf die Recherche der Aufsätze entfällt vermutlich der größte Aufwand der Literatursuche. In Vorüberlegungen wurden Vor- und Nachteile der üblichen Recherche-Methoden bezüglich der Verwendung in dieser Arbeit erörtert. Eine systematische Suche hätte hier den Nachteil eines erheblichen Aufwandes. Das Zeitfenster der in Frage kommenden Publikationen reicht in etwa bis zum Jahr 1920 zurück. Für eine solche Suche würden Datenbanken der Verleger der Journale oder die Datenbank 'ISI Web of Knowledge' in Frage kommen. Ein Nachteil dieser Datenbank ist jedoch, dass sie viele ältere Aufsätze nicht erfasst.

Die rückwärts gerichtete Suche anhand von Literaturverzeichnissen übersichtsartiger Werke oder die vorwärts gerichtete Recherche mittels des 'Science Citation Index Expanded' (SCIE) würden einen geringeren Aufwand bedeuten. Als Anhaltspunkt für eine rückwärts gerichtete Recherche können Zusammenfassungen raumakustischer Parameter dienen, wie sie in den Dokumenten (Ahnert u. Tennhardt, 2008) und (Lacatis u. a., 2008) vorzufinden sind. Über die in diesen Werken referenzierte Literatur werden die Urheber und die entsprechenden Veröffentlichungen der relevanten raumakustischen Parameter ausgemacht und die grundlegende Forschungsliteratur wird erschlossen. Zum Nachvollziehen der Forschung und zur Ermittlung quantitativer Empfehlungen bezüglich der Parameter ist es notwendig, weitere Veröffentlichungen der entsprechenden Wissenschaftler bzw.

des entsprechenden Forschungsfeldes heranzuziehen. Weiterführende Studien, z. B. zur Ermittlung der subjektiven Präferenz von Zuhörern, lassen sich anhand des SCIE oder über eine systematische Suche in den entsprechenden Datenbanken recherchieren. Die systematische Recherche einzelner Schwerpunkte (Parameter, Zeitraum) ist notwendig, um die relevante Forschungsliteratur lückenlos zu erschließen. Als Datenbank kommt das 'ISI Web of Knowledge' in Frage, welches Einträge der Journale zahlreicher Wissenschaften umfasst und eine Suche per SCIE ermöglicht.

Ein weiterer Ansatz der Recherche sind die Literaturverweise der betrachteten Standards, sofern sie angegeben werden. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die referenzierten Dokumente nicht geeignet sind um die Forschungsergebnisse, die in den Richtlinien verarbeitet wurden, nachzuvollziehen. Die Verweise bezüglich der Forschungsliteratur sind nicht nur lückenhaft, sondern auch irrelevanter technischer Natur. Der Zweck der bibliografischen Verweise der Normen besteht eher darin, die beschriebenen Messverfahren und Messgrößen nachzuvollziehen als die Forschung, auf die diese zurückgehen.

Zugänglichkeit

Die Zugänglichkeit der Forschungsliteratur ist mit wenigen Ausnahmen als gut zu bezeichnen. Wie oben bereits erwähnt, sind die relevanten Forschungsarbeiten in Fachzeitschriften, Konferenzberichten, Dissertationen oder Monographien veröffentlicht worden.

Wissenschaftliche Aufsätze aus Fachzeitschriften lassen sich auf verschiedenen Wegen erschließen. Ältere Ausgaben sind im Zeitschriftenmagazin der Bibliothek der TU Berlin oder anderen Bibliotheken in gedruckter Form archiviert. Über die Datenbank Zeitschriftendatenbank lässt sich in der Regel ein Zugang zu Artikeln diverser Zeitschriften per Fernleihe erschließen, falls diese nicht in der Bibliothek der TU archiviert sind. Neuere Ausgaben von Fachzeitschriften sind über Online-Ressourcen der Bibliothek und des Fachgebiets für Audiokommunikation der TU Berlin zugänglich, liegen also in digitaler Form vor. Die wichtigsten Zeitschriften sind:

- Journal of the Acoustical Society of America
- Acustica bzw. Acta Acustica united with Acustica
- Journal of Sound and Vibration
- Applied Acoustics

Dissertationen sind häufig nur in der Bibliothek der Universität erhältlich, an welcher der jeweilige Wissenschaftler promovierte. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten werden in der Regel aber auch auf anderen Wegen veröffentlicht, z. B. als Artikel in einer Fachzeitschrift. Es kann jedoch sein, dass einige relevante Informationen in der komprimierten Form von Artikeln weggelassen wurden, so dass es sich empfiehlt, die Dissertationen per Fernleihe zu erschließen.

Konferenzberichte sind teilweise schwierig oder gar nicht zu beschaffen. Sie werden entweder eigenständig als Sammelband in mehreren Ausgaben oder als Ergänzungsteil bzw. Beiheft einer Zeitschrift veröffentlicht. Das Dokument (Gade, 1992), der Bericht eines Vortrags vom 14. Internationalen Kongress für Akustik (ICA), ist beispielsweise nicht zugänglich. Der Website des ICA kann man entnehmen, dass die Berichte der 14. Tagung nicht mehr erhältlich sind. Das Dokument wäre für diese Arbeit allerdings relevant, da sich ein wesentlicher Standard darauf bezieht.

2.3 Raumakustische Parameter

Dieses Unterkapitel dient der Erläuterung der in den Standards aufgenommenen raumakustischen Parameter. Es soll knapp und chronologisch die Entwicklung der Parameter sowie deren Definition geschildert werden. Die Chronologie und die Anordnung der Parameter richtet sich nach dem Erscheinungsjahr der entsprechenden Veröffentlichungen. Die zugehörigen Untersuchungen gingen diesen Veröffentlichungen zum Teil weit voraus.

2.3.1 Nachhallzeit

Um 1900. Die Nachhallzeit ist der wohl bekannteste raumakustische Parameter. Er geht auf Walter C. Sabine (1922) zurück, der diese in seinen Studien der Akustik von Sälen und Räumen der Harvard Universität Ende des 19. Jahrhunderts formuliert. Der Parameter gilt über eine lange Zeit als einziges und wichtigstes raumakustisches Kriterium zur Erzielung einer guten Hörsamkeit. Auch nachdem Forschungserkenntnisse und weitere Parameter diesen Status anzweifeln lassen bzw. widerlegen, wird an ihrer Relevanz und Kennzeichnung der raumakustischen Bedingungen festgehalten.

Die Nachhallzeit ist als diejenige Zeitspanne definiert, in der die Energie eines Schall-

feldes in einem Raum auf ein Millionstel ihres Anfangswertes nach Anregung mit einer Schallquelle (Rauschen oder Impuls) abgeklungen ist. Dies entspricht einer Abnahme des Schallpegels um 60 dB.[5] Ihr Wert ist proportional zu dem Quotienten aus Raumvolumen V und äquivalenter Absorptionsfläche A. Formel 2.2 gibt die Berechnung der Nachhallzeit anhand des Volumens und der Absorption eines Raumes nach der Sabine'schen Nachhalltheorie wieder. Darüber hinaus gibt es weitere Nachhalltheorien (z.B. von Eyring), die darauf aufbauen und für bestimmte Bedingungen als genauer angesehen werden, als die Sabine'sche Nachhalltheorie. Es gibt verschiedene Varianten, die Messung und Bestimmung der Nachhallzeit durchzuführen. Alle Methoden basieren auf der quadrierten Raumimpulsantwort.

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \quad s \tag{2.1}$$

mit

$$A = \sum_{i=1}^{N} S_i \alpha_i + 4mV, \tag{2.2}$$

wobei S_i die Fläche mit dem Absorptionskoeffizienten α_i darstellt. Der Term $4mV$ berücksichtigt die Dämpfungseigenschaften der Luft.

2.3.2 Deutlichkeit

1953. Die Deutlichkeit (D_{50}) ist ein von R. Thiele formulierter Parameter, der den deutlichkeitserhöhenden Nutzschall der ersten 50 ms nach Eintreffen des Direktschalls am Messplatz mit dem gesamten Nachhall ins Verhältnis setzt (siehe Formel 2.3) (Thiele, 1953).

In seiner Abhandlung beschreibt Thiele ein Messverfahren und geht auf ähnliche Untersuchungen und vorgeschlagene Kriterien ein. So nahm der Wissenschaftler Zwikker eine Grenze von 62 ms, Sawade dagegen eine Grenze von 30 ms für deutlichkeitserhöhende Anfangsschallreflexionen an und beide formulierten ähnliche Parameter. Thiele beruft sich bei der Wahl der Zeitgrenze von 50 ms auf Veröffentlichungen der Wissenschaftler Haas und Meyer. Als Aussage von D_{50} führt Thiele Sprachverständlichkeit, Erkennbarkeit einzelner Musikinstrumente und Unterscheidbarkeit einzelner Noten in schnellen musikalischen Passagen an.

[5] Ist bei Messungen der Nachhallzeit der erforderliche Dynamikumfang von 60 dB nicht gegeben, kann die Nachhallzeit auch über einen Schallpegelabfall von 20 oder 30 dB bestimmt werden. Die Kennzeichnung des Dynamikumfanges, über den die Nachhallzeit bestimmt wurde, erfolgt durch einen Index: T_{60}, T_{30} oder T_{20}

Die Definition der Deutlichkeit ist bis heute unverändert geblieben. Es wurden weitere Messgrößen vorgeschlagen, die auf ähnlichen Annahmen beruhen.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)\,dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)\,dt} \tag{2.3}$$

2.3.3 Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient

1968. Der interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient IACC ist eine binaurale Messgröße, bei der die mittels Kunstkopf gemessenen Ohrsignale auf Gleichheit überprüft werden. Sie ist ein Maß für die Räumlichkeit, die Ohrsignale werden in einem bestimmten Frequenzbereich und in einer gewissen Zeitspanne miteinander verglichen. Die Messwerte des IACC liegen zwischen 0 und 1, wobei 0 die Unterschiedlichkeit und 1 die Gleichheit der Ohrsignale kennzeichnet. Der Parameter wird durch den Maximalwert der interauralen Kreuzkorrelationsfunktion (IACF) gebildet (s. Formeln 2.4 und 2.5). Der Laufzeitunterschied τ wird dabei in der Größenordnung des Laufzeitunterschiedes zwischen den Ohren ($-1ms \leq \tau \leq 1ms$) variiert. Die bei der Berechnung der IACF gewählte Zeitspanne t_1 bis t_2, ermöglicht eine Betrachtung verschiedener Energieanteile des Nachhalls und damit verschiedener subjektiver Aspekte des Räumlichkeitempfindens, wie die scheinbare Schallquellenbreite (ASW) oder die Zuhörereinhüllung (LEV). Nach Ahnert u. Tennhardt (2008) werden üblicherweise drei Zeitbereiche unterschieden:

- Early: 0 bis 80 ms
- Late: 500 bis 2000 ms
- All: 0 bis 2 s

Diese Einteilung ist allerdings nicht konsistent, die genaue Wahl der Zeitgrenzen ist von Autor zu Autor unterschiedlich. In der Forschung gibt es hierbei noch keine übereinstimmende Festgelegung.

$$IACF = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt}} \tag{2.4}$$

$$IACC = max|IACC_{t_1,t_2}(\tau)| \tag{2.5}$$

mit $p_L(t)$ und $p_R(t)$ als Schalldruck des linken bzw. rechten Ohrsignals.

Erste Überlegungen zum IACC gehen auf Untersuchungen des Wissenschaftlers Keet zurück. Dieser untersuchte den subjektiven Eindruck der Schallquellenverbreiterung anhand des Korrelationsgrades stereofoner Aufnahmen. Er schlussfolgerte, dass die Inkohärenz der (Ohr-) Signale im Zeitintervall 0 bis 50 ms nach Eintreffen des Direktschalls beim Zuhörer ein Maß für die Schallquellenbreite sei. Je größer die Inkohärenz der Signale, desto größer sei die wahrgenommene Schallquellenbreite (vgl. Keet, 1968). Damaske u. Ando (1972) definierten schließlich die heutige mathematische Form des IACC als normalisierte Kreuzkorrelation der Ohrsignale nach obiger Formel.

2.3.4 Schwerpunktzeit

1969. Die Schwerpunktzeit t_S ist das erste Moment der quadrierten Impulsantwort (Formel 2.6). Sie stellt, wie der Name verrät, den Schwerpunkt einer Raumimpulsantwort dar, ermittelt also ihren energetischen Mittelpunkt. Angeregt durch L. Cremer definierte R. Kürer (1969) die Schwerpunktzeit. Kürer erwähnt auch einen Zusammenhang zur Sprachverständlichkeit (vgl. Kürer, 1971). Auf subjektive Aspekte geht er in seinen Veröffentlichungen zur Schwerpunktzeit allerdings nicht ein. Laut Ahnert u. Tennhardt (2008) sei t_S ein Maß für den Raumeindruck und die Durchsichtigkeit bei Sprach- und Musikdarbietungen, je höher t_S, desto größer sei der räumliche Eindruck.

$$t_S = \frac{\int_0^\infty t \cdot p^2(t)\,dt}{\int_0^\infty p^2(t)\,dt} \tag{2.6}$$

Die Schwerpunktzeit wird in der Literatur in Millisekunden angegeben.

2.3.5 Frühe Abklingzeit

1970. Die frühe Abklingzeit (engl.: early-decay time, EDT) basiert auf den ersten 10 dB des Abklingvorgangs. Die gemessene Zeit, die der Schalldruck benötigt, um auf 10 dB seines Ausgangswertes abzuklingen, wird mit sechs multipliziert, um einen Dynamikumfang von 60 dB zu erhalten.

Das Konzept einer anfänglichen Nachhallzeit (engl.: initial reverberation time) stellen bereits Atal, Schroeder und Sessler vor, die diese Messgröße über die ersten 15 dB Schalldruckpegelabfall oder auf den ersten 160 ms des Abklingvorgangs beruhend bestimmen (vgl. Atal u. a., 1965). In Hörversuchen weisen beide Konzepte Vor- und Nachteile auf,

stimmen aber gut mit der subjektiv empfundenen Nachhalldauer überein. Angeregt durch die Annahmen Atals u. a., schlägt Jordan (1968) vor, die Anfangsnachhallzeit als 'Zuhörerkriterium' über die ersten 10 dB des Abklingvorgangs zu bestimmen (Jordan, 1968, S. 31 u. 33). Im Folgejahr führt Jordan die Bezeichnung 'Early Decay Time' ein, bezieht sich damit allerdings noch auf die 'initial reverberation time' Schröders (Jordan, 1969, S. 70). Die Definition der EDT in ihrer heutigen Form erfolgt durch Jordan in einer darauf folgenden Publikation (Jordan, 1970, S. 410). Auf der Suche nach einer Schallfeldmessgröße, die eine gute Vergleichbarkeit zwischen Modell- und Konzertsaalmessung gestattet und hohe Korrelationen mit subjektiven Bewertungen der Hörsamkeit aufweist, schlägt Jordan die EDT als jene Größe vor, die darüber hinaus noch einfach zu messen sei.

2.3.6 Klarheitsmaß

1973. Das Klarheitsmaß C setzt die bis zu einer bestimmten Zeit am Hörerplatz einfallende Schallenergie nach Eintreffen des Direktschalls mit der Schallenergie, die nach dieser Zeit am Hörerplatz eintrifft, nach den Formeln 2.7 und 2.8 ins Verhältnis. Heute werden dabei zwei Maße C_{80} bzw. C_{50} unterschieden, die sich auf die Darbietung von Musik bzw. Sprache beziehen.

$$C_{80} = 10\lg \frac{\int_0^{80ms} p^2(t)\,dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t)\,dt} \quad dB \tag{2.7}$$

$$C_{50} = 10\lg \frac{\int_0^{50ms} p^2(t)\,dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t)\,dt} \quad dB \tag{2.8}$$

Das Klarheitsmaß geht auf eine Dresdner Forschergruppe unter der Leitung von W. Reichardt zurück, die sich um 1970 mit der Zeit- und Registerdurchsichtigkeit von Musikdarbietungen befasste (vgl. Reichardt u. a., 1975a; Abdel Alim, 1973)[6]. Ziel war die Definition eines objektiven Maßes zur Unterscheidung von brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit. Nach Ausschluss weiterer Kriterien für diese Brauchbarkeit, unter anderem dem Hallmaß R nach Beranek, definierten die Wissenschaftler das Klarheitsmaß C_{80} für Musik auf der Grundlage eines korrigierten Hallmaßes. Zugleich lieferten sie eine Skala mit drei Kategorien, welche die Durchsichtigkeit als unbrauchbar (C_{80} < -1,6 dB)

[6]Die Definition des Parameters erfolgt in der Dissertation (Abdel Alim, 1973, S. 65-67, 94-95 u. 212). Reichardt u. a. (1975a) liefert eine Zusammenfassung der Dissertation bezüglich der Definition von C_{80}.

oder brauchbar (C_{80} > 1,6 dB) charakterisiert. Der Bereich zwischen -1,6 und 1,6 dB wird als theoretische Grenze betrachtet.

2.3.7 Stärkemaß

1976. Die Erkenntnis, dass die Lautstärke einer Darbietung auf ihre subjektive Beurteilung großen Einfluss hat, führt zur Definition des Stärkemaßes G. Es setzt den Schalldruck $p(t)$ einer ungerichteten Schallquelle mit dem Schalldruck $p_F(t)$ derselben Quelle im Freifeld im Abstand von 10 m ins Verhältnis. Die Berechnung erfolgt nach:

$$G = 10\lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t)\,dt}{\int_0^{10ms} p_F^2(t)\,dt} \quad dB \tag{2.9}$$

Über Urheber und Definition des Stärkemaßes finden sich in der Literatur verschiedene Angaben. Lehmann (1976) definiert das Stärkemaß in seiner Dissertation, da keine bisher bekannten raumakustischen Kriterien die Lautheit der musikalischen Darbietung in Konzertsälen auf geeignete Weise berücksichtigen (Lehmann, 1976, S. 67-68).[7]

Lehmann (1976) normiert in seiner Definition den Schalldruck der Schallquelle im Zähler mit deren Schallleistung, während der heutigen Definition die Verwendung von entweder Schalldrücken oder Schallleistungen zugrunde liegen. Es ergibt sich ein Unterschied zwischen Lehmanns Stärkemaß und der allgemein gebräuchlichen Berechnungsvorschrift nach Formel 2.9 von 31 dB.

2.3.8 Frühe und späte Seitenschallgrade

1981. Die seitlichen Energieanteile (engl.: lateral energy fractions) des frühen und späten Nachhalls sind Gegenstand diverser Untersuchungen, die sich mit der objektiven Erfassung des subjektiven Raumeindrucks beschäftigen. M. Barron und A. H. Marshall untersuchen an simulierten Schallfeldern den Einfluß der frühen seitlichen Reflektionen auf die subjektive Dimension 'spatial impression'. Aus ihren Experimenten leiten sie ab, dass spatial impression bzw. der Räumlichkeitseindruck mit der relativen Stärke der frühen

[7] Eine Zusammenfassung der zugrunde liegenden Untersuchung findet sich auch in Lehmann u. Wilkens (1980), inklusive der Definition von G (Lehmann u. Wilkens, 1980, S. 263).

seitlich bis 80 ms nach Eintreffen des Direktschalls einfallenden Schallfeldenergie zusammenhängt (Barron u. Marshall, 1981). Dies überführen Barron und Marshall in die Definition des Seitenschallgrades 'Early Lateral Energy Fraction' LF nach Formel 2.10, welche die frühe seitliche Schallenergie (5 bis 80 ms) ins Verhältnis zur gesamten frühen Schallenergie setzt (0 bis 80 ms). Zur Messung des LF wird nach Barron (2000) für den seitlichen Energieanteil ein Mikrofon mit einer Achter-Richtcharakteristik benutzt. Die Gesamtenergie wird dagegen mit einer omnidirektionalen Richtcharakteristik erfasst.

M. Kleiner schlägt **1989** den Seitenschallgrad LFC zur genaueren Bestimmung der seitlichen Energieanteile vor. Ungenauigkeiten der Messung nach Barron sind der Achter-Charakteristik des Messmikrofons geschuldet, durch die eine $\cos^2$-Gewichtung der seitlichen Anteile erfolgt. Durch die Benutzung einer Intensitätsmessmikrofonsonde werden die seitlichen Energieanteile nur mit dem Kosinus des Einfallswinkels gewichtet. Die Bestimmung des LFC erfolgt nach Formel 2.11. Details können in (Kleiner, 1989) nachgelesen werden.

1995. Bradley und Soulodre erkennen, dass der Raumeindruck nicht nur, wie von Barron und Marshall angenommen, vom Winkel und der relativen Stärke des frühen seitlichen Schalleinfalls abhängt, sondern auch von Stärke, Winkel und zeitlicher Verteilung des späten seitlich eintreffenden Nachhalls. Insbesondere lasse sich der Raumeindruck in zwei separate subjektive Eindrücke aufteilen (Bradley u. Soloudre, 1995a): frühe seitliche Reflexionen bewirken eine Schallquellenverbreiterung (apparent source width, ASW), späte seitliche Reflexionen dagegen eine Empfindung der Einhüllung in das Schallgeschehen (listener envelopment, LEV), wobei später Nachhall auch die Wahrnehmbarkeit der Schallquellenbreite maskiere. In ihren Ausführungen korrigieren die Wissenschaftler die Annahmen vorangegangener Untersuchungen von Barron und Marshall und schlagen den späten Seitenschallgrad LG als Maß für die Zuhörereinhüllung vor (Formel 2.12) (vgl. Bradley u. Soloudre, 1995b).

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_S^2(t)\,dt}{\int_0^{80ms} p_A^2(t)\,dt} \tag{2.10}$$

$$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_M(t)|p_L(t)|\,dt}{\int_0^{80ms} p_M^2(t)\,dt} \tag{2.11}$$

$$LG = 10\lg\left[\frac{\int_{80ms}^{\infty} p_S^2(t)\,dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t)\,dt}\right] \quad dB \tag{2.12}$$

Mit dem seitlichen Energieanteil $p_S^2(t)$ und der allseitig einfallenden Energie $p_A^2(t)$ in Formeln 2.10 und 2.12 sowie dem gemittelten Schalldruck $p_M(t)$ und der Differenz beider Schalldrücke $p_L(t)$ der Signale der Intensitätsmesssonde in Formel 2.11.

2.3.9 Frühe und späte Unterstützung

1989. Die vorangegangen Parameter beziehen sich auf die Perzeption von Darbietungen in Zuschauersälen musikalischer Aufführungsräume. Die akustischen Bedingungen, unter denen Musiker aufführen, sind dagegen Gegenstand der Untersuchungen der Forschergruppe um den dänischen Wissenschaftler A. C. Gade. 1979 beginnt er seine Studien, in denen er die Vorgehensweise bei der Entwicklung raumakustischer Parameter auf die Untersuchung der Perzeption der Aufführenden überträgt. Aus diversen Interviews mit professionellen Musikern werden subjektive Aspekte der Beurteilung der Akustik gewonnen. Gade konzentriert sich auf den Aspekt der Unterstützung, die den Musiker befähigt, sein Instrument selbst wahrzunehmen sowie andere Instrumente hören zu können. Er formuliert zunächst nach diversen Labor-Experimenten am synthetischen Schallfeld die Parameter Support (ST1 und ST2) und Early Ensemble Level (EEL) (vgl. Gade, 1989a) und überprüft die Ergebnisse anschließend in mehreren Konzertsälen mit Hilfe eines kompletten Orchesters (vgl. Gade, 1989b). In seinem zweiten Forschungsbericht formuliert er ein viertes objektives Maß, $\mathrm{ST}_{\mathrm{late}}$.

$$ST1 = 10\lg\frac{E(20...100ms)}{E(0...10ms)} \quad dB \tag{2.13}$$

$$ST2 = 10\lg\frac{E(20...200ms)}{E(0...10ms)} \quad dB \tag{2.14}$$

$$ST_{\mathrm{late}} = 10\lg\frac{E(100ms...\infty)}{E(0...10ms)} \quad dB \tag{2.15}$$

ST1 und ST2 sind logarithmische Verhältnisse aus der frühen Reflexionsenergie und dem Direktschall (siehe Formeln 2.13, 2.14). Sie beschreiben die Bedingungen für das Zusam-

menspiel der Musiker und die Hörbarkeit des eigenen Instrumentes. Der späten Unterstützung ST_{late} liegt dagegen die späte reflektierte Schallenergie zugrunde (Formel 2.15). Der Parameter bezieht sich auf die subjektive Wahrnehmung der Halligkeit und Dynamik. Alle Parameter werden nach Gade in einem Meter Abstand von der Quelle, dem Instrument des Musikers, gemessen. Die Formelzeichen $E(...)$ (Energie) stellen den Bereich der Impulsantwort dar, über dem die Integration stattfindet.

Erwähnenswert an dieser Stelle ist, dass Gade zur Messung der Bühnenmessgrößen auf der 14. Tagung der ICA einen Vortrag hielt. Der Bericht zum Vortrag könnte in Bezug auf die Standardisierung weiteren Aufschluß geben, da die Richtlinie ISO 3382:2009-10 darauf verweist. Wie im Abschnitt 2.2.3 bereits erwähnt, ist das Dokument jedoch nicht mehr erhältlich.

3 Ergebnisse

3.1 Normen und Standards

Ergebnisse der Recherche

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Richtlinie ISO 3382-1 (2009) derzeit maßgeblich die raumakustischen Bedingungen musikalischer Aufführungsräume für Mitgliedsstaaten der ISO und korrespondierender Staaten regelt. Weitere Standards nationaler Normungsinstitutionen, sofern sie existieren, normieren allenfalls die Sprachverständlichkeit in Unterrichtsräumen oder den Lärmpegel in Großraumbüros. Ausnahmen bilden die Norm der ehemaligen DDR TGL 10687/04 sowie die deutsche Norm DIN 18041, die raumakustische Aspekte über die ISO 3382-1 hinaus regeln. Die relevanten recherchierten Normen werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.[1]

3.1.1 USA, Circular of the NBS, Architectural Acoustics, 1926

Der erste Standard zur Raumakustik wurde beiläufig bei der Literaturdurchsicht erfasst. Zunächst war nicht ganz klar, ob das durch das 'National Bureau of Standards' (NBS) der USA herausgegebene Dokument mit dem Titel „Architectural Acoustics“ als Standard aufzufassen sei. Einerseits habe die Behörde, die heute den Namen 'National Institute of Standards and Technology' (NIST) trägt, laut ihrer Internetpräsenz einen nichtregulatorischen Charakter („non-regulatory federal agency“) (NIST, 2012), andererseits ist die Motivation zur Gründung jenes Amtes im Jahre 1901 vergleichbar mit einem Standardisierungsprozess auf nationaler Ebene. Nach Cochrane (1966) gründete sich das NBS

[1] Nicht erwähnt wird der britische Standard 'BS 5363 - Method for measurement of reverberation time in auditoria' von 1976, der sich offenbar an der ISO 3382 (1975) orientiert, da er laut Perinorm identisch mit dem ISO-Standard ist. Zudem konnte das Dokument nicht im Volltext erschlossen werden. Des Weiteren wurde durch einen Literaturverweis der sowjetische Standard 'GOST 24146-80 - Zuschauersäle: Meßmethoden für die Nachhallzeit' recherchiert. Allerdings konnte hierfür ebenfalls kein Zugang erschlossen werden. Beide Standards sind vermutlich irrelevant, da sie nur die Nachhallzeitmessung regeln.

Anfang des 20. Jahrhunderts, um im industriellen Fortschritt und Wettbewerb mit anderen Ländern Schritt zu halten (Cochrane, 1966, S. 15). Der Autor des Dokuments, P. R. Heyl, findet sich auch in der Publikation wieder (Cochrane, 1966, S. 244). Das Dokument, von dem es laut dem Fernleihe-Portal des KOBV vier Versionen gibt, wird im Rahmen dieser Arbeit als Standard gewertet.

Chronologische Entwicklung

3.1.1.1 Architectural Acoustics, 1926

1926 erscheint die erste Ausgabe des Dokuments, verfasst durch den „senior physicist, in charge of Sound Laboratory“ des NBS, P. R. Heyl, wie aus einer Fußnote hervorgeht (Heyl, 1926, S. 1). In dem Dokument werden die Prinzipien zur Konstruktion akustisch guter Auditorien genannt und die üblichen Fehler der raumakustischen Gestaltung aufgeführt (Echo, ’dead spots’ und Schallfokussierung, Nachhall). Zum Nachhall hält Heyl fest: „A little reverberation is necessary to satisfy our established tastes and auditory habit, and the desired amount of reverberation is found empirically to increase with the size of the auditorium.“ (Heyl, 1926, S. 4). Hierzu gibt Heyl eine Tabelle an, in der für das zur Hälfte sowie voll mit Zuschauern besetzte Auditorium für verschiedene Volumen günstige Bereiche der Nachhallzeit gegeben werden (vgl. Table 1, Heyl, 1926, S. 4) (s. Abb. 3.1). Die Daten sind in Abbildung 3.2 in einem Diagramm dargestellt. Für ein Auditorium mit einem Volumen von etwa 20 000 m^3 ergeben sich nach den Angaben 2,5 bis 2,8 s für die halbe, 1,9 bis 2,3 s für die volle Besetzung des Zuschauerraumes.[2] Die Werte seien aus der Erfahrung abgeleitet, welche aber auch lehre, dass außerhalb dieser Grenzwerte Auditorien existieren, deren akustische Eigenschaften zufriedenstellend sind. Daher seien die Richtwerte nicht als starr anzusehen. Bei der Planung von Auditorien sollte dennoch der Mittelwert der angegebenen Bereiche angestrebt werden.

Des Weiteren wird in dem Dokument eine Hilfestellung zur Berechnung der Sabine’schen Nachhallzeit inklusive einer Liste von Absorptionskoeffizienten diverser Materialien gegeben. In den Literaturangaben findet sich unter anderem Watson (1923) wieder.

[2] Diese Angaben beziehen sich genau genommen auf V = 800 000 ft^3 , was 22 653 m^3 entspricht.

TABLE I

Volume of room in cubic feet	Acceptable limits of reverberation time in seconds		Volume of room in cubic feet	Acceptable limits of reverberation time in seconds	
	Half audience	Maximum audience		Half audience	Maximum audience
10,000	0.9-1.2	0.6-0.8	400,000	2.1-2.3	1.7-2.0
25,000	1.0-1.3	.8-1.1	600,000	2.3-2.6	1.8-2.2
50,000	1.2-1.5	.9-1.3	800,000	2.5-2.8	1.9-2.3
100,000	1.5-1.8	1.2-1.5	1,000,000	2.6-2.9	2.1-2.5
200,000	1.8-2.0	1.4-1.7			

Abbildung 3.1: Abbildung der originalen Tabelle, in der Heyl (1926) den günstigen Bereich der Nachhallzeit für vollbesetzte Auditorien wiedergibt

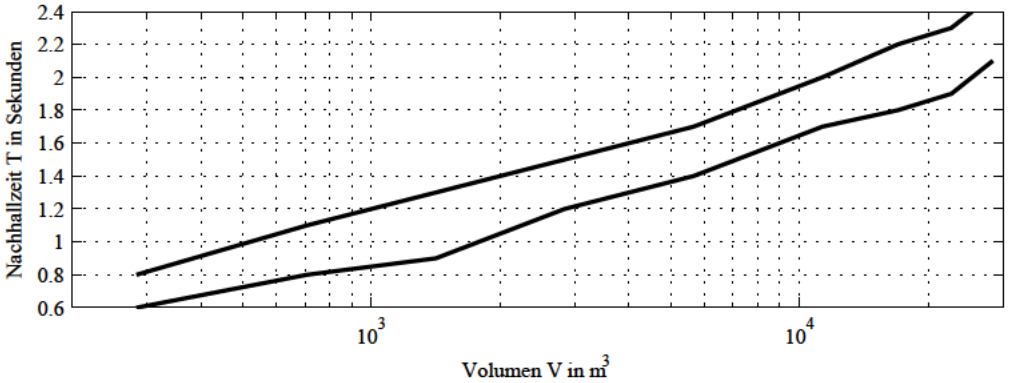


Abbildung 3.2: Empfohlener Bereich der Nachhallzeit für vollbesetzte Auditorien nach Heyl (1926), U.S. Bureau of Standards

3.1.1.2 Architectural Acoustics, 1930

1930 erscheint die zweite Version des Dokuments. Es wird um einige Stellen erweitert. Die empfohlenen Nachhallwerte werden aus der ersten Ausgabe übernommen (Heyl, 1930, S. 4).

3.1.1.3 Architectural Acoustics, 1931

Die dritte Ausgabe wird dagegen einer umfangreicheren Aktualisierung unterzogen. Während der Text noch immer weitgehend identisch mit den vorherigen Versionen ist, wird die oben genannte Tabelle (Abb. 3.1) durch ein Diagramm ersetzt, welches der Quelle (Knudsen, 1931) nachempfunden ist (Heyl, 1931, S. 4) (siehe Abb. 3.3, vgl. mit Abb. 3.30, S. 80).

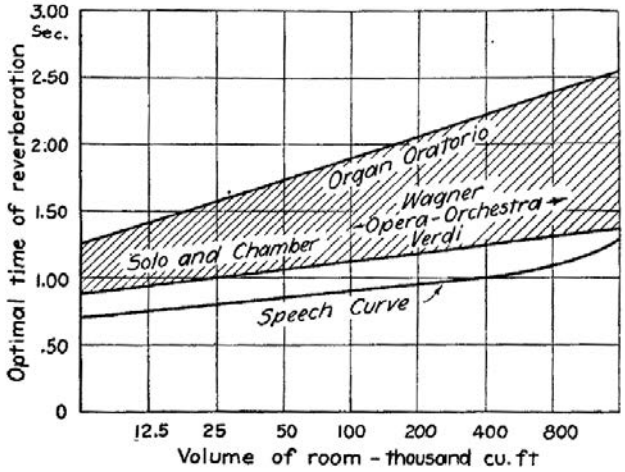


Abbildung 3.3: Eine Knudsen (1931) nachempfundene Abbildung der Ausgaben von 1931 und 1938

3.1.1.4 Architectural Acoustics, 1938

Die vierte und letzte recherchierte Version veröffentlicht Heyl mit dem Co-Autor Chrisler (Heyl u. Chrisler, 1938). Die Ausgabe wird weiter ergänzt, der Abschnitt 'Planning an auditorium' wird erweitert, Hinweise zur Reduzierung von Lärm und Schalldämmung werden hinzugefügt. Aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen werden herangezogen und teilweise zitiert (bspw. Knudsen (1932); Lifshitz (1936); Sabine (1932)). Weitere relevante Aktualisierungen sind dem Dokument nicht zu entnehmen.

3.1.2 Österreich, ÖNORM B8115-3, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau: Raumakustik, 1949

Der erste Standard zur Raumakustik, den die Recherche mittels Perinorm ergab, stammt aus Österreich. Die ÖNORM B 8115-3 existiert heute unter dem Titel „Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik“. Laut der Versionshistorie wird ein Vorgängerdokument des Standards[3] bereits 1936 publiziert. 1949 erscheint die erste Ausgabe der ÖNORM B 8115 mit dem Titel „Hochbau; Schallschutz und Hörsamkeit“. 1959 erscheint die zweite Version und mit einer weiteren wird der Standard 1981 in drei Teilen herausgegeben. Vier weitere Teile werden bis heute ergänzt. 1996 und 2005 erscheinen zwei weitere Ausgaben.

[3] ÖNORM B 2115 - Hochbau; Schutz gegen Schall und Erschütterungen

Für den österreichischen Standard konnte kein Zugang erschlossen werden. Bruckmayer (1962) bezieht sich auf die zweite Ausgabe der Norm von 1959, was einige Rückschlüsse zulässt. Nähere Informationen hierzu werden in dem Unterabschnitt zur entsprechenden Publikation in Kapitel 3.3 gegeben.

Von der Norm existieren sechs Versionen, die aktuell gültige erscheint 2005. Das Kurzreferat dieser Ausgabe besagt: „Nicht behandelt werden Räume, in denen außerordentlich hohe Anforderungen an die akustischen Verhältnisse gestellt werden, zB Opernhäuser, Konzertsäle, Tonaufnahmestudios.“ (Per, 2012, Kurzreferat ÖNORM B 8115-3, 2005). Das Kurzreferat der Ausgabe von 1996 dagegen: „Nicht eingehend behandelt werden Räume, in denen außerordentlich hohe Anforderungen an die akustischen Verhältnisse gestellt werden, z.B. Konzertsäle, Tonaufnahmestudios.“ (Per, 2012, Kurzreferat ÖNORM B 8115-3, 1996). Für frühere Ausgaben ist in der Datenbank Perinorm kein Kurzreferat vermerkt. Daraus lässt sich schließen, dass die raumakustischen Bedingungen 'besonderer' musikalischer Aufführungsräume spätestens ab 1996 und ab 2005 endgültig nicht mehr Gegenstand der Norm sind. Denkbar ist auch, dass diese Räume zwar ausgeschlossen werden, dass aber trotzdem Nachhallzeit-Richtlinien für Musikräume gegeben werden, welche die Volumen solcher Räume einschließen, wie etwa im Fall der deutschen Norm DIN 18041 (2004). Über die Ausgaben von 1981 und 1949 lassen sich keine Aussagen treffen.

Aus den Beschreibungen von Bruckmayer (1962) lässt sich ableiten, dass der 1959er Standard die Raumakustik musikalischer Aufführungsräume bezüglich einer optimalen mittleren Nachhallzeit erfasst (s. Abb. 3.40a, S. 94). Im Absatz über den Standard[4] bemerkt Bruckmayer: „Räume mit besonderer Anforderung an die Nachhallzeit, wie Konzertsäle [...] sollen bei mittleren Frequenzen [...] eine den Werten aus Bild 198 angepaßte Nachhallzeit haben“ (Bruckmayer, 1962, S. 525). Dies wird mit einem Literaturverweis auf Knudsen u. Harris (1950) versehen. Die Abbildung zur Nachhallzeit stimmt mit den Empfehlungen von Knudsen u. Harris (1950) überein (vgl. mit Abb. 3.33, S. 84).

3.1.3 BRD, DIN 52216, Messung der Nachhallzeit in Zuhörerräumen, 1965

Die DIN 52216 (1965) ist die erste Richtlinie des DIN auf dem Gebiet der Raumakustik. Das vierseitige Dokument beschreibt ein Verfahren zur Messung der Nachhallzeit. Es

[4] „2.1 Günstige Nachhallzeit nach ÖNORM B 8115“ (Bruckmayer, 1962, S. 525)

enthält die Definition der Nachhallzeit, unterscheidet zwischen dem besetzten und unbesetzten Zustand des Zuhörerraumes, beschreibt die Messgeräte und deren erforderliche technische Toleranzen und erläutert die Anfertigung eines Prüfberichtes. Das Ziel dieser Norm ist offenbar die Vereinheitlichung der Nachhallzeitbestimmung, so dass ein Vergleich verschiedener Messungen möglich ist. Sie nennt keinen optimalen Wertebereich oder Frequenzverlauf der Nachhallzeit.

Erwähnenswert ist, dass die Richtlinie mit einem „Sekretariats-Entwurfsvorschlag für die Messung der Nachhallzeit in Zuhörerräumen vom August 1964“ (DIN 52216, 1965, S. 3) des Technischen Komitees (TC) 43 der ISO sachlich übereinstimmt.

Die Richtlinie wird im März 2000 durch den internationalen und europäischen Standard DIN EN ISO 3382 ersetzt.

3.1.4 BRD, DIN 18041, Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, 1968

Das Dokument DIN 18041 regelt seit Oktober 1968 Aspekte der Hörsamkeit von Räumen. Die Norm wird 2003 überarbeitet und umfangreich ergänzt, im Mai 2004 wird nach einem Entwurf der gültige Standard herausgegeben. Tabelle 3.1 führt alle Fassungen auf.

Tabelle 3.1: Versionsverlauf der DIN 18041

Fassung	Datum	Dokumentennummer	Status
1	Oktober 1968	DIN 18041:1968-10	Norm
2	April 2003	DIN 18041:2003-04	Entwurf
3	Mai 2004	DIN 18041:2004-05	Norm

Chronologische Entwicklung

3.1.4.1 DIN 18041:1968-10

Die erste Fassung der DIN 18041 (1968) ist ein 4-seitiges Dokument, dass die Hörsamkeit zweier Arten von Räumen regelt: In Unterrichtsräumen, Hörsälen, Gerichtsräumen etc. soll zum einem die Sprachverständlichkeit ohne Einsatz einer elektroakustischen Anlage ermöglicht werden. Die zweite Art fasst Räume zusammen, in denen die Lärmminderung

und die Verständlichkeit von Gesprächen von Interesse ist (z.B. Kanzleien, Schalterhallen). Es werden Räume mit einem maximalen Volumen von 1 000 m^3 behandelt. Räume mit besonderen Anforderungen, wie Konzertsäle, werden ausgeschlossen. Die Norm enthält daher keine relevanten Angaben zur Standardisierung der Akustik musikalischer Aufführungsräume.

3.1.4.2 DIN 18041:2004-05

Wie Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, wird der Standard 2003 in einem Entwurf überarbeitet und 2004 als gültige Norm herausgegeben. Die Norm wird um umfangreiche Aspekte gegenüber ihrem 1968er Vorgänger ergänzt. Das Anwendungsgebiet wird ausgeweitet: Das maximale Volumen der Räume, deren Hörsamkeit geregelt wird, beträgt nun 5 000 bis 8 500 m^3. Grundsätzlich werden zwei Anwendungen unterschieden, die sich in der Entfernung (geringe und mittlere bis große) definieren, über die eine Hörsamkeit hergestellt werden soll. Konzertsäle werden noch immer namentlich von den Regelungen ausgeschlossen. Die Empfehlungen könnten aber auf „[...] Räume für allgemeine Musikdarbietungen, Mehrzweckräume (z. B. Stadthallen) sowie für Räume mit größerem Volumen bis ca. 30 000 m^3 sinngemäß angewandt werden.“ (DIN 18041, 2004, S. 4).

Allgemeine Regelungen

Die Norm gibt eine von der Nutzungsart abhängige Volumenkennzahl k an.[5] Dies ist der Quotient aus dem Raumvolumen und der Anzahl an Zuschauerplätzen, womit zwei Aspekte verarbeitet werden, die eine raumakustische Planungsphase einleiten. Zwei Angaben sind relevant (DIN 18041, 2004, S. 12, Tabelle 2):

- Musik- und Sprachdarbietung: 5 bis 8 m^3 pro Platz
- Musikdarbietung: 7 bis 12 m^3 pro Platz

Für Opernsäle kann auch die erste Empfehlung von Interesse sein. Es werden weitere Empfehlungen über die geometrische Gestaltung gegeben (DIN 18041, 2004, S. 16). Diese beinhalten:

- Die Vermeidung ungeeigneter Grundrisse (kreisförmig oder elliptisch, bezüglich der Darbietungsrichtung divergierende Trapezgrundrisse)

[5] Des Öfteren auch als spezifisches Volumen bezeichnet.

- Die Vermeidung konkav gekrümmter Wand- und Deckenflächen,

- Eine 'lichte Höhe H' für die Anordnung von Balkonen, Emporen, Rängen und Galerien über dem darunter liegenden Zuschauerraum mit H $\leq$ (0,5 bis 1,0)·L, wobei L die Tiefe des überragenden Raumes ist

- Die Einrichtung einer Sitzreihenüberhöhung

Möglichkeiten der Schalllenkung, Streuung und Absorption werden durch Bilder illustriert (DIN 18041, 2004, S. 22-23).

Nachhallzeit

Im Gegensatz zur ersten Version regelt diese Fassung die erforderliche Nachhallzeit von Räumen in Abhängigkeit ihrer Raumgröße und Nutzungsart und einem geeigneten Frequenzverlauf. Die Werte werden in drei Abbildungen präsentiert (DIN 18041, 2004, S. 14-15), wobei zwei relevant sind. Trotz der anfänglichen Einschränkungen des Raumvolumens erfasst das Diagramm zur Soll-Nachhallzeit (Abbildung 3.4, S. 27) Räume bis zu 30 000 m^3. Räume mit einem Volumen zwischen 10 000 m^3 bis 30 000 m^3, was der üblichen Spanne bei Konzertsälen entspricht, sollen eine Nachhallzeit von 1,9 s bis 2,1 s aufweisen. Gleichzeitig wird eine Formel für die Soll-Nachhallzeit gegeben:

$$T_{soll,\,Musik} = 0,45 \lg \frac{V}{m^3} + 0,07 \quad s \tag{3.1}$$

Zwischen 10 000 und 30 000 m^3 liefert Formel 3.1 Werte zwischen 1,87 und 2,08 s (genau 2 s für 20 000 m^3).

Die zweite relevante Abbildung (3.5, S. 27) gibt einen Bereich an, in dem sich die Nachhallzeit relativ zur in Abb. 3.4 vorgegebenen Nachhallzeit über der Frequenz bewegen soll. Demnach wird ein Anstieg der Nachhallzeit unterhalb von 250 Hz bis auf das etwa 1,5-fache bei 63 Hz vorgegeben. Oberhalb von 2 kHz kann ein Abfall des Nachhallwertes erfolgen. Über den gesamten Frequenzbereich ist eine Toleranz des Nachhallwertes von $\pm$20% ($\pm$0,2 s) möglich.

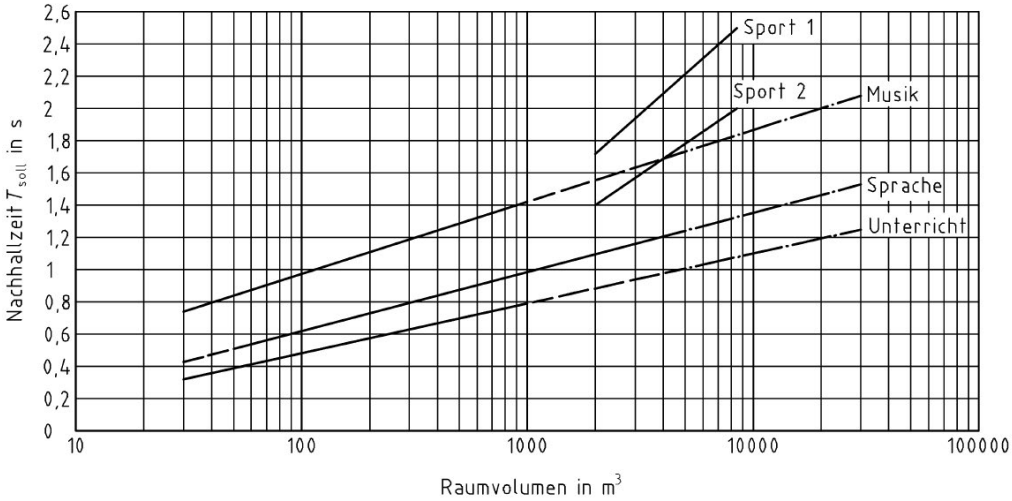


Abbildung 3.4: Sollwert der Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen und dem Nutzungszweck nach DIN 18041:04

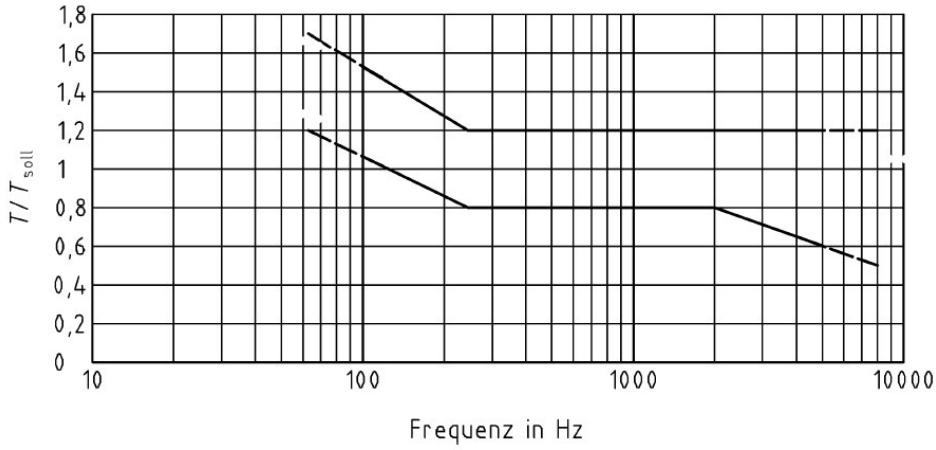


Abbildung 3.5: Bereich der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz für Musik nach DIN 18041:04

3.1.5 DDR, TGL 10687/04, Schallschutz: Schallabsorption in Räumen, 1970

1970 erscheint der DDR-Standard TGL10687/04.[6] Ob es sich dabei um die erste Ausgabe handelt, ist nicht verifizierbar, Literaturhinweise in einigen Monographien deuten darauf hin (Fasold u. Winkler, 1976; Schmidt u. Reichardt, 1984; Fasold u. a., 1987). Die dem Verfasser im Volltext vorliegende vermutlich zweite Version erscheint 1981, die dritte

[6]Die Standard TGL 10687 hat mehrere Teile. Der vierte Teil regelt die relevanten raumakustischen Größen.

1982.[7]

Chronologische Entwicklung

3.1.5.1 TGL 10687/04, 1970

Über die vermutlich erste Ausgabe des DDR Standards können nur Hinweise aus anderen Publikationen zitiert werden, da diese nicht im Volltext erschlossen werden konnte. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass der Standard die mittlere Nachhallzeit sowie den Frequenzverlauf der Nachhallzeit normiert (Fasold u. Winkler, 1976, S. 47, 48 u. 180). Widersprüchliche Angaben werden in einer weiteren Publikation gemacht (Schmidt u. Reichardt, 1984, S. 1193, 1198, 1205 u. 1275). Nach der ersten Publikation unterscheide die Norm zwischen fünf verschiedenen Verwendungszwecken, nach der zweiten lediglich nur zwei, die mit den Angaben der 1981er Ausgabe übereinstimmen. Da dies hier nicht mit einem originalen Dokument belegt werden kann, wird der Leser auf die Abschnitte der entsprechenden Publikationen verwiesen (siehe Abb. 3.46, S. 103 und Abb. 3.51, S. 110).

3.1.5.2 TGL 10687/04, 1981

Die zweite Ausgabe der Norm ist in zwei Abschnitte unterteilt. Neben dem irrelevanten ersten mit dem Titel „Maßnahmen zur Lärmbekämpfung“ erläutert der zweite Abschnitt „Maßnahmen zur Erzielung einer guten Hörsamkeit“ (TGL 10687/04, 1981, S. 1). Es werden spezifische Volumen für drei Hauptnutzungsarten vorgegeben (siehe Abb. 3.6) (TGL 10687/04, 1981, S. 5). Die Norm beziffert die relevanten spezifischen Volumen mit 7 bis 12 m^3 pro Platz für Musikdarbietungen und 5 bis 8 m^3 pro Platz für Musik- und Sprachdarbietungen. Unter der entsprechenenden Tabelle mit diesen Angaben werden Anweisungen gegeben, die besagen, dass für Räume der Hauptnutzung ’1’ mit Volumen über 150 m^3 und der Nutzung ’2’ und ’3’ mit Volumen über 1 500 m^3 raumakustische Gutachten eingeholt werden müssen. Der Absatz legt also fest, dass große Räume für Sprache und Musik,

[7] Der Standard wurde per Literaturverweis in einigen Monographien recherchiert. Auf eine Anfrage beim Bundesarchiv nach allen Versionen dieses Standards, sowie der TGL 10688/08 wurde dem Verfasser die Ausgabe der TGL 10687/04 vom Oktober 1981 zugeschickt, weitere Versionen sind dort nicht archiviert. Die TGL 10688/08 ’Bestimmung der Nachhallzeit von Räumen’ regelt die Messung der Nachhallzeit.

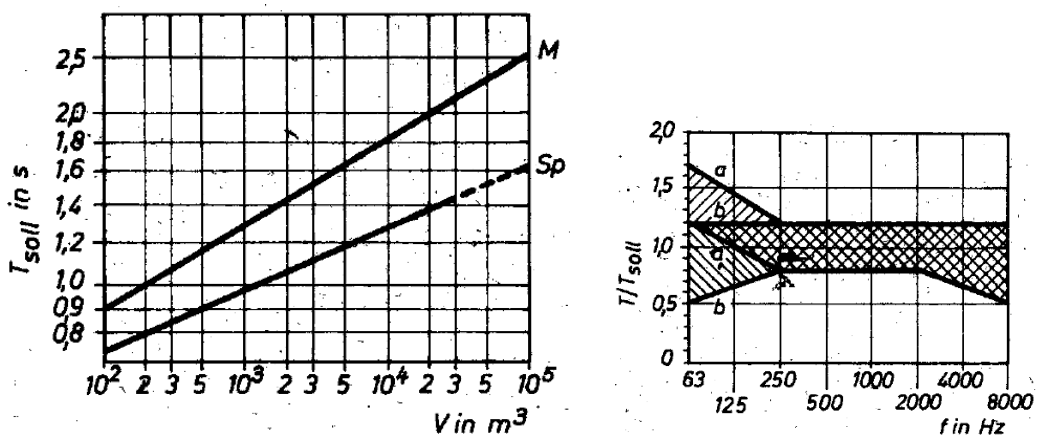
Tabelle 5

Nr.	Hauptnutzung	Raumvolumen je Platz m^3
1	Musikdarbietungen, z. B. in Konzertsälen	7 bis 12
2	Musik- und Sprachdarbietungen, z. B. in Musiktheatern, Mehrzwecksälen	5 bis 8
3	Sprachdarbietungen, z. B. in Sprechtheatern, Kongreß- und Hörsälen, Vortragsräumen	3 bis 6

Abbildung 3.6: Spezifische Volumen verschiedener Raumhauptnutzungen nach TGL 10687/04 (1981)

musikalische Aufführungsräume im Sinne der Arbeit (Kammermusik-, Opern- und Konzertsäle), durch einen Gutachter geprüft werden müssen.

Des Weiteren normiert der Standard die mittlere Nachhallzeit im besetzten Zustand gemäß den Abbildungen 3.7 a und b (TGL 10687/04, 1981, S. 6). Demnach gelte für einen 20 000 m^3 großen Saal eine Nachhallzeit von 2,0 s. Der Toleranzbereich beträgt $\pm 20\%$ ($\pm 0{,}2$ s) über den gesamten Frequenzbereich. Unterhalb von 250 Hz soll die Nachhallzeit bis 63 Hz auf das 1,5-fache ihres mittleren Wertes ansteigen. Zu hohen Frequenzen ist ein Abfall der Nachhallzeit oberhalb von 2 kHz um etwas mehr als 0,1 s pro Oktave möglich. Räume mit gemischten Hauptnutzungen seien entsprechend ihrer vorrangigen Nutzung zu planen.



(a) (b)

Abbildung 3.7: Vorgegebene mittlere Nachhallzeiten (500/1000 Hz) mit M - Musikdarbietungen, Sp - Sprachdarbietungen, (b) Frequenzverlauf der Nachhallzeit mit a - Musik, b - Sprache; nach TGL 10687/04 (1981)

3.1.5.3 TGL 10687/04, 1982

1982. Nach einem Literaturverweis einer Publikation (Fasold u. a., 1987, S. 250 u. 380) erscheint 1982 die vermutlich dritte Ausgabe der TGL 10687/04. Eine Änderung gegenüber der vorherigen betrifft die Vorgabe der mittleren Nachhallzeit. Dementsprechend werden fünf Verwendungszwecke unterschieden. Es wird auf den Abschnitt zur entsprechenden Publikation im Unterkapitel 3.3 verwiesen.[8]

3.1.6 ISO 3382, EN ISO 3382 und DIN EN ISO 3382, 1975

1975 veröffentlicht die ISO den Standard ISO 3382. Eine komplett überarbeitete Version von 1997 wird im Februar 2000 als europäische Richtlinie des CEN eingeführt. Durch die CEN-Mitgliedschaft des DIN ersetzt die Richtlinie das Dokument DIN 52216 (1965) im gleichen Jahr. Durch die Satzung des CEN müssen die nationalen Normungsinstitute der CEN-Mitgliederstaaten den Standard in ihrem Regelwerk ohne Änderung einführen und entgegenstehende Normen zurückziehen. 2009 wird die dritte Fassung des Standards herausgegeben. Diese besteht aus drei Teilen, wobei der erste für die Raumakustik musikalischer Aufführungsräume relevant ist. Einen Überblick der Versionen des internationalen Standards gibt Tabelle 3.2. Die Inhalte der im Titel dieses Abschnitts genannten Normen sind identisch. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf die deutsche Ausgabe der Norm DIN EN ISO 3382.

Tabelle 3.2: Versionsverlauf der ISO 3382

Fassung	Datum	Dokumentennummer - Titel
1	Dezember 1975	ISO 3382:1975-12 Messung der Nachhallzeit von Auditorien
2	Juni 1997	ISO 3382:1997-06 Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Bezug auf andere akustische Parameter
3	Juni 2009	ISO 3382-1:2009-07 Messung von raumakustischen Parametern - Teil 1: Aufführungsräume

[8] Die Vorgaben zur mittleren Nachhallzeit und ihrem Frequenzverlauf sind nach Fasold u. a. (1987) identisch mit denen der TGL 10687/04 von 1970. Die entsprechenden Diagramme hierzu finden sich in Abb. 3.46 auf S. 103 dieser Arbeit.

Chronologische Entwicklung

Laut der Versionshistorie der DIN EN ISO 3382 ist die Norm DIN 52216 die erste Fassung dieser Reihe im DIN-Regelwerk. Dies ist damit zu begründen, dass der Standard DIN EN ISO 3382 im März 2000 das Dokument DIN 52216 ersetzt. Die Norm ist daher nicht direkt mit der chronologischen Entwicklung der ISO 3382 zu verknüpfen und wurde bereits als eigenständige Norm im Abschnitt 3.1.3 behandelt.

3.1.6.1 ISO 3382:1975

Das Dokument liegt dem Verfasser dieser Arbeit zwar nicht im Volltext vor, doch aus der erwähnten sachlichen Übereinstimmung zum Dokument DIN 52216 lässt sich folgender Sachverhalt ableiten: Die erste Ausgabe der ISO 3382 beschreibt die Messung der Nachhallzeit. Weitere Aspekte der Raumakustik werden nicht beschrieben, daher ist der genaue Inhalt der Norm irrelevant für diese Arbeit.

3.1.6.2 ISO 3382:1997

1995 wird ein überarbeitetes Dokument in Form eines Entwurfes veröffentlicht. Nach einem weiteren Entwurf erscheint im Juni 1997 die zweite Fassung der ISO 3382. Diese entsteht aus einer Zusammenarbeit der zuständigen technischen Komitees von ISO (ISO/TC 43/SC2) und CEN (CEN/TC 126) „[...] unter intensiver deutscher Mitarbeit [...]“ (DIN EN ISO 3382, 2000, Deckblatt), wie dem nationalen Vorwort der deutschen Norm zu entnehmen ist. Im europäischem Vorwort wird darauf eingegangen, das ISO-Komitee sei für den Text, das CEN-Komitee dagegen für die europäische Übernahme verantwortlich (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 2). Die Norm erhält im Februar 2000 den Status einer europäischen Norm und wird im März 2000 auch in das Regelwerk des DIN aufgenommen.

Die zweite Fassung der ISO 3382 wurde um umfangreiche Aspekte der Raumakustik ergänzt. Die Norm beschreibt nun nicht mehr nur die Bestimmung der Nachhallzeit, sondern geht auch auf weitere raumakustische Parameter ein. In zwei Anhängen werden neue Messgrößen vorgestellt, die laut Einleitung „[...] zu einer umfassenderen Bewertung der akustischen Eigenschaften von Räumen erforderlich sind.“ (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 2). Die Anhänge sind jedoch nicht Bestandteil verbindlicher Festlegungen, sondern dienen der Förderung des Gebrauchs und der Anwendung der vorgestellten Parameter.

Im Anhang A werden vier Gruppen von Messgrößen aufgenommen, innerhalb derer noch zu entscheiden sei, welche Messgrößen sich für eine Normung eigneten (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 2). Die ausgewählten Parameter hätten „[...] sich als subjektiv wichtig erwiesen [...]“ (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 12). Basis der Parameter sei die quadrierte Impulsantwort. Anhang B stellt eine binaurale Messgröße vor. In den folgenden Abschnitten wird auf die neuen Messgrößen eingegangen.

Stärkemaß

Die Berechnung des Stärkemaßes aus der Impulsantwort geschieht nach bekannter Formel (s. Abschnitt 2.3.7). Alternativ wird eine weitere Bestimmung von G vorgeschlagen, die sich aus der Differenz der Schalldruck-Wirkpegel am Messort und im Freifeld ergeben. Für den Freifeld-Schalldruck-Wirkpegel werden verschiedene Messverfahren vorgestellt, bei denen über die Richtwirkung der Schallquelle gemittelt wird. Der Pegel könne im reflexionsarmen Raum oder im Hallraum bestimmt werden. Weiter sei eine Bestimmung von G aus der Differenz von Schalldruckpegel und Schallleistungspegel einer gleichmäßig kugelförmig abstrahlenden Quelle möglich (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 12-13).

Early Decay Time

Auf die Messung der frühen Abklingzeit wird in zwei kurzen Absätzen eingegangen. Die Bestimmung der EDT orientiere sich an der Messung der Nachhallzeit. Sie sei „subjektiv bedeutsamer“ und hinge mit der Nachhall-Empfindung zusammen (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 14).

Verhältnis zwischen früh und spät eintreffender Energie

In diesem Absatz werden vier verschiedene Parameter vorgestellt, die „in Bezug zur empfundenen Deutlichkeit, Klarheit oder des Gleichgewichts zwischen Klarheit und Nachhall oder Sprachverständlichkeit“ stehen (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 14). Je nachdem, ob die Ergebnisse auf die Darbietung von Sprache oder Musik bezogen werden, soll zwischen den Zeitgrenzen von 50 oder 80 ms als Unterscheidung zwischen früher und später Energie gewählt werden. Die vorgestellten Formeln gehen auf das Klarheitsmaß für Sprache C_{50} oder Musik C_{80} nach Reichardt (vgl. Abschnitt 2.3), die Deutlichkeit D_{50} nach Thiele und die Schwerpunktzeit t_S nach Kürer (vgl. Abschnitt 2.3) zurück. Eine Formel zur Umrechung zwischen C_{50} und D_{50} wird angegeben.

Seitenschallgrad

Als Seitenschallgrade werden der LF nach (Barron, 2000) und der LFC nach (Kleiner, 1989) spezifiziert. Formeln und Messverfahren stimmen für den LF mit der Forschungsliteratur überein (vergleiche hierzu Abschnitt 2.3.8, S. 14). Die Messung des LFC geschieht nicht mittels der von Kleiner (1989) benutzten Intensitätsmesssonde. Es soll stattdessen ein Gradientenmikrofon benutzt werden. Einen Unterschied in den Messwerten ergibt sich daraus jedoch nicht. Zusätzlich wird erwähnt, dass der LFC nach Kleiner für subjektiv genauer gehalten werde (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 15).

Binaurale Messgrößen: Der Interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient

Als binaurale Messgröße wird der interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient vorgestellt. Die Ausführungen zum IACC stimmen mit der Fachliteratur überein (vergleiche mit Abschnitt 2.3.3). Der IACC korreliere gut mit dem subjektiven Räumlichkeitseindruck. Dieser lasse sich in die 'Verbreiterung der Schallquelle' und das 'Umhülltsein' vom Schall unterteilen (vgl. DIN EN ISO 3382, 2000, S. 18). Der erste Aspekt der Schallquellenverbreiterung wird missverständlicherweise als 'Räumlichkeit' bezeichnet. Es wird erklärt, dass Anwendung und subjektive Bedeutung des IACC noch Diskussions- und Forschungsgegenstand seien und unterschiedliche Vorschläge bezüglich der Wahl der Integrationszeitgrenzen und der Frequenz-Filterung existieren (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 19). Der Standard schlägt zwei Zeitgrenzen vor, die zum einen die frühen Reflexionen bis 80 ms, zum anderen die gesamte Impulsantwort ab 80 ms abdecken („[...] t_2 gleich einer Zeit größer als die Nachhallzeit im Raum [...]“ (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 19)).

3.1.6.3 ISO 3382-1:2009-07

Die dritte und aktuelle Fassung entsteht nach zwei weiteren Entwürfen. Im Juni 2009 wird der internationale und europäische Standard EN ISO 3382-1 herausgegeben. Im Oktober desselben Jahres erhält dieser den Status einer deutschen Norm. Auf die Urheberschaft des Textes zur Norm wird dabei nur insofern eingegangen, als dass er in Abstimmung der im vorangegangenen Abschnitt genannten Komitees erarbeitet wurde. Der Standard wird nochmals um raumakustische Parameter erweitert. Diese Parameter werden, wie auch in der vorangegangenen Fassung, nicht verbindlich festgelegt, sondern eingeführt, um ihren Gebrauch und ihre Anwendung zu fördern. Weiterhin gelte die Nachhallzeit als einziges Qualitätskriterium für die Raumakustik. (vgl. DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 4).

Anhang A wurde gegenüber der Vorgängerfassung des Standards um einige Parameter ergänzt. Wie im Vorgängerdokument wurde eine Gruppierung der monoauralen Parameter, die auf demselben subjektiven Aspekt basieren, d. h. stark untereinander korrelieren, vorgenommen. Neben der Nachhallzeit soll jeweils mindestens eine Messgröße aus den Gruppen für die Bewertung der Akustik herangezogen werden. Zwei weitere Neuerungen dieser Fassung sind die Angaben eines üblichen Wertebereichs und von Unterschiedsschwellen der Parameter. Abbildung 3.8 zeigt die zugehörige Tabelle der akustischen Messgrößen aus dem Anhang A (DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 16). Daraus geht, neben dem üblichen Wertebereich und der Unterschiedsschwelle, die Mittelwertbildung für den jeweiligen Parameter hervor. So wird für alle Messgrößen mit Ausnahme der Seitenschallgrade eine Mittelwertbildung aus den Oktaven 500 und 1 000 Hz vorgegeben. Mittelwerte der Seitenschallgrade sollen über die Oktaven 125 bis 1 000 Hz gebildet werden. Davon ausgenommen ist der späte Seitenschallgrad, welcher energetisch gemittelt werden müsse. Die Angabe der üblichen Wertebereiche gelte für den unbesetzten Zustand des Saales (vgl. m. Tabelle A.2, DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 16).

Tabelle A.2 — Akustische Größen, nach Zuhöreraspekten gruppiert

Subjektiver Zuhöreraspekt	Akustische Größe	Einzelfrequenz-Mittelwertbildung[a] Hz	Unterscheidungs-schwelle (JND)	Üblicher Bereich[b]
Subjektiver Schallpegel	Stärkemaß G, in Dezibel	500 bis 1 000	1 dB	–2 dB; +10 dB
Wahrgenommene Halligkeit	Frühe Abklingzeit (EDT), in Sekunden	500 bis 1 000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Wahrgenommene Transparenz des Schalls	Klarheitsmaß C_{80}, in Dezibel	500 bis 1 000	1 dB	–5 dB; +5 dB
	Deutlichkeit, D_{50}	500 bis 1 000	0,05	0,3; 0,7
	Schwerpunktzeit T_S, in Millisekunden	500 bis 1 000	10 ms	60 ms; 260 ms
Scheinbare Quellenbreite (ASW)	Früher seitlicher Energieanteil, J_{LF} oder J_{LFC}	125 bis 1 000	0,05	0,05; 0,35
Zuhörer-Einhüllung (LEV)	Später seitlicher Schallpegel L_J, in Dezibel	125 bis 1 000	Unbekannt	–14 dB; +1 dB

[a] Die Einzelfrequenz-Mittelwertbildung kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert für Oktavbänder, ausgenommen für L_J, der energetisch gemittelt werden muss [siehe(A.17)].

[b] Frequenzgemittelte Werte in unbesetzten Konzert- und Mehrzweckhallen bis zu 25 000 m^3.

Abbildung 3.8: Akustische Größen nach ISO 3382-1:2009-10

Anhang B definiert, wie im Vorgängerdokument, den Interauralen Kreuzkorrelationskeoffizienten. Es wird abermals angemerkt, dass für die Verwendung des IACC noch keine allgemeine Übereinstimmung bestehe (vgl. DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 26), weder für die Frequenz-Filterung und Wahl der Zeitgrenzen, noch für einen optimalen Wertebe-

reich.

Der in dieser Fassung hinzugefügte Anhang C führt zwei neue Bühnen-Messgrößen ein: die frühe und späte Unterstützung. Es wird ein Wertebereich für beide Größen angegeben.

Tabelle 3.3 (S. 35) fasst alle durch die Norm vorgestellten Parameter mit den entsprechenden Empfehlungen für den Wertebereich zusammen. In den folgenden Abschnitten wird auf die spezifizierten Parameter eingegangen, sofern Änderungen zum Vorgängerdokument bestehen.

Tabelle 3.3: Raumakustische Parameter und Empfehlungen nach ISO 3382-1:2009-06

Parameter	**Zugehörige subjektive Empfindung**	**Wertebereich**
Stärkemaß G	Subjektiver Schallpegel	-2 bis +10 dB
Frühe Abklingzeit EDT	Wahrgenommene Halligkeit	1,0 bis 3,0 s
Klarheitsmaß C_{80}	Wahrgenommene Transparenz	-5 bis +5 dB
Deutlichkeit D_{50}	Wahrgenommene Transparenz	0,3 bis 0,7
Schwerpunktzeit t_S	Wahrgenommene Transparenz	60 bis 260 ms
Früher seitlicher Energieanteil J_{LF} u. J_{LFC}	Scheinbare Quellenbreite ASW	0,05 bis 0,35
Später seitlicher Energieanteil L_J	Zuhörereinhüllung LEV	-14 bis +1 dB
Interaur. Kreuzkorrelationskoeffizient IACC	LEV und ASW	k. A.
Frühe Unterstützung ST_{early}	Ensemblebedingungen	-24 bis -8 dB
Späte Unterstützung ST_{late}	Wahrgenommene Halligkeit	-24 bis -10 dB

Verhältnis zwischen früh und spät eintreffender Energie

Die Definitionen in diesem Abschnitt sind mit denen im Vorgängerdokument identisch. Es werden die Messgrößen D_{50}, C_{80}, C_{50} und t_S definiert. Die Zeitgrenze, die bei der Integration der Impulsantwort ihr Ende markiert, wird von $t_2 = \infty$ auf $t_2 = 8\,s$ abgeändert (vgl. S. 19-20, DIN EN ISO 3382-1, 2009; DIN EN ISO 3382, 2000, S. 14).

Seitenschallgrad

Dieser Abschnitt wird erweitert. Neben den frühen Seitenschallgraden nach Barron (2000) und Kleiner (1989) wird eine Messgröße für den späten Seitenschallgrad aufgenommen. Als objektives Maß für die subjektive Empfindung der Schallquellenverbreiterung (ASW)

dienen die frühen Seitenschallgrade LF und LFC (im Dokument mit J_{LF} und J_{LFC} bezeichnet) (DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 20). Als Maß für die Zuhörereinhüllung (LEV) wird der späte Seitenschallgrad L_J nach Bradley u. Soloudre (1995a,b) definiert. Des Weiteren wird ein frequenz-gemittelter Seitenschallgrad $L_{J,avg}$ vorgestellt, der sich aus dem Mittelwert der oktav-gefilterten späten Schallgrade nach Formel 3.2 ergibt (DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 21):[9]

$$L_{J,avg} = 10\lg\left[0,25\sum_{i=1}^{4} 10^{\frac{L_J}{10}}\right] \quad dB. \tag{3.2}$$

Binaurale Messgrößen: Der Interaurale Korrelationskoeffizient

Die im Anhang B des Vorgängerdokumentes beschriebenen Unterklassen des Räumlichkeitseindrucks werden korrigiert. Die Empfindung der Schallquellenverbreiterung wurde darin entgegen der Terminologie der Forschungliteratur mit 'Räumlichkeit'[10] bezeichnet (DIN EN ISO 3382, 2000, S. 18). Dies wurde zu 'scheinbare Quellenbreite' (ASW) abgeändert (DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 25). Auch die zweite Unterklasse des Räumlichkeitseindrucks wird nun wie in der Forschungsliteratur mit 'listener envelopment' (LEV) bezeichnet. Die weiteren Ausführungen sind mit denen im Vorgängerdokument identisch.

Bühnen-Messgrößen: frühe und späte Unterstützung

Die im Anhang C vorgestellten Bühnen-Messgrößen gehen auf A.C. Gade zurück (vgl. mit Abschnitt 2.3.9). Es werden zwei Messgrößen aufgeführt: Die frühe Unterstützung ST_{early} beziehe sich auf die Ensemblebedingungen, die das Zusammenspiel der Musiker kennzeichnen. Der Parameter ist identisch mit dem in (Gade, 1989a) formulierten ST1. Die späte Unterstützung ST_{late} beziehe sich dagegen auf die durch die Musiker wahrgenommene Halligkeit des Konzertsaales. Der durch die Norm definierte Parameter weist gegenüber Gades Parameter allerdings einen Unterschied in den Integrationsgrenzen der späten Schallfeldenergie auf. Während Gade ab 100 ms nach Eintreffen des Direktschalls am Messort die gesamte Impulsantwort berücksichtigt, wird die obere Integrationsgrenze in der Norm auf t_2 = 1 s beschränkt (DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 28). Ob diese Veränderung der Integrationsgrenzen von Gade selbst oder von anderen Wissenschaftlern stammen, lässt sich nicht nachvollziehen. Eine weitere Veröffentlichung Gades (Gade, 1992),

[9] Dies stelle die zuvor erwähnte ernergetische Mittelung dar.

[10] Räumlichkeit oder Raumeindruck beherbergen als Oberbegriffe die ihnen untergeordneten subjektiven Aspekte ASW und LEV

auf die im Literaturverzeichnis der Norm verwiesen wird, könnte Aufschluß darüber geben. Wie zuvor bereits erwähnt, ist das Dokument allerdings nicht mehr zugänglich.

$$ST_{\text{early}} = 10\lg \frac{\int_{20ms}^{100ms} p^2(t)\,dt}{\int_0^{10ms} p^2(t)\,dt} \quad dB \tag{3.3}$$

$$ST_{\text{late}} = 10\lg \frac{\int_{100ms}^{1000ms} p^2(t)\,dt}{\int_0^{10ms} p^2(t)\,dt} \quad dB \tag{3.4}$$

3.2 Einzeluntersuchungen

In diesem Unterkapitel werden abschnittsweise recherchierte Einzeluntersuchungen bezüglich der relevanten Informationen zusammengefasst. Das Unterkapitel ist nach Forschergruppen geordnet. Es werden die Empfehlungen der Wissenschaftler aufgeführt und insofern es aus den Publikationen hervorgeht, wird die Grundlage der Empfehlungen erläutert. Weiter wurde versucht zum Vergleich der Nachhallzeitempfehlungen einen mittleren Einzahlwert zu extrahieren. Dieser bezieht sich, wenn nicht anders angegeben, auf den üblichen Mittelwert der Oktaven 500 und 1 000 Hz. Als typische Volumen der musikalischen Aufführungsräume wurden 20 000 m^3 für Konzert- und Opernsäle, sowie 5 bis 10 000 m^3 für Kammermusiksäle angenommen.

3.2.1 F. R. Watson, Universität Illinois, USA, 1924-1927

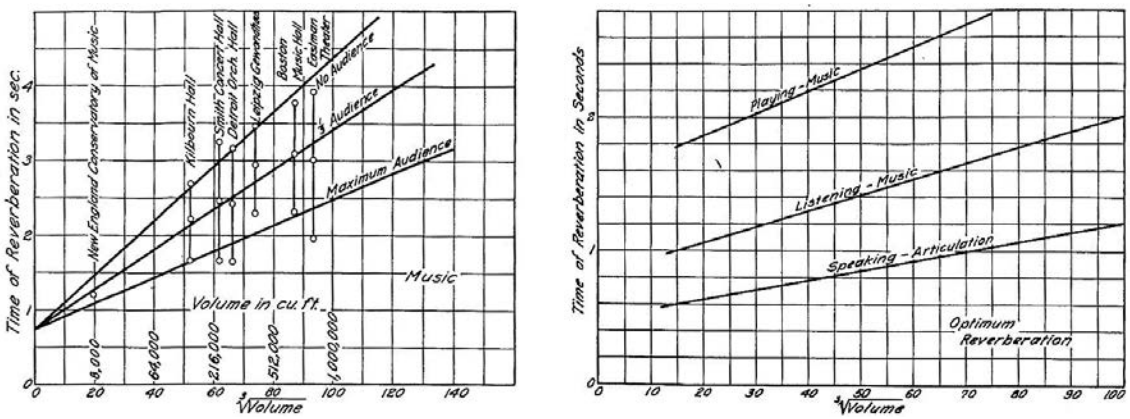
Der amerikanische Wissenschaftler F. R. Watson korrigert 1924 seine früheren Empfehlungen in einem Aufsatz und bemerkt, gegenwärtige Empfehlungen könnten als wegbereitende Bemühungen betrachet werden, die zu einer 'finalen Lösung' führen (Watson, 1924, S. 74). Der Autor hält daran fest, dass die Nachhallzeit mit der dritten Wurzel des Raumvolumens steigen müsse. Für große Auditorien sei seine 1923er Empfehlung korrekt, für kleine Raumvolumen seien die in (Watson, 1923) empfohlenen Nachhallzeiten allerdings zu gering. Watson liefert ein modifiziertes Diagramm, das durch eine lineare Beziehung zwischen der dritten Wurzel aus dem Raumvolumen und der Nachhallzeit etwas höhere Nachhallzeiten für kleinere Volumen berücksichtigt (Watson, 1924, S. 81), siehe Abbildung 3.9a. Die minimale Nachhallzeit für musikalische Darbietungen betrage demnach 0,75 s. Wie schon 1923 gibt er drei Kurven an, für das leere, das zu einem

Drittel gefüllte und das voll besetzte Auditorium. Zusätzlich fasst er die Nachhallzeit-Raumvolumen-Beziehung des leeren Zustandes in die folgende Gleichung (Watson, 1924, S. 82):[11]

$$T_{opt} = 0,75 + 0,12\sqrt[3]{V} \tag{3.5}$$

und bemerkt, die Nachhallzeit könne um 5% davon abweichen (Watson, 1924, S. 81). Cremer (1961) gibt folgende Formel für die günstige Nachhallzeit des voll besetzten Zuschauerraumes nach Watson an (Cremer, 1961, S. 228):

$$T_{opt} = 0,75 + 0,057\sqrt[3]{V} \tag{3.6}$$



(a) Watson (1924) (b) Watson (1927)

Abbildung 3.9: (a) 'Modifizierte' günstige Nachhallzeiten musikalischer Aufführungsräume nach Watson (1924) und (b) optimale Nachhallzeiten für Musiker und Zuhörer nach Watson (1927)

1927 veröffentlicht Watson erneut einen Aufsatz zur Akustik von Auditorien und beschreibt darin die Nachhallzeit erneut als wichtigsten Faktor der Akustik. Ihr Optimum erhalte man, in dem man zunächst die durchschnittliche Meinung über die gute oder schlechte Akustik von bestehenden Auditorien sammle und auf dieser Basis eine mathematische Beziehung für die Erzielung zufriedenstellender Akustik von Auditorien formuliere (Watson, 1927, S. 251). Der Autor zieht die in seinen früheren Publikationen präsentierten Diagramme zur optimalen Nachhallzeit heran (siehe Abb. 3.27, S. 76) und bemerkt, die empfohlenen Nachhallzeiten seien für einen maximalen Besetzungszustand ausgelegt. Die Werte setzten voraus, dass unter Berücksichtigung des Volumens eine 1 000 000 Mal größere Schallintensität erreicht werde, als diejenige, die man gerade noch

[11] Die Umrechnung zwischen metrischen und amerikanischen Längeneinheiten ist bereits berücksichtigt.

wahrnehmen könne. Dies entspricht bekanntlich dem Dynamikbereich, über den die Nachhallzeit gemessen wird. Allerdings, so Watson, sei die Annahme, dass für sehr kleine Volumen der Nachhallwert gegen Null tendiere, falsch. Daher liege die minimale günstige Nachhallzeit für Musik bei 0,75 s (vgl. mit Abb. 3.9a). Watsons Kurven hätten Eignung in der Praxis bewiesen, doch sie beruhten auf den durchschnittlichen Bedingungen einiger Auditorien. Verlässlichere Werte ließen sich in Versuchen finden, in denen die Nachhallzeit durch Variation der Absorptionsmaterialeinheiten und nach dem Urteil von Hörern eingestellt würde (Watson, 1927, S. 252). Weiter hält der Autor fest, dass sich die optimalen Bedingungen für Zuhörer und Musiker insofern unterscheiden, dass letztere einen höheren Nachhallwert bevorzugten. Dies bestätigte er experimentell mit oben genannter Methode und fasst seine Ergebnisse in zwei weiteren Diagrammen zusammen (Abb. 3.9b).[12] (Watson, 1927, S. 253). Zur Zufriedenstellung beider Parteien, Musiker wie Zuhörer, sei es ratsam, die Absorptionselemente am Ende des Raumes (im Zuschauerraum) zu platzieren. Die relevanten Empfehlungen umfassen die optimale Nachhallzeit für Ausführende (3,1 s) und für Zuhörende (1,9 s), wobei sich die Zuhörer-Nachhallzeit auf eine Darbietung von Musik und Sprache bezieht. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Abbildung 3.9b Watsons Empfehlungen für die Rezeption von Musik und Sprache sowie für die Aufführung von Musik darstellen und seine Empfehlung von 1924 (Abb. 3.9a) ersetzen. Watson setzt seine Nachhallzeitempfehlung für ein 20 000 m^3 fassendes Auditorium von ehemals 2,3 s auf 1,9 s herab.

In einem weiteren Aufsatz von 1928 wird dies noch einmal bestätigt. Watson hält fest, dass ein Aufführender durch ihm nahe Reflexionsflächen unterstützt werde (Watson, 1928, S. 263). Während nach Watsons Experimenten Musiker eher eine hallige Umgebung bevorzugen, erscheine die Rezeption der Aufführung dagegen am zufriedenstellensten unter nachhallärmeren Bedingungen. (Watson, 1928, S. 263-264). Dass sich der Autor dabei nicht nur auf die Darbeitung von Sprache bezieht, zeigt folgendes Zitat: „[...] the audience room in which people listen to the generated sound should be as dead as outdoors. [...] the time of reverberation should be less than is usually the case in auditoriums [...]“ (Watson, 1928, S. 265). Watson liefert dazu ein weiteres Diagramm, welches seine frühere Empfehlung im Stile der 1924er Empfehlung darstellt (Watson, 1928, S. 266). Die Kurve (s. Abb. 3.10) ist mit ’Listening-Music’ in Abb. 3.9b identisch.

[12] Das zweite Diagramm (’Fig. 6’) stellt dieselbe Kurve dar, die im ersten mit „Listening - Music“ bezeichnet wird (vgl. Fig. 5 und Fig. 6 Watson, 1927, S. 253).

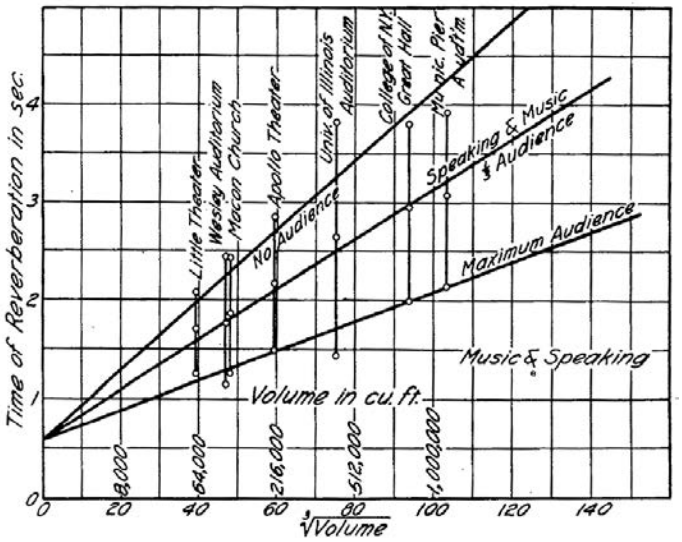


Abbildung 3.10: Optimale Nachhallzeiten nach Watson (1928)

3.2.2 Bagenal, 1925

Bagenal (1925) berichtet über Experimente in einem Raum mit einem Volumen von etwa 2 700 m^3. Um die raumakustischen Bedingungen zu varieren wurden verschiedene Absorptionsmaterialien in den Raum eingebracht. Musiker wurden nach ihrem Zusammenspiel darin befragt. Bagenal hält fest, „The first obvious result was that a minimum reverberation was required for all instruments, namely, about 2 seconds.“ (Bagenal, 1925, S. 626).

3.2.3 S. Lifshitz[13] und S. Beljajew[14], UdSSR 1925-1932

S. Lifshitz bestimmt in einem Raum von 126 m^3 die optimale Nachhallzeit in Versuchen, in dem er Musiker (Sänger, Violine und Violoncello) vor einem Publikum bestehend aus ’hochqualifizierten Musikern’ Stücke mehrmals wiederholen lässt. Die Nachhallzeit wurde auf dem Urteil der Sachverständigen basierend auf einen mittleren Wert von 1,03 s eingestellt. Lifshitz mittelt die Ergebnisse mit einem von W. C. Sabine auf ähnliche Weise gefundenen Wert von 1,08 s zu 1,06 s. Auf Grundlage dieses Nachhallwertes bestimmt der Autor eine Formel für die Berechnung der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit

[13] Universität Moskau

[14] Akademie der Künste Leningrad

vom Volumen des Raumes (Lifshitz, 1925, S. 392):

$$(10,23 - \log V)T_{opt} + 0,97(0,4 - \log V)\sqrt{T_{opt}} = 6 \tag{3.7}$$

Der optimale Nachhallwert liege bis zu einem Volumen von 350 m^3 bei 1,06 s, darüber wachse die Nachhallzeit nach der Beziehung oberhalb (Lifshitz, 1925, S. 392). Nach Lifshitz seien optimale Nachhallzeiten für Musik und Sprache nur für eine 'unperfekte' Akustik verschieden, eine 'perfekte' Akustik sei allein von der Nachhallzeit abhängig. Nur ein Jahr später korrigiert Lifshitz seine Formel zu (Lifshitz, 1926, S. 621):

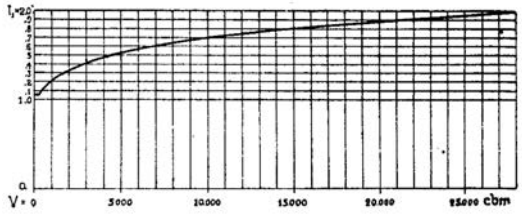
$$\log V = 8,5 + \log T_{opt} - \frac{6,194}{\sqrt{T_{opt}}} \tag{3.8}$$

Die korrigierte Empfehlung unterschiedet sich aber nur geringfügig von der alten. Für einen Konzertsaal mit einem Volumen von 20 000 m^3 ergeben sich nach Lifshitz erster Empfehlung 1,89 s, nach der zweiten 1,91 s. Auf den Frequenzverlauf der Nachhallzeit geht Lifshitz in beiden Artikeln nicht ein. Es wird auch nicht erwähnt, auf welche Frequenz sich Formel 3.8 bezieht, anzunehmen sind 500 oder 1 000 Hz.

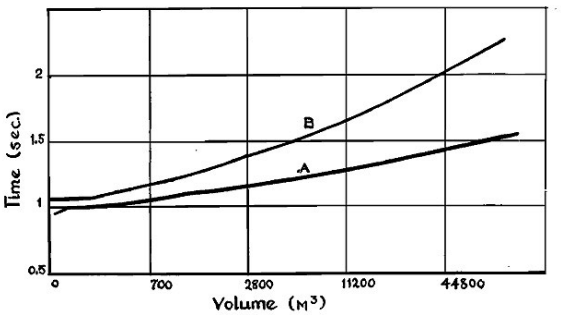
Der russische Architekt und Professor an der Akademie der Künste in Leningrad S. Beljajew schreibt 1926 einen kurzen Aufsatz über die „Akustik großer Räume“ (Aufsatztitel, Beljajew, 1926). Er bemerkt, Lifshitz habe ein Gleichungssystem entwickelt, um die günstige Nachhallzeit großer Räume zu berechnen. Diese sei aber unhandlich für den praktischen Gebrauch, weshalb er die von Lifshitz gefundene Beziehung zwischen Raumvolumen und günstiger Nachhallzeit grafisch in einem Diagramm aufbereitet (Beljajew, 1926, S. 71). Die Abbildung löst den für Aufführungsräume interessanten Volumen-Bereich besser auf als die Darstellung von Lifshitz (1925) (siehe Abb. 3.11a). Beljajew führt zur Überprüfung der Formel drei Beispiele auf, deren akustische Qualität bekannt sei, vergleicht deren Nachhallzeiten mit der günstigen nach Lifshitz und sieht die Richtigkeit dieser Formel bestätigt.

In einem Aufsatz von 1932 geht Lifshitz erneut auf die optimale Nachhallzeit ein. 1926 habe er eine Empfehlung von 1,75 s für 512 Hz bei einem Volumen von 12 500 m^3 gegeben, was er in dem vorliegenden Aufsatz auf 1,7 s korrigiert (Lifshitz, 1932, S. 118). Aus einer Verbesserung der 1926er Formel (3.9) errechnet er die optimale Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen und veranschaulicht dies in einem Diagramm (Lifs-

[16] Lifshitz verwechselt bei der Beschreibung der Abbildung die Kurven A und B.



(a) Lifshitz (1926)



(b) Kurve A nach Békésy (1931) , Kurve B nach Lifshitz (1932)[16]

Abbildung 3.11: Optimale Nachhallzeit nach (a) Lifshitz (1926), Quelle: Beljajew (1926) und (b) Lifshitz (1932)

hitz, 1932, S. 119) (siehe Abb. 3.11b). Für einen Raum mit einem Volumen von 20 000 m^3 ergeben sich in leichter Abweichung von Lifshitz vorherigen Empfehlungen 1,81 s.

$$\log V = 9,237 + \log T_{opt} - \frac{6,996}{\sqrt{T_{opt}}} \tag{3.9}$$

1936 korrigiert Lifshitz seine Formel 3.9 zu (Lifshitz, 1936, S. 217):[17]

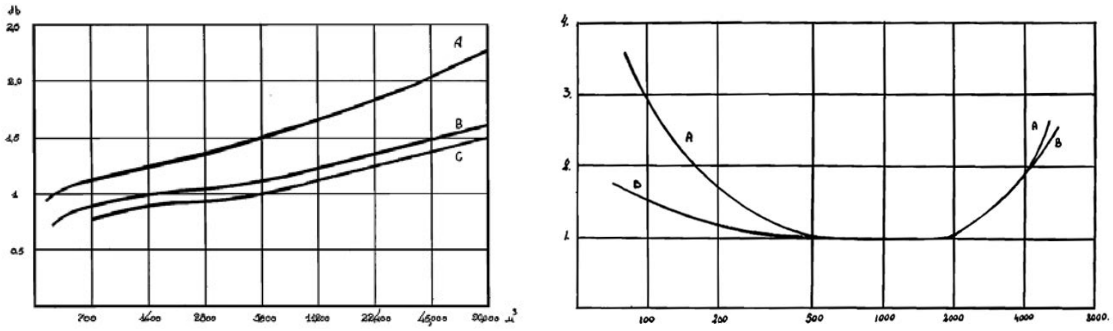
$$\log V = 9,534 + \log T_{opt} - \frac{7,35}{\sqrt{T_{opt}}} \tag{3.10}$$

Mit 1,79 s unterscheidet sich auch diese Korrektur nur geringfügig von der vorherigen Empfehlung. Gleichzeitig gibt Lifshitz Nachhallzeit-Formeln für Rundfunkstudios und Filmtheater an (Abb. 3.12a). Zusätzlich schlägt der Autor auch einen Frequenzverlauf der Nachhallzeit vor, mit einem zu Knudsen (1932) und McNair (1930) vergleichbarem Kriterium (Lifshitz, 1936, S. 219-220) (siehe Abb. 3.12b). Die Nachhallzeit steigt demnach unterhalb von 500 Hz um das etwa 2,5-fache (125 Hz) des mittleren Nachhallwertes sowie oberhalb von 2 kHz um das 2-fache (4 000 Hz) an.

3.2.4 P.E. Sabine, 1928

Paul E. Sabine beantwortet 1928 die Frage nach der günstigen Nachhallzeit mit Verweis auf Räume, deren Akustik als gelungen ('good') gilt. Er gibt ein explizites Beispiel für die

[17] Es befindet sich ein Fehler im Dokument, das '=' vor dem letzten Term sollte ein '−' sein.



(a) A - Konzertsaal, B - Runfunkstudio, C - Filmtheater

(b) A - Musik, B - Sprache

Abbildung 3.12: (a) Optimale Nachhallzeiten und (b) Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Lifshitz (1936)

Nachhallzeit eines Raumes mit ca. 5 660 m^3 Volumen von 1,5 s und liefert ein Diagramm der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Volumen (Sabine, 1928, S. 812-813). Die Grundlage seiner Empfehlung bildet Sabine anhand von Sälen, die als akustisch gut gelten. Der von Sabine so gefundene lineare Zusammenhang zwischen dem dekadischen Logarithmus des Raumvolumens und der günstigen Nachhallzeit ist in Abb. 3.13 dargestellt. Für einen Konzertsaal mit einem Volumen von 20 000 m^3 ergebe sich demnach eine optimale Nachhallzeit von etwa 1,85 s. Ob sich der Zusammenhang auf 500 Hz oder 1000 Hz bezieht, gibt Sabine nicht an. Der eigentliche Anlass des Aufsatzes ist die Akustik von Studioräumen, das Diagramm bezieht sich offenbar auf den allgemeinen Fall eines Auditoriums. Zur Nachhallzeit von Aufnahmestudios leitete Sabine 1926 Untersuchungen, in denen die Nachhallzeit eines Raumes zwischen 0,25 s und 0,64 s variiert und ein Programm unter diesen variierten Bedingungen im Radio übertragen wurde. Radio-Hörer wurden um ihr Urteil gebeten und mit 73 von 121 bevorzugte die Mehrheit der Einsendungen das halligste Programm. Sabine bemerkt, es sei nicht möglich gewesen, längere Nachhallzeiten zu testen, aber der präferierte liege nahe dem empfohlenen Wert.

3.2.5 K. Schuster und E. Waetzmann, Breslau, 1929

Die Wissenschaftler Schuster und Waetzmann veröffentlichen 1929 Überlegungen zur günstigen Nachhallzeit von Räumen, in der sie die Empfehlungen ihrer Zeitgenossen kritisch betrachten. Die von Lifshitz (1926) entwickelte Formel beruhe auf der Annahme, die Schallleistung sei in allen Räumen (unterschiedlicher Größe) gleich. Diese Annahme sei insofern falsch, als dass für größere Räume höhere Schallleistungen angenommen wer-

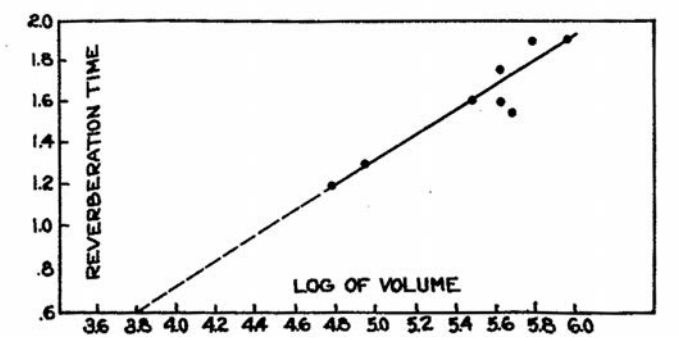


Abbildung 3.13: Optimale Nachhallzeit nach P. E. Sabine (1928)

den müssen. Unter der Annahme, dass die Schallleistung L mit der dritten Wurzel steigt, also der Beziehung $L \sim \sqrt[3]{V}$ folgt, bestimmen sie auf Lifshitz' Überlegungen basierend Formel 3.11 (Abb. 3.14, Kurve 2) (Schuster u. Waetzmann, 1929, S. 690-691). Eine weitere Formel 3.12 ergebe sich, wenn man annehme, dass die Empfindungsstärke mit dem Volumen in der Beziehung $E_0 \sim \frac{1}{\sqrt[3]{V}}$ stehe (Abb. 3.14, Kurve 3) (Schuster u. Waetzmann, 1929, S. 692). Eine dritte Formel, die auf ähnlichen Annahmen beruhe, geben die Autoren zusätzlich an (Abb. 3.14, Kurve 4), jedoch sind die Nachhallzeiten nach Formel 3.13 unwesentlich höher als jene nach Formel 3.12, wie die folgende Auflistung der mit einem Volumen von 20 000 m^3 erhaltenen Werte zeigt (Schuster u. Waetzmann, 1929, S. 693).

1) $T_{opt,1}$ = 1.55 s (3.11)
2) $T_{opt,2}$ = 1,18 s (3.12)
3) $T_{opt,3}$ = 1,20 s (3.13)

Die dazugehörigen Formel lauten:

$$\frac{2}{3}\log V = \left(6 - \log 1,06 + \frac{2}{3}\log 350\right) + \log T_{opt} - \frac{6 \cdot \sqrt{1,06}}{\sqrt{T_{opt}}} \tag{3.11}$$

$$T_{opt} = \frac{6 \cdot 1,06}{6 + \log\sqrt[3]{350} - \log\sqrt[3]{V}} \tag{3.12}$$

$$T_{opt} = \frac{6 \cdot 0,88}{5 + \log\sqrt[3]{350} - \log\sqrt[3]{V}} \tag{3.13}$$

Allerdings stellen die Autoren ihren Überlegungen voraus:

„Da für die Beurteilung der Hörsamkeit das subjektive Empfinden maßgebend ist, ist es schwer, einigermaßen sichere empirische Unterlagen zu gewinnen. Wenn wir trotzdem in dem folgenden Paragraphen einige Formeln angeben, so sind wir uns also klar darüber, dass die eingesetzten Zahlenwerte unbedingt der Verbesserung bedürfen.“ (Schuster u. Waetzmann, 1929, S. 689)

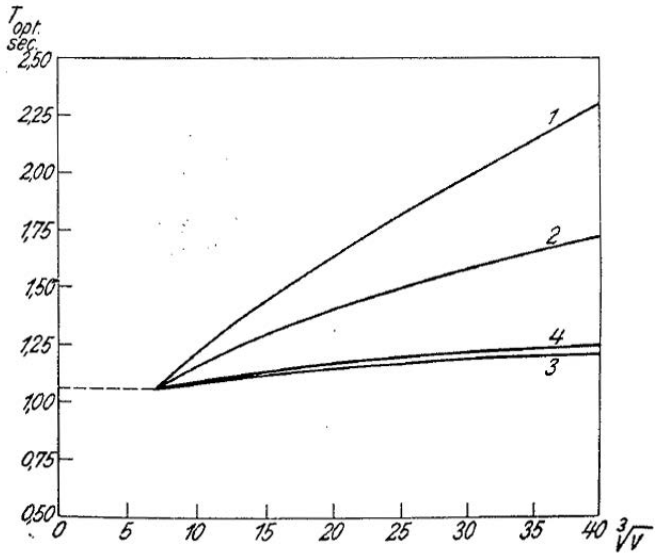


Abbildung 3.14: Diskussion der günstigen Nachhallzeit auf Grundlage von Lifshitz Berechnungen nach Schuster u. Waetzmann (1929)

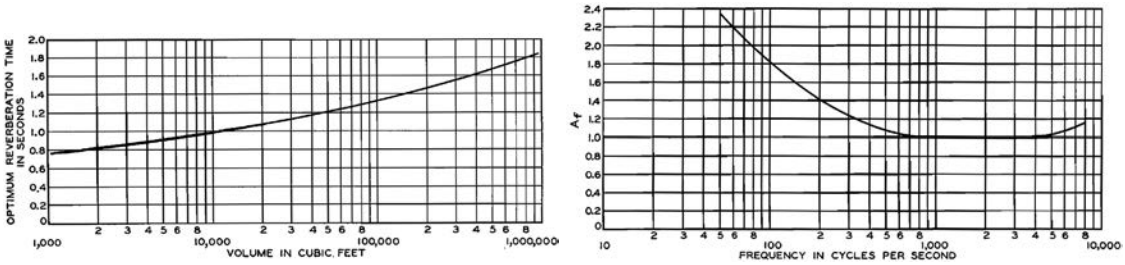
3.2.6 Bell Telephone Laboratories, USA, 1930-1947

Walter McNair erwähnt in einem Aufsatz zur optimalen Nachhallzeit, der 1930 in der ersten Ausgabe der JASA erschien: „It is often mentioned by engineers and physicists that to secure the best acoustical results, the reverberation time should be the same for all frequencies in any one room.“ (McNair, 1930, S. 242). Dagegen hält er einen Nachhallverlauf, der sich an der Lautheit der jeweiligen Frequenz orientiert, für optimal. Wie Lifshitz entwickelt er eine Formel[18] zur Berechnung der optimalen Nachhallzeit bei 1 kHz in Abhängigkeit vom Raumvolumen (McNair, 1930, S. 247) (siehe Abb. 3.15a).

$$\log V = 10,4 + \log T_{opt} - \frac{6,35}{\sqrt{T_{opt}}} \tag{3.14}$$

[18]Das '=' vor dem letzten Term der Formel ist offensichtlich ein Druckfehler und ist durch ein '−' zu ersetzen.

Die so erhaltenen Nachhallwerte betragen 92,5% des Wertes bei 500 Hz. McNairs Nachhallfrequenzverlauf steigt unterhalb der Referenzfrequenz 1 kHz bis auf das etwa 2,1-fache bei 63 Hz an (Faktor 1,6 bei 125 Hz), wie aus Abb. 3.15b, die dem Aufsatz entnommen ist, ersichtlich wird (McNair, 1930, S. 243). Oberhalb von 4 kHz ergibt sich nach McNairs Kriterium ein schwacher Anstieg. Für ein typisches mittleres Volumen eines musikalischen Aufführungsraumes von 20 000 m^3 ergeben sich nach McNair Nachhallzeiten von 1,75 s für 1 kHz und 1,89 s für 500 Hz. Für tiefe Tonlagen beträgt McNairs optimale Nachhallzeit 3,7 s bei 63 Hz, sowie 2,8 s bei 125 Hz.



(a) Optimale Nachhallzeit, 1 kHz (b) Opt. Frequenzverlauf der Nachhallzeit

Abbildung 3.15: Optimale mittlere Nachhallzeit und Verlauf der Nachhallzeit nach McNair (1930)

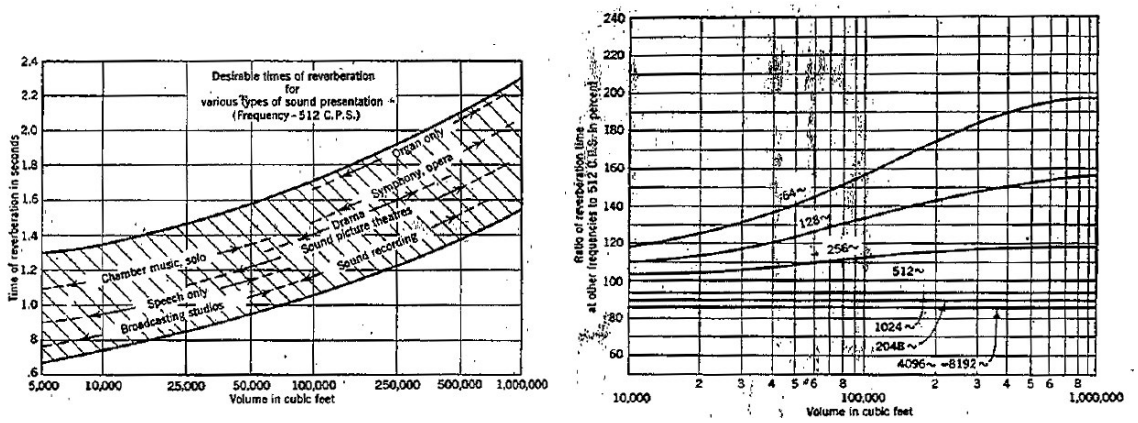
Die Frage, was eine gute Akustik ausmache, könne nach Maxfield u. Potwin (1940) nicht eindeutig beantwortet werden:

> „The orchestra leader and musician have their conceptions [...] while the producer and musical critics may have different ideas. The acoustical engineer feels that his opinion should be considered and, finally, the listener must be satisfied.“ (Maxfield u. Potwin, 1940, S. 390)

Die Autoren erachten neben der Nachhallzeit und ihrem Verlauf über der Frequenz die frühen Schallreflexionen als maßgeblich für die subjektive Beurteilung der Hörsamkeit. Es gebe fast universelle Übereinstimmung bezüglich der mittleren Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Volumen des Aufführungsraumes und der Art der Schallquelle. Dies sei den Frequenzverlauf der Nachhallzeit betreffend nicht der Fall. Die Autoren beziehen sich auf ein Diagramm, in dem der Faktor, mit dem die Nachhallzeit für einen bestimmten Frequenzwert der tiefen Tonlagen (256 Hz , 128 Hz) zu gewichten ist, mit dem Raumvolumen steigt (vgl. Fig. 2 u. Fig. 3, Maxfield u. Potwin, 1940, S. 391). Auf dieser Grundlage, so die Autoren, seien einige erfolgreiche Auditorien geplant worden. Jedoch sei diese Beziehung sowie bisher empfohlene mittlere Nachhallzeiten erneut zu diskutieren, da die

Möglichkeit der Beeinflussung der frühen Reflexionen bestehe. Dies ermögliche höhere Nachhallzeiten als die bisher empfohlenen Werte (Maxfield u. Potwin, 1940, S. 391). Weiter sei ein höheres spezifisches Volumen wünschenswert, da sich dies auf die Räumlichkeit der musikalischen Darbietung und die damit verbundene emotionale Wirkung steigernd auswirke.

Watson (1941) führt zwei Diagramme von Maxfield und Potwin mit einem Verweis auf ihre Publikation auf. Jedoch sind diese hier nicht enthalten und es konnte weiter keine andere Publikation von Maxfield und Potwin recherchiert werden, welche die Abbildungen umfasst. Die Abbildungen werden an dieser Stelle abgedruckt und es wird auf die entsprechende Stelle verwiesen (vgl. Fig. 6h u. Fig. 6i, Watson, 1941, S. 47 u. S. 48). Die Abbildungen zeigen zum einen den volumenabhängigen Bereich günstiger mittlerer



(a) mittlere Nachhallzeit (512 Hz)

(b) relative Nachhallzeit diverser Frequenzen

Abbildung 3.16: (a) Günstige mittlere Nachhallzeiten verschiedener Genres und (b) Nachhallzeiten verschiedener Frequenzen relativ zum Referenzwert bei 512 Hz, Quelle Watson (1941)

Nachhallzeiten verschiedener Musik-Genres (vgl. Abb. 3.16a), zum anderen die variablen vom Volumen abhängigen Faktoren für die Bestimmung der Nachhallzeit diverser Frequenzen (Abb. 3.16b). Kleine Raumvolumen, wie etwa die von Kammermusiksälen, haben demnach einen geringeren günstigen Nachhallzeitanstieg zu tiefen Frequenzen als größere Volumen. Für hohe Frequenzen sinke die Nachhallzeit unabhängig vom Volumen des Aufführungsraumes um einen bestimmten Faktor. Abbildung 3.16b deckt sich mit den oberhalb erwähnten Abbildungen des Aufsatzes Maxfield u. Potwin (1940).

Maxfield u. Albersheim (1947) befassen sich mit der Herleitung eines Kriteriums, das die raumakustischen Bedingungen auf einen Einzahlwert reduziert. Diese Größe, Liveness, erfasst die akustischen Eigenschaften des Raumes, die Quellen-Empfänger-Distanz und

die Richtcharakteristik der Quelle etc. Die Herleitung passen die Autoren unter anderem an empirische Daten von McNair, Heyl und P. E. Sabine an (Maxfield u. Albersheim, 1947, S. 72-73) (s. Abb. 3.17).[19] Eine Volumen-Nachhallzeit-Beziehung, die diese Daten am besten repräsentiert, sei durch Formel 3.15 gegeben (Maxfield u. Albersheim, 1947, S. 74):[20]

$$T_{opt} = \frac{0,212}{\sqrt{0,3048}} \cdot V^{1/6} \tag{3.15}$$

Maxfield (1948) bestätigt dies nochmals durch Herleitung der Formel 3.15 unter der An-

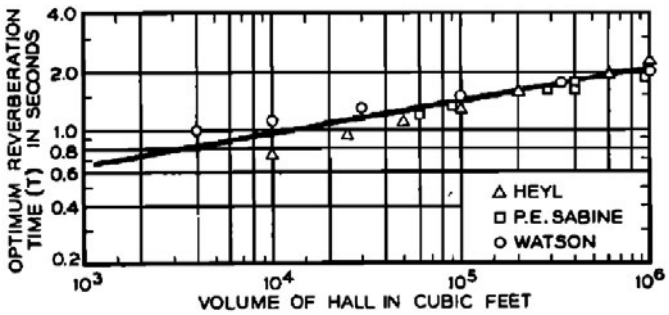


Abbildung 3.17: Optimale Nachhallzeit nach Maxfield u. Albersheim (1947) u. Maxfield (1948)

nahme, dass das menschliche Ohr die Schallenergie nach der Form $\int_0^\infty p^2(t)\,dt$ integriere (Maxfield, 1948, S. 483-484). Dies vergleicht der Autor mit dem Konzept McNairs, welcher annimmt, das Ohr integriere den dekadischen Logarithmus der Schallenergie nach $\int_0^\infty \log p^2(t)\,dt$ (Maxfield, 1948, S. 485-486). Maxfields und Albersheims Konzept zeige gegenüber dem von McNair eine bessere Übereinstimmung mit empirischen Daten (Maxfield, 1948, S. 486).

3.2.7 Georg v. Békésy[21] u. a.[22], Budapest, Ungarn, 1931-1954

Georg v. Békésy (1931) fordert für eine gute Akustik, „[...] daß die wirkliche Nachhalldauer bei der mittleren starken Tongebung der Präsenzzeit gleichkommt.“ (Békésy, 1931,

[19] Die Abbildung ist der Quelle (Maxfield, 1948) entnommen.

[20] Die Autoren rechnen im angloamerikanischen Maßsystem, daher muss die ursprüngliche Formel mit $0,3048^{-1/2}$ multipliziert werden.

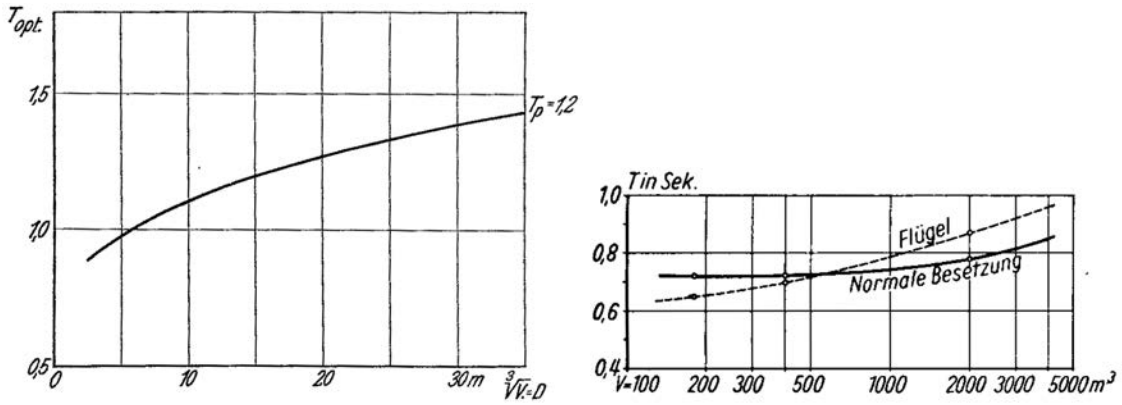
[21] Kgl. ungarisches. telegraphentechnisches Versuchsamt, Budapest

[22] Th. Tarnóczy, Zentralphysikalisches Forschungsinstitut Budapest

S. 873).[23] Die günstige Nachhalldauer berechne sich in Anlehnung an Sabine zu (Békésy, 1931, S. 871):

$$T = \frac{-13,82 \cdot \sqrt[3]{V}}{\sqrt{3}c\ln(1-a)} \tag{3.16}$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit und a die mittlere Absorption der Wände darstellen. Leider lassen sich mittels der Formeln die von Békésy empfohlenen Nachhallzeiten in Abhängigkeit vom Volumen des Raumes nicht ohne Weiteres reproduzieren. Diese liegen über einem Volumenbereich von 1 000 bis 30 000 m^3 mit 1 bis 1.4 s unter allen bisherigen Empfehlungen. Für ein Konzertsaal-typisches Volumen ergibt sich eine günstige Nachhalldauer von etwa 1,3 s, wie der Abbildung 3.18a entnommen werden kann (Fig. 13, Békésy, 1931, S. 872). Békésy bemerkt dazu, dass es sich mit dieser Empfehlung um keinen endgültigen Wert handle, da die Konstanten der oberhalb gegebenen Formeln von der Art der musikalischen Darbietung abhingen (Békésy, 1931, S. 871).



(a) Békésy (1931) (b) Békésy (1934b)

Abbildung 3.18: Günstige 'Sabin'sche' Nachhalldauer nach Békésy (1931) und günstige frequenzunabhängige Nachhallzeit nach Békésy (1934b)

Georg v. Békésy untersucht 1934 die günstige Nachhalldauer und ihre Frequenzabhängigkeit in kleinen Musikräumen. Die Räume und erhaltenen Werte sind nicht repräsentativ für die hier behandelten Aufführungsräume. Dennoch ist Békésys Untersuchung erwähnenswert, da er die günstige Nachhallzeit durch das subjektive Urteil von „[...] Musikpädagogen, Konzertbesucher, Funkbastler und mehrere namhafte Künstler und Mitglieder der hiesigen Musikakademie [...]“ erhält (Békésy, 1934a, S. 675, 676). Diese beurteilten

[23] Der Begriff der Präsenzzeit stammt aus der Psychologie und ist diejenige Zeit, in der man sich einer Beobachtung noch unmittelbar bewusst ist. Für Musik könne von einer mittleren Präsenzzeit von 1,2s ausgegangen werden (Békésy, 1931, S. 858).

in verschiedenen Räumen (Volumen von 180 und 400 m^3), mittels schwerer Musik von Pianino, Streichquartett, Gesang und Flügel Nachhallzeiten, die über das Einbringen von Absorptionsstoffen in den Raum variiert wurden. Die erhaltenen Werte sind im Wesentlichen frequenzunabhängig und mit 0,7 s kürzer, als die von anderen Autoren zu der Zeit angegebenen Werte. Békésy führt dies teilweise darauf zurück, dass die in der Literatur angegebenen Werte berechnet anstatt gemessen sind (Békésy, 1934a, S. 678).

Im selben Jahr erscheint ein Aufsatz Békésys, in dem er über ähnliche Versuche in größeren Räumen berichtet. Es handele sich um einen Rundfunksenderaum von 2 000 m^3 Volumen, in dem abermals die Hörsamkeit im Sinne der optimalen Nachhallzeit durch Beurteilungen von geübten Hörern bestimmt werden solle.

> „Bei der Bestimmung der günstigsten Nachhallzeit“, so Békésy, „ist hierzu am zweckmäßigsten, den Raum von übermäßig starker Dämpfung auf zu großen Nachhall und zurück mehrmals sprungweise einzustellen“ (Békésy, 1934b, S. 371).

Dieses Vorgehen sei gegenüber der Methode, bei der von einem Extremfall ausgehend in kleinen Schritten die Nachhallzeit variiert werde, genauer und (leichter) reproduzierbar. Der Autor bemerkt, er könne den in der Literatur oft erwähnten Unterschied zwischen der Musik von Wagner und Mozart nicht feststellen, da bei Versuchen mit Werken der Komponisten bei gleicher Orchesterbesetzungsstärke stets die selbe Nachhallzeit erhalten wurde (Békésy, 1934b, S. 372). Aus der Gesamtheit der Versuche, einschließlich der in Békésy (1934a) beschriebenen, schließt Békésy auf eine mit dem Raumvolumen steigende und frequenzunabhängige günstige Nachhallzeit (siehe Abb. 3.18b), dessen Werte für Volumen zwischen 100 und 5 000 m^3 und nach Art der Schallquelle (Flügel, Orchester mit ’normaler Besetzung’) in einem Diagramm angegeben werden (Békésy, 1934b, S. 373-374). Für eine normale Orcheserbesetzung steige die Nachhallzeit mit dem Volumen gering von einem Wert von etwa 0,7 s (bis 1 000 m^3 nahezu konstant) bis auf etwa 0,85 s bei 4 000 m^3 an. Für den Flügel steige sie etwas stärker bis auf 0,95 s bei 4 000 m^3. Die Möglichkeit einer frequenzabhängigen Nachhallzeit in viel größeren Räumen räumt der Autor ein (Békésy, 1934b, S. 375).

In einem Bericht zur Verbesserung der akustischen Bedingungen des Budapester Stadttheaters beschreibt Th. Tarnóczy 1954 die durch den Umbau angestrebte Nachhallzeit. Die Nachhallzeit von 1,3s im besetzten Zustand sollte auf einen optimalen Wert von 1,8 s heraufgesetzt werden. Der Nachhallzeitverlauf im leeren Theater sollte zu hohen Frequenzen hin steigen. Durch Entfernung von Absorptionsmaterial im Theater wurde eine

Nachhallzeit von 1,6 s und der angestrebte Verlauf bei hohen Frequenzen erreicht (Tarnoczy, 1954).

3.2.8 V. O. Knudsen und M. Rettinger, Universität von Kalifornien, Los Angeles, USA, 1931-1954[24]

V. O. Knudsen erläutert 1931 in einen Aufsatz das Problem der Akustik musikalischer Aufführungsräume. Der Text ist teilweise identisch mit der Monographie Knudsen (1932). Die selben relevanten Aussagen können dem Aufsatz entnommen werden. Daher wird an dieser Stelle nicht auf diese Aussagen eingegangen und auf die entsprechende Stelle im Abschnitt 3.3 verwiesen. Jedoch ist die Abbildung zur optimalen Nachhallzeit geringfügig verändert, was die Position der eingetragenen Musikstile Kammermusik ('Solo and Chamber') und Oper und Konzert ('Opera, Orchestra') betrifft (Knudsen, 1931, S. 466) (s. Abb. 3.19). Des Weiteren geschieht die Beschreibung des Frequenzverlaufs der Nachhallzeit nur in Worten und weicht etwas von Knudsen (1932) ab (Knudsen, 1931, S. 441-443). Das zugrunde liegende Kriterium, dass alle Frequenzkomponenten gemäß der Intensität in der Darbietung gleichmäßig abklingen sollen, wird auch hier von Knudsen angewandt. Zwischen 500 und 2 000 Hz sei der optimale Verlauf aber konstant, unterhalb von 500 Hz steige er bis 100 Hz auf das 2- bis 3-fache an. Oberhalb von 2 kHz steige die Nachhallzeit geringfügig.

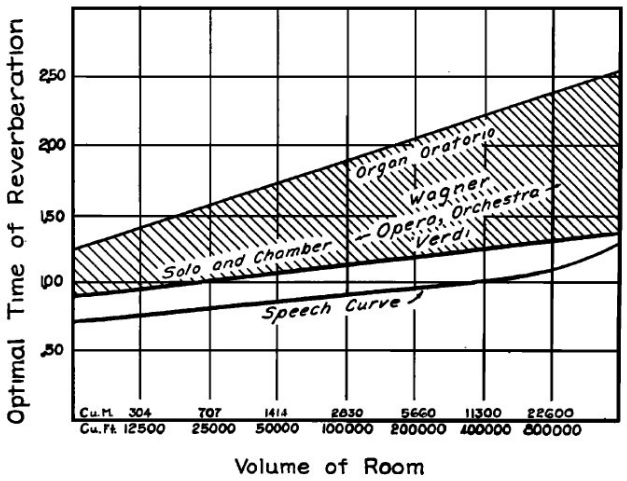


Abbildung 3.19: Optimale Nachhallzeiten diverser musikalischer Aufführungsräume nach Knudsen (1931)

[24] V. O. Knudsen unterrichtete an der Universität von Kalifornien, M. Rettinger absolvierte sein Studium an der selben Universität und war Schüler Knudsens.

In einer kurzen Stellungnahme zu den von McNair (1930) und Knudsen (1932) vorgeschlagenen Kriterien bezüglich des Frequenzverlaufs der Nachhallzeit schlägt Rettinger (1934) zwei weitere vor. Der Autor plädiert dafür, dass die Nachhallzeit bei verschiedenen Frequenzen proportional zu der Wahrnehmbarkeitsunterschiedsschwelle der Intensität der entsprechenden Frequenz sein müsse. Forschungsergebnisse der Psychophysik deuteten an, dass die Schwelle für Frequenzdiskrimination ähnlich verlaufe, wie die der Intensitätswahrnehmung, so könnte man diese Schwelle ebenfalls als Kriterium hierzu heranziehen (Rettinger, 1934, S. 51). Basierend auf dem erst genannten empfiehlt Rettinger einen Verlauf der Nachhallzeit, der bei 2048 Hz sein Minimum erreiche (vgl. Fig. 2, Rettinger, 1934, S. 52) (siehe Abb. 3.20). Zu tiefen Frequenzen steige die Nachhallzeit bis zu dem 2,2-fachen an, zu hohen Tönen etwas schwächer bis auf das etwa 1,5-fache bei 8192 Hz (vgl. Fig. 2, Rettinger, 1934, S. 52).

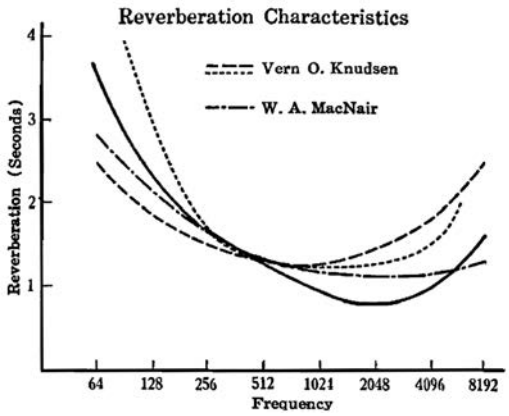


Abbildung 3.20: Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Rettinger (1934)

Knudsen erkennt 1954 einen Trend zu kürzeren Nachhallzeiten, als sie bisher empfohlen wurden, der zum einen auf den vermehrten Einsatz von Absorptionsmaterialen, zum anderen auf einen ansteigenden Gebrauch verstärkender (elektroakustischer) Anlagen beruhe (Knudsen, 1954). Seine 1932er Empfehlungen für musikalische Aufführungsräume ($V = 15\,000\,m^3$) von 1,8 s setzten Harris und Knudsen 1950 auf 1,6 s herab.

3.2.9 W. Furrer, 1942, Schweiz

W. Furrer stellt 1942 fest, das akustische Verhalten eines Radio-Studios sei durch sein Volumen und die Nachhallzeit bestimmt. Dieser Zusammenhang sei aber im Wesentlichen von subjektiven Empfindungen abhängig (Furrer, 1942, S. 77). Es gebe eine optimale

Nachhallzeit, „[..] die durch das musikalische Empfinden verhältnismäßig scharf definiert ist“ (Furrer, 1942, S. 80). Die Nachhallzeiten schweizer Konzertsäle bzw. Studios stimmen mit Watsons Empfehlungen überein bzw. liegen knapp unter Watsons Optimum. Diese Säle würden als sehr gut beurteilt. Der Schluss Furrers hieraus ist, Studios mit Volumen über 2 000 m^3 seien bezüglich der Nachhallzeit wie Konzertsäle zu planen. (Furrer, 1942, S. 82). Für große Studios (2 000-5 000 m^3) empfiehlt Furrer eine Nachhallzeit von 1,35 bis 1,5 s. Der Frequenzverlauf der Nachhallzeit sollte im Bassbereich ansteigen.

3.2.10 F. Winckel, 1950-1958

Fritz Winckel hält in einem Aufsatz über die Verbesserung der raumakustischen Bedingungen des Titania Palastes in Berlin fest, dass zwischen den amerikanischen und deutschen Vorstellungen der optimalen Nachhallzeit Unterschiede bestünden. Nach einem Diagramm wünschten sich die Deutschen höhere mittlere Nachhallzeiten (dt.: 1,8 s, am.: 1,6 s), einen oberhalb von 250 Hz konstanten Frequenzverlauf der Nachhallzeit und einen Anstieg dieser zu tiefen Frequenzen hin bis auf einen Faktor von etwa 1,3 bis 1,4 des mittleren Nachhallwertes bei 125 Hz. Nach amerikanischer Empfehlung (nach Olson[25]) sei ein Anstieg der Nachhallzeit unterhalb von schon etwa 800 Hz erwünscht, wobei der Anstieg geringer sei, im Vergleich zur deutschen Auffassung aber dennoch bei 125 Hz etwa denselben Faktor bezüglich der mittleren Nachhalldauer aufweise. Zudem sei ein Anstieg im hohen Frequenzbereich oberhalb von 4 000 Hz günstig (Winckel, 1950, S. 499) (siehe Abb. 3.21), Winckel hält diesen jedoch für unerheblich. Diese Nachhallzeiten beziehen sich auf einen 10 000 m^3 fassenden Saal. Aus beiden Kurven entwickelt Winckel für das Beispiel Titania Palast einen Toleranzbereich guter Konzertsaalakustik, einen mit 0,2 s Toleranz recht schmalen Bereich (Abb. 5, Winckel, 1950, S. 499). Winckel stellt des Weiteren eine Geschmacksveränderung in Richtung steigender Nachhallzeit fest, die „sich überraschend schnell vollzieht“ (Winckel, 1950, S. 499).

Fritz Winckel führt zwischen 1950 und 1955 eine Befragung von Dirigenten durch, um „die besten Konzertsäle der Welt“ zu ermitteln (Aufsatztitel, Winckel, 1955), vergleicht die Hörsamkeiten der ermittelten Säle und veröffentlicht seine Ergebnisse 1955 in einem Aufsatz (Winckel, 1955, S. 753). Zunächst stellt Winckel fest, dass die Nachhallzeiten der Säle den von Kuhl (1954) festgestellten repertoireabhängigen optimalen Nachhallzeiten für klassische und romantische Musik entsprechen (Winckel, 1955, S. 753). Die unter-

[25] Quelle wird nicht näher referenziert.

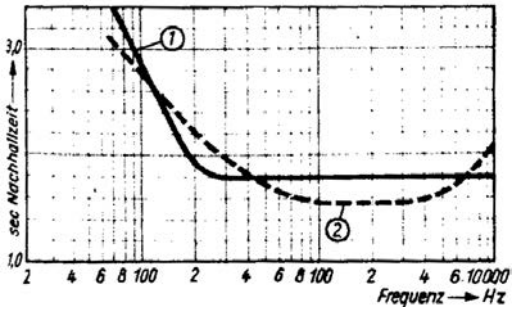


Abbildung 3.21: Gegenüberstellung deutscher (1) und amerikanischer (2) Empfehlungen zum Frequenzverlauf der Nachhallzeit, Winckel (1950)

schiedlichen Nachhallwerte der Säle zwischen 1,4 und 2,1 s deuten auf andere wesentliche Faktoren der Hörsamkeit hin, Winckel nennt hierzu Schalldiffusität und Deutlichkeit. Bezüglich der optimalen Nachhallzeit verweist der Autor auf die von Kuhl (1954) durchgeführte Untersuchung.

In einem weiteren Aufsatz aus dem Jahre 1958 vergleicht Winckel die auf der Dirigentenbefragung basierende Liste der weltbesten Konzertsäle, welche vor dem zweiten Weltkrieg errichtet wurden, mit Sälen, die nach 1945 entstanden, bezüglich ihrer akustischen Eigenschaften. Ein Aspekt der „hohen Klanggüte“ der Vorkriegssäle sei der nicht allzu große Anstieg der Nachhalldauer im tiefen Frequenzbereich (Winckel, 1958, S. 52). Winckel diskutiert diesen Frequenzverlauf und zieht hierzu die Wissenschaftler Békésy (1934a), Knudsen u. Harris (1950) und Beranek (1955) heran. Während Békésy einen frequenzunabhängigen Verlauf vorschlägt, sprechen sich letztere für einen Anstieg bei tiefen Frequenzen aus. Dies hält auch Winckel für gerechtfertigt, da einerseits die Orchesterbesetzungen der klassischen Werke für kleinere Räume konzipiert wurden. In den heutigen größeren Räumen müsse dies durch die Nachhallzeit oder eine veränderte Besetzung ausgeglichen werden. Andererseits nehme die Empfindlichkeit des Ohres zu tiefen Frequenzen hin ab und es fehle bei langen Laufzeiten des Schalls an „einer ausreichenden Baßstütze“ (Winckel, 1958, S. 52). Des Weiteren hält Winckel einen Abfall der Nachhallzeit zu hohen Frequenzen für gerechtfertigt. Die moderne Entwicklung zu ’high fidelity’ liege „[...] nicht im Sinne des Klangbildes der damaligen Komponisten“ (Winckel, 1958, S. 52). Der Autor schließt sich bezüglich der Nachhallkurve den Empfehlungen nach Beranek (1955) an. Winckels Vergleich der alten und neuen Säle setzt sich wie folgt fort (vergleiche hierzu Abb. 3.22). Die mittleren Nachhallzeiten der alten Säle verschöben sich von einem Wert von etwas über 2 s auf unter 2 s der Nachkriegsbauten um etwa 0,2 bis 0,5 s (vgl. Winckel, 1958, S. 51, S. 53 u. 58). Gleichzeitig sei eine leichte Begradigung

des von hohen zu tiefen Frequenzen absteigenden Nachhallzeitverlaufs. festzustellen. Der Autor führt den Trend zu kürzeren Nachhallzeiten direkt nach dem Krieg auf den Einfluss der Rundfunkstudioentwicklung[26] zurück und äußert sich zustimmend über die gegenwärtige rückläufige Tendenz auf einen „bewährten Wert von 2 sec“ (Winckel, 1958, S. 54). Dennoch solle die Bedeutung des Verlaufs nicht überschätzt werden, da es Beispiele der ungünstigen Beurteilung von Sälen gebe, die eine geeignete Nachhallkurve aufweisen.

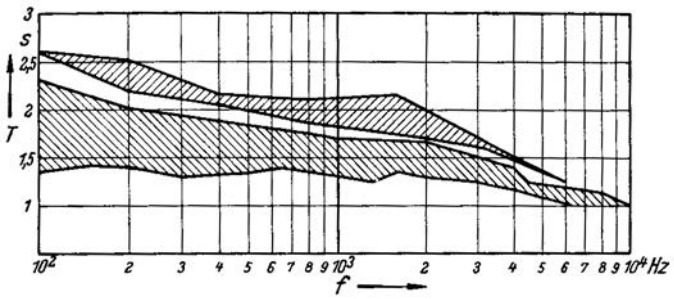


Abbildung 3.22: Vergleich der Nachhallkurven ’der besten Konzertsäle vor 1945’ (oben) und nach 1945 gebauter Säle (unten), Winckel (1958)

1962 gibt Winckel die optimale Nachhallzeit für symphonische Musik mit 2s zwischen 500 und 1000Hz an (Winckel, 1962, S. 81). Dies stellt weniger eine Empfehlung, als eine einleitende Bemerkung in einem Aufsatz dar. Winckel begleitete hierzu das Orchester von Cleveland auf einer Konzertreise, fertigte Messungen in 15 verschiedenen Konzertsäle an und analysierte des Orchesters Spielweise unter den variierten raumakustischen Bedingungen.

3.2.11 Parkin u. a., Departement of Scientific and Industrial Research, England, 1952-1953

Parkin, Scholes und Derbyshire publizieren 1952 einen Aufsatz zur Nachhallzeit zehn britischer Konzertsäle. Ihre Untersuchung umfasst eine Befragung von Komponisten, Kritikern und Professoren für Musik zur Akustik der Konzertsäle. Für sieben Säle gaben die Teilnehmer mehr als 50% ’good’-Urteile ab. Die Nachhallzeiten dieser Säle liegen auf bzw. leicht unter der Knudsen-Harris-Empfehlung (1950), wenn man zwei Extremwerte ignoriere (Convent Garden Opera House mit 1,1 s und St. Andrews Hall mit 2,2 s).

[26] Rundfunkübertragungen waren derzeit einkanalig. Dabei geht im Gegensatz zum binauralen Hören die Richtungsinformation der Quelle vollständig verloren. Die subjektive Nachhalldauer steigt somit, während die Deutlichkeit sinkt.

Die Wissenschaftler halten fest, dass man aus den Ergebnissen nicht auf eine optimale Nachhallzeit nahe der Knudsen-Harris-Empfehlung schließen könne (Parkin u. a., 1952, S. 100). Dies lasse einerseits die Methode der Befragung, die Auswahl der Teilnehmer und die erhaltenen Urteile nicht zu. Die Volumen moderner Konzertsäle liegen andererseits über den Volumen der Säle, denen diese Untersuchung galt. Erwähnenswert sei des Weiteren die Tatsache, dass die Mehrheit der untersuchten Konzertsäle im Bassbereich (125Hz) nicht über die Nachhallzeit verfüge, die generell akzeptiert sei, nämlich eine Nachhallzeit 1 bis 1,5-fach so hoch wie die der mittleren Frequenzen.

1953 nehmen Parkin u. a. in einem Bericht über die raumakustische Gestaltung der Royal Festival Hall in London, welche 1951 eröffnet wurde, Bezug zur Nachhallzeit. In der Planungsphase wurde zunächst das Optimum nach Bagenal und Wood von 2,2 s für mittlere Frequenzen angestrebt (Parkin u. a., 1953, S. 250). Raumakustischen Vermessungen anderer britischer Konzertsäle entnahmen die Berater jedoch, dass dieser Wert nicht erreicht werden könne. Stattdessen wurde mit 1,7 s das Knudsen-Harris-Optimum von 1950 als Zielwert festgelegt. Für tiefe Frequenzen (125 Hz) sollte die Nachhallzeit auf 100 bis 150% des Wertes für 500 Hz eingestellt werden, was 1,7 bis 2,5 s entspreche. Letztendlich besaß der Konzertsaal nach Fertigstellung eine Nachhallzeit von 1,5 s, was von den Autoren als zu niedrig eingeschätzt wird (Parkin u. a., 1953, S. 258).

3.2.12 W. Kuhl, Rundfunktechnisches Institut, Nürnberg, 1954-1978

W. Kuhl veröffentlichte 1954 eine Studie zur Bestimmung der optimalen Nachhallzeit in großen Musikstudios. Er resümiert und kritisiert vorangegangene Studien der letzten 30 Jahre und erläutert die Schwierigkeiten einer solchen Untersuchung. So kann bspw. durch die Befragung von Fachleuten zur Hörsamkeit berühmter Säle nicht auf die optimale Nachhallzeit geschlossen werden. Den in der Literatur oft anzutreffenden Zusammenhang zwischen optimaler Nachhallzeit und Raumvolumen führt Kuhl auf das Fehlen von Absorptionsmaterialien insbesondere in älteren Sälen zurück, da die Nachhallzeit dort zum großen Teil nur vom Raumvolumen abhänge (Kuhl, 1954, S. 620). Die bisher empfohlenen Werte der Nachhallzeit seien ziemlich unsicher, da sie einerseits auf Berechnungen beruhen, die weit über den wirklichen Nachhallzeiten der Säle liegen und andererseits für den unbesetzten Zustand des Saales gelten (Kuhl, 1954, S. 621). Diese Nachhallzeiten würden immer wieder zitiert, obwohl die Meßwerte einiger Säle bereits länger bekannt wären. Zudem gebe es keine Empfehlungen, die die musikalische Stilart

berücksichtigen. Kuhl führt die Empfehlungen diverser Studien auf und vergleicht sie mit den auf dieser Studie beruhenden Werten (vgl. Abb. 1 u. 2, Kuhl, 1954, S. 620). Die Studie wurde mittels einkanaliger Aufnahmen in verschiedenen Musikstudios durch Befragung von 370 erfahrenen Versuchspersonen zu den akustischen Eigenschaften der Aufnahmeräume (wie Nachhallzeit, Durchsichtigkeit) durchgeführt. Auf Grundlage der vorliegenden Studie empfiehlt Kuhl für große Musikstudios abhängig vom Musikstück folgende Nachhallzeiten (Kuhl, 1954, S. 628, S. 633-634):

- romantische Musik (z. B. Brahms) - 2,1 s
- klassische Musik (z. B. Mozart) - etwas über 1,5 s
- moderne Musik (z. B. Strawinski) - etwas unter 1,5 s

Einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Spielarten sieht Kuhl bei einer Nachhallzeit von 1,7 s (Kuhl, 1954, S. 634). Eine Abhängigkeit zum Raumvolumen gebe es nicht, dafür aber zur musikalischen Stilart bzw. zur Komposition. Zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Konzertsäle bemerkt Kuhl: „Für Konzertsäle gelten logischerweise die gleichen oder etwas größere Werte“ (Kuhl, 1954, S. 633-634), allerdings für den mit Orchester und Zuschauern besetzten Saal. Des Weiteren konnte der optimale Anstieg zu tiefen Frequenzen nicht geklärt werden, jedoch sei ein Abfall ungünstig (Kuhl, 1954, S. 634).

Kuhl (1954) nimmt in einer Fußnote Bezug zu einer ähnlichen Studie T. Somervilles (Kuhl, 1954, S. 622).[27] Dieser wiederum antwortet in (Somerville, 1955). Somerville kritisiert, dass die Nachhallzeiten der klassischen und modernen Musikstücke (Mozart bzw. Strawinski) nur einen engen Spielraum um 1,5 s aufwiesen und dass sich so dem Mittelwert dieser Nachhallzeiten (1,47 s bzw. 1,46 s) ähnliche Gesamturteile ergeben. Somerville stimmt mit Kuhl zu den abgeleiteten Zeiten für klassische und romantische Musik überein. Für moderne Musik hingegen empfehle er allerdings bis zu 2 s anstelle von 1,5 s. Das Musikstudio des BBC-Orchesters habe eine Nachhallzeit von 1,7 s, womit sehr gute Resultate erzielt würden. Kuhl stimmt in Anbetracht, dass 1,7 s den empfohlenen Kompromiss für verschiedene Stilarten darstellt, mit Somerville überein. Somerville ist jedoch der Meinung, mit 1,7 bis 2 s ließen sich sehr gute Bedindungen für die Aufnahme oder Übertragung von moderner Musik herstellen (Somerville, 1955, S. 99).

[27] Die Studie (Somerville, 1953) findet an dieser Stelle der Arbeit nur Erwähnung, da sie keine relevanten Informationen enthält.

In den Tagungssberichten des 2. Kongresses internationaler Akustik äußert sich Kuhl zur Akustik von Aufführungs- und Aufnahmeräumen. Zur Nachhallzeit verweist er auf die Ergebnisse seiner eigenen Studie aus dem Jahre 1954, die repertoirespezifische günstige Nachhallzeiten ergab. In Opernsälen müsse ein Kompromiss zwischen Verständlichkeit des Gesangs und musikalischen Anforderungen geschlossen werden. Dieser resultiere in einem günstigen Nachhallwert von 1,6 bis 1,8 s (Kuhl, 1957, S. 54-55). Die Nachhallzeit-Empfehlung von Beranek (1955) ergänzt Kuhl um weitere Empfehlungen, die er in deutschen Studios erlangt habe. Studios für Kammermusik wird hier eine Nachhallzeit zwischen 0,8 und 1,1 s zugeordnet, der Verlauf der Nachhallzeit sieht einen Abfall oberhalb von etwa 3 bis 4 kHz vor (vgl. Fig. 2, Kuhl, 1957, S. 55).

3.2.13 Reichardt u. a., Technische Universität Dresden, 1954-1981

Reichardt, Kohlsdorf und Mutscher veröffentlichten 1955 eine zu Kuhl (1954) vergleichbare Untersuchung zur Nachhallzeit von Studioräumen. Einleitend wird die übliche 'Schulmeinung' über die optimale Nachhallzeit zusammengefasst und in Frage gestellt. Reichardt empfehle in (Reichardt, 1952) eine vom Volumen und Genre abhängige Nachhallzeit und einen Frequenzverlauf dieser mit einem Anstieg des Nachhallwertes unterhalb von 256 Hz (siehe 3.38, S. 90). Der Anstieg, so die Autoren, sei entweder auf eine „Geschmacksbildung“ oder auf eine Notwendigkeit zurückzuführen, da tiefenwirksame Schallabsorption nur mit erheblichem Aufwand hergestellt werden könne und in der Vergangenheit „Mittel und Wirkung“ unbekannt gewesen wären (Reichardt u. a., 1955, S. 18). Die Untersuchung wurde anhand nachhallarmer Aufnahmen verschiedener Musikstücke durchgeführt, zu denen Nachhall hinzugemischt wurde. Aus einer Befragung von 85 geschulten sowie ungeschulten Beobachtern schlussfolgerten die Autoren, dass die übliche Meinung über die Nachhalldauer einen guten Mittelwert angebe, jedoch die Streuung um diesen teilweise erheblich ausgeprägt sei. Bei einem Vergleich mit und unter Anwendung der Auswertungsmethoden von Kuhl (1954) stellten die Forscher eine Übereinstimmung der Ergebnisse fest. Es ergaben sich folgende, vom Musikstück abhängige Nachhallzeiten (Reichardt u. a., 1955, S. 24-25):

- Rhythmisch ausgeprägte Musik - 1,2s
- Symphonische Musik - 1,55 bis 1,65s
- Romantische symphonische Musik - 1,85s

Bei dem für romantische Musik gefundenen Wert sei jedoch unklar, ob dieser auf die Nachhallzeit bei 500 und 1000 Hz oder auf den Abfall der Nachhallkurve zu tiefen Frequenzen hin zurückzuführen sei. Ob sich die hier gefundenen Ergebnisse auf Konzertsäle übertragen ließen, sei fragwürdig.

Abdel Alim definiert 1973[28] das Klarheitsmaß C_{80} für Musik (vergleiche mit Abschnitt 2.3.6). Er gibt drei Kategorien zur Unterscheidung zwischen unbrauchbarer und brauchbarer Durchsichtigkeit musikalischer Darbietungen an: Gut, Grenzbereich und Schlecht (Abdel Alim, 1973, S. 212). Unterhalb von C_{80} = - 1,6 dB stuft der Autor die Klarheit als unbrauchbar (schlecht) ein. Über dem theoretischen Grenzbereich von - 1,6 dB $\geq C_{80} \geq$ 1,6 dB wird die Durchsichtigkeit als brauchbar (gut) bezeichnet. Diese Einteilung bezieht sich auf ein Musikmotiv von Mozarts Jupiter-Sinfonie. „Bei anderen Motiven ist noch [...] eine Korrektur einzuführen.“ (Reichardt u. a., 1975a, S. 136). Abdel Alim untersucht hierzu den Einfluss des Musikmotivs auf die Zeit- und Registerdurchsichtigkeit und findet für Motive von Wagner und Arnold um - 3 bzw. - 2 dB vom Mozartmotiv abweichende theoretische Grenzbereiche (Abdel Alim, 1973, S. 138).[29] Dies bedeutet, dass für Werke der Romantik (Wagner) - 3 $\pm$ 1,6 dB, für die zeitgenössische Kompositionen (Arnold) dagegen - 2 $\pm$ 1,6 dB als Grenze für brauchbare Klarheiten gelten. Der akzeptable Bereich der Klarheit lässt sich demnach in Abhängigkeit vom Motiv auf ca. - 4,6 dB erweitern. Des Weiteren untersucht Abdel Alim die Klarheit C auf Korrelation mit anderen Parametern. Die Schwerpunktzeit korreliere stark mit der Klarheit. Laut Abdel Alim entspreche der Bereich 0 $\pm$ 1,6 dB einer Spanne der Schwerpunktzeit von 97 bis 131 ms, wobei die kleinste brauchbare Klarheit von -1,6 dB einem maximalen Wert der Schwerpunktzeit von 131 ms entspricht (Abdel Alim, 1973, S. 172).

Reichardt u. Lehmann (1981) untersuchen die als optimal empfundenen Bereiche der Parameter Klarheitsmaß und Raumeindrucksmaß[30] in Hörversuchen mit synthetischen Schallfeldern. Abdel Alim (1973) berichtete bereits über den für klassische Musikmotive gültigen unteren Grenzbereich der Klarheit von 0 $\pm$ 1,6 dB. Für den praktischen Konzertbetrieb liege diese bei - 3 dB. Die obere Grenze habe er jedoch nicht untersucht (Reichardt u. Lehmann, 1981, S. 175). In die Beurteilung der Durchsichtigkeit und des Raumein-

[28] Für eine kürzere Zusammenfassung der Arbeit, siehe Reichardt u. a. (1975a, 1974).

[29] Zu beachten ist, dass sich die in der Publikation genannten Werte auf das korrigierte Hallmaß R^*_2 beziehen, welches mit dem Klarheitsmaß in der Beziehung C = $-R^*_2$ steht, und daher positiv sind.

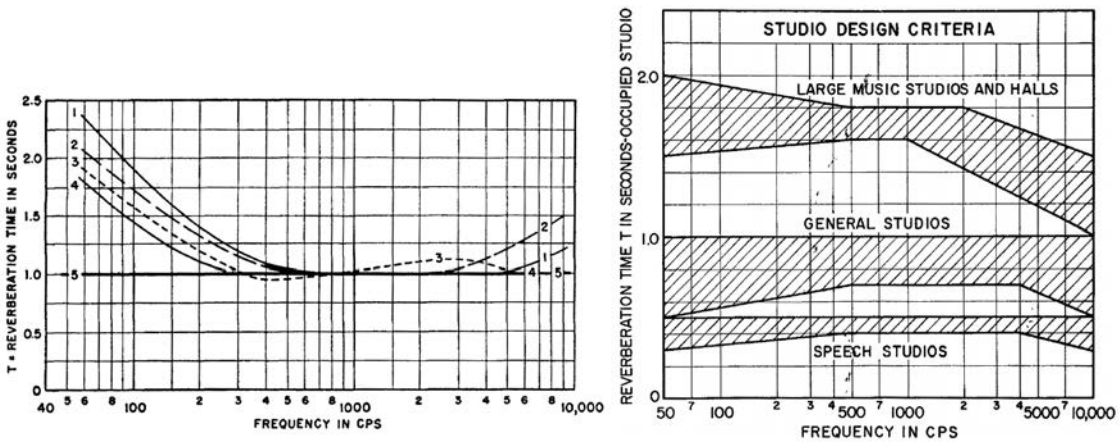
[30] Die Dresdner Forschergruppe unter der Leitung von W. Reichardt schlug diese objektive Messgröße für den Raumeindruck vor. Diese fließt jedoch nicht in die Standardisierung mit ein und ist daher für diese Arbeit irrelevant.

drucks fließe, den Autoren nach, die Erwartungshaltung der Zuhörer mit ein, so dass in Bühnennähe eine größere Durchsichtigkeit und in weiterer Entfernung von der Bühne ein gut vermischter Gesamtklang vorrausgesetzt würden. Daher verschiebe sich der optimale Bereich der Parameter mit zunehmender Bühnenentfernung zu geringeren Klarheitswerten und höherem Raumeindruck (Reichardt u. Lehmann, 1981, S. 176). Aus den Hörversuchen anhand von drei Musikmotiven von Haydn, Mozart und Wagner schließen die Autoren, für die vorderen Platzgruppen liege der Bereich guter Durchsichtigkeit zwischen 3 und 8 dB. Als brauchbare Werte des Klarheitsmaßes werden solche zwischen - 2 und 3 dB sowie > 8 dB angesehen. Unbrauchbar seien Werte unter - 2 dB. Für bühnenentfernte Plätze sei gute Durchsichtigkeit im Bereich zwischen 0 und 5 dB gegeben, brauchbare zwischen - 5 bis 0 dB und zwischen 5 bis 9 dB . Als unbrauchbar gelten Werte > 9 dB und < -5 dB (Reichardt u. Lehmann, 1981, S. 180-181). Die Autoren nehmen des Weiteren an, dass für Oratorien und sonstige Chormusik sowie für romantische Musik die Forderung $C_{80} \geq -3$ dB gültig sei (Reichardt u. Lehmann, 1981, S. 184).

3.2.14 L. L. Beranek u. a., 1955-1992

Beranek empfiehlt 1950 in einem Aufsatz volumenabhängige Nachhallzeiten für Rundfunkstudios. Für ein Volumen von 20 000 m^3 ergibt sich aus einem Diagramm eine Nachhallzeit von 1,7 s (Beranek, 1950, S. 471). Bezüglich des Frequenzverlaufes der Nachhallzeit führt Beranek in einem zweiten Diagramm die Vorgaben verschiedener Autoren auf und spricht sich für eine Nachhallkurve aus, die mit geübten Zuhörern in dänischen Rundfunkstudios experimentell ermittelt wurde (Beranek, 1950, S. 471-472) (Abb. 3.23). Die Kurve weist einen Anstieg zu tiefen Frequenzen unterhalb von etwa 300 Hz und eine Anhebung der Nachhallzeit bei hohen Frequenzen zwischen 1 und 5 kHz auf.

Fünf Jahre später korrigiert Beranek seine Empfehlungen nach Berücksichtigung der Ergebnisse von Kuhl (1954). In einem weiteren Diagramm gibt Beranek einen Toleranzbereich der Nachhallzeit für große Musikstudios an (Beranek, 1955, S. 551). Die günstige mittlere Nachhallzeit liege demnach zwischen 1,6 und 1,8 s. Zu hohen Frequenzen über 2 kHz sei Abfall der Nachhallkurve empfohlen. Im tiefen Frequenzbereich deutet der Toleranzbereich einen möglichen leichten Abfall sowie einen etwas stärkeren Anstieg der Nachhallkurve an (vgl. Abb. 3.23). Es wird nicht deutlich, ob Beranek seine Vorgaben auf große Musikstudios bzw. auf einkanalige Rundfunkübertragungen beschränkt. Einerseits erwähnt er im Abstract des Aufsatzes, „New criteria are proposed for reverberation



(a) Beranek (1950) (b) Beranek (1955)

Abbildung 3.23: (a) Vergleich verschiedener Nachhallkurven, Beranek (1950), Kurve 3: dänische Rundfunkhäuser, (b) optimale Nachhallzeitbereiche nach Beranek (1955)

time for studios and auditoriums used for speech, music and general purposes“ (Beranek, 1955, S. 551) und bezeichnet den oben beschriebenen Verlauf mit „large music studios and halls“ (Beranek, 1955, S. 551), andererseits stellt er klar, dass Kuhls Ergebnisse für die einkanalige Rundfunkübertragung Gültigkeit besäßen, nicht aber für Konzertsäle. Zumindest andere Wissenschaftler, wie Winckel (1958), ziehen des Autors Vorgaben auch für die Konzertsaalakustik in Betracht.

1965 berichten Beranek und Schultz in einem Aufsatz über einen Zusammenhang zwischen frühem Reflexionsschall und spätem Nachhall. Sie modifizieren Thieles Deutlichkeit zu dem Quotienten aus später Nachhallenergie und früher Schallfeldenergie (mit der Grenze bei 50 ms) in dB. Ein so modifiziertes D’ = 0 dB besagt, dass sich die gesamte Schallfeldenergie zu jeweils 50% auf die ersten 50 ms nach Eintreffen des Direktschalls am Hörerort und auf den späteren Nachhall nach dieser Zeitgrenze teilt. Beranek und Schultz folgern aus Hörversuchen, tiefe Frequenzen müssen im 50ms-Energie-Anteil nicht präsent sein, sofern sie im Nachhall in ausreichender Stärke vorhanden sind. Dies steht in Widerspruch mit einer Feststellung von Schroeder u. a. (1966), die auf Messungen in der Philharmonic Hall (New York) beruht. Kritiken der ersten Konzerte berichteten von einem Mangel an „low-frequency response“ (Schroeder u. a., 1966, S. 434). Messungen ergaben einen Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin, aber einen Mangel an tieffrequenter Direktschall- und früher Reflexionsenergie (Schroeder u. a., 1966, S. 436-437). Beranek und Schultz vertreten die schon bekannte Meinung, die Nachhallzeit tiefer Frequenzen müsse länger als die der mittleren sein, um spektrale Balance zu erzielen.

Die Nachhallenergie solle den 50 ms-Anteil überwiegen, was einem D < 50% entspricht. D-Werte zwischen 28 und 36% bei 1 kHz (24 bis 28% bei 500 Hz) halten die Autoren für angemessen (Beranek u. Schultz, 1965, S. 314) (vgl. mit Abb. 3.24).[31]

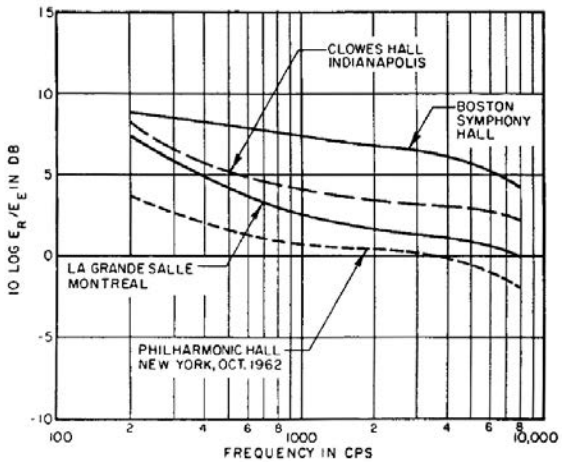


Abbildung 3.24: Messungen der 'Modifizierten' Deutlichkeit nach Beranek u. Schultz (1965) einiger Konzertsäle

In einem umfassenden Aufsatz beschreibt Beranek (1992) zahlreiche Untersuchungen zur subjektiven Beurteilung raumakustischer Bedingungen, sowie die Erforschung raumakustischer Phänomene und Schallfeldgrößen. In dem abschließenden Abschnitt geht Beranek auf sieben für die subjektive Wahrnehmung maßgebliche Kriterien ein, nennt jedoch nur für die Nachhallzeit eine empfehlenswerte Größenordnung: „The mid-frequency reverberation time RT in a fully occupied concert hall should be somewhere between 1.7 and 2.0s [...].“ (Beranek, 1992, S. 35).

Hidaka u. Beranek (2000) berichten über eine Untersuchung von 23 Opernhäusern. Die Autoren fertigen in den unbesetzten Sälen Messungen an und verschicken an 64 Dirigenten Fragebögen zur Akustik dieser Säle. Anhand 23 beantworteten Fragebögen nehmen die Hidaka und Beranek eine statistische Auswertung vor (Hidaka u. Beranek, 2000, S. 368) und nennen Empfehlungen zu einigen der zur Untersuchung herangezogenen Parameter. Die am besten bewerteten Opernsäle hätten Nachhallzeiten zwischen 1,2 und 1,6 s (Hidaka u. Beranek, 2000, S. 379), die Dirigenten bewerteten Nachhallzeiten zwischen

[31] Die Daten stammen aus einer Messung des modifizierten D' zwischen 250 Hz und 8 kHz. Ähnlich der Umrechnung zwischen Klarheit und Deutlichkeit kann auch die von Beranek und Schultz modifizierte Messgröße in Thieles Deutlichkeit mit Hilfe der Beziehung $D = (10^{\frac{D'}{10}} + 1)^{-1}$ umgerechnet werden. Beranek und Schultz geben die Kurve der Clowes Hall als optimal an, La Grande Salle Montreal sei ebenfalls günstig (vgl. Fig. 2, Beranek u. Schultz, 1965, S. 312). Die Werte sind beiden Kurven bei den angegeben Frequenzen entnommen.

1,4 und 1,6 s als günstig. Das Klarheitsmaß habe seinen optimalen Wert zwischen 1 und 3 dB. Dieser Bereich gelte für die eine Quelle auf der Bühne. Für das begleitende Orchester im Graben solle das Klarheitsmaß negative Werte annehmen. Der frühe IACC (bis 80 ms), welchen Beranek über die Oktaven 500 bis 2 000 Hz mittelt, sollte kleiner 0,4 sein. Zuletzt macht Beranek Angaben zum Stärkemaß G. Mit der Quelle auf der Bühne sollte dies zwischen 1-4 dB liegen (Hidaka u. Beranek, 2000, S. 380).

3.2.15 Nickson und Muncey, 1953-1959

Nickson u. Muncey (1953) gehen in einem kurzen Aufsatz auf die Nachhallzeiten australischer Konzertsäle ein. Hierzu fertigen sie Messungen in einigen Sälen an und vergleichen die erhaltenen Nachhallzeiten mit denen britischer Konzertsäle und den Optima nach Knudsen u. Harris (1950) und Bagenal u. Wood (1931) (s. Abb. 3.25). Sie kommen zu dem Schluss, dass australische Konzertsäle im besetzten Zustand noch sehr lange Nachhallzeiten hätten und das damit wahrscheinlich ihr schlechter akustischer Ruf zu erklären sei.

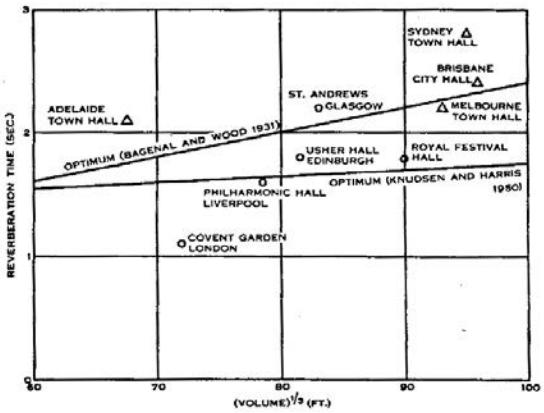


Abbildung 3.25: Vergleich der mittleren Nachhallzeit britischer und australischer Konzertsäle nach Nickson u. Muncey (1953)

Nickson und Muncey kritisieren 1959, dass bisherige Bestrebungen zur objektiven Erfassung der raumakustischen Bedingungen nicht auf der subjektiven Beurteilung der Hörsamkeit beruhten und auch nicht mit dieser korreliert wären (Nickson u. Muncey, 1959, S. 317). Weiter gebe es einen breiten Toleranzbereich der subjektiven Präferenz, der eine Adaption verschiedener raumakustischer Bedingungen zur Folge hätte. Erst akustische Defekte würden den Zuhörer auf eine unbefriedigende Hörsamkeit aufmerksam machen

(Nickson u. Muncey, 1959, S. 320). Der Autoren Schluss hieraus ist, „[...] daß eine dauernde Suche nach präziseren akustischen Parametern für das zweiohrige Hören [...] nicht gerechtfertig ist.“ (Nickson u. Muncey, 1959, S. 316). Die Autoren erörtern die Unterschiede der vorgeschlagenen optimalen Nachhallzeiten. Sie führen diese auf verschiedene Gewohnheiten der Länder zurück. Bagenal und Woods (England) Vorschläge liegen über denen von Knudsen und Harris (USA). Die Nachhallzeiten australischer Konzertsäle lägen nochmals höher als beide Optima. Daraus schlussfolgern und fordern sie, dass ein Nachhallzeitoptimum einen Toleranzbereich von $\pm 25\%$ haben sollte. Die höheren Werte für australische, die kleineren für amerikanische Hörgewohnheiten. Der Toleranzbereich innerhalb eines Landes betrage dann $\pm 10\%$. Des Weiteren betonen die Autoren die Bedeutung der Direktschallverstärkung im Sinne der Erhöhung des frühen Energieanteils (bis 50 ms nach Einteffen des Direktschalls) relativ zum späten Nachhall (Nickson u. Muncey, 1959, S. 319-320).

3.2.16 Shankland u. a., 1960-1968

In einem Aufsatz über die akustische Optimierung der Severence Hall (New York) berichten H. J. Ormestad, R. S. Shankland und A. H. Benade 1960 über die Einstellung der Nachhallzeit auf 1,7 s im mittleren Frequenzbereich. Zuvor betrug diese 1,5 s und wurde als zu kurz beurteilt. Der Anstieg der Nachhallzeit im Bassbereich wird mit einem Verweis auf Knudsen und Harris als nahezu optimal bezeichnet (Ormestad u. a., 1960, S. 373).

R. S. Shankland berichtet 1968, es sei offenkundig, dass relativ zum tiefen und mittleren Frequenzbereich längere Nachhallzeiten der hohen Frequenzen als unbefriedigend beurteilt werden. Ein Anstieg im Bassbereich sei dagegen wünschenswert, begründet durch die zu tiefen Frequenzen hin abfallende Sensitivität der Ohren. Außerdem gebe dies der musikalischen Aufführung „fullness of tone“ und der Sprachdarbietung „body“ (Shankland, 1968, S. 426).

3.2.17 Hawkes und Douglas 1971

Hawkes u. Douglas (1971) decken in einer Befragung englischer Konzertbesucher mit 16 Gegensatzpaaren die Multidimensionalität der Beurteilung der Hörsamkeit von Konzertsälen auf. Die Forscher erfassen vier bis sechs Aspekte der Wahrnehmung und Be-

urteilung, abhängig vom Konzertsaal und der Art und Variation der dargebotenen Musik (Hawkes u. Douglas, 1971, S. 235, S. 242 u. 250). In einem Vergleich von jeweils vier unterschiedlichen Platzkategorien in vier Konzertsälen scheint die subjektive Wahrnehmung der Halligkeit (reverberance) durch die Nachhallzeit determiniert zu sein. In zwei Sälen mit mittleren Nachhallzeiten von 2 s, 2,2 s bei 125 Hz und 1,8 bzw. 2,0 s bei 2 kHz, wurde 'reverberance' am höchsten beurteilt. Die Konzertsäle mit den niedrigsten Bewertungen der Kategorie 'reverberance' hatten kleinere mittlere Nachhallzeiten von höchstens 1,7 s sowie kleinere Nachhallzeiten zu tiefen und hohen Frequenzen hin (Hawkes u. Douglas, 1971, vgl. S. 247). Die Dimension 'Brilliance' sei so mit einer langen Nachhallzeit hoher Frequenzen verknüpft (Hawkes u. Douglas, 1971, S. 250). Eine vielleicht nicht sichere Schlussfolgerung aus den Ergebnissen von Hawkes und Douglas würde ein Nachhallzeitoptimum zwischen 1,8 und 2 s sowie einen Anstieg der Nachhallzeit in den tiefen Tonlagen und einen nicht zu starken Abfall zu hohen Frequenzen hin darstellen.

3.2.18 Drittes Physikalisches Institut der Universität Göttingen, E. Meyer u. a., 1956-1982

Eine 1956 von E. Meyer und R. Thiele durchgeführte Untersuchung sollte klären, welche neueren Messverfahren neben der Nachhallzeit relevant für die subjektive Beurteilung der Hörsamkeit sind. Es wurden Säle unterschiedlicher Volumina (550 bis 22 000 m^3) untersucht. Dabei erwies sich der Nachhallzeitverlauf unter 1 kHz als sehr unterschiedlich, was auf eine bis zu dem Zeitpunkt nicht einheitliche Meinung des optimalen Verlaufes unterhalb von 1 kHz und auf die schwierige Vorberechnung der Gesamtabsorption bei tiefen Frequenzen zurückgeführt wurde (Meyer u. Thiele, 1956, S. 428). Empfohlene optimale Nachhallzeiten seien bis dato vom Volumen des entsprechenden Saales abhängig. Erst Kuhl (1954) wies auf die Abhängigkeit der Nachhallzeit vom Musikstück hin, was allerdings für einkanalige Rundfunkübertragungen gelte. Die Messung der Deutlichkeit ergab Hinweise auf die Relevanz für die Beurteilung der Hörsamkeit (Meyer u. Thiele, 1956, S. 442-444): Die Deutlichkeitswerte lagen für alle Säle zwischen 31 und 77% mit einer Streuung zwischen 3 und 16% pro Saal. Die größten Werte erhielten die Autoren an den vorderen und hinteren Plätzen der Säle. Die an Mittelplätzen gemessenen niedrigeren Deutlichkeiten stehen eventuell mit subjektiv schlechten Beurteilungen dieser Plätze im Zusammenhang. Einen weiteren Hinweis für die Bedeutung der Deutlichkeit für die Hörsamkeit sei die Tatsache, dass große D-Werte dort gemessen wurden, wo Tonmeister für Rundfunkübertragungen Mikrofone platzierten. Die Werte an diesen Plätzen liegen

zwischen 38 und 76%, mit einem Mittelwert bei 62% (Meyer u. Thiele, 1956, S. 444). Zudem sei möglicherweise die Streuung der Deutlichkeit für das Gesamturteil eines Saales von Bedeutung, da in Sälen mit kleiner Streuung die ausgewählte Mikrofonposition als unkritisch berichtet wurde.

In den 1970er Jahren wird an der Göttingener Universität eine Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung der Akustik von musikalischen Aufführungsräumen durchgeführt. Die Kernarbeit ist durch die Dissertationen von Siebrasse (1973) und Gottlob (1973) gegeben, wird aber auch später im JASA durch Schroeder u. a. (1974) beschrieben. Ziel der Untersuchung ist es, zunächst die für die Wahrnehmung der Hörsamkeit von Konzertsälen wesentlichen subjektiven Beurteilungskriterien zu identifizieren und sie dann mit objektiven Daten der Konzertsäle zu verknüpfen. Die Forschungsarbeit von Siebrasse (1973) bezieht sich auf ersteres, die von Gottlob (1973) auf letzteres. Dazu wurden in 25 europäischen Konzertsälen binaurale Aufnahmen eines Mozart-Stückes per Lautsprecherwiedergabe nachhallfreier Orchesteraufnahmen von der Bühne angefertigt. 10 bis 15 Versuchspersonen (VPn) gaben in Paarvergleichen der Schallfelder ihre Präferenzurteile ab, d. h., welches von zwei Schallfeldern sie bevorzugten. Laut Siebrasse lassen sich vier verschiedene, voneinander unabhängige Kriterien bei der Beurteilung unterscheiden (Siebrasse, 1973, S. 69). Bei dem wichtigsten Kriterium komme eine Übereinstimmung der Versuchspersonen bezüglich des Kriteriums zum Ausdruck. Die restlichen Kriterien werden durch die Versuchspersonen in unterschiedlicher Weise angewendet, d. h. bei ihnen kommen die unterschiedlichen Geschmäcker der VPn zum Ausdruck. Die von Gottlob (1973) für den Vergleich mit Siebrasses Ergebnissen herangezogenen und für diese Arbeit relevanten objektiven Messgrößen sind Nachhallzeit, Early Decay Time, Deutlichkeit, Schwerpunktzeit und interaurale Kohärenz. Gottlob schließt aus den Daten der am meisten bevorzugten Schallfeldern auf eine 'optimale' Nachhallzeit von 2,1 s: Je größer die Abweichung von diesem Wert, desto größer sei die Ablehnung der Schallfelder durch die VPn. Dabei wirken sich Abweichung zu längeren Nachhallzeiten weniger stark aus als Abweichungen zu kürzeren (Gottlob, 1973, S. 49-50). Die Nachhallzeit erweise sich als wichtiges Kriterium, sofern Schallfelder mit sehr unterschiedlichen Nachhallzeiten zur Auswertung hinzugezogen werden. Dennoch sei eine optimale Nachhallzeit „noch kein hinreichender Grund für eine günstige Beurteilung eines Schallfeldes“, wie die weitere Auswertung zeigt (Gottlob, 1973, S. 50). Zudem hinge der Wert von dem ausgewählten Musikstück ab. Deutlichkeit und Nachhallzeit seien miteinander negativ korreliert. Für Nachhallzeiten der Schallfelder zwischen 1,75 und 2,25 s korrelieren die Parameter allerdings nur schwach miteinander (Gottlob, 1973, S. 38). Die Deutlichkeit erweise sich

als wichtiges Kriterium für die subjektiven Beurteilung. Gottlob nimmt einen optimalen Wert der Deutlichkeit von 0,34 (Gottlob, 1973, S. 51) an und sieht Übereinstimmungen zu den Schlussfolgerungen der Untersuchung von Beranek u. Schultz (1965), die einen günstigen Bereich der Deutlichkeit von 0,3 bis 0,35 angeben würden.[32] Die interaurale Kohärenz korreliere für ein Zeitintervall von 100 ms[33] am stärksten mit den subjektiven Urteilen (Gottlob, 1973, S. 52-53). Je geringer die Kohärenz, desto bevorzugter sei das entsprechende Schallfeld. Für die am meisten bevorzugten Schallfelder betrug die Kohärenz 0,23 bis 0,24 (Gottlob, 1973, S. 49). Aus den Auswertungen einer zweiten Hörreihe[34] deutet Gottlob, zu niedrige Kohärenzen können zu ablehnenden Beurteilungen der Schallfelder führen (Gottlob, 1973, S. 61). Die genannten optimalen Werte sind nicht als direkte Empfehlungen zu werten. Sie werden als optimal bezeichnet, um durch eine Abweichung davon stärkere Korrelationen mit den subjektiven Urteilen zu erreichen als durch die optimalen Werte selbst. Zudem wird in der zusammenfassenden Publikation Schroeder u. a. (1974) nur über Korrelationen berichtet und auf Angabe von optimalen Werten verzichtet. Eine Ausnahme stellt eine Angabe zur Nachhallzeit dar: „Not unexpectedly, reverberation time was found to be one of the significant preference factors with reverberation times below 2.2 sec“ (Schroeder u. a., 1974, S. 1201). Jedoch bemängeln die Forscher, dies wäre kein neuer Fund. Die für diese Arbeit relevanten festzuhaltenden Ergebnisse sind also, dass für eine günstige Beurteilung der Raumakustik die Nachhallzeit nicht allzu sehr von einem Wert von etwa 2s abweichen solle. Weiter führen geringe Kohärenzen der an den Ohren eintreffenden Signale in der Größenordnung von 0,23 bis 0,24 sowie nicht zu hohe Deutlichkeiten um den Wert 0,34 zu günstigen Beurteilungen.

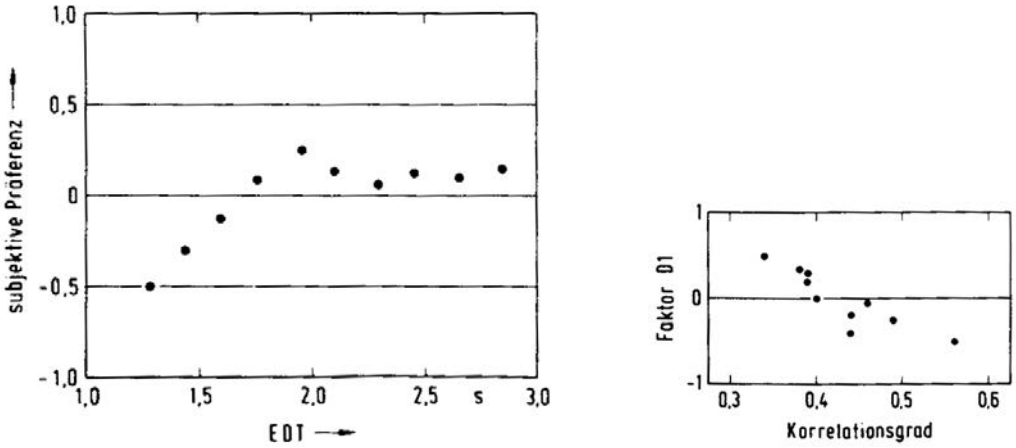
Kohlrausch u. Alrutz (1980) führen Hörversuche an Schallfeldern durch, bei denen einige Parameter gezielt variiert, andere konstant gehalten werden. Dies werde durch die digitale Schallfeldsynthese ermöglicht, bei der nachhallfreie Musikmotive mit kopfbezogenen Impulsantworten gefaltet werden. Die Nachhallzeit werde zwischen 1,3 und 2,8 s verändert, indem die Impulsantwort mit einer exponentiellen Gewichtungsfunktion multipliziert werde (Kohlrausch u. Alrutz, 1980, S. 387). In Paarvergleichen werden die so

[32] In einem vorangegangenen Abschnitt dieses Kapitels wurde die Publikation von Beranek u. Schultz (1965) bereits resümiert. Dort wurden Deutlichkeitswerte von 0,28 bis 0,36 aus einem Diagramm extrahiert (vgl. Fig. 2, Kurven ’Clowes Hall’ u. ’La Grande Salle Montreal’ Beranek u. Schultz, 1965, S. 312). Wenn Gottlob nun die etwas davon abweichenden Werte von 0,3 bis 0,35 zitiert, ist dies wohl auf eine Varianz beim Ablesen der Werte aus dem Diagramm zurückzuführen.

[33] Zeitintervall von 0 bis 100 ms, in der die Impulsantwort ausgewertet wird

[34] Die Aufnahmen wurden in zwei verschiedene Hörreihen eingeteilt: Hörreihe a mit Aufnahmen gleichwertiger Plätze aus 24 Konzertsälen und Hörreihe b mit Aufnahmen 10 verschiedener Plätze aus 4 Konzertsälen.

erhaltenen Stimuli beurteilt mit dem Ergebnis, dass für EDT-Werte zwischen 1,7 und 2,3 s die höchste Bevorzugung erreicht werde (Kohlrausch u. Alrutz, 1980, S. 389). Des Weiteren verändern die Forscher den Korrelationsgrad der Musikmotive, indem sie frühe seitliche Reflexionen in den Impulsantworten simulieren. Dazu nehmen die Forscher im reflexionsarmen Raum für 20 Winkel in der horizontalen Hörebene Richtungsimpulsantworten auf und fügen diese in die Originalimpulsantwort ein (Kohlrausch u. Alrutz, 1980, S. 388).[35] Ergebnis dieses Hörversuches, so Kohlrausch und Alrutz, sei eine einheitliche Beurteilung und Bevorzugung eines geringen Korrelationsgrades. Die subjektive Präferenz der EDT und der Präferenzraum des Korrelationsgrades können den Abb. 3.26 a und b entnommen werden (Kohlrausch u. Alrutz, 1980, S. 388-389). Niedrige Korrelationsgrade zwischen etwa 0,3 und 0,4 werden demnach größeren bevorzugt.



(a) (b)

Abbildung 3.26: (a) Subjektive Präferenz der Early Decay Time und (b) faktorieller Präferenzraum des Korrelationsgrades

Y. Ando u. a. (1982) publizieren 1982 eine Untersuchung über präferierte Nachhallzeiten. Die Ergebnisse der Studie werden im Abschnitt 3.3 zu (Ando, 1985) behandelt und daher soll hier nur knapp darauf eingegangen werden. Schallfelder, bestehend aus verschiedenen Kombinationen früher Reflexionen und spätem Nachhall, wurden anhand von Musikmotiven von Mozart, Gibbons und Arnold durch 9 bis 14 Versuchspersonen beurteilt. Die präferierten Nachhallzeiten wurden einerseits scheinbar aus den Hörversuchen bestimmt (vgl. Fig. 6, Ando u. a., 1982, S. 140), andererseits mittels der effektiven Länge der Autokorrelationsfunktionen τ_e der Quellsignale und der Beziehung $[T_{sub}]_p \cong 23\tau_e$ berechnet

[35] Die Richtungsimpulsantworten entsprechen einzelnen frühen Reflexionen.

(Table II und Formel 11 Ando u. a., 1982, S. 138 und S. 139). Beide Werte können Tabelle 3.7 (Seite 112) entnommen werden. Die Übereinstimmung der Urteile der Versuchspersonen sei für alle Musikmotive ausreichend (Ando u. a., 1982, S. 138). Es wird für das Musikmotiv Mozart ein weiterer Wert der bevorzugten Nachhallzeit von 1,2s angegeben (Ando u. a., 1982, S. 140). Woher dieser Wert stammt, wird aus der Publikation nicht ersichtlich. Der Wert stehe laut den Autoren im Kontrast zu den Ergebnissen anderer Forscher, beispielsweise zu Kuhl (1954), der eine Nachhallzeit von 1,54s für dasselbe Motiv ableitete.

3.2.19 P. Lehmann und H. Wilkens, Institut für Technische Universität Berlin, 1975-1980

Eine umfassende Untersuchung der 1970er Jahre in Berlin zur subjektiven Beurteilung der Hörsamkeit von Konzertsälen und dem Zusammenhang mit objektiven Schallfeldmessgrößen ist durch die Dissertationen von Wilkens (1975) und Lehmann (1976) dokumentiert. Die Aufsätze (Wilkens, 1977) und (Lehmann u. Wilkens, 1980) fassen deren Ergebnisse zusammen. Auf einer Konzertreise des Berliner Philharmonischen Orchesters werden in jeweils sechs Konzertsälen an verschiedenen Plätzen vom Orchester gespielte Musikmotive mit einem Kunstkopf aufgenommen (Wilkens, 1975, S. 43-46). Es werden Motive unterschiedlicher Epochen von Mozart (Klassik), Brahms (Romantik) und Bartok (moderne Musik) für die Aufnahme ausgewählt (Wilkens, 1975, S. 46-47). 40 Versuchspersonen beurteilen schließlich anhand von Fragebögen mit 19 akustischen Gegensatzpaaren die insgesamt 60 Hörbeispiele (Wilkens, 1975, S. 75-78). Wilkens berichtet von drei subjektiven Beurteilungsaspekten, nach denen das Schallfeld wahrgenommen werde (Wilkens, 1975, S. 103):

1. Stärke und Ausdehnung der Schallquelle
2. Empfindung der Deutlichkeit des Gesamtklanges
3. Beurteilung des Gesamtklanges bezüglich der Klangfarbe

Darüber hinaus lassen sich zwei Gruppen unterschiedlichen Geschmacks bezüglich des ersten Aspektes unterscheiden: die erste bevorzuge ein relativ kräftiges, die zweite dagegen ein weniger kräftiges, deutlicheres Schallfeld (Wilkens, 1975, S. 103-104). Lehmann (1976) untersucht anschließend eine Auswahl von raumakustischen Parametern auf Korrelation mit den gefundenen Beurteilungsaspekten. Hierbei korreliere das Stärkemaß G am stärksten mit der ersten Beurteilungskategorie. Die Empfindung der Deutlichkeit

des Gesamtklanges werde am besten durch die Schwerpunktzeit beschrieben. Der dritte Beurteilungsaspekt der Klangfarbe korreliere mit nur 67% mit der frequenzabhängigen Auswertung der Impulsantwort in Form des Verlaufes der EDT zwischen 125 und 2000 Hz (S. 87, Lehmann, 1976; Lehmann u. Wilkens, 1980, S. 263-265). Es ließe sich schlussfolgern, dass bezüglich der Klangfarbe Säle mit einer um −0,1 bis −0,2 s pro Oktave fallenden EDT bevorzugt werden (S. 82, Lehmann, 1976; Lehmann u. Wilkens, 1980, S. 266). Die Nachhallzeit solle dementsprechend mit steigender Frequenz leicht fallen (Lehmann u. Wilkens, 1980, S. 267). Aus den Beurteilungen der zuvor erwähnten Gruppen unterschiedlichen Geschmacks folgert Lehmann, dass ein minimales Stärkemaß von $G_{min} = -28$ dB nicht unterschritten und eine maximale Schwerpunktzeit von $t_{S,max} = 140$ ms nicht überschritten werden dürfe (Lehmann, 1976, S. 83-84), um für beide Gruppen „[...] eine allgemein als gut oder befriedigend beurteilte Hörsamkeit zu erzielen.“ (Lehmann u. Wilkens, 1980, S. 267). Für einen Vergleich mit anderen Empfehlungen muss am minimalen Stärkemaß allerdings eine Korrektur von +31 dB vorgenommen werden (siehe Abschnitt 2.3.7). Daraus ergibt sich eine Empfehlung von $G_{min} = 3$ dB. Zur Suche nach optimalen Werten und Bereichen raumakustischer Parameter äußern sich die Wissenschaftler zuletzt:

> „Von dem Gedanken der Formulierung eines Optimums von raumakustischen Eigenschaften muß wegen der Unterschiedlichkeit der Beurteilung durch verschiedene Versuchspersonen (-gruppen) sowie bei verschiedenen Musiken abgegangen werden.“ (Lehmann u. Wilkens, 1980, S. 267).

3.2.20 V. L. Jordan, 1981

In einer Studie beschäftigt sich Jordan (1981) mit einigen Parametern, welche die Raumakustik eines Konzertsaales als Gruppe am besten beschreiben. Hierzu bedient sich Jordan vier Kriterien: der Klarheit C_{80}, der frühen Abklingzeit EDT, dem Seitenschallgrad Lateral Effiency (LE nach Jordan) und der Frequenzcharakteristik der EDT. Zunächst diskutiert er die Toleranzbereiche der Kriterien. Bezüglich der Nachhallzeit gelte ein akzeptabler Bereich von 1,4 bis 2,8 s (Jordan, 1981, S. 256). Für die EDT, welche die subjektive Nachhalldauer besser widerspiegele, werde ein Bereich von 1,8 bis 2,6 s angenommen. Die Klarheit variiere in vielen Sälen stark und daher halte er einen Toleranzbereich von ±2 dB passender als die von Reichardt u. a. (1975a) vorgeschlagenen ±1,6 dB. Jordan diskutiert weiter einen akzeptablen Wertebereich des Parameters LE im Vergleich zu

Kuhls Stufen der Räumlichkeit und bezieht hierzu den Seitenschallgrad 'lateral energy fraction' (LF) nach Barron mit ein: LF = 0,26 würde einer Toleranz der LE-Werte von 0,2 bis 0,3 entsprechen (Jordan, 1981, S. 257-258). Anschließend wertet er Messungen der Parameter in elf verschiedenen Konzertsälen aus und kommt zu folgenden Schlüssen:

- Die besten klassischen Säle wiesen eine Kombination aus hohen LE- und EDT-Werten auf (Jordan, 1981, S. 264)
- Eine Variation der C_{80}-Werte von 4 bis 7 dB, natürlich bei akzeptablen Mittelwerten, innerhalb eines Saales sei angemessen (Jordan, 1981, S. 265).

Schließlich stellt Jordan eine Reihenfolge der Bedeutung der von ihm benutzten Kriterien für die Akustik von Konzertsälen auf: EDT nehme eine Führungsrolle ein, gefolgt von LE und zuletzt C_{80}. Die Neigung des Frequenzverlaufs der EDT erfasst Jordan über die Beziehung $EDT'(f) = \frac{1}{3}(EDT_{2kHz} - EDT_{250Hz})$ (in s/Oktave). Zwar habe der Wert nur einen informativen Gehalt, doch sollte er nahe bei Null liegen. Jordan betont, dass es sich mit den Ergebnissen nur um eine einleitende Studie handeln könne.

3.2.21 A. C. Gade, 1989

Wie bereits im Abschnitt 2.3.9 berichtet wurde, definiert Gade (1989a) den Parameter ST1 und in einer zweiten Publikation (Gade, 1989b) die Messgröße ST_{early}. Während sich das erste Dokument mit Laborexperimenten befasst, werden im zweiten Aufsatz Feldstudien in britischen und dänischen Konzertsälen beschrieben. Zugleich gibt Gade Messwerte der Parameter in verschiedenen Sälen an und schließt von subjektiven Befragungen von Musikern zur Unterstützung auf einen optimalen Bereich des Parameters ST1 von -12 dB $\pm$ 1 dB (Gade, 1989b, S. 260). Gade nennt des Weiteren eine optimale Nachhallzeit von etwa 2 s und eine günstige EDT von 1,5 s. Diese Werte beziehen sich allerdings auf Orchesterplattformen und die Beurteilung durch Musiker.

3.2.22 Fasold und Stephenson, 1993

Fasold u. Stephenson (1993) stellen fest, dass es bis 1993 noch keine „geschlossene Theorie“ für die Beurteilung der Hörsamkeit von musikalischen Aufführungsräumen gebe (Fasold u. Stephenson, 1993, S. 41). Zwar seien sichere Erkenntnisse vorhanden, zugleich jedoch auch „[...] eine Reihe noch offener Fragen [...]“ (Fasold u. Stephenson, 1993, S. 43).

Einigkeit in der Forschungsgemeinschaft herrsche darüber, dass die Hörsamkeit durch einige Hauptkriterien beschrieben werden könne, jedoch sei diese sich zugleich uneinig in der Aufstellung der Wertigkeiten für die Hörsamkeit relevanter subjektiver Kriterien (Fasold u. Stephenson, 1993, S. 41). Dennoch ließe der derzeitige Stand der Kenntnis eine raumakustische Planung bezüglich der Erzielung einer guten Hörsamkeit zu, was die Autoren an zwei Beispielen, dem Neuen Gewandthaus in Leipzig und dem Berliner Schauspielhaus, festmachen. Vor den Eröffnungen der beiden Säle in den Jahren 1981 und 1985 wurden objektive Messungen und subjektive Befragungen durchgeführt, deren Auswertung auf eine gute Akustik schließen ließen (Fasold u. Stephenson, 1993, S. 42-43). Einen Hinweis, dass die mittlere Nachhallzeit nicht als Hauptkriterium dienen könne, liefern unterschiedliche subjektive Beurteilungen der Nachhalldauern trotz gleicher Nachhallzeit der Säle von 2,0 s. Die Autoren führen dies auf das unterschiedliche Bassverhältnis, der Nachhallzeit tiefer Frequenzen relativ zur mittleren Nachhallzeit, zurück. Das Berliner Schauspielhaus weise im Gegensatz zum Leipziger Gewandthaus einen Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen auf, die Nachhalldauer wurde hier als etwas zu groß beurteilt. Der Schluss der Autoren hieraus ist, dass der Frequenzverlauf der Nachhallzeit in den tiefen Tonlagen die subjektive Nachhalldauer stark beeinflusse. Bemerkenswert hieran ist, dass das Schauspielhaus das von Beranek empfohlene Bassverhältnis von 1,2 aufweise, nach Korrektur der Nachhallzeit durch Helmholtzresonatoren betrage dieses jedoch nur noch 1,1. Des Weiteren besprechen die Autoren günstige Bereiche objektiver Zielgrößen (Fasold u. Stephenson, 1993, S. 41-42). Der Seitenschallgrad LF habe nach Barron (1993) einen mittleren günstigen Wert bei 0,2. Der optimale Bereich der Nachhallzeit liege zwischen 1,8 und 2,1 s. Optimale Werte des Klarheitsmaßes C_{80} lägen zwischen -1 und 3 dB. Die Deutlichkeit solle größer als 50% und das Klarheitsmaß C_{50} größer 0 dB sein. Die letzten beiden Werte beziehen sich allerdings auf gute Sprachverständlichkeit.

3.2.23 J. S.Bradley, G. A. Soulodre, 1994-2000

Bradley (1994) widmet sich dem objektiven Vergleich zwischen dem Interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten IACC und den frühen Seitenschallgraden LF nach Barron und LFC nach Kleiner. Als Grundlage dienen Messdaten von elf britischen und nordamerikanischen Konzertsälen. Die Volumina der Säle liegen bis auf zwei kleinere (2970 und 6070 m^3) zwischen 10 000 und 22 000 m^3. Der IACC wurde in drei Zeitbereichen 'early' (IACC(E), 0-80 ms), 'late' (IACC(L), 80-1000 ms) und 'total' (IACC(T), 0-1000 ms) erfasst. Saal-Mittelwerte des frühen und späten IACC seien stark frequenzabhängig, wobei

die Messwerte für tiefe Frequenzen nahe bei eins lägen (Bradley, 1994, S. 3526-3527). Für alle Frequenzen seien die Mittelwerte des frühen größer als die des späten IACC, was auf die Diffusität des späten Schallfeldes zurückzuführen sei. Die LF- und LFC-Mittelwerte streuten in einem kleineren Bereich über der Frequenz, die LF-Werte fielen dabei kleiner aus, als die des Seitenschallgrades nach Kleiner. Zwischen dem frühen IACC und den Seitenschallgraden gebe es innerhalb der 125 bis 1000 Hz Oktaven eine ausgeprägte Korrelation, vergleiche man aber anstelle von Saal-Mittelwerten die individuellen Messpositionen könnten keine Zusammenhänge zwischen den beiden Messgrößen festgestellt werden (Bradley, 1994, S. 3530). Der IACC(E) variiere in einigen Sälen über die Quellen-Empfänger-Distanz, während der LF nach Barron relativ konstant bleibe. Eine systematische Abhängigkeit der Messwerte des IACC vom Saalgrundriss könne aber nicht festgestellt werden (Bradley, 1994, S. 3251). Für die Angabe von Saal-Mittelwerten eigne sich eine große Auswahl von Quellen-Empfänger-Positionen am besten. Eine geringe Anzahl von Quellen-Empfänger-Positionen liefere zwar den prinzipiellen Verlauf der IACC(E)- bzw. LF-Werte über der Frequenz, seien aber nicht repräsentativ für den Saal-Mittelwert. Der IACC(L) sei dagegen weniger empfindlich gegenüber der Anzahl der Messpositionen. Des Weiteren diskutiert Bradley den Maximalwert der Verzögerung τ_{max} bei der Berechnung des IACC und präferiert einen Wert von $\tau_{max} = 0,97ms$. Die von den Autoren festgestellten Mittelwerte der Schallfeldgrößen über alle Säle geben Aufschluss über ihre üblichen Bereiche. Aus zwei Diagrammen lassen sich die folgenden Bereiche entnehmen (Bradley, 1994, S. 3527). Die Messwerte der Kreuzkorrelationskoeffizienten gelten nur für mittlere und hohe Frequenzen, da diese, wie oberhalb erwähnt, mit fallender Frequenz gegen 1 tendieren. Die Werte der Seitenschallgrade gelten für den gesamten Frequenzbereich:

- IACC(E) - 0,3 bis 0,6 für mittlere bis hohe Frequenzen
- IACC(L) - 0,1 bis 0,4 für mittlere bis hohe Frequenzen
- LF - 0,1 bis 0,3 über alle Frequenzen
- LFC - 0,2 bis 0,4 über alle Frequenzen

Bradley u. a. (2000) berichten in einer Untersuchung zur subjektiven Evalution diverser Parameter über den Zusammenhang einiger Messgrößen mit subjektiven Empfindungen. Demnach korreliere ein über alle Oktavbänder zusammengefasstes Stärkemaß G, wie es im derzeit aktuellen ISO-Standard vermerkt ist, gut mit der Empfindung der Lautheit. Ein A-gewichtetes G korreliere dagegen stark mit der subjektiv wahrgenommenen Lautheit. Klarheit C_{80} und Schwerpunktzeit t_S im mittleren Frequenzbereich (500 und

1 000 Hz) korrelierten gut mit der subjektiv empfundenen Klarheit. Des Weiteren wurde die Prädiktion der Nachhallempfindung durch die Messgrößen Nachhallzeit und EDT untersucht. Die mittlere Nachhallzeit korreliere leicht mit der empfundenen Nachhalldauer, die EDT jedoch stärker. In einem Gesamturteil korreliere nur die subjektive Empfindung der Klarheit mit den Urteilen der Versuchspersonen. Die Hörversuche wurden mit binauralen Stimuli aus einer 15-sekündigen Passage einer Mozart-Overtüre, zehn verschiedenen Schallfeldern und zehn Versuchspersonen durchgeführt. Bradley und Soulodre geben keine quantitativen Empfehlungen.

Bradley u. a. (2000) liefern ein Argument für eine Volumenabhängigkeit der Nachhallzeit in musikalischen Aufführungsräumen. Ihre Untersuchung ist den Zusammenhängen der scheinbaren Schallquellenbreite ASW und der Zuhörereinhüllung LEV gewidmet. Wie an verschiedenen Stellen dieser Arbeit bereits erwähnt, wird die Ausdehnung der Schallquelle durch frühe, die Einhüllung des Zuhörers durch späte seitliche Energieanteile des Nachhalls beeinflusst. Gleichzeitig, so die Autoren, verkleinere sich die Wahrnehmung der ASW mit zunehmenden späten seitlichen Energieanteilen, für die LEV gilt selbiges im umgedrehten Zusammenhang. Die größten Ausprägungen von ASW und LEV machen die Autoren in kleinen Sälen aus, die über starke frühe und späte laterale Schallfelder verfügten. An den Schallfeldern größerer Säle mit hoher Klarheit und starken frühen seitlichen Energieanteilen würden die kleinsten Ausprägungen der Zuhörereinhüllung festgestellt. Längere Nachhhallzeiten in diesen Sälen würde die Erzielung guter Zuhörereinhüllung ermöglichen (Bradley u. a., 2000, S. 660).

3.2.24 Choi und Fricke, 2005

Choi u. Fricke (2005) berichten über Korrelationen der Parameter G[36], C_{80}, EDT und IACC mit den Präferenzurteilen aus Hörversuchen anhand der Schallfelder zweier Konzertsäle in Sydney. Auf der Grundlage von zwölf Messpositionen pro Saal wurde die Berechnung der Parameter nach dem Standard ISO 3382 (1997) durchgeführt. Die Untersuchung wurde mit Kunstkopfaufnahmen unter Anwendung einer 2AFC-Methode durchgeführt. Die acht Versuchspersonen zeigten eine ausgeprägte Präferenz zugunsten einer der beiden Konzertsäle (V = 11 000 m^3). Die Ergebnisse der Studie mögen, dadurch dass nur zwei Konzertsäle untersucht wurden, nicht repräsentativ für andere Konzertsäle sein (Choi u. Fricke, 2005, S. 1061). Die Wissenschaftler geben daher keine quantitativen

[36] Insbesondere G_{mid}, Mittelwert der 500/1 000 Hz-Oktaven.

Empfehlungen bezüglich der Parameter. Dennoch kann man die Messgrößen der bevorzugten Schallfelder notieren, sie sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tabelle 3.4: Messwerte des bevorzugten Schallfeldes der Untersuchung von Choi u. Fricke (2005)

	T in s	EDT in s	G_{mid} in dB	$IACC_{E3}$	C_{80} in dB
kleinster Wert	1,98	1,75	5,2	0,26	-1,6
größter Wert	2,08	2,15	8,6	0,45	0,6
Mittelwert	**2,04**	**1,87**	**7,2**	**0,33**	**0,68**

3.3 Monographien und Sammelbände

In diesem Unterkapitel werden absatzweise und in chronologischer Reihenfolge die recherchierten Monographien und Sammelbände bezüglich der relevanten Informationen zusammengefasst. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde das Unterkapitel in drei Abschnitte aufgeteilt. Es werden die Empfehlungen der Autoren aufgelistet und soweit es aus den Publikationen hervorgeht, wird die Grundlage der Empfehlungen erläutert. Wie im vorherigen Unterkapitel wurde versucht zum Vergleich der Nachhallzeitempfehlungen einen mittleren Einzahlwert zu extrahieren. Die typischen Volumen entsprechen selbstverständlich denen im Abschnitt zuvor.

3.3.1 1920 bis 1949

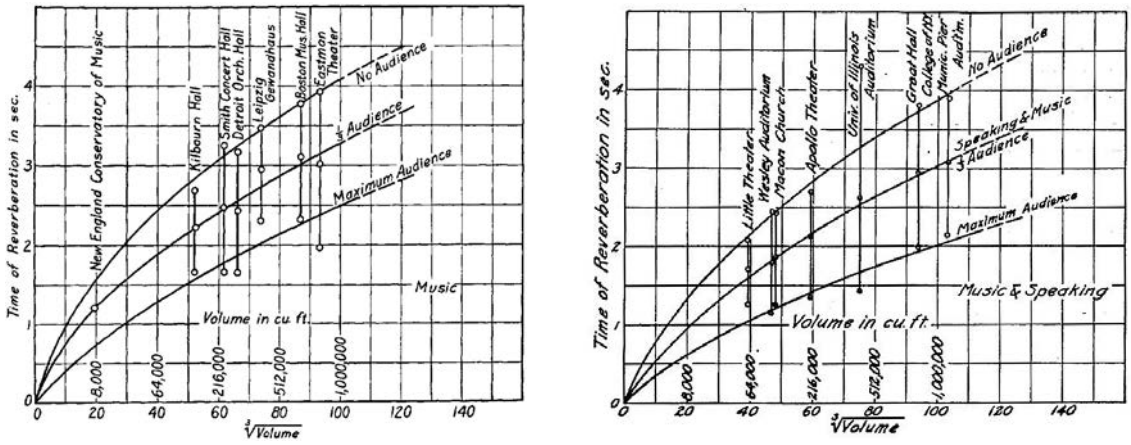
„The reverberation, or prolongation of sound, is the most usual and most important acoustic defect in auditoriums.“ (Watson, 1923, S. 22) In den frühen zwanziger Jahren gilt die Nachhallzeit noch als einziges Kriterium zur Beschreibung der Akustik von Räumen. Die Nachhallzeit sei ein wichtiger Faktor bei der Planung oder Korrektur von Auditorien. Hinweise auf die Quantität dieser Messgröße erlange man durch das Studieren der akustischen Daten von Räumen, die von der ’öffentlichen Meinung’ als gut bezeichnet werden (Watson, 1923, S. 31). Watson nimmt an, die Nachhallzeit variiere mit der dritten Wurzel des Raumvolumens. Dementsprechend verweist er auf eine Abbildung, welche die günstige Nachhallzeit für Konzertsäle in Abhängigkeit vom Raumvolumen und vom Besetzungszustand wiedergebe (siehe Abb. 3.27a, S. 76)[37] (Watson, 1923, S. 30).

[37]Die Abbildung wurde der Quelle (Watson, 1924, S. 74) entnommen, ist aber mit Watson (1923) identisch.

Im Diagramm vermerkt er gleichzeitig die (vermutlich berechneten) Nachhallzeiten einiger Konzertsäle. Für einen Saal mit einem Volumen von 20 000 m^3 ergäben sich je nach Besetzung des Saales:

- besetzt: 2,3 s
- 1/3-Besetzung: 3,1 s
- leer: 3,8 s

Die günstigen Nachhallzeiten für die Darbietung von Sprache und Musik unterscheiden sich nicht sehr. Daher könne ein fachgerecht geplantes Auditorium beide Schwerpunkte bedienen. Für einen vereinten Verwendungszweck von Musik- und Sprachdarbietung sei eine Nachhallzeit von 1,9s (besetzt) empfohlen, was einer zweiten Abbildung entnommen werden kann (siehe Abb. 3.27b, S. 76) (Watson, 1923, S. 32).[38] Diese Vorgaben seien aber nicht als final anzusehen, eine 'moderate' Abweichung von diesen Werten werde keine fehlerhafte Akustik ergeben. Erwähnenswert an dieser Stelle ist noch, dass Watson drei Hauptfaktoren bei der Gestaltung der Raumakustik für wichtig erachtet: Zunächst sei das Volumen des entsprechenden Raumes an die Art und Stärke bzw. Menge der Schallquellen anzupassen. Dann müsse man die Position und Form der Wände berücksichtigen, so dass Echos vermieden werden. Zuletzt sei die Nachhallzeit dem Zweck und der Größe des Raumes anzupassen (Watson, 1923, S. 35-36).



(a) Konzertsäle (b) Musik und Sprache, auf Oper anwendbar

Abbildung 3.27: Günstige Nachhallzeiten nach Watson (1923) für (a) Konzertsäle und (b) Auditorien für die Darbietung von Musik und Sprache

[38] Die Abbildung wurde der Quelle (Watson, 1927, S. 251) entnommen, ist aber mit Watson (1923) identisch.

Nach Davis u. Kaye (1927) hänge die optimale Nachhallzeit vom Charakter der Musik ab: „Excess of reverberation will impart an increased sonority which may add greatly to the impressiveness of slow stately music, but will blur the vividness of lively and rapid passages.“ (Davis u. Kaye, 1927, S. 86). Für Konzertsäle seien etwas längere Nachhalldauern tolerabel und zumeist bevorzugt, jedoch gebe es Hinweise, dass bei hoher Lautheit der Darbietung die Toleranz gegenüber 'exzessiven' Nachhallzeiten geringer werde (Davis u. Kaye, 1927, S. 141-142). Daher müsse auch das Volumen des Raumes an die Anzahl der Orchesterinstrumente angepasst werden. Die Frage nach der Toleranz gegenüber Abweichungen vom Optimum sei schwieriger zu beantworten als die Bestimmung des Optimums selbst. Allzu große Abweichungen seien aber unerwünscht (Davis u. Kaye, 1927, S. 87).

H. Bagenal und A. Wood diskutieren in ihrer 1931er Publikation zunächst bestehende Konzertsäle mit gutem Ruf („high standard of standard of tone“) (Bagenal u. Wood, 1931, S. 115) um daraus eine Beziehung zwischen Nachhall und der dritten Wurzel des Raumvolumens abzuleiten. Diese Beziehung begründe sich darin, dass die Nachhalldauer mit der mittleren freien Weglänge des Schalles variiere (Bagenal u. Wood, 1931, S. 117). Dies resultiere in einem Bereich günstiger Nachhallzeiten für musikalische Aufführungsräume (vgl. Fig. 60, Bagenal u. Wood, 1931, S. 116) (s. Abb. 3.28), dabei sei die untere Grenze für Dargebotenes mit Sprachanteil, die obere dagegen für chorale Musik zu wählen. Der Mittelwert beider Kurven gebe den 'Standard' für orchestrale Werke wieder. Für den typischen Aufführungsraum empfehlen die Autoren eine Nachhallzeit zwischen 1,7 und 2,6 s mit einem Mittelwert bei 2,2 s. Sämtliche Empfehlungen der Autoren scheinen aus der Erfahrung mit akustisch guten Sälen hergeleitet, so auch das spezifische Volumen. In einem Diagramm stellen Bagenal und Wood das spezifische Volumen der Platzanzahl des Saales gegenüber und leiten aus der Erfahrung einen Bereich des optimalen spezifischen Volumens ab (vgl. Fig. 61, Bagenal u. Wood, 1931, S. 119). Die obere Grenze sei für genuine Konzertsäle empfohlen (6 bis 7 m^3 pro Platz), die untere dagegen für Verwendungszwecke, die Sprache und Musik vereinen (5 bis 5,5 m^3 pro Platz). Für chorale Musik liege das Optimum über dem gegebenen Bereich (Bagenal u. Wood, 1931, S. 118-119).

Paul E. Sabine (1932) vergleicht die Nachhallzeiten einer Reihe von Konzertsälen, die für ihre gute Akustik bekannt seien, mit ihrem Volumen und leitet eine Beziehung zwischen beiden daraus her (s. Abb. 3.29 (Sabine, 1932, 6S. 158). Er benutzt die Sabine'sche Nachhallformel, um die Werte für diese Säle zu erlangen. Seine Schlüsse sind, die Nachhallzeit steige mit dem Volumen des Saales und es existiere ein optimaler Bereich in dem

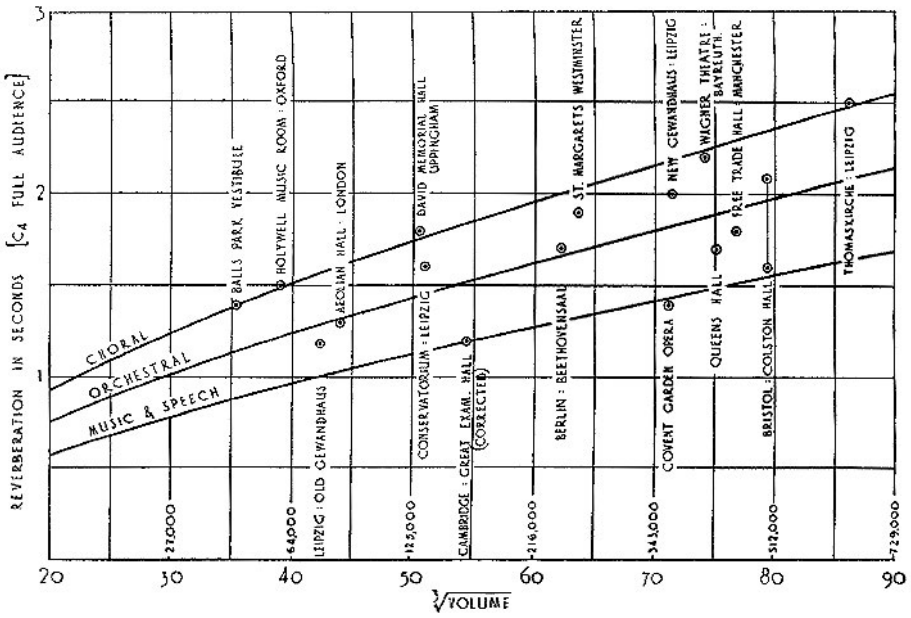


Abbildung 3.28: Günstige Nachhallzeit musikalischer Aufführungsräume nach Bagenal u. Wood (1931)

sich die Nachhallzeit bewege. Für das typische Volumen eines Konzertsaales ergebe sich ein Bereich von etwa 1,65 bis 1,95 s. Sabine hält fest, dass die musikalische und sprachliche Anforderungen an die Akustik keinen großen Unterschied für entsprechende Nachhallzeiten bedeuteten. Das von ihm gegebene Diagramm berücksichtige einen möglichen Kompromiss für beide Raumverwendungszwecke, Musik wie Sprache (Sabine, 1932, S. 159-161).

Neben der Tatsache, dass Vorstellungen der Raumakustik von musikalischen Aufführungsräumen verschieden sind und nicht immer vereinbar seien, gebe es nach Knudsen (1932) einen gemeinsamen Konsens. Die Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit solle eine natürliche Ausgewogenheit zwischen hohen und tiefen Tönen schaffen. Knudsen diskutiert mehrere Überlegungen zum Nachhallfrequenzverlauf und verwirft eine für alle Frequenzen gleiche oder sogar mit der Frequenz steigende Nachhallzeit, aufgrund der daraus folgenden Überbetonung hoher Frequenzen. Er zieht stattdessen die Frequenzverteilung der Schallenergie bei musikalischen Darbietungen als Kriterium heran. Alle Frequenzkomponenten sollen gleichzeitig abklingen. Dies sei vergleichbar mit McNairs Überlegung, dass alle Frequenzen (gemäß ihrer Lautheit) subjektiv gleichmäßig abklingen sollen. Der Frequenzgang der Nachhallzeit steige daher unterhalb von 512 Hz bis 128 Hz auf das 2,3-fache des 512 Hz-Wertes an (Knudsen, 1932, S. 406-407 u. S. 414). Diese Werte können einem Diagramm entnommen werden, vergleiche hierzu Abb. 3.30b.

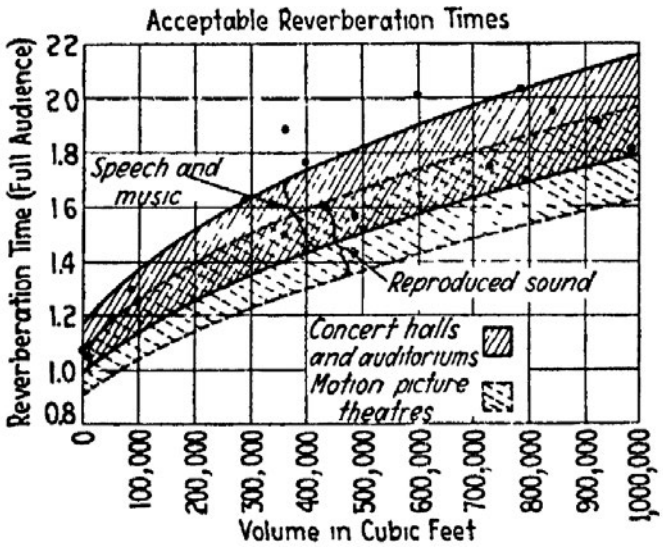


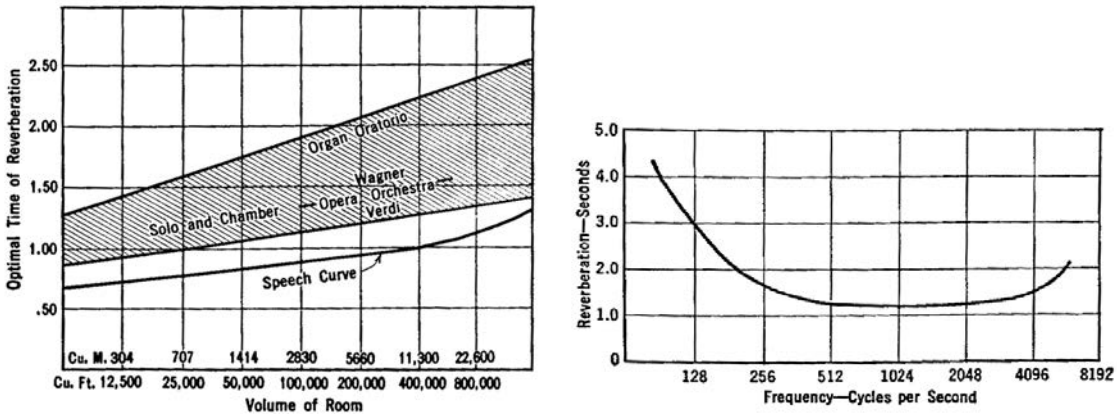
Abbildung 3.29: Günstige Nachhallzeit musikalischer Aufführungsräume nach Sabine (1932)

Zu hohen Frequenzen ergebe sich nach Knudsens Kriterium ein Anstieg der Nachhallzeit oberhalb von 4096 Hz von dem etwa 1,5-fachen des 512 Hz-Wertes, allerdings empfiehlt der Autor hier einen konstanten Frequenzverlauf (Knudsen, 1932, S. 414). Des Weiteren schließt er die Möglichkeit eines flacheren Verlaufs nicht aus. Bezüglich eines optimalen mittleren Nachhallwertes berücksichtigt Knudsen sowohl physikalische Überlegungen als auch musikalische Aspekte. Einerseits hinge der optimale Wert vom Volumen des Aufführungsraumes ab. Andererseits gebe es „[...] a particular time and character of reverberation for each type of music [...]“ (Knudsen, 1932, S. 412). Knudsens optimale Nachhalldauern fallen kürzer aus als die Empfehlungen seiner Zeitgenossen, da er ’exaktere Formeln’ nach Eyring, Norris und anderen als Grundlage seiner Berechnung heranziehe, anstelle der Sabine’schen Nachhalltheorie (Knudsen, 1932, S. 409-411). Der Autor schildert seine Empfehlung in Form einer Abbildung, die auf Grundlage von Berechnungen und Messungen diverser Aufführungssäle in Europa und den USA gebildet wurde (vgl. Fig. 183, Knudsen, 1932, S. 413), (siehe Abb. 3.30a). Knudsen unterscheidet demnach zwischen Orgelmusik u. Oratorium, Opern- u. Orchesterwerken und Solo- u. Kammermusik, zusätzlich zwischen der Wagner’schen und der melodischen Oper von Komponisten wie Verdi oder Mozart, vergleiche hierzu auch (Knudsen, 1932, S. 551). Geeignete Volumen für die verschiedenen Aufführungsräume lassen sich ebenfalls entnehmen. Für typische Volumen ergeben sich folgende optimale Nachhallzeiten:

- Konzert (’Orchestra’): 1,6 s
- Wagner’sche Oper: etwa 1,7 s

- Melodiöse Oper: 1,4 s
- Solo - und Kammermusik (etwa 3 000 m^3): 1,3 s
- Orgelmusik und Oratorium: 2,3 s

Jedoch besteht hierbei ein gewisser Spielraum in der Interpretation der Abbildung. Abweichungen von 0,1 bis 0,2 s von den optimalen Werten seien tolerierbar (Knudsen, 1932, S. 550).



(a) Optimale Nachhallzeit

(b) Opt. Frequenzverlauf der Nachhallzeit eines Raumes mit einer mittl. Nachhallzeit von 1,3 s

Abbildung 3.30: (a) Optimale Nachhallzeiten diverser musikalischer Aufführungsräume und Musikgenres und (b) Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit für 'music rooms' nach Knudsen (1932)

Josef Engl publiziert 1939 ein Buch über Raum- und Bauakustik. Für die Ermittlung günstiger Nachhallzeiten bei Musikwiedergabe oder musikalischer Darbietung solle man sich an den Urteilen von „Musiksachverständigen“ und der Erfahrungen mit bestehenden Sälen bedienen (Engl, 1939, S. 238). Engl geht nicht von einem optimalen Wert für ein bestimmtes Volumen aus, sondern befürwortet einen gewissen Toleranzbereich abhängig vom Volumen des Raumes und von der musikalischen Stilrichtung des Dargebotenen. Dazu bedient sich Engl einem Diagramm von Knudsen (1932) (Abb. 3.30). Weiter spricht er sich mit einem Verweis auf McNair und Wente für eine frequenzabhängige Charakteristik der Nachhallzeit aus. Alle Frequenzen sollen subjektiv gleichmäßig abklingen (Engl, 1939, S. 238).

1941 erscheint die dritte Auflage Watsons 'Acoustics of Buildings'.[39] Im Vorwort deutet der Autor an, dass viele Erkenntnisse des letzten Jahrzehnts den Wissensstand erweitert

[39]Die zweite Auflage (1930) war nicht zugänglich, hat aber den gleichen Umfang wie Watson (1923).

hätten. Die Entwicklung des Tonfilms, die Gründung der Akustischen Gesellschaft Amerikas und die Publikation des Journals (JASA) hätten dazu ihren Beitrag geleistet (Watson, 1941, Vorwort, S. v-vi). Watson fasst bezüglich der optimalen Dauer des Nachhalls die Ansichten verschiedener Autoren in zwei Abbildungen zusammen, beginnend mit seiner eigenen Empfehlung der ersten Auflage dieser Publikation, welche er als frühen Versuch zur Lösung des Problems beschreibt (Watson, 1941, S. 41). Watson präsentiert eine Grafik, welche den Bereich der optimalen Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Volumen darstellt (Watson, 1941, S. 43), (Abb. 3.31).[40] Für Konzertsäle, so Watson weiter, sei die obere Grenze des Bereichs zu entnehmen, was bei einem typischen Volumen einem Wert von 1,9 s entspricht. Für Säle in denen Sprache und Musik zur Aufführung kommen, empfehle sich der Mittelwert der Grenzgeraden, 1,65 s. Zum Nachhallverlauf über

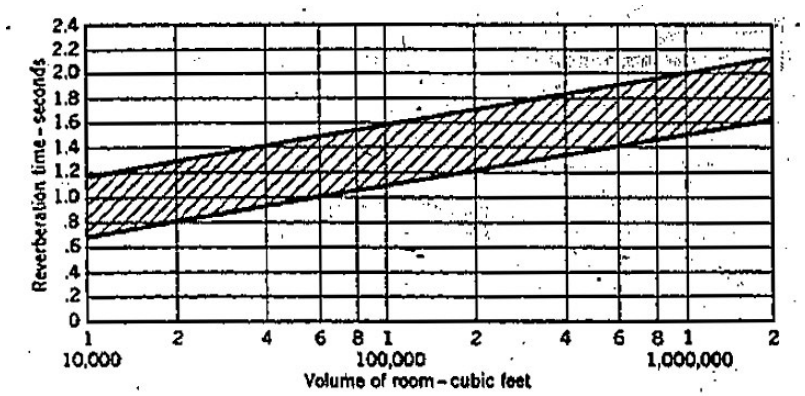


Abbildung 3.31: Optimale Nachhallzeiten zitiert von Watson (1941)

der Frequenz diskutiert der Autor Empfehlungen verschiedener Wissenschaftler, darunter Knudsen, Maxfield und Potwin und McNair (Watson, 1941, S. 44-49) und hält fest, eine Kombination der Theorien nach Knudsen und McNair würde bessere Ergebnisse erzielen (Watson, 1941, S. 46). Die Empfehlungen von Maxfield und Potwin bezeichnet Watson als „[...] up-to-date information about the desirable times of reverberation [...]“ (Watson, 1941, S. 48). Während es nicht eindeutig ist, ob Watson seine Zeitgenossen zitiert um sich ihrer Empfehlung anzuschließen oder um verschiedene Ansichten zu erläutern - er lehnt diese zumindest nicht ab - äußert er zuletzt einen ungewöhnlichen Gedanken (Watson, 1941, S. 48-49): Die akustischen Bühnenbedingungen seien bisher noch nicht betrachtet worden, worauf man akustische Defekte zurückführen könne. Watson ist der Meinung, optimale Nachhallzeiten sollen sich auf Bühnen beziehen und nicht wie üblich

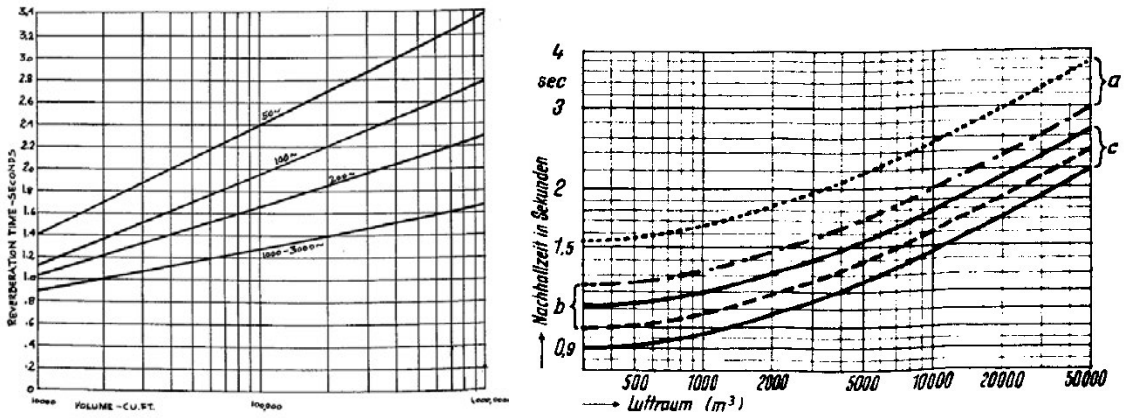
[40] Die Grafik entnimmt Watson einer Quelle, die er mit 'Acoustical Materials Association Bulletin VII' angibt. Eine Recherche nach dem Dokument blieb jedoch erfolglos.

auf die Zuschauersäle. Dies begründet Watson damit, dass akustische Probleme auf die Reflexion von Schall zurückzuführen seien und schlägt vor, Auditorien derart zu gestalten, dass die akustischen Bedingungen mit denen von Freilufttheatern vergleichbar wären (Watson, 1941, S. 50-51). Die Bühne sollte über reflektierende Oberflächen verfügen (Orchestermuschel), so dass die Musiker sich selbst hören könnten. Die Annahme, dass Schallreflexionen an Begrenzungsflächen eines Zuhörerraumes notwendig für die zufriedenstellende Lautstärke der Darbietung wären, sei falsch. Die ersten nützlichen Reflexionen verursachen nur eine Lautstärkezunahme um 4 dB, was kaum wahrnehmbar sei. Für größere Säle verweist Watson auf die Möglichkeit der elektroakustischen Verstärkung des Schalls. Watson versucht mit diesem ungewöhnlichen Vorschlag die akustischen Defekte von Auditorien, wie Echo, Resonanzen oder exzessiven Nachhall, auszuschließen.

Nach Rettinger (1947) stelle die Nachhallzeit den wichtigsten Faktor der Akustik eines Raumes dar (Rettinger, 1947, S. 30). Rettinger stellt in Abhängigkeit vom Nutzungszweck optimale Nachhallzeiten und Frequenzverläufe dieser vor. Er unterscheidet 'scoring stages', 'broadcasting studios' und 'auditoria'.[41] Rettingers Empfehlungen zur Akustik von Auditorien können einem Diagramm entnommen werden (Rettinger, 1947, S. 138) (siehe Abb. 3.32a). Für ein Volumen von 20 000 m^3 empfiehlt der Autor eine mittlere Nachhallzeit von 1,6 s. Der Anstieg zu tiefen Frequenzen hänge nach Rettinger ebenfalls vom Volumen des Aufführungsraumes ab. Der Faktor, mit dem die Nachhallzeit für tiefe Tonlagen zu gewichten sei, variiere bei 100 Hz von etwa 1,5 für kleine Volumen (ca. 3 000 m^3) bis 1,65 für große (20 000 m^3). Diese Angaben werden für ein zu zwei Dritteln besetztes Auditorium gemacht. Den Empfehlungen liegt die Nachhalltheorie nach Eyring zugrunde, was ihre geringen Werte erklärt.

Nach Karlhans Weisse (1949) „[...] müssen die Nachhallzeiten für tiefe, mittlere und hohe Töne innerhalb gewisser Erfahrungswerte liegen, damit die [...] Musik angenehm und unverfälscht klingt.“ (Weisse, 1949, S. 7). In seiner Publikation behandelt Weisse elementare Grundbegriffe, Echo und Nachhall. Für verschiedene Musikstile seien unterschiedliche Nachhallzeiten erwünscht. Eine genauere Unterscheidung der Stile, wie sie Weisse in einer Abbildung zusammenfasst (Abb. 3.32b), sei aber nicht sinnvoll. Der Autor empfiehlt einen günstigen Bereich der Nachhallzeit, der mit dem Volumen des Aufführungsraumes steigt (Weisse, 1949, S. 63). Für Volumen von 20 000 m^3 ergeben sich für 512 Hz folgende

[41] Scoring stages und broadcasting studios sind Studioräume für die Aufnahme von Musik und unterscheiden sich insofern, dass letztere einen Publikumsraum vorsehen. Da sich die Anforderungen für die Aufnahme von Musik von denen für die Aufführung hinsichtlich Nachhallzeit und ihrem Frequenzverlauf unterscheiden, werden diese als irrelevant eingestuft und hier nicht behandelt.



(a) Rettinger (1947) (b) Weisse (1949)

Abbildung 3.32: Optimale Nachhallzeiten nach Rettinger (1947) und Weisse (1949). Zu Weisse: a - Choral und Orgelmusik; b - Oper, Schauspiel, Konzert und Kanzelreden; c - Tonfilm und Sprachvorträge

Nachhallzeiten:

- Choral- und Orgelmusik: 2,4 bis 3,0 s
- Oper und Konzert: 1,9 bis 2,4 s

Des Weiteren gibt Weisse Verhältniswerte bezüglich des Nachhallzeitverlaufs über der Frequenz an. Demnach steige dieser unterhalb von 512 Hz bis zu einem Faktor von 1,4 bei 128 Hz (1,15 bei 256 Hz) an. Zu hohen Frequenzen oberhalb von 512 Hz betrage der Faktor 0,9. Der Autor empfiehlt zusätzlich ein spezifisches Volumen, da sich dieses Verhältnis unter Umständen stark auf die Nachhallzeit im besetzten Zustand auswirke. 5 bis 10 m^3 pro Zuhörer seien für einen großen Raum angemessen (Weisse, 1949, S. 75).

3.3.2 1950 bis 1979

Vern O. Knudsen veröffentlicht 1950[42] erneut mit dem Co-Autor C.M. Harris einen Raumakustik-Leitfaden. Es werden zwei Diagramme gegeben, anhand derer sich optimale Werte für die Nachhallzeit (Abb. 3.33) und ihrem Verlauf über der Frequenz (Abb. 3.34) in Abhängigkeit vom Volumen des Raumes bestimmen lassen. Es lasse sich für einen Raum mit gegebenen Volumen aber kein bestimmter Wert annehmen. Vielmehr gebe es einen optimalen Bereich in dem sich die Nachhallzeit abhängig vom Volumen und dem musikalischen Stil bewege (Knudsen u. Harris, 1950, S. 194). Laut den Abbildungen werde die

[42]Die zweite Auflage (Knudsen u. Harris, 1978) ist mit der ersten identisch.

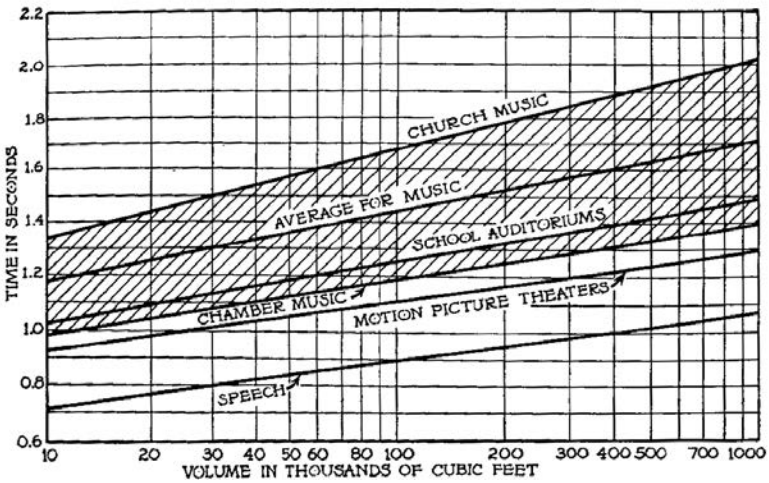


Abbildung 3.33: Optimale Nachhallzeiten nach Knudsen u. Harris (1950)

untere Grenze durch Kammermusik, die obere durch Kirchenmusik gegeben. Die Nachhallzeit bewege sich in einem Bereich mit einer Toleranz von 0,4 bis 0,6 s. Für einen Saal mit dem Volumen von 20 000 m^3 empfehlen die Autoren eine Nachhallzeit zwischen 1,35 bis 1,95 s, mit einem Durchschnittswert für Musik bei 1,65 s (512 Hz). Für Kammermusik ergibt sich nach dem Diagramm eine Nachhallzeit von 1,3 s (10 000 m^3). Der günstige Verlauf der Nachhallzeit sei für Frequenzen oberhalb von 512 Hz konstant. Unterhalb werde ein Anstieg zwischen dem 1 bis 1,5-fachen (100 Hz) der mittleren Nachhallzeit angestrebt (Knudsen u. Harris, 1950, S. 195). Des Weiteren empfehlen die Autoren ein spezifisches Volumen von 5,7 m^3 pro Platz für 'Musikräume' mit mehr als 1 500 Plätzen (Knudsen u. Harris, 1950, S. 191).

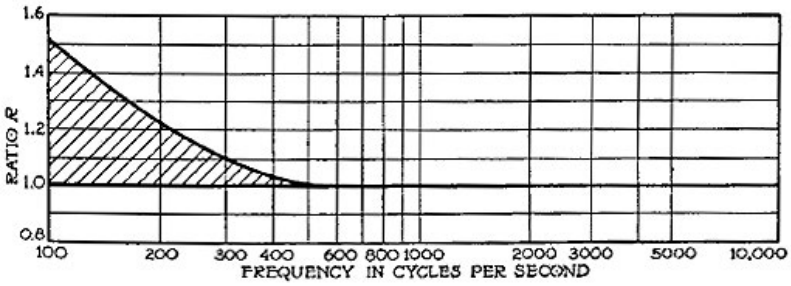


Abbildung 3.34: Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Knudsen u. Harris (1950)

In einer umfangreichen Publikation befassen sich die Autoren Stephens u. Bate (1950)[43]

[43] Der zweiten Auflage der Publikation (Stephens u. Bate, 1966) können identische Informationen entnommen werden.

knapp mit der Nachhallzeit von Auditorien. Einen empirisch ermittelten Bereich optimaler Nachhallzeiten erhalte man, indem man die Nachhallzeiten als gut befundener Säle der dritten Wurzel ihrer Raumvolumen gegenüberstelle. Die Autoren geben eine aus diesen Beziehungen abgeleitete Formel an, nach der die Nachhallzeit für den passenden Verwendungszweck mit einer Toleranz von 1 bis 2% berechnet werden könne (Stephens u. Bate, 1950, S. 285):[44]

$$T_{opt} = (0,0118\sqrt[3]{V} + 0,107)r \tag{3.17}$$

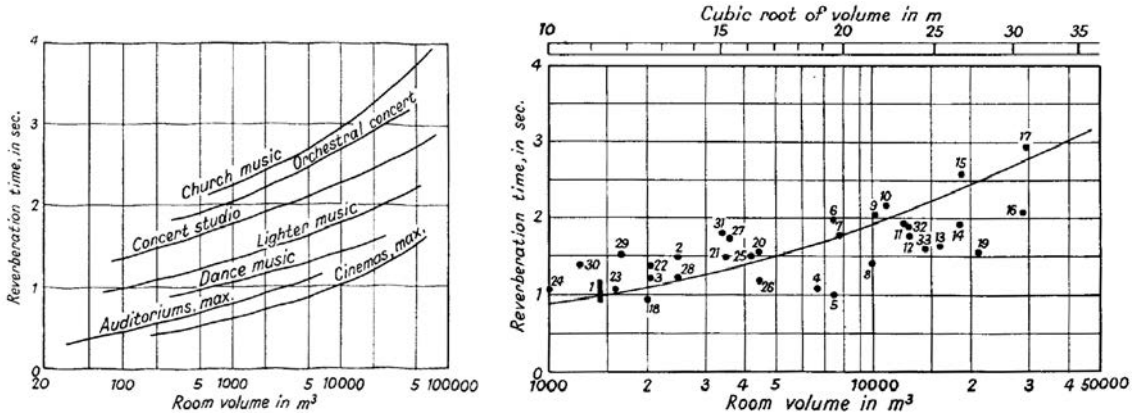
Für orchestrale Musik setze man r = 5, für Chormusik sei r = 6. Für einen Saal mit einem Volumen von 20 000 m^3 erhält man demnach eine Nachhallzeit von 2,14 s für erstere und 2.57 s für letztere. Für Sprache sei r = 4, woraus sich eine Nachhallzeit von 1,71 s errechnet. Die Angaben der Autoren können dahingehend interpretiert werden, dass die optimale Nachhallzeit eines Opernsaales zwischen 1,71 und 2,14 s liegt.[45] Formel 3.17 könne aber nur als Richtwert zu interpretieren sein. Die Autoren äußern sich an anderer Stelle bezüglich verschiedener Geschmäcker: „[...] differing personal tastes enter so much into the latter [music] that the optimum musical conditions for a room are very difficult to realise.„ (Stephens u. Bate, 1950, S. 308). Des Weiteren gelte die Nachhallzeit nicht mehr als Garant für die gute Raumakustik.

Per V. Brüel (1951) betrachtet die Nachhallzeit nicht als einzige Determinante der subjektiven Wahrnehmung der Raumakustik. Er definiert den 'room-effect' als das Verhältnis zwischen Primärschall (Direkt- und Reflexionsschall innerhalb der ersten 1/15 s bzw. 66 ms) und Nachhall. Für Musikräume und Konzertsäle müsse dieses Verhältnis derart ausgeprägt sein, wie es der Stil der Musik erfordere. Brüel nimmt an, dass das richtige Verhältnis für einen bestimmten Musikstil konstant zu halten sei und nicht mit dem Volumen des Raumes variiere, was zu dem Schluss führe, dass raumakustische Qualität nicht nur durch den Nachhall zu erreichen sei. Die optimale Nachhallzeit könne nicht berechnet werden, man müsse sich auf die Erfahrung verlassen (Brüel, 1951, S. 178-181). Brüel nimmt an verschiedenen Stellen der Publikation einen Bezug zur optimalen Nachhallzeit sowie zu ihrem Frequenzverlauf. Zunächst führt die Einleitung den Leser zu allgemeinen, oberhalb schon zusammengefassten raumakustischen Überlegungen. Diese münden

[44] Eine Umwandlung der Volumeneinheit ins metrische System wurde bereits berücksichtigt. Die originale Formel, welche sich auf Kubikfuß bezieht lautet:
$T_{opt} = (0,0036\sqrt[3]{V} + 0,107)r$

[45] Da die akustischen Anforderungen an einen Opernsaal einen Kompromiss zwischen sprachlicher und musikalischer Darbietung darstellen, lässt sich wohl annehmen, dass Stephens und Bates Nachhallzeitempfehlung für einen solchen Saal zwischen zwischen diesen beiden Werten anzusiedeln ist.

in Empfehlungen zur Nachhallzeit für (a) verschiedene Musikarten, (b) aus der Erfahrung abgeleitete Zusammenhänge zwischen Nachhallzeit und Raumvolumen diverser Aufführungsräume und (c) die Frequenzcharakteristik betreffend (Brüel, 1951, S. 179-183). Aus



(a) (b)

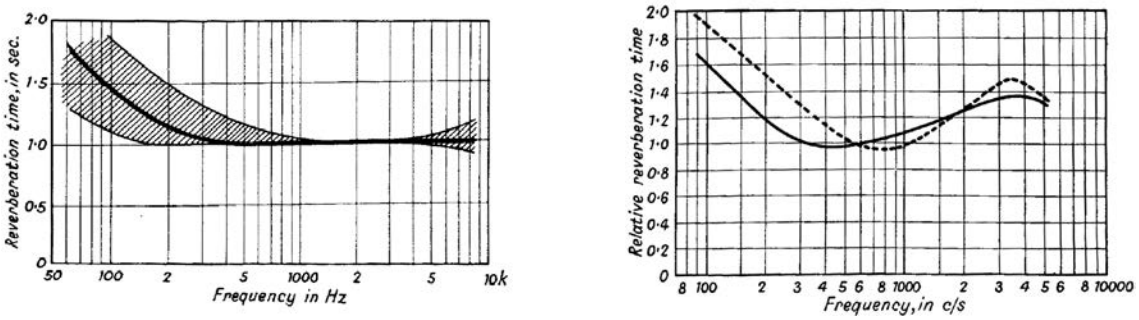
Abbildung 3.35: Optimale Nachhallzeiten für (a) verschiedene Musikgenres und (b) proportional zur dritten Wurzel des Raumvolumens Brüel (1951)

den Abbildungen 3.35 a und b (Fig. 160 u. 161, Brüel, 1951, S. 179 und S. 180) wird ersichtlich, dass Brüel eine Abhängigkeit sowohl vom Raumvolumen, als auch von dem Musikstil in Erwägung zieht. Die erste Abbildung zeigt günstige Nachhallzeiten verschiedener Musikstile (für besetzte Saalzustände), wie sie mit dem Volumen steigen. Die Daten stammen aus einer Mittelung der Angaben diverser Autoren. In der zweiten Abbildung trägt Brüel Nachhallzeiten gegenüber den Raumvolumen verschiedener 'akustisch exzellenter' Säle auf und leitet daraus eine proportionale Beziehung zur dritten Wurzel des Raumvolumens ab. Die Nachhallzeiten streuen stark und daher sei eine Abweichung von Optimum nicht sehr kritisch. Für Säle mit V = 20 000 m^3 ergeben sich folgende Nachhallzeiten:

- 'Orchestral concert': 2,9 s (3.35a)
- 'Church music': 3,2 s (3.35a)
- Konzertsaal: 2,5 s (3.35b)

Brüel kommentiert bei einem Vergleich empfohlenen Nachhallzeiten diverser Wissenschaftler wie Watson oder Lifshitz: „A diagram that merely indicates the music room's reverberation time as function of volume is of lesser importance, as reverberation time is in the highest degree dependent on the type of music.“ (Brüel, 1951, S. 239). Kritischer sei aber der Frequenzverlauf der Nachhallzeit. Brüel gibt dazu erneut die Meinungen diverser

Autoren in einem Diagramm wieder (Brüel, 1951, S. 181) (s. Abb. 3.36a). Die Empfehlungen reichen vom 1,2- bis 1,8-fachen der mittleren Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen (100 Hz). Studien in dänischen Musikstudios wiesen auf die günstige Beurteilung einer Reduzierung der Nachhallzeit zwischen 300 und 500 Hz hin (Brüel, 1951, S. 182) mit gleichzeitigem Anstieg außerhalb dieses Bereiches (s. Abb. 3.36b). Verschiebungen dieser Reduzierung entlang der Frequenzachse seien aber recht kritisch und führten wiederum zu schlechten Beurteilungen. Die Ergebnisse der Studie gelten laut Brüel sowohl für Musikstudios als auch für Konzertsäle. Als Empfehlungen des Autors sind offenbar die vom Musikgenre abhängigen Nachhallzeiten und die nachfolgend beschriebenen Frequenzverläufe inklusive der Untersuchungsergebnisse dänischer Musikstudios zu betrachten.



(a) (b)

Abbildung 3.36: Optimaler Frequenzverlauf der Nachhallzeit: (a) Konsens in der Literatur (b) eines dänischen Musikstudios (durchgezogene Linie) Brüel (1951)

Nach F. Eichler hänge die günstige Nachhallzeit von zwei Faktoren ab: dem Verwendungszweck und der Größe des Raumes. Seine Ausführungen, Empfehlungen und Abbildungen sind der Publikation von Weisse (1949) entnommen (vgl. Eichler, 1952, S. 202-203).

Nach Furrer (1956) sei für Musik nur das subjektive musikalische Empfinden maßgebend und daher existiere im Gegensatz zur Verständlichkeit von Sprache kein objektives Kriterium (Furrer, 1956, S. 94). Es gebe keine eindeutige optimale sondern eine von der Stilart der Musik und dem subjektiven Empfinden abhängigen Nachhallzeit (Furrer, 1956, S. 112). Die subjektive Dimension müsse physikalisch erfasst werden, beispielsweise durch subjektive Urteile auf einer breiten statistischen Grundlage (Furrer, 1956, S. 94). Hierzu könne man auch bestehende Konzertsäle heranziehen, die für ihre gute Raumakustik bekannt wären oder eine historische Rolle spielten. Eine durch die akustische Vermessung solcher Säle und die Ausschaltung 'anormaler' Extremwerte erhaltene Beziehung zwi-

schen günstiger Nachhallzeit und Raumvolumen gibt Furrer in einer Abbildung wieder (vgl. Furrer, 1956, S. 94) (Abb. 3.37). Demnach gebe es einen Bereich von ca. 0,3 s der optimalen Nachhallzeit. Für 20 000 m^3 liege dieser zwischen ca. 1,7 und 2 s. Seine Empfehlungen sieht Furrer durch die Ergebnisse Kuhls 1954er Studie zur Nachhallzeit großer Musikstudios bestätigt (siehe Abschnitt 3.2). Die dort gefundenen Nachhallzeiten seien ohne Weiteres auf Konzertsäle übertragbar. Die Nachhhallzeit sei hauptsächlich von der Publikumsabsorption abhängig, weshalb angegebene Werte sich auf den besetzten Zustand eines Konzertsaales beziehen sollten. Für die Erhaltung des Nachhalloptimums von 2 s für symphonische Werke der Romantik sei ein optimales Raumvolumen pro Zuhörerplatz 8 bis 9 m^3 pro Platz empfohlen (Furrer, 1956, S. 96). Mit einem Minimum von 6 bis 7 m^3 pro Platz ließe sich eine für klassische sowie moderne Werke günstige Nachhallzeit von 1,5 s erreichen.[46] Furrer erwähnt neben der Nachhallzeit zwei weitere Messgrößen und erwägt, dass Richtungsdiffusität und Deutlichkeit nach Thiele in Verbindung mit der Nachhallzeit „[...] die akustischen Verhältnisse eines Raumes in vollständiger Weise zu erfassen [...]“ erlauben (Furrer, 1956, S.91). In Konzertsälen mit Volumen zwischen 5 000 und 6 000 m^3 ergeben sich Werte der Deutlichkeit von 40 bis 60%.[47]

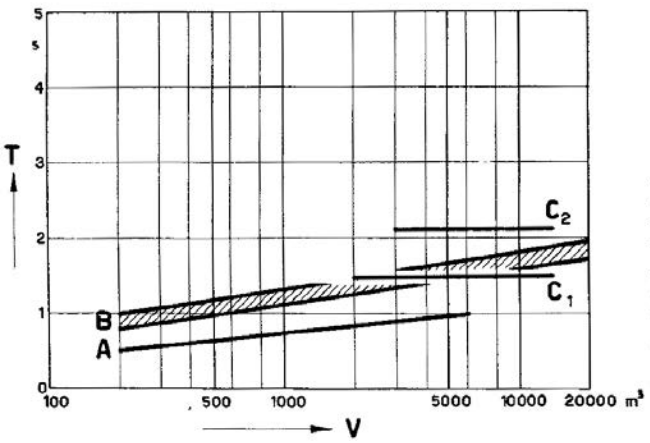


Abb. 61
Optimale Nachhallzeit für verschiedene Raumvolumina bei 1000 Hz. *A* Sprache; *B* mittlerer Bereich für Musik; C_1 optimaler Wert für klassische und moderne Musik; C_2 optimaler Wert für romantische Musik.

Abbildung 3.37: Optimale mittlere Nachhallzeit nach Furrer (1956), die mit C_1 und C_2 bezeichneten Kurven beziehen sich auf Kuhl (1954)

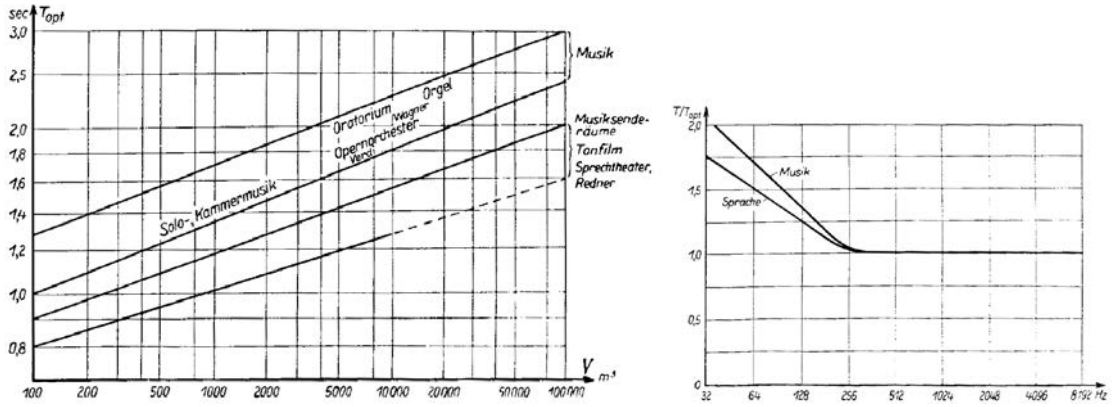
[46] Die Angaben zum minimalen und optimalen Volumen je Zuhörerplatz gelten laut Furrer für Raumvolumen zwischen 6 000-15 000 m^3.

[47] Es existieren weitere Auflagen der Monographie. Die zweite (Furrer, 1961) und dritte (Furrer u. Lauber, 1972) Auflage bieten identische Informationen.

Nach Reichardt (1960)[48] stelle die Nachhallzeit „[...] allein offenbar noch kein ausreichendes Kriterium für die Hörsamkeit eines Raumes [...]“ dar (Reichardt, 1960, S. 295). Reichardt bemerkt, Thieles Deutlichkeit könne eine wichtige Beurteilungsgrundlage der Raumakustik bilden und verweist auf Untersuchungen, in denen zwischen der raumakustischen Qualität (gut, schlecht) einzelner Sitzplätze und den Deutlichkeitsmesswerten (hoch, niedrig) Beziehungen bestünden. Nach einem Diagramm gebe es einen vom Volumen abhängigen günstigen Toleranzbereich der Nachhallzeit (für 512 Hz) (Reichardt, 1960, S. 495) (s. Abb. 3.38a). Für 20 000 m^3 liege dieser zwischen 2,0 bis 2,5 s. In Anlehnung an Knudsen (1932) trägt Reichardt innerhalb des Diagramms verschiedene Genres ein, unterscheidet zwischen Verdi und Wagner, nur liegen die von ihm empfohlenen Nachhallwerte mit etwa 1,8 s und 2,1 s deutlich höher. Die Positionen der eingetragenen Genre- bzw. Repertoiretypen geben offenbar die Grenzen für übliche Volumen und Nachhallzeiten an. Der Autor gibt an, es handele sich dabei um Erfahrungswerte. Weiter bezieht er sich auf Kuhls 1954er Untersuchung und bemerkt, Kuhls Fund der Unabhängigkeit der Nachhallzeit gegenüber dem Raumvolumen gelte nur für einkanalige Aufnahmen in Musikstudios, da dem Zuhörer Rückschlüsse auf die Größe des Aufnahmeraumes nicht möglich wären. Für musikalische Darbietungen in Aufführungsräumen mit Publikum gelte weiterhin die Beziehung zwischen Nachhallzeit und Raumvolumen unter Vorbehalt einer Nachprüfung, wegen der von Kuhl erwähnten Unstimmigkeiten und Schwankungen zwischen berechneten und vermessenen Nachhallzeiten bekannter Konzertsäle. Dort sei neben der Nachhallzeit auch Lautstärke der Darbietung, Deutlichkeit und Diffusität von Bedeutung, worauf Reichardt nicht weiter eingeht (Reichardt, 1960, S. 497). Bezüglich des Frequenzverlaufs der Nachhallzeit vertritt der Autor die Meinung, die Nachhallzeit müsse unterhalb von 256 Hz ansteigen, oberhalb sei sie konstant zu halten. Die Größe des Anstiegs zu tiefen Frequenzen geht aus einer Abbildung hervor und bewegt sich bei 100 Hz im Rahmen des 1,5-fachen der mittleren Nachhallzeit (Reichardt, 1960, S. 499) (vgl. mit Abb. 3.38b).

Cremer (1961) stellt in der zweiten Auflage der Statistischen Raumakustik das Vorhandensein von Optima in Frage (Cremer, 1961, S. 219). Es gebe nicht nur individuelle Unterschiede in der Beurteilung der Hörsamkeit, auch der Geschmack einer Person sei nicht scharf definierbar. Die musikalischen Anforderungen an Aufführungsräume bzw. der Ge-

[48] Die Erstauflage der Monographie stammt aus dem Jahr 1952. Dem Verfasser lag zunächst die dritte Auflage des Buches vor, worauf sich dieser Abschnitt bezieht. Die zweite Auflage (1954) bietet identische Informationen. In der ersten Auflage von 1952 ist der Abschnitt zur Deutlichkeit natürlich nicht enthalten, die Aussagen über die optimale Nachhallzeit sind aber auch hier identisch zur dritten Auflage.

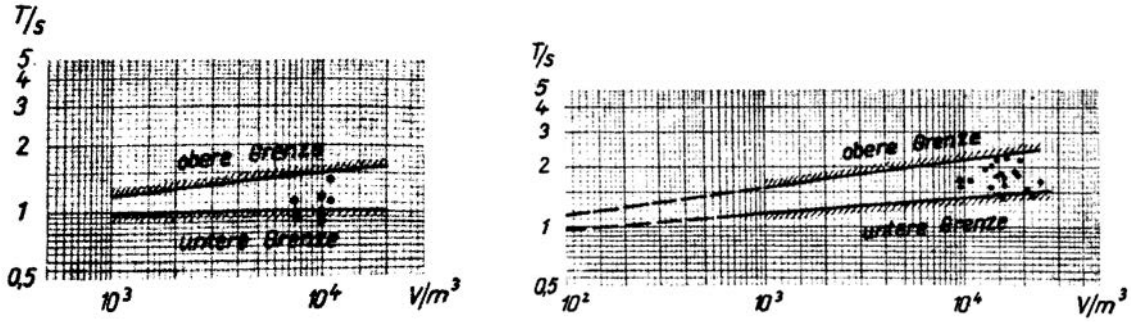


(a) (b)

Abbildung 3.38: Optimale mittlere Nachhallzeit (a) und günstiger Verlauf der Nachhallzeit (b) nach Reichardt (1960)

schmack könne durchaus einer Art 'Mode' unterworfen sein, die sich im Laufe der Zeit ändere. Die Volumen-Abhängigkeit der Nachhallzeit habe in der Raumakustik große Bedeutung besessen. Rückblickend seien die empirischen und psychologischen Annahmen und Begründungen von Wissenschaftlern, wie bspw. Watson, Lifshitz oder McNair, zu dieser Volumen-Abhängigkeit fragwürdig (Cremer, 1961, S. 226). Die Frage des richtigen Frequenzganges, ob und wie stark der Tiefenanstieg der Nachhallzeit ausgeprägt sein solle, könne man nicht einfach beantworten. Es gebe nämlich in der Geschichte Beispiele guter Hörsamkeit von Sälen, die sowohl einen Anstieg, als auch einen konstanten Frequenzverlauf oder sogar einen Abfall zu tiefen Frequenzen aufwiesen (Cremer, 1961, S. 239 - 242). So hält Cremer fest, „[...] daß eine gewisse Verschiedenheit von Raum zu Raum reizvoll ist.“ (Cremer, 1961, S. 242). Der Autor hält sich mit definitiven Empfehlungen zurück und spricht sich für einen möglichst gleichmäßigen Frequenzverlauf der Nachhallzeit im besetzten Saalzustand aus, wobei „[...] aber im Hinblick auf die Ohreigenschaften ein gewisser Tiefenanstieg in Kauf genommen werden kann.“ (Cremer, 1961, S. 242). Zumindest sollten Ungleichmäßigkeiten der Frequenzgänge (Senken und Anhebungen) nicht die Breite einer Oktave beanspruchen. Schließlich bekundet Cremer, dass auch er eine persönliche und begründete Ansicht zur optimalen Nachhallzeit habe, diese dem Leser nicht vorenthalten möchte. Jedoch gebe er weniger ein Optimum an als eine obere und untere Grenze, die als gerade Linien in das T-log-V-Diagramm eingetragen würden (Cremer, 1961, S. 243). Auch gebe Cremer keine mathematische Beziehung hierzu an, da es keine ableitbare Gesetzmäßigkeit gebe. Für Opernsäle liege die untere Grenze der Nachhallzeit konstant bei 1,0 s . Hierbei bedient sich Cremer offenbar der Erfahrung

mit existierenden Räumen. Die obere Grenze steigt mit dem Volumen und liegt derart, dass sich für einen Raum von 10 000 m³ eine obere Grenze von 1,5 s ergibt (20 000 m³, 1,6 s) (Cremer, 1961, S. 247). Die niedrigsten Zeiten seien der italienischen Oper, die höchsten Werte der deutschen romantischen Oper angepasst. Ein stärkerer Anstieg der Nachhallzeit der Tiefenlagen sei bei der romantischen Oper zusätzlich erwünscht. Die Grenzen der günstigen Nachhallzeit von Konzertsälen steigen hingegen beide mit dem Volumen (Cremer, 1961, S. 248). Für typische Volumina empfiehlt Cremer 1,5 bis 2,4 s. Die Angaben beziehen sich auf den besetzten Zustand des Zuschauerraumes.



(a) (b)

Abbildung 3.39: Toleranzbereich der günstigen Nachhallzeit für (a) Opernsäle und (b) Konzertsäle nach Cremer (1961)

Eine wichtige Publikation, auf die sehr häufig in zusammenfassenden Werken verwiesen wird, stammt von Beranek (1962). Der Studie liegen Interviews mit Experten (professionelle Musiker, Musikkritiker, Dirigenten) zur Akustik von 54 Konzertsälen zugrunde. Die Befragten kommentierten Säle, die ihnen vertraut waren und sollten diese bezüglich ihrer Gesamtgüte in eine Rangfolge bringen. Beranek beschreibt zunächst zahlreiche subjektive Wahrnehmungsdimensionen der musikalischen Akustik ('Subjective Attributes of Musical-Acoustic Quality') und versucht diese durch umfangreiche Vermessungen der Säle und daraus abgeleiteten objektiven Messgrößen zu erfassen. Das Ziel der Studie ist die Entwicklung einer nummerischen Werte-Skala für die Kategorisierung der Raumakustik musikalischer Aufführungsräume. Dazu werden unterschiedliche Punktzahlen auf die von Beranek als wichtig erachteten Messgrößen verteilt. Die maximale Punktzahl für eine Messgröße vergibt Beranek, sofern ihr optimaler Wertebereich erreicht wird. Jenseits des von Beranek festgelegten Bereiches ergeben sich Punktabzüge. Akustische Defekte, wie Echo oder Lärm, tragen eine negative Punktzahl bei. Die Summe aller Punktzahlen ist für die Einteilung des jeweiligen Aufführungsraumes in eine Kategorie von C+ 'fair' bis A+ 'excellent' entscheidend. Die für diese Arbeit relevanten Messgrößen und

ihre von Beranek empfohlenenen Wertebereiche werden im Folgenden beschrieben. Die Nachhallzeiten der mit A+ bewerteten Säle rangiere zwischen 1,7 und 2,05 s mit einem Mittel bei 1,9 s. Einige schlechter bewertete Säle fallen ebenfalls in diesen Zeitbereich, der Rest liege größtenteils unter dem Wert von 1,7 s. Nach Beranek sei die Nachhallzeit ein wichtiges Kriterium, jedoch kein Unterscheidungsmerkmal, das exzellente akustische Qualität von schlechter Akustik trennt (Beranek, 1962, S. 409-411). Beranek empfiehlt für die Nachhallzeit folgende von der Stilart abhängige optimale Werte (Beranek, 1962, S. 420 u. 431):

- 'Symphony orchestra' 1,9 s
- 'Italian opera': 1,3 bis 1,6 s, optimal: 1,5 s
- 'Wagnerian opera': 1,5 bis 1,8 s, optimal: 1,7 s

Aus den Urteilen der interviewten Experten ergebe sich folgende Einteilung (Beranek, 1962, S. 429):

- Romantische Musik: 2,1 bis 2,3 s
- Sinfonische Musik: 1,8 bis 2,0 s
- Klassische Musik und Barockmusik: 1,4 bis 1,8 s

Der Frequenzverlauf der Nachhallzeit drückt sich im Bassverhältnis aus.[49] Beranek vergibt die maximale Punktzahl für ein Bassverhältnis zwischen 1,2 und 1,25. Für Opernhäuser sei die Toleranz gegenüber des optimalen Werts größer, da dort der Gesang im Vordergrund stehe. Demnach sei laut Beranek ein Anstieg der Nachhallzeit im Bassbereich erwünscht (Beranek, 1962, S. 435-436). Beranek macht seine Empfehlungen oder Ableitungen aus den Interviews bezüglich der Nachhallzeit nicht vom Volumen abhängig. Bei der Diskussion der Lautheit des Nachhalls bedient sich Beranek aber einem Verhältnis aus Raumvolumen zu Nachhallzeit[50] (Beranek, 1962, S. 441-442). Dieses Verhältnis habe laut maximaler Punktzahl seiner Rating-Skala einen optimalen Wert bei L = 3. An anderer Stelle erwähnt Beranek, das Verhältnis solle zwischen 1 und 5 liegen (Beranek, 1962, S. 489). Dies drückt prinzipiell eine Volumenabhängigkeit der Nachhallzeit aus, wenn auch auf die empfundene Lautstärke des Nachhalls bezogen. Dennoch sind diese Werte nicht als Empfehlung zu betrachten, da Beranek die optimale Nachhallzeit ausdrücklich durch die Art des Dargebotenen bestimmt sieht.

[49] Das Bassverhältnis ist das Verhältnis der Nachhallzeiten der tiefen Frequenzen zu denen der mittleren: $BR = \frac{T_{125}+T_{250}}{2T_{500-1000}}$

[50] $L = (T/V) \cdot 10^5$

Im selben Jahr veröffentlicht der an der Technischen Hochschule Graz tätige F. Bruckmayer ein umfangreiches Buch über Schall im Hochbau. Im Kapitel 'Raumakustik' trägt der Autor verschiedene Angaben zur günstigen Nachhallzeit zusammen. Zum einen zitiert er den österreichischen Standard ÖNORM B 8115 (Bruckmayer, 1962, S. 525-526). Nach der Norm ergeben sich aus einer Abbildung folgende Empfehlungen der günstigen Nachhallzeit für einen Raum mit 20 000 m^3 im besetzten Zustand (Bruckmayer, 1962, S.525) (vgl. mit Abb 3.40a):

- Kammermusik: 1,3 s
- Durchschnitt für Musik: 1,8 s

Eine Abweichung von mehr als 25% von diesen Angaben sei zu begründen. Erwähnenswert ist, dass im erklärenden und auf die Abbildung verweisenden Absatz zur ÖNORM auf Knudsen u. Harris (1950) verwiesen wird. Des Weiteren erwähnt Bruckmayer Kuhls 1954er Untersuchung (siehe Abschnitt 3.2) und zitiert dessen Ergebnisse. Im Anschluss gibt der Autor eigene Empfehlungen wieder, die sich auf seine Erfahrung gründen. Diese seien zunächst unabhängig vom Raumvolumen (Bruckmayer, 1962, S. 526-527):

- Operntheater: 1,4 bis 1,7 s
- Konzertsaal: 1,7 bis 2,0 s

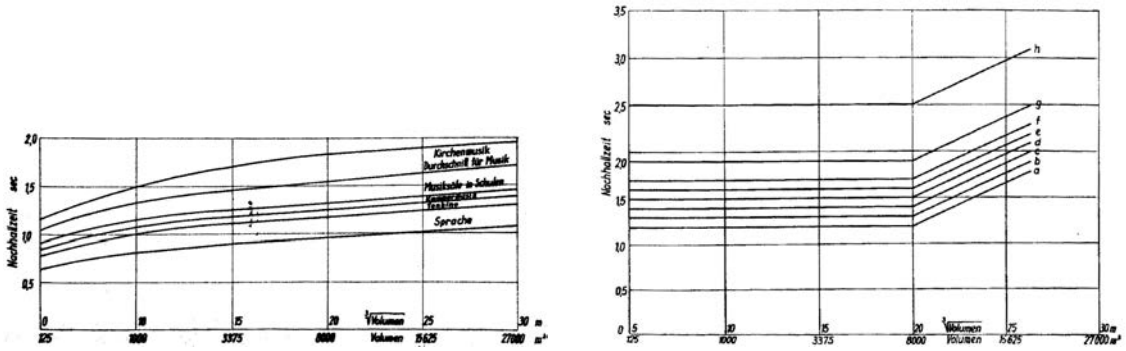
Für größere Räume solle man sich an der oberen Grenze der Bereiche orientieren. Weiter hält Bruckmayer fest: „Sollte im Verlauf der Entwicklung der Geschmack der Zuhörer weiter zu längerer Nachhallzeit neigen (man vergleiche die Schallplatten mit zunehmender Halligkeit), [...]“ (Bruckmayer, 1962, S. 527-528) so empfiehlt er ab einem Volumen von 8 000 m^3 die Nachhallzeit von einer Berechnungsgrundlage von 1,9 s für Konzertsäle und 1,6 s für Opernsäle mit $\sqrt[3]{V}$ ansteigen zu lassen. Für 20 000 m^3 ergeben sich dann (vgl. mit Abb. 3.40b):

- Operntheater: 2,2 s
- Konzertsaal: 2,6 s

Bruckmayer macht aber eine weitere Zusatzangabe, wonach für Konzertsäle eine Nachhallzeit von 1,9 s bis zu einem Volumen von 20 000 m^3 gültig seien. In der entsprechenden Abbildung steigt die Kurve für diese Raumarten dennoch ab 8 000 m^3 an.[51] In einem Beispiel der Planung der Hörsamkeit eines Konzertsaales bevorzuge der Autor einen Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen von etwa 25% vor dem Anstieg der Nachhall-

[51] Der Anstieg entspreche der Linie $t = 0,09\sqrt[3]{V}$ (Bruckmayer, 1962, S. 528)

zeit nach amerikanischen Vorbild von 500 Hz bis 125 Hz um 50% (Bruckmayer, 1962, S. 559).[52] Ein konstanter Nachhallzeitverlauf begünstige allerdings die Deutlichkeit. Als Besetzungsgrad empfiehlt Bruckmayer für Konzertsäle 7 bis 9 m^3 pro Zuhörerplatz. Bruckmayer erwähnt neben der Nachhallzeit die Deutlichkeit nach Thiele als ein Kriterium, dass „[...] nach dem derzeitigen Stand der Akustik [...] über die nach wie vor überragende Bedeutung der Nachhallzeit [...]“ hinausgehe (Bruckmayer, 1962, S. 574). Jedoch erfordere die Auswertung einer Messung der Deutlichkeit weitere Erfahrungen.



(a) (b) Kurven: e - Operntheater, g - Konzertsaal

Abbildung 3.40: Optimale mittlere Nachhallzeiten nach (a) ÖNORM B8115 und (b) nach Bruckmayer (1962)

Leslie Doelle fasst 1965 in einer Publikation des ’Division of Building Research’ des ’National Research Council’ von Kanada die Empfehlungen diverser Wissenschaftler zur Raumakustik zusammen. Die Nachhallzeit sei derzeit das wichtigste Kriterium bei der akustischen Gestaltung von Zuhörerräumen. Dies schließe sowohl einen volumenabhängigen Einzahlwert der Nachhallzeit bei 500 bis 1000 Hz, als auch ihren Verlauf über der Frequenz mit ein. Der Autor zitiert Empfehlungen von Knudsen u. Harris (1950), Kuhl (1954), Furrer (1956) und weiteren Autoritäten auf dem Gebiet der Raumakustik (Doelle, 1965, S. 135-137). Auf eine Wiedergabe der Werte wird hier verzichtet, da die entsprechenden Publikationen an anderer Stelle behandelt werden. Zum Frequenzverlauf der Nachhallzeit verweist auch Doelle auf den oft empfohlenen Anstieg von 150% bei tiefen Frequenzen (125 Hz) und den konstanten Verlauf oberhalb von 500 Hz. Eine Abweichung von 5 bis 10% von diesen Vorgaben sei akzeptabel. Ein optimales Raumvolumen pro Zuhörerplatz für einen Konzertsaal liege zwischen 7 bis 8,5 m^3, die untere Grenze sei durch 6,5 m^3 pro Platz, die obere durch 10 m^3 gegeben (Doelle, 1965, S. 213). Für das Opern-

[52] Gemeint sind Knudsen u. Harris (1950)

haus gebe es eine empfohlene Spanne von 4 bis 5,5 m³ mit dem Optimum zwischen 4,3 und 5 m³ pro Platz (Doelle, 1965, S. 221).

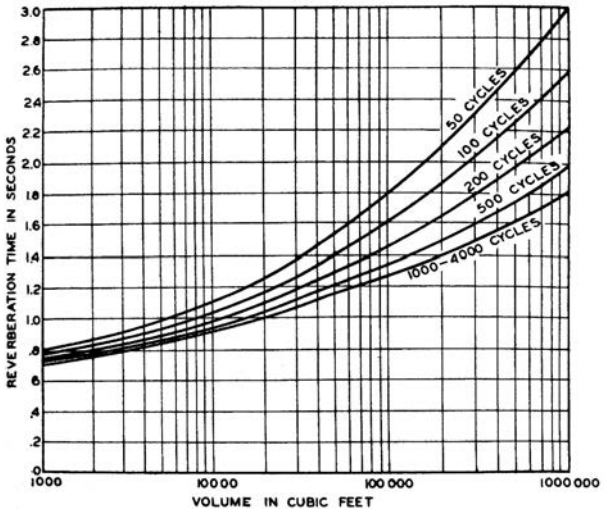


Abbildung 3.41: Optimale Nachhallzeiten nach Olson (1967)

Während sich Olson 1939 bezüglich der optimalen Nachhallzeit nur auf seine Zeitgenossen beruft (Olson u. Massa, 1939, S. 356), macht er 1967 eigene Angaben hierzu (Olson, 1967, S. 275-282). Die volumenabhängige optimale Nachhallzeit schildert er in einem Diagramm (Olson, 1967, S. 276) (s. Abb. 3.41). Hierin finden sich auch die Kurven für mehrere Tonlagen wieder. Der günstige Mittelwert (500 Hz) der Nachhallzeit liege für ein typisches Volumen bei 1,9 s. Für tiefe Frequenzen empfiehlt Olson einen Anstieg der Nachhallzeit bis auf 2,8 s bei 50 Hz (100 Hz: 2,4 s, 200 Hz: 2,1 s), Dies entspricht einem Faktor von etwa 1,5 (1,25 bzw. 1,1). Für hohe Frequenzen (1 bis 4 kHz) ist in dem Diagramm eine um den Faktor 0,9 kürzere Nachhallzeit vermerkt, aber es sei auch erstrebenswert die Nachhallzeit in diesem Bereich um ein paar Prozent zu erhöhen (Olson, 1967, S. 275). Des Weiteren gebe es für jeden Musikstil eine optimale Nachhallzeit, die der Autor in einer Tabelle aufführt (Olson, 1967, S. 282):

- Sinfonie: 1,5 bis 2,0 s
- Oper: 0,7 bis 1 s
- Chor ('chorus'): 1 bis 2 s
- Orgelmusik: 2 bis 5 s

Bemerkenswert ist dabei, dass Olson ein elektroakustisches System zur Anpassung der Nachhallzeit eines Auditoriums an die verschiedenen Optima vorschlägt: „The acousto-electronic system of Fig. 8.10 provides the correct reverberation time for all types of

musical renditions.“ (Olson, 1967, S. 281-282).

E. Meyer und E.-G. Neumann publizieren 1967 ein Hochschul-Lehrbuch in dem sie auf die Nachhallzeit eingehen. Die optimale Nachhallzeit sei dem Verwendungszweck des Raumes anzupassen. Die Autoren empfehlen folgende von der Musikart abhängige optimale Nachhallzeiten (Meyer u. Neumann, 1967, S. 70):

- Kammermusik: 1,4s
- Oper: 1,3 bis 1,6s
- Konzert: 1,7 bis 2,0s
- Orgelmusik: 2,5s

Die Autoren befürworten einen Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen (Meyer u. Neumann, 1967, S. 71).

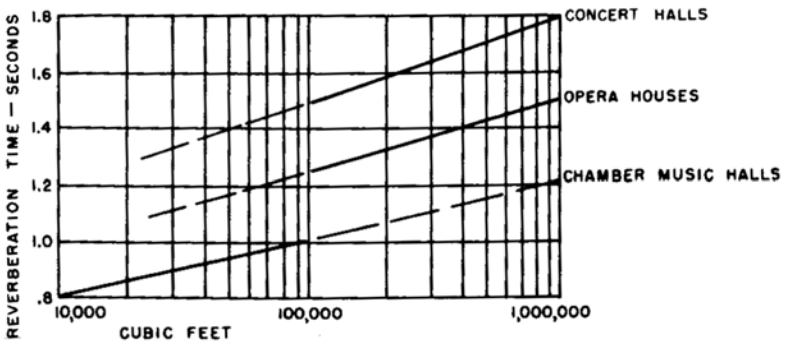


Abbildung 3.42: Optimale Nachhallzeiten nach Rettinger (1968)

M. Rettinger schreibt in seiner 1968er Publikation: „The reverberation time and its relation to volume and purpose of an enclosure represents at present the most important criterion for satisfactory room acoustics.“ (Rettinger, 1968, S. 88). Der Autor präsentiert in einem Diagramm allgemeine Richtwerte der Nachhallzeit für verschiedene Musikgenres (s. Abb. 3.42). Die verschiedenen Repertoires verlangen allerdings unterschiedliche Nachhallwerte, so dass diese Werte nicht absolut zu verstehen seien. Die Wagner’sche Oper benötige etwa 10% längere Nachhallzeiten als die italienische, für romantische Musik (Brahms) seien 25% längere Werte empfohlen als für klassische (Mozart) oder moderne (Stravinsky). Die empfohlenen Werte für typische Volumen und einem zu zwei Dritteln besetzten Konzertsaal können Tabelle 3.5 entnommen werden (vgl. Fig. 23, Rettinger, 1968, S. 89). Die Nachhallzeiten werden als Funktion des Raumvolumens gegeben, ge-

strichelte Kurven scheinen dabei unübliche bzw. unpassende Volumen zu kennzeichnen. Zusätzlich gibt Rettinger für jede Kurve eine Formel an, um aus dem Volumen des Aufführungsraumes die günstige Nachhallzeit zu berechnen[53] (Rettinger, 1968, S. 90). Diese seien nicht theoretisch entwickelt, sondern aus Erfahrungswerten abgeleitet. Zwischen den Verwendungszwecken unterscheide sich Formel 3.18 nur um den Faktor b, welcher der Tabelle 3.5, (S. 97) entnommen werden kann. Der Nachhallwert für Kirchen wird zusätzlichen noch um die Konstante c reduziert.

$$T = b \log \frac{V}{0,3048^3} - c \tag{3.18}$$

Des Weiteren variiere die Nachhallzeit mit der Frequenz, so dass sich für 100 Hz 20 bis 50% höhere Werte ergeben, als für die in der Tabelle 3.5 genannten, welche sich auf 500 Hz beziehen. Für Konzertsäle macht der Autor in einem gesonderten Kapitel die Angabe, bei 100 Hz solle die Nachhallzeit etwa 30% länger sein als bei 1000 Hz um Klangfülle zu erreichen (Rettinger, 1968, S. 264). Weiter empfiehlt Rettinger ein Volumen pro Zuhörerplatz von etwa 5,6 bis 14 m^3 für Konzertsäle und 4,3 bis 7 m^3 für Opernhäuser (Rettinger, 1968, S. 328).

Tabelle 3.5: Günstige Nachhallzeiten verschiedener Raumarten nach Rettinger (1968)

Verwendung	**Nachhallzeit / s**	**b**
Konzertsaal	1,75 s	0,30
Opernsaal	1,45 s	0,25
Kammermusiksaal	1,10 s	0,20

A. Lawrence beschreibt 1970 die günstige Nachhallzeit für musikalische Aufführungsräume. Ihr Frequenzverlauf sollte halbwegs konstant sein, obwohl eine Anhebung zu tiefen Frequenzen unter 500 Hz bis zu einem maximalen Faktor von 1,5 akzeptabel sei (Lawrence, 1970, S. 153). Die Autorin gibt Empfehlungen in einem Diagramm wieder (Lawrence, 1970, S. 154) (vgl. mit Abb. 3.43). Ob es sich dabei um eigene oder adaptierte Empfehlungen handelt, wird nicht ersichtlich. Die günstige Nachhallzeit sei vom Raumvolumen abhängig. Lawrence unterscheidet Kirchen, Mehrzweck- und Konzertsäle. Für einen Konzertsaal mit einem Volumen von 20 000 m^3 liege die günstige Nachhallzeit bei

[53] Die von Rettinger gegebene Formel gilt für Kubikfuß. Für metrische Volumeneinheiten muss das Volumen zusätzlich durch $0,3048^3$ geteilt werden.

2,0 s (Lawrence, 1970, S. 154).

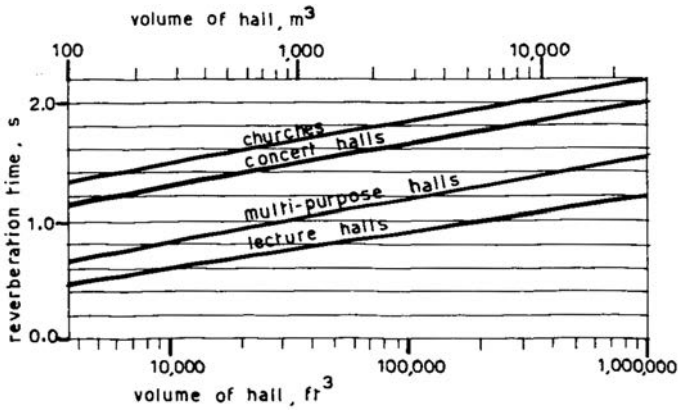


Abbildung 3.43: Optimale mittlere Nachhallzeiten nach Lawrence (1970)

Nach M. David Egan (1972) bestehe der Einfluss des Volumens auf die optimale Nachhallzeit darin, dass sich diese für große Räume an der oberen Grenze des von ihm gegebenen Toleranzbereiches orientieren sollte. Aus einer Abbildung wird ersichtlich, dass der optimale Bereich durch das Dargebotene bestimmt sei (vgl. Egan, 1972, S. 40) (s. Abb. 3.44). Akzeptable Extremwerte seien durch einen gestrichelten Bereich gekennzeichnet. Es handle sich bei den Empfehlungen um Erfahrungen mit bestehenden Räumen. Ein Verweis unter der Abbildung „Courtesy of Bolt, Beranek & Newmann“ lässt den bzw. die Urheber der Empfehlungen erahnen (Egan, 1972, S. 40).

- Zeitgenössische Orchesterwerke, Solo- und Kammermusik: 1,4 bis 1,7 s
- Romantische Musik: 1,7 bis 2,1 s
- Operetten: 1,2 bis 1,4 s
- Oper: 1,5 bis 1,8 s
- Sakuläre Chorwerke: 1,7 bis 2,0 s
- Liturgische Musik: Orchester, Chor und Orgel: mind. 2,0 s

Des Weiteren sei nach Egan der Nachhallzeitfrequenzverlauf optimal, sofern dieser einen Anstieg zu tiefen und einen Abfall zu hohen Frequenzen mit folgenden auf die mittlere Nachhhallzeit bezogenen Faktoren aufweise: 1,4-fach bei 125 Hz, 0,8-fach bei 4 kHz (Egan, 1972, S. 160).

In einer übersichtlicheren Publikation von 1972 beschreibt L. Doelle erneut die Anforderungen an eine gute Akustik. Nach einer Abbildung gebe es einen Bereich optimaler Nachhallzeit der mit dem Volumen zunimmt und innerhalb dessen diverse Verwendungs-

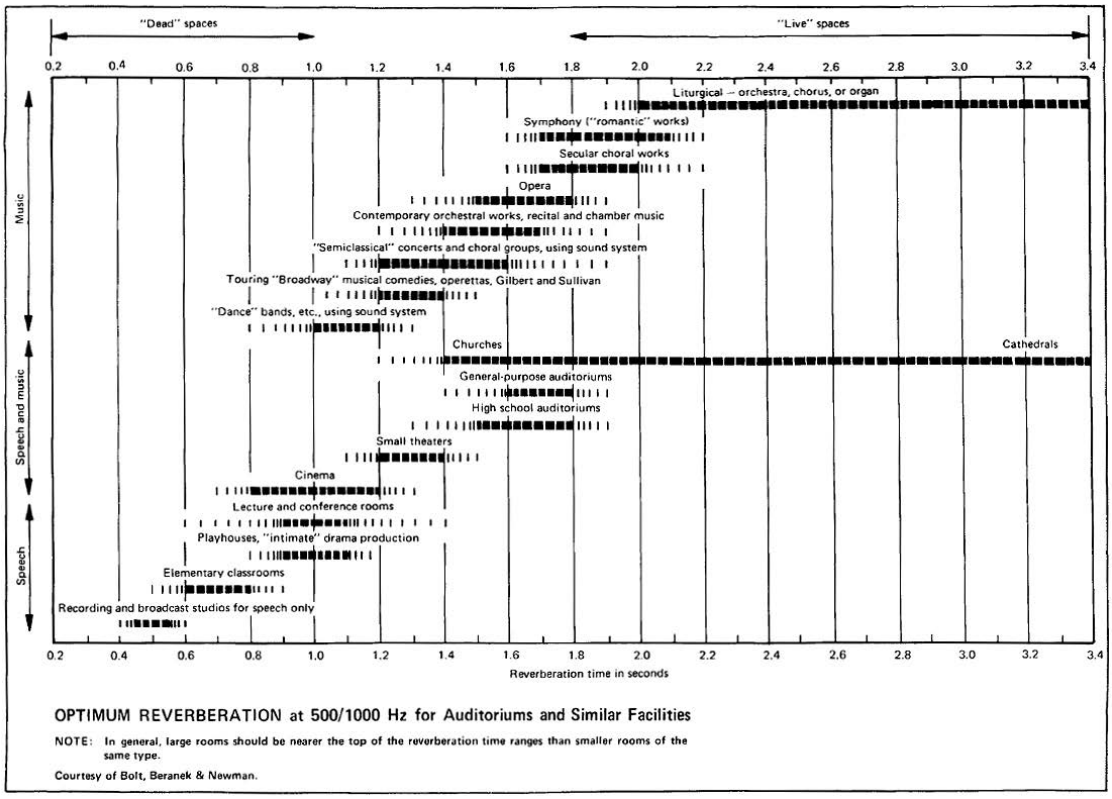
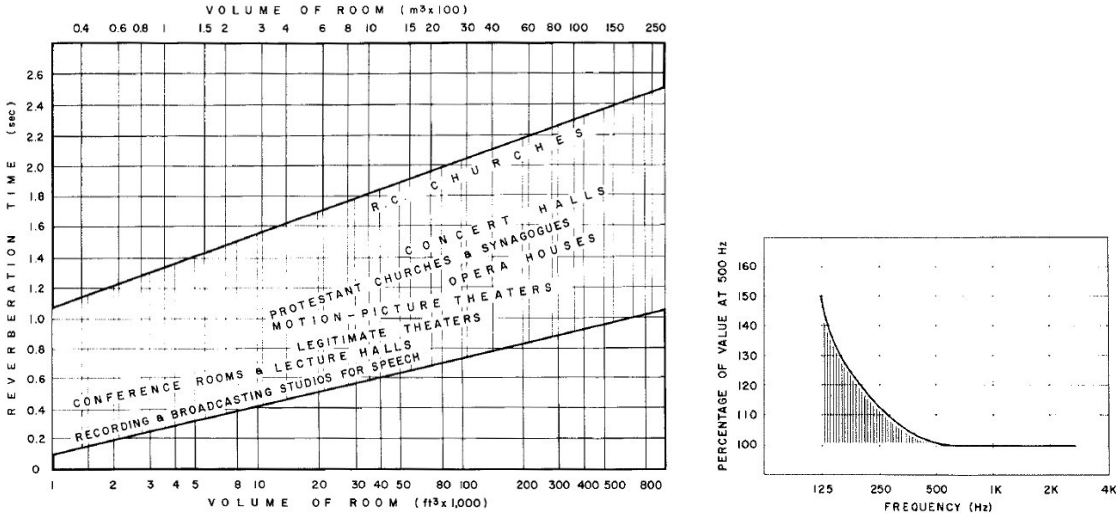


Abbildung 3.44: Optimale mittlere Nachhallzeiten nach Egan (1972)

zwecke und Musikstile untergeordnet sind. Die Empfehlungen unterscheiden sich im Vergleich zur 1965er Publikation nur in den Benennungen. Für Konzertsäle (20 000 m^3) gelte eine optimale Nachhallzeit von ca. 1,9 s, für Opernhäuser liege diese bei 1,6 s (Doelle, 1972, S. 56) (vgl. mit Abb. 3.45). Zu tiefen Frequenzen hin steige die Nachhallzeit, wie der Autor auch 1965 empfahl, auf 150% bei 125Hz an. Die Empfehlungen gehen auf diverse Autoren zurück. Doelle erachtet neben dem Nachhall auch das Verhältnis von Direkt- und Reflexionsschall als wichtig, gibt jedoch weder eine Messgröße noch Zahlenwerte hierzu an. Doelles weitere Ausführungen und Vokabular erinnern an Beranek (1962). Zudem macht er erneut Empfehlungen zur optimalen Nachhallzeit verschiedener Stile, die mit den Nachhallzeiten nach Kuhl (1954) übereinstimmen (Doelle, 1972, S. 85). Für Opernsäle gibt der Autor zusätzlich diesen Werten einen optimalen Bereich von 1,2 bis 1,4 s an. Des Weiteren gibt Doelle Richtwerte für das spezifische Volumen pro Platz an (Doelle, 1972, S. 52):

- Konzertsaal: 6,2 bis 10,8 m^3, Optimum: 7,8 m^3
- Opernsaal: 4,5 bis 7,4 m^3, Optimum: 5,7 m^3



(a) (b)

Abbildung 3.45: (a) Optimale mittlere Nachhallzeiten und (b) Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Doelle (1972)

In seiner Publikation von 1972[54] geht J. Meyer auf die Anforderungen der Raumakustik von musikalischen Aufführungsräumen ein. Er bedient sich dabei historischer sowie gegenwärtiger Beispiele und betrachtet die raumakustischen Bedingungen auch unter musikwissenschaftlichen Aspekten. Neben dem Volumen des Aufführungsraumes müsse bei Nachhallzeitfragen auch das Repertoire berücksichtigen werden. So sei der im 19. Jahrhundert erbaute Wiener Musikvereinssaal mit einer Nachhallzeit von 2,05 s für romantische Werke, die Bonner Beethovenhalle mit 1,7 s für die Aufführung klassischer Werke wie etwa Haydn-Sinfonien geeignet (Meyer, 1972, S. 119-121). Die Anforderungen an die Akustik eines Kammermusiksaales „[...] werden akustisch durch eine verhältnismäßig kurze Nachhallzeit in nicht zu großen Räumen erfüllt [...]“ (Meyer, 1972, S. 129). Der Autor benennt die Nachhallzeiten historischer Räume mit etwas über einer Sekunde, moderner Säle mit etwa 1,1 s (Meistersingerhalle Nürnberg , 4 000 m^3) (Meyer, 1972, S. 129-131).[55] Akustisch für gut befundene Säle wiesen einen Anstieg der Nachhallzeit

[54] Aus der zweiten Auflage von 1980 ergeben sich inhaltlich identische Angaben, die dritte Auflage von 1995 ist um einige Stellen erweitert, gibt aber dennoch dieselben Aussagen wieder. Interessante zusätzliche Informationen werden per Fußnote gegeben.

[55] Weitere Beispiele zählt die dritte Auflage auf (Meyer, 1995, S. 195). Die Nachhallzeit des Leipziger Gewandthauses von 1,7 s werde schon für kleine Ensembles als zu lang empfunden. Zusätzliche Angaben werden zum Klarheitsmaß gemacht. Der Kammermusiksaal des Berliner Schauspielhauses weise Klarheitsmaße zwischen 1,3 und 3,5 dB auf, das Leipziger Gewandthaus dagegen nur solche von 0,5 bis 1,3 dB, was schon als zu gering empfunden werde. Der allgemeine optimale Bereich von C_{80} liege zwischen -2 und +4 dB, für entfernte Plätze könne das Maß auch -5 dB betragen (Meyer, 1995, S. 156).

im Bassbereich auf. Da die meisten Instrumente tiefe Frequenzen unterhalb von 200 Hz nur schwach abstrahlten und durch die Abnahme der Empfindlichkeit der Ohren zu tiefen Frequenzen sei „[...] es günstig, wenn die Grundtonlagen der Baßstimmen vom Raum etwas verstärkt werden.„ (Meyer, 1972, S. 118).[56]. Bei Opernhäusern spiele der Kompositionsstil eine größere Rolle als bei sinfonischer Musik. Es ließen sich die Forderungen nach einer höheren Deutlichkeit und einer kürzeren Nachhallzeit aufstellen. Des Weiteren verlangen Opern von Mozart kürzere Nachhallzeiten als Werke von Verdi, Wagner und Strauss. Für Opern von Wagner seien die Säle der Festspielhäuser in Bayreuth und Salzburg mit ihren Nachhallzeiten von 1,55 und 1,5 s sehr gut geeignet. Berechnete Nachhallzeiten für das Burgtheater in Wien, in dem Mozart einige seiner Opern aufführte, liegen dagegen zwischen 1,0 und 1,3 s (Meyer, 1972, S. 123-124). Bezüglich der Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit empfiehlt Meyer einen Abfall der Nachhallkurve zu tiefen Frequenzen oder zumindest einen konstanten Verlauf (Meyer, 1972, S. 125). Des Weiteren hält Meyer fest: „Urteile über die akustische Qualität von Konzertsälen sind deshalb immer nur aus der jeweiligen Zeit heraus zu deuten und sind - in Detailfragen - nicht unbedingt allgemeingültig.“ (Meyer, 1972, S. 117). Meyer erkennt zwischen den raumakustischen Vorstellungen der Nachkriegsjahre und der seiner Zeit eine Geschmacksveränderung „[...] von einer größeren Transparenz des Klangbildes [...] zu einer homogenen Klangfülle [...]“ (Meyer, 1972, S. 117). Dies äußere sich in kürzeren Nachhallzeiten der in den Nachkriegsjahren erbauten Konzertsäle (1,4 bis 1,7 s) im Vergleich zur bspw. in den 1960er Jahren fertiggestellte Philharmonie Berlin (2,0 s) (Meyer, 1972, S. 116-117). Der Geschmack von Zuhörern und Musikern, d. h. die Vorstellung einer guten Akustik, sowie der musikalische Interpretationsstil seien einer zeitlichen Veränderung unterworfen. An den beispielhaften Opernsälen im Stile des 19. Jahrhunderts erkennt Meyer eine Veränderung dieses Geschmacks zu etwas halligeren Räumen. Ihre Nachhallzeiten steigen mit dem Baujahr von 1,1 auf 1,3 s (Meyer, 1972, S. 124).

Kuttruff (1973) gibt den optimalen Bereich der Nachhallzeit für Konzertsäle zwischen 1,6 und 2,1 s an. Für größere Säle wähle man höhere Werte dieses Bereiches als für kleinere (Kuttruff, 1973, S. 187). Jedoch vertrage Chormusik, begleitet von romantischer Orchestermusik oder Orgelmusik eine noch höhere Nachhallzeit (Kuttruff, 1973, S. 188). Der optimale Bereich für Kammermusik liege zwischen 1,4 und 1,6 s. In Opernsälen müsse ein Kompromiss zwischen der Verständlichkeit des Gesanges und dem Klang der Musik gefunden werden. Der Verfasser führt hier zwei Beispiele auf (La Scala, Mailand und

[56] Nach der dritten Auflage gebe es die Tendenz, die Nachhallzeit für hohe Frequenzen in gewissem Rahmen (bis etwa 2 000 Hz) konstant bzw. aufrecht zu erhalten (Meyer, 1995, S. 164)

Festspielhaus Bayreuth), die offensichtlich die Grenzen der günstigen Nachhalldauer darstellen: 1,2 bis 1,55 s werden genannt (Kuttruff, 1973, S. 189). Ein Anstieg der Nachhallzeit ab 500 Hz zu tiefen Frequenzen bis maximal zu einem Faktor von 1,5 der mittleren Nachhalldauer sei allgemein als vorteilhaft betrachtet. Es gebe aber auch Beispiele guter Konzertsäle, welche diesen Anstieg nicht aufweisen (Kuttruff, 1973, S. 188).

Nach Fasold u. Winkler (1976) sei es nicht möglich, die subjektiv empfundene Hörsamkeit mit nur einem objektiven Kriteritum zu beschreiben (Fasold u. Winkler, 1976, S. 23). Die Autoren erläutern die derzeit gebräuchlichsten raumakustischen Kriterien und bemerken, in der DDR würden neben Nachhallzeit das Raumeindrucksmaß R und Klarheitmaß C verwendet (Fasold u. Winkler, 1976, S. 30). Zur Nachhallzeit stellen die Autoren einen Trend zu längeren Nachhallzeiten fest (Fasold u. Winkler, 1976, S. 136) und beziehen sich auf den DDR-Standard TGL 10687/04. Demnach hinge die optimale Nachhallzeit vom Raumvolumen und dem Musikstil ab. Die Volumenabängigkeit begründe sich auf die subjektive Erwartungshaltung zum Raumeindruck: je größer der Raum, desto größer der erwartete Raumeindruck. Für typischen Volumen empfiehlt die zitierte DDR-Norm folgende Werte (vgl. Fasold u. Winkler, 1976, S. 47), was aus einem Diagramm hervorgeht (s. Abb. 3.46):

- Orgelmusik, Oratorium: 2,6 s
- Sinfonische Musik: 2,2 s
- Solo - und Kammermusik: 1,8 s
- Oper, Mehrzwecksäle für Musik und Sprache 1,7 s

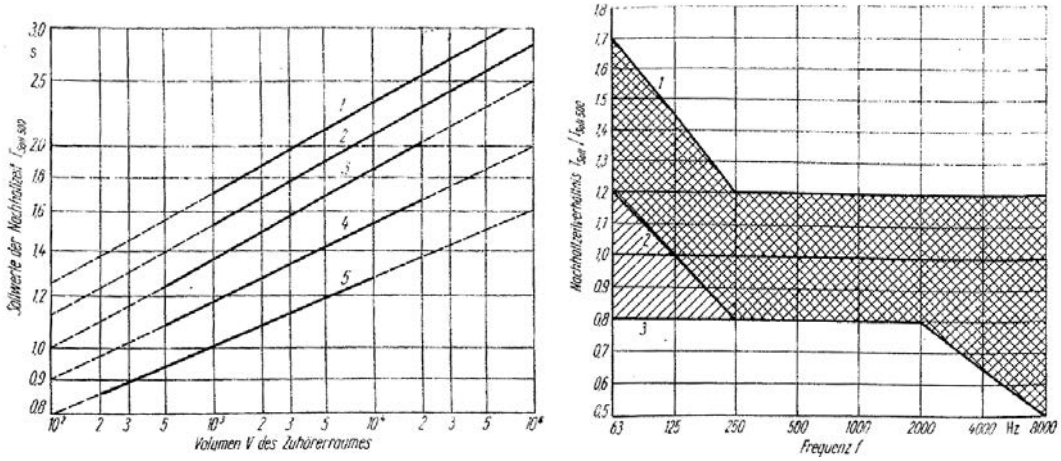
Fasold und Winkler geben darüberhinaus volumenunabhängige günstige Bereiche der Nachhallzeit an. Als Quelle der unterhalb aufgeführten Nachhallwerte geben die Autoren Meyer u. Neumann (1967) an.[58]

- Orgelmusik, Oratorium: 2,5 bis 3 s
- Konzert: 1,7 bis 2,1 s
- Kammermusik: 1,0 bis 1,5 s
- Oper: 1,3 bis 1,6 s

Für die Abschätzung der gewünschten Nachhallzeit empfehle sich die Volumenkennzahl.

[58] Jedoch weichen die Angaben von Meyer u. Neumann (1967) ab, vergleiche mit dem entsprechenden Abschnitt dieses Kapitels.

[58] Kurvenbezeichnungen (a): 1 - Oratorium und Orgelmusik, 2 - sinfonische Musik, 3 - Solo- und Kammermusik, 4 - Operntheater, Mehrzwecksäle für Sprache und Musik, 5 - Sprechtheater etc.; Kurvenbezeichnungen (b): 1 - 2 für Musik; 1 - 3 für Sprache



(a) (b)

Abbildung 3.46: (a) Sollwerte der mittleren Nachhallzeit und (b) Nachhallzeitfrequenzgang nach TGL 10687/04 (1970) [57] , Quelle Fasold u. Winkler (1976)

Bei einem Wert von 10 m^3 pro Platz seien die Voraussetzungen für einen Konzertsaal gegeben (Fasold u. Winkler, 1976, S. 30). Für Musikdarbietungen sollen 7 m^3 aber nicht unterschritten bzw. 12 m^3 nicht überschritten werden. Zum Frequenzverlauf der Nachhallzeit liefern die Autoren ebenfalls ein Diagramm der Norm TGL 10687/04 (vgl. Fasold u. Winkler, 1976, S.48 und S. 49). Demnach seien einerseits Abweichungen von $\pm$20% von der optimalen Nachhallzeit tolerierbar. Unterhalb von 250 Hz empfehle sich ein Nachhallzeitanstieg bis auf etwa 50% der mittleren Nachhallzeit bei 63 Hz. Zu hohen Frequenzen sei ein Abfall der Nachhallzeit möglich. Weitere Angaben machen die Autoren zum Klarheitsmaß C. Für von der Schallquelle entfernte Plätze seien Werte unter -5 dB und über 9 dB unbrauchbar, für Plätze nahe der Schallquelle gelte dies für Werte unter -2 dB bzw. über 12 dB (Fasold u. Winkler, 1976, S. 32).

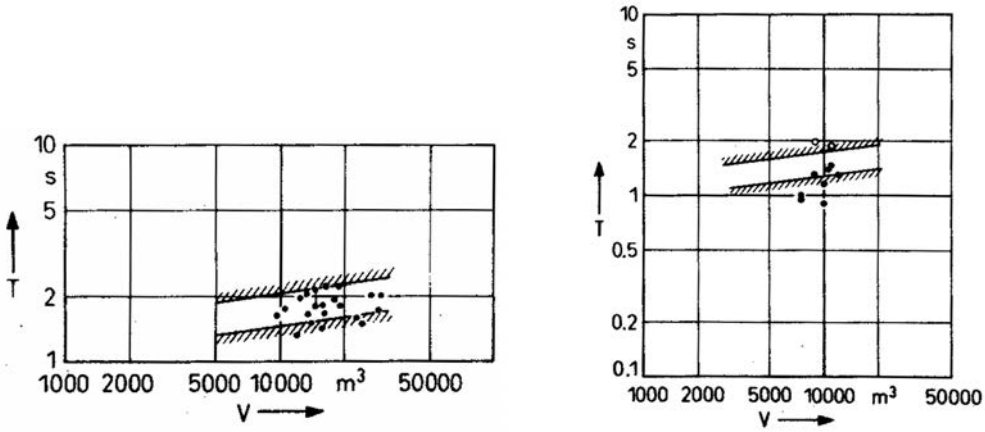
In einem Vortrag der 260. Sitzung der Rheinisch-Westfälischen Akademie der Wissenschaften im Jahre 1978, welcher als Publikation erschien, beschreibt H. Kuttruff günstige Nachhallwerte verschiedener Aufführungsräume (Kuttruff, 1978, S. 10):

- Operntheater: 1,2 bis 1,7 s
- Konzertsäle: 1,7 bis 2,1 s

Dies sei von bekannten Sälen abgeleitet. Doch müsse es weitere maßgebliche Kriterien für die Beschreibung raumakustischer Bedingungen geben, da die Nachhallzeit alleine keinesfalls eine gute Akustik garantiere. Hierzu erläutert Kuttruff die Forschung anderer

Wissenschaftler, gesteht aber ein, dass trotz richtiger Ansätze, Forschungsmethoden und diverser Ergebnisse quantitative Einschätzungen objektiver Schallfeldgrößen mit subjektiver Signifikanz bisher noch nicht gelungen seien.

Nach Cremer u. Müller (1978) sei die Hoffnung auf 'anerkannte Richtwerte' und Prädiktion der Hörsamkeit durch die aufwendigen psychophysischen Methoden vergangener Untersuchungen bisher unerfüllt geblieben. Es gebe keinen (oder einen geringen) Konsens der Forschung, weder bezüglich der Anzahl und Rangfolge für die Wahrnehmung maßgeblicher subjektiver raumakustischer Aspekte, noch in der Verwendung der ihnen zugeordneten objektiven Größen. Die Existenz von scharf begrenzten Optima raumakustischer Parameter stellen sie daher in Frage, doch müsse man bestimmte Grenzwerte dieser Kriterien einhalten (Cremer u. Müller, 1978, S. 487-490). Bei der Angabe von Richtwerten



(a) Konzertsäle (b) Opernhäuser

Abbildung 3.47: Bereiche anzustrebener Nachhallzeiten für (a) Konzertsäle und (b) Opernhäuser nach Cremer u. Müller (1978)

halten sich die Autoren an die Erfahrungswerte. Sie diskutieren die in der Literatur oft anzutreffende Abhängigkeit der Nachhallzeit vom Volumen des Raumes (Cremer u. Müller, 1978, S. 490-493). Grundsätzlich richte sich die Nachhallzeit nach dessen Verwendungszweck. Der von Lehmann (1976) gefundene Zusammenhang des subjektiv wesentlichen Aspektes der Stärke der Darbietung mit dem objektiven Stärkemaß bedinge aber eine vom Volumen abhängige minimale Nachhallzeit. Daraus erschließe sich die notwendige Angabe einer primär vom Verwendungszweck abhängigen unteren Grenze der Nachhallzeit, die gleichzeitig mit dem Raumvolumen steige. Der Anstieg der oberen Grenze sei folglich ebenfalls unvermeidlich. So präsentieren die Autoren jeweils ein Diagramm des günstigen Bereiches der Nachhalllzeit für Opernhäuser und Konzertsäle (Cremer u. Müller, 1978,

S. 498-499) (siehe Abb. 3.47). Die Anstiege der oberen und unteren Grenzgeraden entsprechen in etwa der Steigung nach folgender Gleichung:[59]

$$\log \frac{T}{T_1} = \frac{1}{7} \log \frac{V}{V_1} \tag{3.19}$$

Die Empfehlungen beziehen sich auf den besetzten Saalzustand. Daher sei ein Saal dementsprechend zu planen, dass die obere Nachhallzeitgrenze im unbesetzten Zustand erreicht bzw. leicht überschritten werde (Cremer u. Müller, 1978, S. 495). Doch finde die Volumenabhängigkeit der Empfehlungen für Konzertsäle ihre Begründung darin, dass Kammer- und Solomusik in kleineren Sälen aufgeführt werden und die Musikstile mehr Deutlichkeit und Durchsichtigkeit vertragen (Cremer u. Müller, 1978, S. 499). Die Empfehlungen der Autoren umfassen für typische Volumen etwa folgende Bereiche:[60]

- Konzert: 1,6 bis 2,3 s
- Kammer- und Solomusik: 1,4 bis 2,1 s
- Oper: 1,4 bis 1,9 s

Für den optimalen Frequenzgang der Nachhallzeit empfehle sich die Einhaltung der Bedingung nach Lehmann (1976), dass der Abfall der Nachhallzeit $\overline{T}'_{04}$ zwischen 125 und 2000 Hz zwischen 0,1 und 0,2 s pro Oktave liegt (Cremer u. Müller, 1978, S. 485, 503-504):[61]

$$\overline{T}'_{04} = \frac{1}{10} \sum_{i=0}^{4} (i+1) T_{E,i} - \frac{3}{10} \sum_{i=0}^{4} T_{E,i} \tag{3.20}$$

Diese gelte für Räume mit Volumen über 11 000 m^3. Für kleinere Räume legen die Autoren einen frequenzunabhängigen Nachhallzeitverlauf, wie etwa Békésy ihn empfiehlt, nahe. Lege man der Nachhallzeitmessung sich überlappende Terzfilter anstelle von den Oktavfiltern zugrunde, erhalte man einen stärker schwankenden Frequenzgang. Diese Schwankungen seien akzeptabel, falls sie nicht größer ausfielen, als in einer weiteren Abbildung eines gemessenen Nachhallzeitverlaufes dargestellt (siehe Abb. 3.48). Demnach sollten die Schwankungen bei nebeneinander liegenden Terzen nicht mehr als etwa ±0,2 s betragen (Cremer u. Müller, 1978, S. 504-505). Zu weiteren raumakustischen Kriterien zitieren die Autoren die Ergebnisse anderer Forscher wie folgt (Cremer u. Müller, 1978,

[59] Mit nicht näher angegebenen Bezugsgrößen T_1 und V_1.

[60] Eine genaue Formel wird nicht angegeben und durch die logarithmische Skalierung der Nachhallzeitachse sind die Nachhallwerte schwer abzulesen.

[61] Lehmann bezieht dies allerdings auf den Frequenzgang der EDT. In der entsprechenden Untersuchung war die Nachhallzeitmessung bei tiefen Frequenzen durch einen zu geringen Signal-Rausch-Abstand zu ungenau.

S. 505-506):

- $C_{80,\,min}$ = 0 dB nach Reichardt u. a. (1975a)
- D = 0,34 und IACC = 0,23 nach Gottlob (1973)
- $t_{S,\,max}$ = 140 ms nach Lehmann (1976)

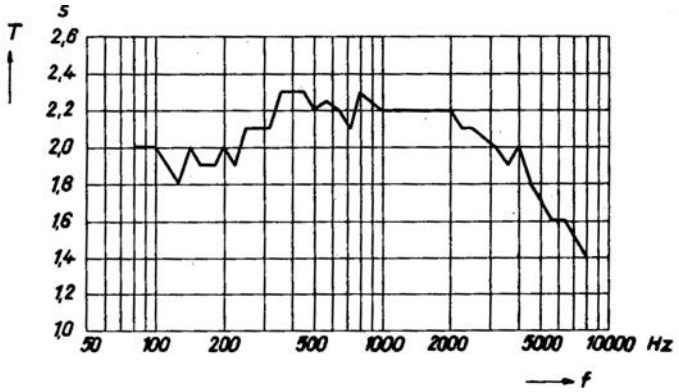


Abbildung 3.48: Nachhallzeitfrequenzgang mit überlappenden Terzen gemessen (Beethovensaal der Liederhalle in Stuttgart)

J. E. Moore präsentiert 1978 optimale Nachhallzeiten in Abhängigkeit des Raumvolumens und der Musikart. Die Volumenabhängigkeit begründe sich in der Hörer-Erwartung, dass in großen Räume auch längere Nachhalldauern erwartet werden, wie Studien zeigen. Es gelten folgende Werte (Moore, 1978, S. 163):

- Konzertsaal: 1,9 s
- Opernsaal: 1,5 s
- Kammermusiksaal: 1,5 s
- Orgelmusik und Chor: 2,9 s

Das diese Empfehlungen beherbergende Diagramm macht des Weiteren Angaben über die Frequenzabhängigkeit (s. Abb. 3.49). Während die Werte oberhalb für 500 bis 2 000 Hz gelten, ergeben sich für 125 Hz um den Faktor 1,5 höhere Nachhallzeiten, bspw. 2,9 s für den Konzertsaal. Der Autor betrachtet vier Aspekte, denen sich alle weiteren akustischen Anforderungen musikalischer Aufführungsräume unterordnen: Schallstärke, Klarheit, 'Blend' und Ensemble (Moore, 1978, S. 169). Weitere quantitative Empfehlungen werden hierzu allerdings nicht gemacht.

In einer 1979 erscheinenden Publikation versucht Walter Reichardt dem Leser gute Raumakustik in Form eines Gesprächs mit Intendanten, Architekten, Bühnentechniker etc. näher zubringen. Die Nachhallzeit reiche als einziges Gütekriterium nicht aus, was man

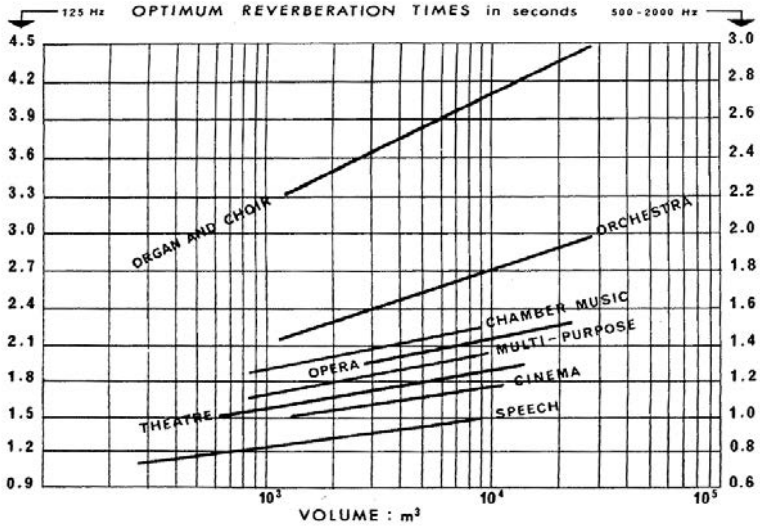


Abbildung 3.49: Optimale Nachhallzeiten verschiedener Frequenzen nach Moore (1978)

schon daran erkenne, dass an 'guten' und 'schlechten' Plätzen eines Saales dieselbe Nachhalldauer festgestellt werde (Reichardt, 1979, S. 14). Weitere objektive Messgrößen seien also notwendig, um die raumakustischen Bedingungen hinreichend zu beschreiben. Diese müssen Aspekte der Durchsichtigkeit, des Raumeindruckes der Lautstärke und der Klangfarbe abdecken. Bezüglich der Klangfarbe genüge der Nachhallzeitfrequenzverlauf nicht (Reichardt, 1979, S. 76). Als objektive Messgröße der Durchsichtigkeit empfehle Reichardt nach Erkenntnissen Abdel Alims ein Klarheitsmaß $C_{80} > 0$, was im Konflikt mit Forderungen zur Nachhallzeit stehe. An bühnenentfernten Plätzen sei ein solches Klarheitsmaß bei Nachhallzeiten über 1,6 s schwer herzustellen (Reichardt, 1979, S. 128). Reichardt deutet an, Lehmann habe begründet, ein Klarheitsmaß größer 4 dB sei unerwünscht. Leider wird hierzu keine Publikation genannt (Reichardt, 1979, S. 78). Die günstige Nachhallzeit betrage für Oper und Kammermusik 1,5 s, für Konzertsäle werden „in zunehmenden Maße“ Werte über 2 s verlangt (Reichardt, 1979, S. 86). Die längsten Nachhallzeiten seien für Orgelmusik, Oratorien und sakrale Musik empfohlen, einen Wert nennt Reichardt allerdings nicht. Des Weiteren betrage das empfohlene Raumvolumen 7 bis 12 m^3 pro Platz.

Nach Parkin u. a. (1979) sei es üblich, volumenabhängige Nachhallzeiten zu empfehlen. Eine 'moderne Tendenz' bestehe darin, dies zu verwerfen und nur von dem Musikstil der Darbietung auszugehen. Romantische und chorale Werke benötigen längere, klassische und moderne Musik kürzere Nachhallzeiten. Das vom Musikstil gewünschte Verhältnis zwischen Definition und Nachhall müsse abgewogen werden. Die günstige Nachhallzeit

für sinfonische Konzerte und Kammermusik liege zwischen 1,7 und 2,2 s (500 Hz), wobei romantische Musik an der oberen Grenze und klassische an der unteren anzusiedeln sei (Parkin u. a., 1979, S. 83). Die Anzahl der projektierten Zuhörerplätze und das davon abhängige Volumen bestimmen den Planungsspielraum in Nachhallzeitfragen. Ausgehend von 1 500 Zuhörerplätzen würde es eine Volumenkennzahl zwischen 6 und 10 m^3 pro Platz ermöglichen, oben angegebene Nachhallzeiten zu erreichen. Die Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit sollte im Bassbereich (125 Hz) einen Anstieg bis auf maximal 50% des 500 Hz-Wertes berücksichtigen (Parkin u. a., 1979, S. 85-86) (vgl. Abb. 3.50). Bei Opernhäuser trennen die Autoren zwei Haupttypen: die italienische Oper mit kürzeren Nachhallzeiten von $1{,}2 \pm 0{,}2$ s und die Wagnersche Oper mit längeren Werten von etwa 1,7 s (Parkin u. a., 1979, S. 89-91). Ein Kompromiss zwischen beiden Werten sei natürlich möglich. Für den Gesang sei der oben genannte Nachhallzeitwert tiefer Tonlagen ungünstig.[62] Ein frequenzunabhängiger Verlauf der Nachhallzeit sei daher möglich.

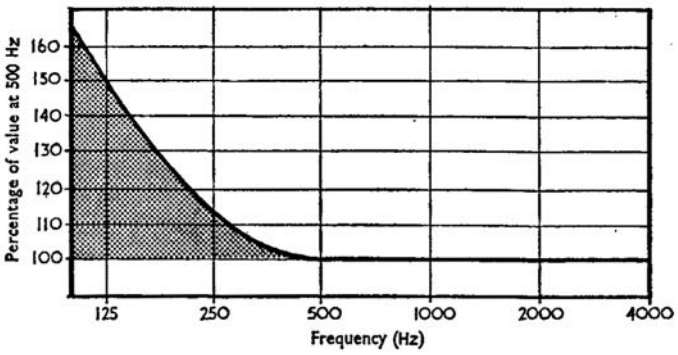


Abbildung 3.50: Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit nach Parkin u. a. (1979))

3.3.3 1980 bis 2009

V. L. Jordan diskutiert 1980 diverse vorgeschlagene raumakustische Kriterien und raumakustische Bedingungen verschiedener Konzertsäle, Opernhäuser und Musikstudios. Jordan hält sich damit zurück, quantitative Empfehlungen zu nennen, gibt dennoch 'vorläufige' akzeptable Durchschnittswerte und Toleranzbereiche einiger diskutierter Kriterien (Jordan, 1980, S. 191) an.

- Nachhallzeit: 1,4 bis 2,8 s, Mittelwert: 2,1 s
- EDT: 1,8 bis 2,6 s, Mittelwert 2,1 s

[62] Die Autoren meinen die Verständlichkeit des Gesanges gegenüber dem Orchester bei Opernwerken.

- Klarheitsmaß C_{80}: -2 bis +2 dB, Mittelwert: 0 dB

Jordan bringt dem Leser die Gestaltung der Raumakustik von Konzertsälen anhand von Fallstudien näher. Konkrete Empfehlungen lassen sich aber nicht extrahieren. Erwähnenswert ist allerdings, dass sich der Autor, wie Brüel (1951), auf die Einstellung der Nachhalldauern der Musikstudios des dänischen Rundfunkhauses 'Radiohuset' in Kopenhagen bezieht (1945). Bezüglich der Frequenzcharakeristik berichtet er von der günstigen Beurteilung einer Senke der Nachhallzeit im mittleren Frequenzbereich zwischen 300 und 800 Hz (Jordan, 1980, S. 2-3).

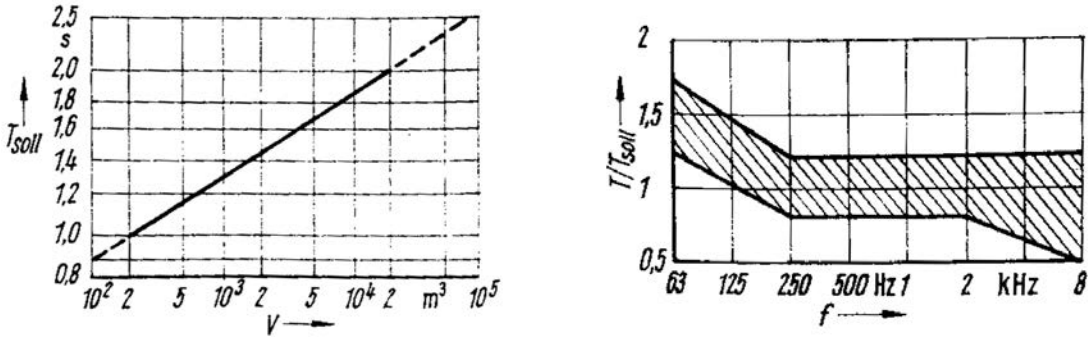
Die Autoren Schmidt und Reichardt unterscheiden in ihrem Beitrag um Sammelband „Taschenbuch der Technischen Akustik“ aus dem Jahre 1984 vier Schallfeldstrukturen: die zeitliche, räumliche, spektrale und dynamische Struktur. Daraus ergäben sich fünf Kategorien subjektiver Kriterien mit dazugehörigen objektiven Messgrößen (vgl. Tafel 9.1, Schmidt u. Reichardt, 1984, S. 1190). Die hier relevanten Kriterien sind Deutlichkeit, EDT, Schwerpunktzeit, Nachhallzeit, Klarheitsmaß, Stärkemaß und Abwandlungen des IACC, wobei die drei erstgenannten nur als Kriterien für Sprachdarbietungen erfasst werden. Letzterer wird in Form des 'Kurzzeit-Korrelationsfaktors' nach Keet (1968) und als 'maximaler Korrelationsgrad' nach Gottlob (1973) aufgeführt, dessen mathematische Definition identisch dem IACC ist. In Abhängigkeit von der Nutzungsfunktion geben die Autoren für einige der Schallfeldgrößen Richtwerte an. Tabelle 3.6 fasst diese zusammen, zusätzlich sind darin weitere Empfehlungen der Autoren vermerkt (Schmidt u. Reichardt, 1984, S. 1230 - 1231).

Tabelle 3.6: Raumakustische Parameter und Kenngrößen von Aufführungsräumen nach Schmidt u. Reichardt (1984) [63]

Verwendungszweck	**Volumen-kennzahl in m^3/Platz**	**Max. Volumen in m^3**	**D_{50}**	**C_{80} in dB**	**t_S in ms**
Sinfonische Musik	7 bis 10	25 000	-	> 0	100...150
Kammermusik	-	10 000	-	> 0	80 ...100
Oper, Operette	5 bis 8	15 000	> 0,5	> 0, +2	70 ...90
Orgelmusik, Oratorien	8 bis 12	30 000	-	> -3, > 0	120...180

[63] Die Autoren geben eine Klarheit C_{50} = 0 dB an, Umrechnung in die Deutlichkeit mittels $D_{50} = \frac{10^{\frac{C_{50}}{10}}}{10^{\frac{C_{50}}{10}}+1}$; Falls für das Maß C_{80} zwei Werte gegeben werden, bezieht sich der erste auf die mittleren und hinteren Plätze, der zweite auf die vorderen Plätze.

Die Autoren eines weiteren Abschnittes des Sammelbandes, Winkler und Reichardt, entnehmen Richtwerte für die Nachhallzeit dem erwähnten DDR-Standard. Der Toleranzbereich sei sehr breit. Für mittlere und hohe Frequenzen empfehlen Winkler und Reichardt eine frequenzunabhängige Nachhallzeit. Der Nachhallwert tiefer Frequenzen solle ab 250 Hz nach der Vorgabe der TGL-Norm ansteigen (Winkler u. Reichardt, 1984, S. 1263-1264), (Abb. 3.51).[64] Für Opernhäuser liefern die Autoren ein gesondertes Diagramm der volumenabhängigen optimalen Nachhallzeit (s. Abb. 3.52a). Für 10 000 m^3 sei ein Wert von etwa 1,4 s empfohlen, für 20 000 m^3 1,7 s, wobei mittels gestrichelter Linie im Diagramm auf ein ungünstiges Volumen hingewiesen wird (Winkler u. Reichardt, 1984, S. 1266). Der Frequenzgang der Nachhallzeit wird ebenfalls in Diagrammform gegeben (s. Abb. 3.52b). Demnach könne die Nachhallzeit von ihrem optimalen Wert um ±20% abweichen. Des Weiteren könne im Gegensatz zu Konzertsälen auch eine frequenzunabhängige Nachhallzeit angestrebt werden, ein Anstieg des Nachhallwertes bis auf etwa 140% bei 125 Hz unterhalb von 250 Hz sei auch möglich.

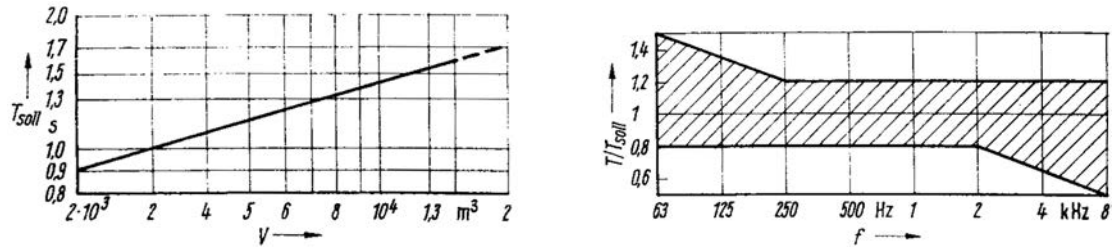


(a) (b)

Abbildung 3.51: (a) Anzustrebende mittlere Nachhallzeit und (b) Toleranzbereich und Frequenzgang der Nachhallzeit für Musikdarbeitungen nach TGL 10687/04 (1970), Schmidt u. Reichardt (1984)

Andos Publikation 'Concert Hall Acoustics' ist der Versuch ein System zu entwickeln, mit dem sich die Hörsamkeit von Konzertsälen an jedem einzelnen Platz bestimmen lässt. Hierzu arbeitet Ando den theoretischen Hintergrund auf und stellt die notwendigen raumakustischen Parameter auf. Diverse Experimente und Untersuchungen liegen den gesammelten Erkenntnissen zugrunde. Nach Y. Ando (1985) könne man die Schallsignale an beiden Ohren eines Zuhörers in einem Konzertsaal durch vier objektive Messgrößen be-

[64] Winkler u. Reichardt (1984) verweisen auf das Diagramm, dass sich im zuvor resümierten Abschnitt des Sammelbandes Schmidt u. Reichardt (1984) befindet.



(a) (b)

Abbildung 3.52: (a) Anzustrebende mittlere Nachhallzeit und (b) Toleranzbereich und Frequenzgang der Nachhallzeit von Operntheatern nach Winkler u. Reichardt (1984)

schreiben (Ando, 1985, S. 59):

- Lautstärke ('listening level')
- Verzögerung der frühen Reflexionen bzw. ITDG[65]
- Nachhallzeit ('subsequent reverberation times')
- IACC

Ando untersucht die subjektive Präferenz der Messgrößen in Paarvergleichen mittels simuliertem Schallfeld (computergestützt) und japanischen, koreanischen und deutschen Versuchspersonen (Ando, 1985, S. 3, 48). Die Wiedergabe erfolgt mehrkanalig über Lautsprecher im reflexionsarmen Raum (vgl. Fig. 4.14, Ando, 1985, S. 59 - 60). Insgesamt werden sechs veschiedene Stimuli benutzt, fünf Musikmotive und ein Sprachsignal. Bei der Auswertung werden allerdings zum Teil nur Motive der folgenden Komponisten berücksichtigt (siehe Table 2.1, Ando, 1985, S. 6): O. Gibbons, (Motiv A, 16./17. Jahrhundert, Barock), M. Arnold (Motiv B, 20. Jhdt., moderne Musik) und Mozart (Motiv E, Jupitersinfonie, Klassik). Um die Unabhängigkeit der ausgewählten Parameter untereinander und ihre präferierten Größenordnungen zu untersuchen, werden in drei Hörversuchsabschnitten jeweils zwei der Parameter konstant gehalten und die verbleibenden variiert (Ando, 1985, S. 59). Dabei ergeben sich für die Motive unterschiedliche bevorzugte Nachhallzeiten T_{sub}, siehe Tabelle 3.7 (S. 112) (vgl. Fig. 4.17, Ando, 1985, S. 64). Nach Ando sei die statistische Beschreibung der Quellsignale durch die Autokorrelationsfunktion (AKF) der Quellsignale gegeben und ihre effektive Dauer τ_e [66] ein signifikanter Faktor innerhalb der subjektiven Attribute (Ando, 1985, S. 4-8). Mit der Beziehung $[T_{sub}]_p \cong 23\tau_e$

[65] Das Initial Time-Delay Gap ist das Zeitintervall zwischen dem Direktschall und der ersten Reflexion.

[66] τ_e durch das Zeitintervall definiert, bis zu dem die Hüllkurve der mit ihrem Maximalwert bei $\tau = 0$ normalisierten AKF auf unter 0,1 sinkt. τ_e ist vom Tempo abhängig: Kompositionen mit langsamen Tempi weisen ein hohes τ_e auf (z. B.Gibbons, 127ms), schnelle Kompositionen ein kleines (z. B. Mozart, 38ms)

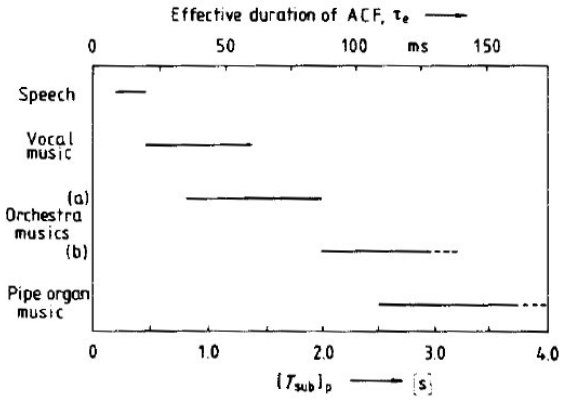


Abbildung 3.53: Bevorzugte Nachhallzeiten $[T_{sub}]_p$ und effektive Längen der Autokorrelationsfunktionen τ_e verschiedener Musikmotive nach Ando (1985)

könne somit die bevorzugte Nachhallzeit aus der der effektiven Dauer der AKF berechnet werden (s. Abb. 3.53), jene Werte sowie τ_e können Tabelle 3.7 ebenfalls entnommen werden (Table 2.1, Ando, 1985, S. 6). Des Weiteren gibt Ando auf Grundlage der Stimuli und

Tabelle 3.7: In Hörversuchen ermittelte und mit τ_e berechneten bevorzugten Nachhallzeiten nach Ando (1985)

Musikmotiv	τ_e **in ms**	$\mathbf{T_{sub}}$ **in s**	$\mathbf{[T_{sub}]_p}$ **in s**
Gibbons, A	127	2,6 s	2,92s
Arnold, B	43	1 s	0,87s
Mozart, E	38	0,9 s	0,99s

der Längen τ_e Schätzwerte der günstigen Nachhallzeit für verschiedene Musiktypen an. Ando unterscheidet vier Raumtypen. Durch die Unterschiede in orchestralen Werken zwischen bspw. Klassik (A) und Romantik (B) gebe es zwei Arten von 'concert hall designs' (Ando, 1985, S. 75 - 76) (vgl. mit Abb. 3.53):

- Opernsaal: 0,5s bis 1,4s
- Konzersaal Typ A: 0,7 bis 2,0s
- Konzersaal Typ B: 2 bis 3s
- Orgelmusik: mindestens 2,5

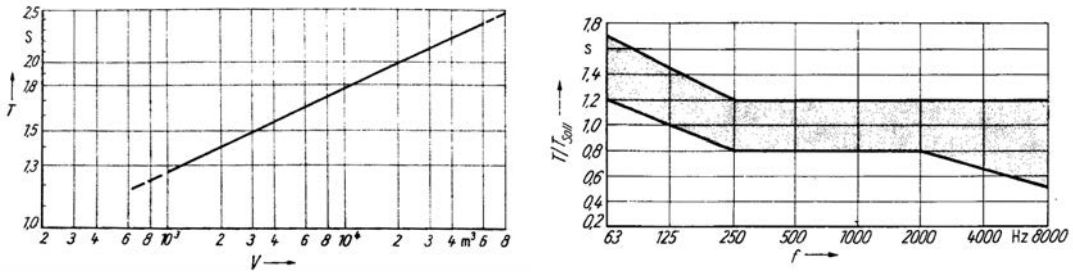
Die Nachhallzeit verschiedener Frequenzbereiche, so vermutet Ando, sei gemäß der oberhalb erläuterten Beziehung von der Autokorrelationsfunktion im entsprechenden Frequenzband des Quellsignals abhängig (Ando, 1985, S. 76 - 77). Zum IACC hält Ando

fest: „For a given constant listening level, the sound fields with a smaller IACC are always preferred.“ (Ando, 1985, S. 67). Die Werte des IACC wurden durch Verschiebung der Lautsprecher in der horizontalen Hörebene zwischen 0,4 und 1 bzw. 0,31 und 0,93 variiert (Ando, 1985, S. 65 - 68). So wurde bspw. für Motiv A ein IACC von 0,4 am höchsten bewertet (Fig. 4.20b, Fig. 4.21 Ando, 1985, S. 67, S. 68). Weiter solle der IACC für eine einzelne Quelle auf der Bühne unter 0,5 gehalten werden (Ando, 1985, S. 81). Auf die Auswertung der Verzögerungzeit der ersten Reflexionen wird hier wegen ihrer Irrelevanz im Rahmen der Arbeit nicht eingegangen. Gleiches gilt für den Parameter der Lautstärke, da sich von Andos Ergebnissen nicht auf günstige Werte des Stärkemaßes G schließen lässt.

Als knapper Überblick für Architekten ist die Publikation von Templeton u. Saunders (1987) zu werten. Auf die Nachhallzeit von Konzertsälen gehen die Autoren in kurzer Weise ein: die günstige Nachhallzeit liege zwischen 1,5 und 2,5 s, solle über den Frequenzverlauf nicht allzu stark variieren und im Bassbereich (250 Hz) um 50% gegenüber der Angabe für mittlere Frequenzen erhöht sein (Templeton u. Saunders, 1987, S. 133).

Fasold u. a. (1987) bezeichnen die Nachhallzeit als „Pauschalmaß für die raumakustische Qualität eines Saales“, da von ihrem Wert auf die Ausprägung anderer raumakustischer Aspekte, wie Deutlichkeit, Durchsichtigkeit, Halligkeit, Raumeindruck, Lautstärke und Klangfarbe geschlossen werden könne (Fasold u. a., 1987, S. 249). Ihr Optimalwert hinge vom Raumverwendungszweck ab. Hierzu zitieren die Autoren (wie schon in Fasold u. Winkler (1976)) den DDR-Standard TGL 10687/04, welcher in Form eines Diagramms für verschiedene Verwendungszwecke die Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Saalvolumen darstellt (s. Abb. 3.46, S. 103). Diese Abhängigkeit ergebe sich aus der Erwartungshaltung der Zuhörer: je größer der Raum, desto größer die erwartete Halligkeit. Auch weitere Vorgaben, welche die Autoren bereits in der 1976er Publikation angeben, führen sie hier auf, wie den Toleranzbereich der Nachhallzeit nach TGL 10687/04 und Näherungswerte der optimalen Nachhallzeit nach Meyer u. Neumann (1967), (Fasold u. a., 1987, S. 250-251).

Der Nachhallzeit von Konzertsälen wird ein weiterer Abschnitt gewidmet (Fasold u. a., 1987, S. 305-306). Die Autoren machen hier erneut Empfehlungen zu ihrem optimalen Wert und Verlauf über der Frequenz. Die anzustrebende Nachhallzeit ist in einem Diagramm dem Volumen des Konzertsaales gegenübergestellt, für ein typisches Volumen ergibt sich daraus ein Wert von 2,0 s. Die Nachhallkurve ist mit der Kurve der TGL



(a) (b)

Abbildung 3.54: Günstige mittlere Nachhallzeit und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Fasold u. a. (1987)

10687/04 (1981) identisch (s. Abb. 3.54).[67] Im Fließtext geben die Autoren einen günstigen Bereich von 1,7 bis 2,1 s an. Der Nachhallzeitverlauf über der Frequenz ist mit der Vorgabe des DDR-Standards identisch. Erwähnenswert ist die Feststellung der Verfasser einer Tendenz zu längeren Nachhallzeiten in den letzten Jahrzehnten. Zur Erzielung der optimalen Nachhallzeit sei ein Mindestvolumen des Saales einzuhalten. Dieses Mindestvolumen drücke sich in der Volumenkennzahl aus, für welche die Autoren die in Tabelle 3.8 ersichtlichen Richtwerte geben (Fasold u. a., 1987, S. 259). Darüber hinaus führen die

Tabelle 3.8: Volumenkennzahlen und maximale Volumen nach Fasold u. a. (1987)

Verwendung	**Volumenkennzahl in m^3/Platz**	**maximales Volumen in m^3**
Sinfonisches Konzert	8 bis 12	25 000
Oper, Operette	5 bis 8	15 000
Kammermusik	6 bis 10	10 000
Oratorien, Orgelmusik	10 bis 14	30 000

Autoren weitere raumakustische Kriterien auf, die sie in vier Kategorien einteilen (Fasold u. a., 1987, S. 254): (1) zeitliche und räumliche, (2) zeitliche, (3) dynamische und zuletzt (4) spektrale Schallfeldstruktur. Die erste Kategorie werde durch den Raumeindruck gebildet. Die Autoren führen hier unter anderem den 'maximalen Korrelationsgrad' (IACC) auf (Fasold u. a., 1987, S. 256). Die zweite Kategorie beinhalte unter anderem das Klarheitsmaß C_{80} und die Schwerpunktzeit t_S (Fasold u. a., 1987, S. 257). Das Klarheitsmaß sei zwischen 0 und + 4 dB optimal, die niedrigen Werte dieses Bereiches gelten für orchesterferne, die höheren für orchesternahe Plätze. Die Schwerpunktzeit habe ihren optimalen

[67] Da die Autoren in früheren Publikationen den DDR-Standard zitieren, lässt sich annehmen, dass die Nachhallkurve auf den TGL-Vorgaben basiert.

Bereich zwischen 100 und 150 ms. Das Stärkemaß ordne sich in die dritte Kategorie ein. Die Autoren führen die 'originale' Definition nach Lehmann (1976) auf, jedoch geben sie keine Richtwerte an (Fasold u. a., 1987, S. 258). Die vierte Kategorie Klangfarbe werde durch das Bassverhältnis nach Beranek mit optimalen Werten zwischen 1,2 und 1,3 gebildet (Fasold u. a., 1987, S. 258-259).

In einer zweiten Auflage seines raumakustischen und architektonischen Leitfadens empfiehlt Egan (1988) zur 1972er Erstauflage (vgl. mit Egan, 1972) identische Darbietungskategorien und darauf basierende günstige Nachhallzeiten. Einige Änderungen sind allerdings enthalten, welche sowohl die Art der Darbietung als auch den empfohlenen Bereich der Nachhallzeit betreffen. Romantische und klassische Musik fasst Egan nun mit einem günstigen Bereich zwischen 1,7 und 2,3 s zusammen. Aus der Kategorie 'Zeitgenössische Orchesterwerke, Solo- und Kammermusik' werden 'Zeitgenössische Orchesterwerke' gestrichen und die Angabe 'Barock' hinzugefügt. Eine weitere Abbildung zum

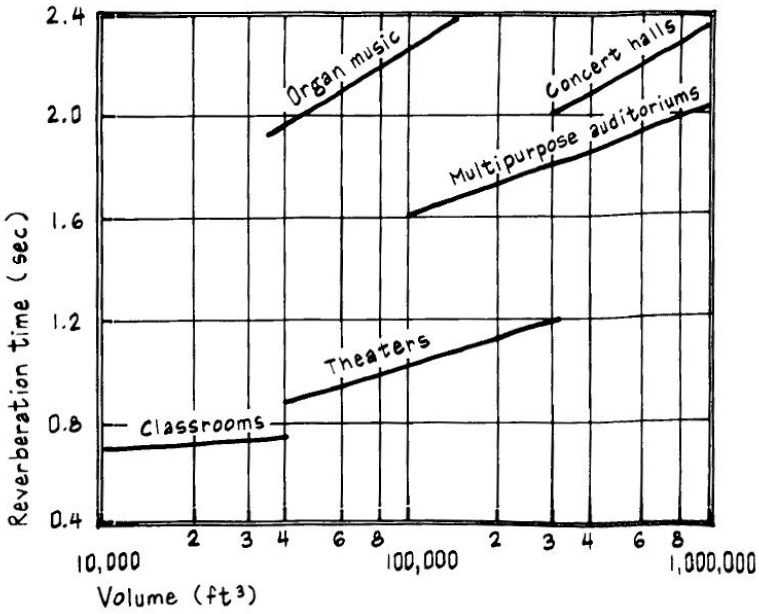


Abbildung 3.55: Optimale Nachhallzeiten verschiedener Raumverwendungszwecke nach Egan (1988)

Nachhallzeit-Optimum wird in dem Kapitel 'Room acoustics' derselben Publikation gegeben (Egan, 1988, S. 133). Diese unterscheidet sich von der ersten insofern, dass eine vom Raumvolumen abhängige Nachhallzeit gegeben wird. Egan verweist dazu auf Beranek, Cremer und Müller, Knudsen und Harris. Der Autor unterscheidet Mehrzweck-Auditorien, Orgelmusik und Konzertsäle. Räume für Orgelmusik haben demnach ihr optimales Volumen zwischen ca. 1 000 und 4 000 m^3 mit Nachhallzeiten zwischen 1,9 und

2,4 s[68]. Mehrzwecksäle hätten für ein Volumen von 20 000 m^3 eine optimale Nachhallzeit von knapp 2,0 s, Konzertsäle dagegen von 2,2 bis 2,3 s. Die Angaben zwischen beiden Diagrammen widersprechen sich. Der Autor bezieht in dieser Ausgabe auch das Bassverhältnis, die Nachhallzeit bei tiefen Frequenzen, in seine Überlegungen mit ein. Unterhalb von 500Hz solle diese um 10% pro Oktave steigen (Egan, 1988, S. 155), das Bassverhältnis sollte 1,2 betragen. Darüberhinaus empfiehlt Egan ein Volumen von 8,5 bis 12,7 m^3 pro Zuhörerplatz (Egan, 1988, S. 157).

Sein 1934er Kriterium zum Frequenzverlauf der Nachhallzeit besitzt für Rettinger (1988) 50 Jahre später immer noch Gültigkeit. Der günstige Nachhallzeitverlauf zu tiefen Frequenzen sei proportional zur Wahrnehmbarkeitsunterschiedschwelle der Frequenz oder der Intensität der entsprechenden Frequenz (Rettinger, 1988, S. 203). Dass die Nachhallzeit hoher Frequenzen dem gleichen Schema folgen solle, hat der Autor offenbar verworfen. Doch zitiert er weitere Empfehlungen der 1930er Jahre diesbezüglich und präsentiert den Verlauf der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen nach McNair (1930) und Knudsen (1932) in einem Diagramm. So liege die Nachhallzeit bei 125 Hz (63 Hz) zwischen dem 1- und 1,5-fachen (2,5-fachen) der mittleren Nachhallzeit (Rettinger, 1988, S. 201), (s. Abb. 3.56). Zur optimalen mittleren Nachhallzeit bemerkt der Autor, dies sei eine Frage des Geschmacks. Musiker bevorzugten längere Nachhallzeiten als Laien (Rettinger, 1988, S. 199). Dennoch gibt er jeweils eine mathematische Beziehung für die Berechnung der Nachhallzeit bei gegebenem Volumen für zu zwei Drittel besetzten Konzert- (3.21), Opern- (3.22) und Kammermusiksälen[69] (3.23) an (Rettinger, 1988, S. 200):

$$T_{Konzert} = 0,4 \log V + 0,22 \tag{3.21}$$

$$T_{Oper} = 0,3 \log V + 0,16 \tag{3.22}$$

$$T_{Kammermusik} = 0,22 \log V + 0,364 \tag{3.23}$$

Daraus ergeben sich für typische Volumen der drei Saalarten günstige Nachhallzeiten von 1,95 s, 1,35 s und 1,1 s in der oben genannten Reihenfolge (vgl. mit Abb. 3.57). Des Weiteren empfiehlt der Autor für Konzertsäle ein spezifisches Volumen von 9,2 m^3, für Opernhäuser eines von 7,1 m^3 pro Platz (Rettinger, 1988, S. 159).

[68] Das Diagramm endet bei 2,4 s, daher sind die Werte sicher nicht absolut zu nehmen.

[69] In der angegebenen Formel befindet sich ein Fehler. Eine Reproduktion der Kurve nach Abb. 3.57 kann mit $T = 0,22 \log \frac{V}{0,3048^3} - 0,1$ geschehen.

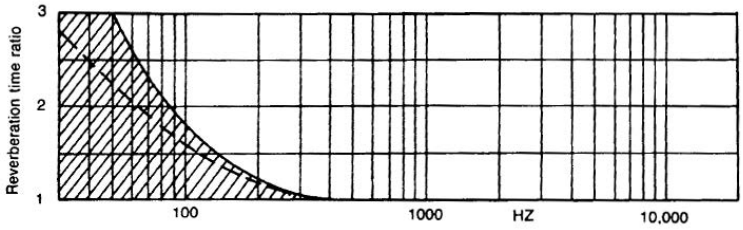


Abbildung 3.56: Günstiger Nachhallzeitverlauf über der Frequenz nach Rettinger (1988)

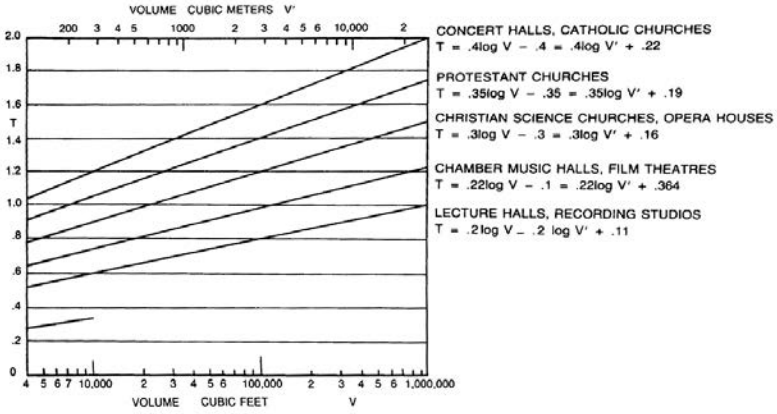


Abbildung 3.57: Günstige mittlere Nachhallzeit nach Rettinger (1988)

Nach den diversen Autoren der Publikation Fry (1988) variiere die optimale Nachhallzeit eines Konzertsaales zwischen 1,5 und 2 s in Abhängigkeit vom Stil der dargebotenen Musik (Fry, 1988, S. 94). Dass das Raumvolumen nach Meinung der Autoren ebenfalls Einfluss auf ihren Wert hat, wird aus einer Abbildung ersichtlich (vgl. Fry, 1988, S. 95). Für einen Konzertsaal des Volumens von 20 000 m^3 kann man dem Diagramm allerdings eine Spanne der günstigen Nachhallzeit von 1,8 bis 2,5 s entnehmen.[70] Für tiefe Frequenzen betrage diese das 1 bis 1,5-fache der Nachhalldauer bei 500 Hz. Eine Abweichung von 5 bis 10% von den empfohlenen Werten sei tolerabel.

M. Barron ist wie viele seiner Zeitgenossen der Meinung: „The appropriate reverberation time for an auditorium should be determined principally on the basis of programme [...]“ (Barron, 1993, S. 28), dass die günstige Nachhallzeit vom dargebotenem Programm abhänge. Diese sei immer noch als wertvolle Messgröße anzusehen, da sie über einen Raum

[70] Die Autoren beziehen sich wahrscheinlich auf ein Volumen von 10 000 m^3.

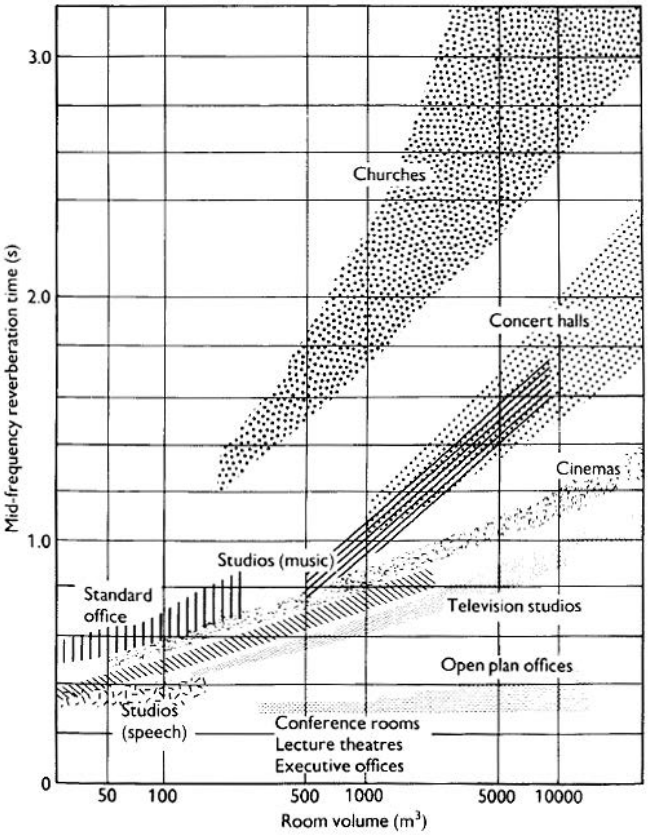


Abbildung 3.58: Günstige mittlere Nachhallzeit nach Fry (1988)

konstant sei. Barron macht Angaben zur günstigen Nachhallzeit folgender Programme[71] (vgl. Table 2.3, Barron, 1993, S. 29):

- Frühe klassische Musik: 1,6 bis 1,8 s
- Romantische klassische Musik: 1,8 bis 2,2 s
- Oper: 1,3 bis 1,8 s
- Kammermusik: 1,4 bis 1,7 s
- Orgelmusik: mindestens 2,5 s

Des Weiteren sei ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen (125 Hz) bis auf 50% ihres Einzahlwertes erwünscht (vgl. Fig. 2.20, Barron, 1993, S. 29), (vgl. Abb. 3.59), wo-

[71] Weitere Angaben zur günstigen Nachhallzeit verschiedener Programme finden sich im Kapitel über Mehrzwecksäle wieder. Barron nennt hier etwas abweichende Bereiche, aus dem Text und den Angaben wird nicht ersichtlich, dass es sich bei der Auflistung um Kompromisswerte handelt. Da die Angaben aber nur in dem Kapitel auftauchen und nicht, wie die hier zitierten, an verschiedenen Stellen der Publikation wiederholt werden, wird auf die entsprechende Tabelle nur verwiesen (Table 10.1, Barron, 1993, S. 340)

bei Barron einen Unterschied in der amerikanischen und europäischen Auffassung zum Bassverhältnis der Nachhallzeit sehe: „Americans considering that one cannot have to much bass, while some consultants in Europe have striven for a flat characteristic with music“ (Barron, 1993, S. 29). Die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Ohres mit in Betracht gezogen, stimmt Barron mit der 'amerikanischen Auffassung' überein. Zu Kam-

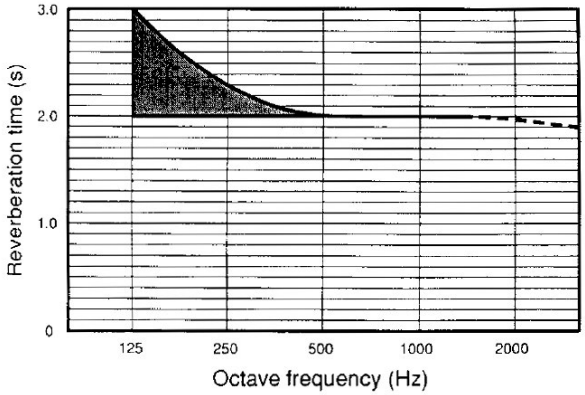


Abbildung 3.59: Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Barron (1993)

mermusiksälen bemerkt Barron in einem weiteren Kapitel, im Gegensatz zu den günstigen Nachhallzeiten von Sinfonie-Konzertsälen, welche vom Programm abhängig seien, gebe es bei Kammermusiksälen die Tradition, günstige Nachhallzeiten als Funktion des Raumvolumens zu definieren. Ohne eine eigene Empfehlung zu nennen, verweist er auf Cremer und Müller, deren Vorgaben durch einen günstigen Bereich auf der siebten Wurzel des Raumvolumens basierend gegeben seien (0,9 bis 2,2 s) (Barron, 1993, S. 196-197). Das Stärkemaß solle in Kammermusiksälen mindestens 4 dB aufweisen, in Rezitalsälen ('solo recital halls') 6 dB (Barron, 1993, S. 198). Dies seien aber nur grobe Richtwerte. Bezüglich Opernsäle decke die Empfehlung oberhalb das Repertoire von (z. B.) Mozart bis Wagner ab, wobei für erstere eher kürzere Nachhallzeiten in Frage kommen, für letztere bzw. die meisten spät-romantischen Opern sei eine längere Nachhallzeit am Ende des empfohlenen Bereiches angemessen (Barron, 1993, S. 307 - 308). Des Weiteren sorge ein geringerer Nachhallzeitanstieg im tiefen Frequenzbereich von maximal 20% bis 125 Hz für einen akzeptablen Kompriss zwischen Sprachverständlichkeit (Gesang) und musikalischen Anforderungen. Im Sinne des Gesanges solle die Nachhallzeit zwischen 2 und 4 kHz so lang wie möglich geplant werden. Barron diskutiert neben der Nachhallzeit die gebräuchlichsten objektiven Messgrößen EDT, Klarheit, Seitenschallgrad, Stärkemaß und Support (Barron, 1993, S. 42-43 und S. 56). Über den Verlauf der Publikation macht er einige vorläufige Angaben zu günstigen Bereichen dieser. Der Parameter Support ST1

scheine zwischen -13 bis -11 dB seinen optimalen Wert bezüglich der Aufführungsbedingungen der Musiker zu haben (Barron, 1993, S. 56). Diese Werte gehen aller Wahrscheinlichkeit nach auf Gade zurück, der als Autor dieses Abschnittes angegeben wird (Barron, 1993, S. 52). Ein typischer Wert für den frühen Seitenschallgrad LF sei 0,15. Vorläufige günstige Werte lägen zwischen 0,1 und 0,35 (Barron, 1993, S. 61). An gleicher Stelle und aus den selben Publikationen zitiert Barron auch vorläufige Werte der Kriterien EDT mit 1,8 bis 2,2s, C_{80} zwischen -2 bis +2 dB und G größer 0 dB. Die Annahme von Lehmann u. Wilkens (1980) eines günstigen Stärkemaßes von mindestens 3 dB lehnt Barron ab, da dies 60% der britischen Konzertsäle ausschließe.

Die englische Übersetzung einer Publikation von Leonid Makrinenko, die 1986 in Russland erschien, wird 1994 veröffentlicht. Makrinenko geht darin auf verschiedene raumakustische Parameter ein und nennt und zitiert optimale Bereiche dieser (Makrinenko, 1994, S. 37-43). Die Frühe Abklingzeit habe ihren optimalen Wert zwischen 1,7 und 2,3 s, was auch mit dem optimalen Bereich der Nachhallzeit übereinstimme. Beim Klarheitsmaß C_{80} unterscheide man zwischen vorderen und hinteren Reihen. Auf den vorderen Plätzen sei ein C_{80}-Wert zwischen -2 und +3 dB akzeptabel, zwischen 3 bis 8 dB optimal. In den hinteren Reihen sorge ein C_{80} von 5 bis 9 für akzeptable, eines von 0 bis 5 dB für opimale Klarheit. Damit zitiert Makrinenko Reichardt u. Lehmann (1981). Der optimale Bereich der Schwerpunktzeit liege zwischen 120 und 140 ms, was auf die Berliner Wissenschaftler Lehmann und Wilkens zurückgeht. Makrinenko bemerkt, die Größe Schwerpunktzeit müsse für die praktische Anwendung allerdings verbessert werden. Zudem müsse ihre Frequenzabhänigkeit ergründet werden (Makrinenko, 1994, S. 39). So scheint Makrinenko auch bezüglich der optimalen Nachhallzeit empfohlene Bereiche anderer Wissenschaftler heranzuziehen. Die optimale Nachhalldauer sei volumen- und musiktypabhängig und wird in Form eines Diagramms geschildert (Makrinenko, 1994, S. 115), (s. Abb. 3.60). Für typische Volumen ergeben sich in Abhängigkeit der musikalischen Darbietung folgende günstige Nachhallwerte und spezifische Volumen (Makrinenko, 1994, S. 122, S. 126):

- Sinfonische Musik: 1,9 s, 8 bis 10 m^3
- Oper: 1,7 s, 6 bis 7 m^3
- Kammermusik: 1,5 s, 6 bis 7 m^3
- Oratorium und Orgelmusik: 2,4 s, 10 bis 12 m^3

Darüber hinaus beeinflusse das Repertoire die optimale Nachhallzeit. Barockmusik benötige eine kürzere Nachhallzeit, romantische eine längere. Bei tiefen Frequenzen empfiehlt

Makrinenko einen Anstieg der Nachhallzeit um den Faktor 1,2 bei 125 Hz sowohl für Konzert- als auch für Opernsäle.

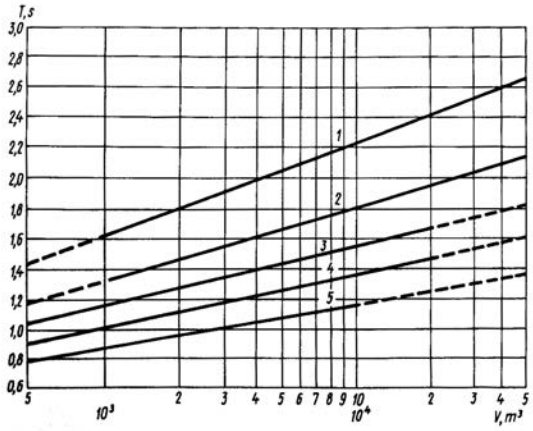


Abbildung 3.60: Optimale Nachhallzeiten für Oratorium und Orgelmusik (1), sinfonische Musik (2), Kammermusik und Oper (3) nach Makrinenko (1994)

Leo L. Beranek versucht 1996 erneut die raumakustischen Bedingungen von Konzertsälen und Opernhäusern auf einer Skala mit einem Einzahlwert zu bewerten. Grundlage bilden Interviews mit Musikern, Dirigenten, Musikkritikern und Ingenieuren, aus jenen Beranek eine Einteilung in Kategorien von C ('fair') bis A+ ('Superior') vornimmt. Nach einer Konsultation diverser Studien der vergangenen drei Jahrzehnte wählt er eine Anzahl von objektiven Schallfeldgrößen aus, legt optimale Bereiche dieser fest und vergibt anhand von Messwerten Punktzahlen, die in die Gesamtbewertung einfließen. Die 'statistisch unabhängigen akustischen Attribute' und ihre prozentualen Beiträge zum Gesamturteil sind die folgenden (Beranek, 1996, S. 515):

- Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient $IACC_{E3}$, 25%
- Frühe Abklingzeit EDT, 25%
- Surface Diffusity Index SDI, 15%
- Stärkemaß G_{mid}, 15%
- Initial Time Delay Gap[72] t_I, 10%
- Bassverhältnis BR, 10%

Irrelevante Parameter außer Acht gelassen, werden nun die zahlreichen Empfehlungen Beraneks resümiert. Diese leitet er aus den Interviews und Messwerten ab. Zur optimalen Nachhallzeit von Konzertsälen diskutiert Beranek: „The optimum RT for a hall [...]

[72] Das Zeitintervall zwischen dem Direktschall und der ersten Reflexion am Zuhörerplatz.

should probably be in the range of 1.8 to 2.0 sec.“ (Beranek, 1996, S. 426). Dieser Bereich entspreche auch der Meinung der befragten Experten zum ’durchschnittlichen symphonischen Repertoire’, während Musik des Barocks oder der Klassik in ihren Augen eher kürzere Nachhallzeiten zwischen etwa 1,6 und 1,8 s erfordere (Beranek, 1996, S. 424). Weiter nennt Beranek an gleicher Stelle einen optimalen Bereich der EDT als ’Surrogat’ der günstigen Nachhallzeit (zwischen 1,8 bis 2,0 s) von 2,0 bis 2,3 s. Da die EDT eine geringere Abhängigkeit gegenüber dem Besetzungszustand zeige, die Messwerte weniger streuen und ähnlich bewertete Säle ähnliche EDT-Messwerte aufweisen, werde dieses Maß der Nachhallzeit in der Gesamtbewertung vorgezogen (Beranek, 1996, S. 508-509). Für Opernsäle leitet Beranek eine Nachhallzeit-Empfehlung von 1,3 bis 1,5 s ab, mit einem optimalen Wert bei 1,4 s (Beranek, 1996, S. 427 und S. 534). Den Frequenzverlauf der Nachhallzeit behandelt Beranek unter den Stichworten Brillianz und Wärme, welche er an Verhältnissen der Nachhallzeit der hohen bzw. tiefen Frequenzen zu den mittleren Frequenzen misst. Die EDT wird auch hierzu als zweites objektives Maß der Halligkeit verwendet. Zusammengefasst empfiehlt Beranek für hohe Frequenzen bei 2 kHz bzw. 4 kHz das 0,93- bzw. 0,84-fache der mittleren Nachhallzeit nicht zu unterschreiten (Beranek, 1996, S. 427). Für die frühe Abklingzeit gelte ein unterer Faktor von 0,9 bzw. 0,72 für die genannten Frequenzbänder. Für hohe Frequenzen empfiehlt der Autor ein Bassverhältnis von 1,1 bis 1,25[73], bei einer Nachhallzeit von 1,8s oder weniger ein Verhältnis zwischen 1,1 und 1,45. Aufgrund der eingeschränkten Messgenauigkeit bei tiefen Frequenzen, seien die Werte jedoch unsicher (Beranek, 1996, S. 513). Bezüglich der Lautheit hält Beranek fest, einige Konzertsäle würden durch die Befragten bei großen Orchesterbesetzungen als zu laut empfunden. Das Stärkemaß dieser Säle liege zwischen 6 und 8 dB. Beraneks Empfehlung für das optimale Stärkemaß bei mittleren Frequenzen beträgt 4 bis 5,5 dB[74] (Beranek, 1996, S. 446), der bevorzugte Wert sei G_{mid} = 5dB (Beranek, 1996, S. 513). Der interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient (IACC) beschreibe am besten den subjektiven Raumeindruck der scheinbaren Quellenbreite (ASW) (Beranek, 1996, S. 36). Weiter sei der IACC „[...] one of the most significant physical attributes for judging the acoustical quality of occupied halls.“ (Beranek, 1996, S. 474). Beranek wertet diesen in verschiedenen Zeitbereichen und Frequenzbändern der Impulsantwort aus. Vorangegangenen Untersuchungen entnimmt er die maßgeblichen Frequenzbänder mit Mittenfre-

[73] Beranek definiert das Bassverhältnis zu $BR = \frac{T_{125Hz}+T_{250Hz}}{T_{500Hz}+T_{1000Hz}}$.

[74] Es gebe Unterschiede in der Kalibrierung des zur Messung verwendeten Dodekaeders zwischen japanischen Forscherteams (Takenaka) und Wissenschaftlern westlicher Länder. Der genannte Bereich sei ein Kompromiss zwischen beiden. Der äquivalente Bereich mit ’kanadischer und europäischer Kalibrierung’ liege zwischen 3,5 bis 5 dB, bei ’japanischer’ Kalibrierung zwischen 4,5 bis 6 dB.

quenzen bei 500, 1 000 und 2 000 Hz (Beranek, 1996, S. 466-469). Der Autor unterscheidet zwischen frühen Reflexionen ('early', 0 bis 80 ms), spätem Nachhall ('late', ab 80 ms) oder bezieht die gesamte Impulsantwort ('all') mit ein. Die Kennzeichnung des IACC erfolgt bspw. durch $IACC_{E3}$[75] (Beranek, 1996, S. 464). Den (zusammengefassten) Kategorien der Konzertsäle lassen sich, so Beranek, eindeutig Messwertbereiche des $IACC_{E3}$ zuordnen, die sich gegenseitig nicht überlappen. In den besten Kategorien A+ und A betrage der Mittelwert des $IACC_{E3}$ 0,34 (0,29 - 0,38), in Kategorie B+ 0,44 (0,39 - 0,54) und in den unteren Kategorien von B bis C betrage dieser 0,58 (0,56 - 0,59) (vgl. Fig. 11.1 und Table 11.2, Beranek, 1996, S. 468)[76]. Einen bevorzugten Wert des $IACC_{E3}$ gebe es nicht, doch solle der Wert von 0,3 erreicht werden. Höhere Werte ergäben schlechtere Bewertungen (Beranek, 1996, S. 511). Nicht ganz so scharf sei diese Trennung für den Parameter 'lateral energy fraction' LF nach Barron[77], welcher sich daher nicht für eine Skaleneinordung anhand der Expertenurteile eigne (Beranek, 1996, S. 469-471). Beranek untersucht den $IACC_{L3}$ als Maß der Zuhörereinhüllung (LEV), kann aber keine Messwerteinteilung vornehmen, wie zuvor für den $IACC_{E3}$, da sich die Werte zwischen den Kategorien nicht signifikant unterscheiden (Beranek, 1996, S. 472-473). Die Klarheit C_{80} bezieht Beranek ebenfalls in seine Betrachtungen mit ein. Es wird als $C_{80}(3)$ bezeichnet, was eine Mittelung über die Frequenzbänder 500, 1 000 und 2 000 Hz andeutet. Quantitäten der Messgröße zwischen -4 und -1dB werden in einer Konzertsituation höheren Werten von 1 bis 5dB, die eher in einer Probensituation erwünscht seien, vorgezogen (Beranek, 1996, S. 478). An anderer Stelle leitet Beranek aus den Messwerten der mit A+ bewerteten Konzertsäle ab, dass Werte zwischen -4 und 0dB erzielt, Werte über 1dB dagegen vermieden werden sollten (Beranek, 1996, S. 555). Da die Werte jedoch breit über die Kategorien streuen, eigne sich $C_{80}(3)$ nicht für Beraneks Zwecke der Qualitätsbeurteilung (Beranek, 1996, S. 480-481).

Templeton (1997) geht auf einige hier relevante Kriterien ein. Er empfiehlt ein optimales Volumen pro Sitzplatz, wobei er zwischen verschiedenen Raumtypen unterscheidet (Templeton, 1997, S. 58):

- Konzertsaal: 8 bis 12, Optimum: $10m^3$/Platz
- Opernsaal: 4 bis 6, Optimum: $5m^3$/Platz

[75] E für early, L für late, A für all; 3 für die Mittelung über die Frequenzbänder 500, 1 000 und 2 000Hz.

[76] Der Leser wird darauf hingewiesen, dass Beranek die Form (1-IACC) benutzt.

[77] LF_{E4}: Beranek mittelt über die vier Oktavfrequenzbänder zwischen 250 und 2 000 Hz.

Günstige Nachhallzeitbereiche nach Templeton können Tabelle 3.9 entnommen werden (Templeton, 1997, S. 67). In einem weiteren Diagramm präsentiert der Autor günstige Nachhallzeiten als Funktion des Raumvolumens, welche auf die 'Sound Research Laboratories, Colchester Essex' (SRL) zurückgehen (Templeton, 1997, S. 68), (s. Abb. 3.61). Templeton behandelt auch die frühe Abklingzeit, welche nicht mehr als 10% von der

Tabelle 3.9: Empfohlene Nachhallzeiten nach Templeton (1997) und den 'Sound Research Laboratories' (SRL)

Musikstil	**Nachhallzeit nach Templeton**	**Nachhallzeit nach SRL**
Orchestrale Musik	1,7 bis 2,2 s	1,7 bis 2,5 s
Oper	1,0 bis 1,6 s	-
Kammer- und Solomusik	1,2 bis 1,7 s	1,2 bis 1,4 s
Orgelmusik und Chor	2,0 bis 5,0 s	> 3,0 s[78]

Nachhallzeit abweichen solle. Für Konzertsäle sei ein Bereich von 1,8 bis 2,3 s günstig (Templeton, 1997, S. 63). Des Weiteren liegen übliche Maximalwerte des Parameters 'early lateral energy fraction' bei 0,3 (Templeton, 1997, S. 64), wobei der Autor keine mathematische Definition des Parameters angibt. Templetons Ausführungen schließen auch die Maße C_{50}, C_{80} und D_{50} mit ein. „Good auditoria will have higher D50 values." (Templeton, 1997, S. 64). Es lässt sich nur vermuten, dass der Autor dies auf einen sprachlichen Darbietungsschwerpunkt bezieht. Ein Positiver C_{80}-Wert sei allerdings für klassische Musik angemessen. Romantische Musik und chorale Werke benötigen mehr Halligkeit und so lässt sich annehmen, dass Templeton hierfür negative C_{80}-Werte andeutet.

Fasold u. Veres (1998) bringen dem Architekten und Bauingenieur umfangreiche und praxisnahe Informationen zur Bau- und Raumakustik näher. Die Autoren erläutern verschiedene Kriterien für Musik und Sprachdarbietungen. Folgende optimale Bereiche der hier relevanten Kriterien werden genannt (Fasold u. Veres, 1998, S. 136,):

- Nachhallzeit: ca. 2s
- EDT: ca. 2,2s
- Schwerpunktzeit t_S: 100 bis 150ms[79]
- Klarheitsmaß C_{80}: -1 bis 3 dB

[79]Die Werte sind *wahrscheinlich* der Dissertation von Abdel Alim, 1973 entnommen

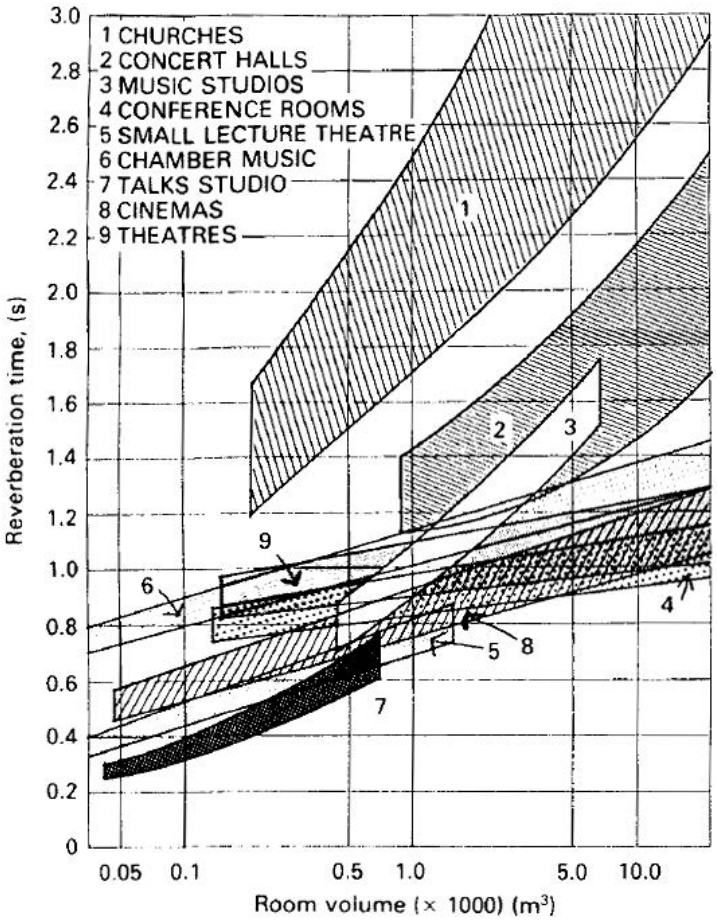


Abbildung 3.61: Optimale mittlere Nachhallzeiten nach Templeton (1997)

- Seitenschallgrad bzw. Seitenschallmaß LF: 25 bis 40% bzw. -4 bis -6 dB[80]
- Stärkemaß G: 1 bis 10 dB

Der Deutlichkeitsgrad nach Thiele wird ebenfalls behandelt. Ein optimaler Wert wird aber nur für Sprachdarbietungen gegeben. Die Nachhallzeitangabe von 2s sei ein 'Näherungswert für sinfonische Musik'. Die günstigen Nachhallzeiten verschiedener Musikstile „[...] entsprechen weitgehend denen jener Räume, in welchen die Kompositionen zu ihrer Entstehungszeit aufgeführt worden sind." (Fasold u. Veres, 1998, S. 137,). Für Orgelmusik liege der optimale Wert über, für Kammermusik unter 2s. Diese Werte können auch einem Diagramm entnommen werden (vgl. Bild 4.54, Fasold u. Veres, 1998, S. 139), in der die

[80] Das Seitenschallmaß ist der zehnte dekadische Logarithmus des Seitenschallgrades. In der zitierten Tabelle wird für den Seitenschallgrad die Angabe -4 bis -7 dB gemacht. Dabei handelt es sich möglicherweise um einen Druckfehler, da zum einen der Wert von -7 dB mit einem Seitenschallgrad von 20% korrespondiert, zum anderen geben die Autoren im Fließtext den optimalen Bereich zwischen -4 und -6 dB an (Fasold u. Veres, 1998, S. 152).

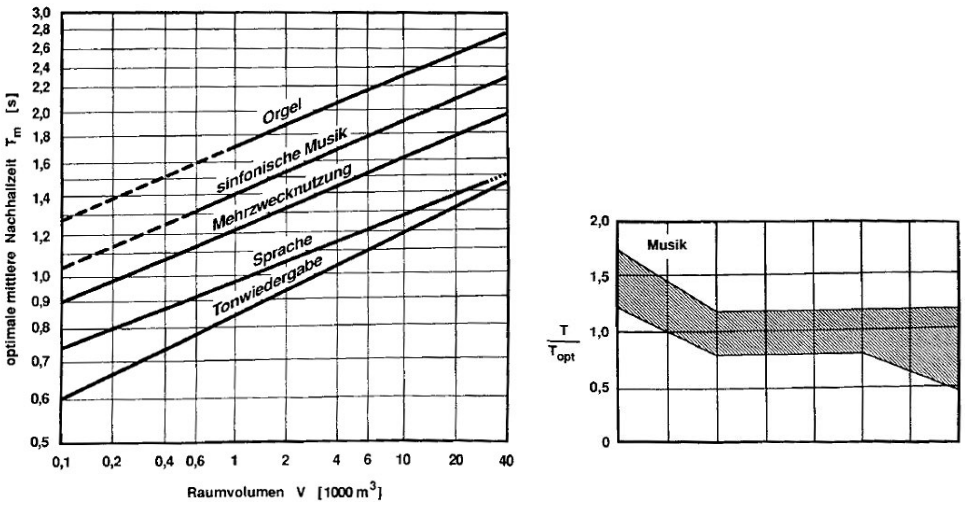
günstige Nachhallzeit verschiedener Raumnutzungszwecke als Funktion des Raumvolumens dargestellt ist (Abb. 3.62a). Für Kammermusik gelte die Kurve für 'Mehrzwecknutzung'. Die mittleren Nachhallzeiten für typische Raumvolumen sind in der Tabelle 3.10 vermerkt. In einem weiteren Abschnitt zu Kammermusiksälen nennen die Autoren noch-

Tabelle 3.10: Empfohlene mittlere Nachhallzeiten, spezifische Volumen und maximale Raumvolumen nach Fasold u. Veres (1998)

Musikstil	**Mittlere Nachhallzeit**	**Raumvolumen pro Platz**	**Max. Raumvolumen**
Sinfonische Musik	2,1 s	8 bis 12 m^3	25 000 m^3
Oper	1,2 bis 1,6 s	5 bis 8 m^3	15 000 m^3
Kammermusik	1,6 s	6 bis 10 m^3	10 000 m^3
Orgelmusik	2,5 s	10 bis 14 m^3	30 000 m^3

mals empfohlene Eckdaten für diese (Fasold u. Veres, 1998, S. 206). Es sei eine größere Durchsichtigkeit erwünscht als bei sinfonischen Konzerten, was sich in einem Klarheitsmaß von 2 bis 3 dB äußert. Weiter solle ein niedrigerer Raumeindruck angestrebt werden, der Seitenschallgrad liege zwischen 25 und 30% (-6 bis -5,2 dB). Des Weiteren geben Fasold und Veres einen optimalen Bereich des Nachhallzeitfrequenzgangs an (vgl. Bild 4.55, Fasold u. Veres, 1998, S. 139) (Abb. 3.62b). Unterhalb 250Hz steige die Nachhalldauer bis 125 Hz um das ca. 1,3- bis 1,5-fache ihren mittleren Wertes, oberhalb von 2 kHz sei ein Abfall möglich. Für Opernhäuser empfehlen die Autoren einen geringen Anstieg zu tiefen Frequenzen hin (Fasold u. Veres, 1998, S. 194). Weiter wird aus der Abbildung deutlich, dass eine Variation der Nachhallzeit von 20% zu höheren oder niedrigeren Werten tolerierbar sei. Für die Erreichung der optimalen Nachhallzeit sei durch die Schallabsorption des Publikums die Einhaltung eines Mindestvolumens pro Zuhörerplatz nötig. Abhängig vom Musikstil ergeben sich der Tabelle 3.10 entnehmbare zulässige Bereiche der Volumenkennzahl und maximale Volumen(vgl. Tabelle 4.19, Fasold u. Veres, 1998, S. 142). Erwähnenswert ist, dass die Publikation im Literaturverzeichnis der Norm DIN 18041 (2004, S. 39) enthalten ist.

Der Sammelband von Cavanaugh u. Wilkes (1999) greift eine Abbildung auf, der sich schon Egan (1972) bedient um die optimale Nachhallzeit zu beschreiben (vgl. Marshall u. Klapper, 1999, S. 156). Entwickelt sei diese von Russel Johnson, vermutlich im Rahmen seines Arbeitsverhältnisses mit 'Bolt, Beranek and Newman, Inc.'. Die Empfehlungen wurden bereits an anderer Stelle genannt und der Leser sei auf den entsprechenden Ab-



(a) (b)

Abbildung 3.62: (a) Optimale mittlere Nachhallzeiten diverser Verwendungszwecke und (b) Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Fasold u. Veres (1998)

schnitt zur Publikation Egan (1972) verwiesen. Es kann aber festgehalten werden, dass Marshall und Klepper mit dem Verweis auf Empfehlungen anderer eine volumenunabhängige sich nach Art der Darbietung richtende Nachhallzeit propagieren. Die Autoren erläutern subjektive Aspekte und weitere Standard-Messgrößen, äußern aber keine konkreten Empfehlungen. Eine weitere Abbildung gibt eine Skala des Klarheitsmaßes wieder. Demnach gelte für Orgelmusik ein günstiges Klarheitsmaß von ca. -9 bis -6dB, für sinfonische Musik und Opernmusik liege die optimale Klarheit zwischen -2 und +5dB, wobei man die Abbildung auch dementsprechend interpretieren könnte, dass Opernaufführungen eine höhere Klarheit benötigten, als sinfonische Werke (vgl. Marshall u. Klapper, 1999, S. 159). Dies bestätigen die Autoren im weiteren Verlauf des Kapitels (Marshall u. Klapper, 1999, S. 168).

Ein weiteres Kapitel der Publikation befasst sich mit den Ergebnissen der raumakustischen Forschung der letzten Jahrzehnte. Die Raumimpulsantwort und daraus abgeleitete Parameter werden detailliert beschrieben, wichtige Untersuchungen und ihre Empfehlungen werden zusammengefasst. Demnach sei die Lautstärke bzw. Lautheit die möglicherweise wichtigste akustische Qualität, welche weiter alle anderen Qualitäten in ihrer Ausprägung und Wahrnehmbarkeit beeinflusse (Siebein u. Kinzey, 1999, S. 244). Eine auf 110 bis 150% des 500 Hz-Wertes ansteigende Nachhallzeit für Frequenzen unterhalb von 500 Hz sei nach diversen Autoren empfehlenswert (Siebein u. Kinzey, 1999, S. 238) (s. Abb. 3.63). Aus einer Tabelle geht hervor, dass die Parameter LF kleiner 0,4

und IACC kleiner 0,5 sein sollten, um die korrespondierenden subjektiven Empfindungen in ihrer gewünschten Stärke oder Art zu erreichen (Siebein u. Kinzey, 1999, S. 264). Aus beiden Kapiteln wird deutlich, dass die Nachhallzeit nicht mehr als wichtigstes bzw. einzig erfassbares Kriterium gilt. Vielmehr habe diese ihre Bedeutung (teilweise) zugunsten mehrerer mit subjektiven Aspekten zusammenhängenden Messgrößen eingebüßt, obwohl sie aus musikalischer und kompositorischer Sicht dennoch einen wichtigen Eckpfeiler einnimmt. Des Weiteren hänge ihr optimaler Wert nicht mehr unmittelbar vom Raumvolumen ab, sondern vom musikalischen Stil des Dargebotenen. Es kommt zum Ausdruck, dass die Richtung, Stärke und Zeitabfolge der frühen Reflexionen eines Impulsdiagramms von Relevanz seien und dass Klarheit, Definition und Transparenz des Schallfeldes einen hohen Stellenwert einnehmen.

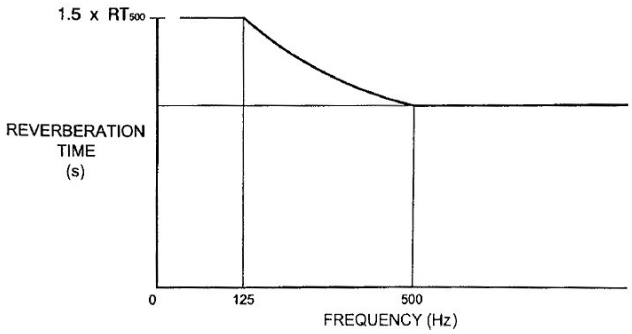


Abbildung 3.63: Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Siebein u. Kinzey (1999)

James Cowan geht in seinem 'design guide' in knapper Weise auf die Nachhallzeit ein: „The optimum midfrequency RT_{60} for a fully occupied room is different for various types of music.“ (Cowan, 2000, S. 30). Da das heutige orchestrale Repertoire späte klassische, sowie romantische Musik hervorhebe, gebe man die mittlere Nachhallzeit für Konzertsäle mit 1,8 bis 2,0s an. Für Opernhäuser gelten Werte zwischen 1,4 bis 1,6 s (Cowan, 2000, S. 31). Die Nachhallzeit steige ab 500 Hz zu tiefen Frequenzen um 10% pro Oktave, sinke ab 1 kHz pro Frequenzverdopplung um den gleichen Wert. Bei 125 Hz entspricht dies einem Faktor von ungefähr 1,2 des 500 Hz-Wertes. Cowan gibt Nachhallzeitbeispiele für Aufführungssäle, in denen unterschiedliche Musikstile zu Aufführung kommen. So soll bspw. der Kompromiss zwischen zeitgenössischer und klassischer Musik zwischen 1,6 und 1,8 s liegen (Cowan, 2000, S. 54). Für zeitgenössische Musik lautet Cowans Empfehlung 1,3 bis 1,6 s.

Kuttruff beschreibt in der 2000 erscheinenden vierten Auflage von „Room Acoustics“ mit der Deutlichkeit, der Klarheit, der Schwerpunktzeit, dem Stärkemaß, den Seitenschall-

graden LF und LG, dem IACC und der Nachhallzeit fast alle durch den Standard ISO 3382-1 definierten raumakustischen Kriterien. Dennoch gibt Kuttruff nur Empfehlungen zur Nachhallzeit. Die optimale Nachhallzeit für Konzertsäle liege zwischen 1,6 und 2,1 s (Kuttruff, 2000, S. 215-217). Für Solo- und Kammermusik sei eine kleinere Nachhalldauer von 1,4 bis 1,6 s empfohlen. Ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen ab 500 Hz sei allgemeiner Konsens, obwohl es auch Beispiele von Konzertsälen gebe, die keinen Anstieg oder sogar einen Abfall der Nachhallzeit in diesem Frequenzbereich aufwiesen und dennoch als akustisch exzellent gelten würden (Kuttruff, 2000, S. 217). Bezüglich weiterer Kriterien zitiert Kuttruff Untersuchungsergebnisse verschiedener Wissenschaftler.

Kinsler u. a. (2000)[81] gehen einer Publikation über die Grundlagen der Akustik auf die Nachhallzeit ein. Sie geben ein geeignetes Verhältnis zwischen Direkt- und Nachhallschall an und entwickeln schließlich die Formel $T = RV^{\frac{1}{3}}$ für die Berechnung der günstigen Nachhallzeit. R stellt dabei eine Konstante dar, die durch die Darbietung variiert werde. Für Konzertsäle betrage diese $0{,}07 \pm 10\%$, für Opernhäuser $0{,}06 \pm 10\%$ (Einheit s/m) bei zulässigen maximalen Volumen von 25 000 m^3 für erstere und 20 000 m^3 für letztere. Diese Beziehung führt bei typischen Volumen beider Saalarten zu empfohlenen Nachhallzeiten von 1,7 bis 2,1 s bzw. 1,45 bis 1,8 s. Weitere Empfehlungen geben die Autoren im Text. So seien für klassische und barocke Musik Nachhallzeiten zwischen 1,0 und 1,4 s günstig, für Musik des 19. Jhdt. (Romantik) hingegen von etwa 2,0 s (Kinsler u. a., 2000, S. 343-345). Des Weiteren empfehlen Kinsley u. a. einen Anstieg der Nachhallzeit unterhalb von 500 Hz bis zu einem Faktor 1,5 bei 125 Hz (s. Abb. 3.64). Oberhalb von 500 Hz deutet das Diagramm, aus dem dies ersichtlich wird, einen Abfall der Nachhallzeit bis zu dem etwa 0,8-fachen bei 4 000 Hz an. Hierzu bemerken die Autoren, dass das Optimum des Nachhallzeitverlaufs für Musik des Barocks sich eher in Richtung einer frequenzunabhängigen Nachhallzeit orientiere (Kinsler u. a., 2000, S. 345-347).

Christopher N. Brooks schreibt in seiner 2003er Publikation: „A concert hall may have a reverberation time in the 2-second range.“ (Brooks, 2003, S. 21). Der Autor, selbst Musiker und akustischer Berater, erläutert die Akustik von Konzertsälen und anderen Räumen auf einfache, verständliche Art. Bezug auf physikalische Schallfeldmessgrößen stellen die Ausnahme dar, andere hier relevante Maße außer der Nachhallzeit werden nicht behandelt.

[81] Eine weitere Auflage von 1982 ist identisch mit der vorliegenden.

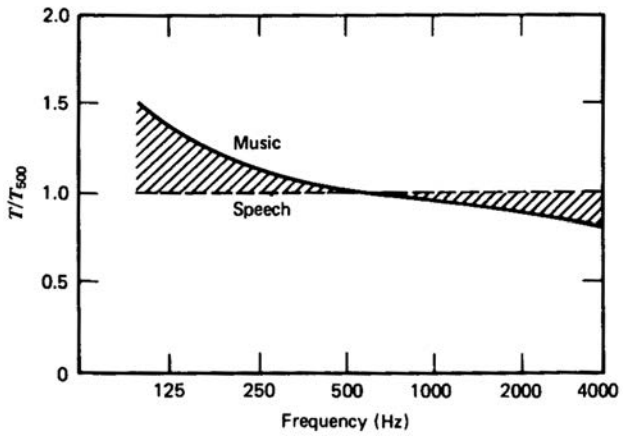


Abbildung 3.64: Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Kinsler u. a. (2000)

2004 erscheint die zweite Auflage von Leo L. Beraneks Monographie „Concert and Opera Halls: how they sound“. Unter anderem überarbeitet der Autor darin seine Empfehlungen raumakustischer Parameter. Auf Beraneks Versuche, die raumakustischen Bedingungen unter Berücksichtigung voneinander unabhängiger Messgrößen mit einem Einzahlwert zu bewerten, wurde schon in den entsprechenden Abschnitten zu Beranek (1962) und Beranek (1996) eingegangen. Dies soll hier nicht erneut geschehen. Vielmehr sind die Empfehlungen interessant, sofern sie sich von den bisherigen unterscheiden. Tabelle 3.11 gibt diese wieder (Beranek, 2004, S. 536). Beranek unterscheidet demnach drei Kate-

Tabelle 3.11: Empfehlungen raumakustischer Parameter nach (Beranek, 2004, S. 536)

Raumart	**T in s**	**EDT in s**	**IACC**	**G in dB**	**C_{80} in dB**	**ST1 in dB**
Sinfonisches Rep.	1,8 - 2,1	2,2 - 2,6	0,29 - 0,35	1,5 - 5,5	-3 - 0	> -14
Kammermusik	1,6 - 1,8	1,9 - 2,3	0,24 - 0,3	9 - 13	-2 - 2	> -12
Oper	1,4 - 1,6	1,5 - 1,9	0,29 - 0,4	-1 - 2	1 - 3	k. A.

gorien von Aufführungsräumen. Die erste Auflage unterschied nur sinfonische Konzerte und Opern, wobei zum Großteil nur für erstere Richtwerte der Kriterien genannt wurden. Der vorliegenden zweiten Auflage sind nicht nur Kriterien hinzugefügt, sie nennt des Weiteren Richtwerte für Opern- und Kammermusiksäle. Die empfohlenen Werte der Klarheit beziehen sich auf eine Mittelung der Oktavbänder zwischen 500 und 2 000 Hz. Die Werte der EDT gelten für unbesetzte Säle, die der Nachhallzeit dagegen für den besetzten Saalzustand. Den IACC behandelt Beranek in der Form (1-$IACC_{E3}$) als ’Binaural Quality Index’ (BQI), wobei ’E’ für das Zeitintervall von 0 bis 80ms und ’3’ für eine Mit-

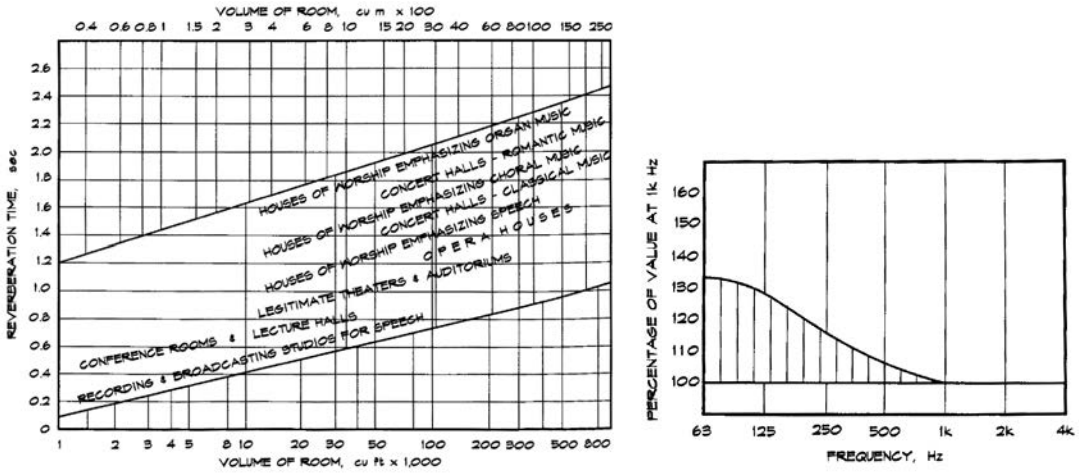
telung der Oktavfrequenzbänder zwischen 500 und 2 000 Hz stehen (Beranek, 2004, S. 578). $IACC_{L3}$-Werte ('L' für 'late', ab 80ms) streuten nicht stark über verschiedene Konzertsäle, die Werte liegen in etwa zwischen 0,1 und 0,2. Es wurde vermutet, dass diese Form des Kreuzkorrelationskoeffizienten ein Maß für die Zuhörereinhüllung sei. Beranek schließt aus den Messwerten, dass die Messgröße diesbezüglich wenig Aussagekraft habe (Beranek, 2004, S. 524-526). Einige zusätzliche Angaben werden von Beranek an anderer Stelle gemacht und durch die Tabelle nicht erfasst. So liege der 'erstrebenswerte' Bereich des Parameters ST1 zwischen -14,4 und -12 dB (Beranek, 2004, S. 539). Der frühe Seitenschallgrad LF sei ein Maß für die Empfindung der scheinbaren Quellenbreite. Beranek mittelt den Parameter in zweifacher Weise: über die Oktavbänder zwischen 250 bis 1 000 Hz und 500 bis 2 000 Hz. Der Unterschied sei aber nicht nennenswert. Beim Vergleich der Messwerte mit den Gütekategorien zeige sich, dass der LF zwar prinzipiell exzellente von schlechten Säle trenne, aber zwischen den Kategorien nicht eindeutig unterscheide (Beranek, 2004, S. 519-520). Aus einem Diagramm lässt sich dennoch der Bereich von 0,17 bis 0,24 extrahieren, den die 'besten' Säle aufwiesen (vgl. Fig. 4.15, Beranek, 2004, S. 520). Des Weiteren gibt Beranek für Orgelmusik einen optimalen Nachhallzeitbereich von 3 bis 5 s an (Beranek, 2004, S. 535).

Marshall Long empfiehlt 2006 auf Grundlage der Vorgaben anderer Wissenschaftler (Knudsen u. Harris, 1950; Doelle, 1972) günstige Nachhallzeiten, die sowohl vom Volumen des Raumes abhängen, als auch von der Art der Darbietung (vgl. Fig. 17.10, Long, 2006, S. 586), (Abb. 3.65). Für typische Saalvolumina werden folgende Nachhallwerte angegeben:

- Romantische Musik: 2,2 s
- Klassische Musik: 1,9 s
- Oper: 1,6 s
- Chorale Musik: 2,1 s
- Orgelmusik: 2,4 s

Zuvor gibt Long einige repertoireabhängige Unterschiede an. So seien für Opern, wie Gilbert und Sullivan Nachhallwerte zwischen 1 bis 1,2 s, für Mozart-Opern 1,2 bis 1,5 s und für Wagner 1,5 bis 1,6 s angemessen (Long, 2006, S. 585-586). Werte für romantische Sinfonien lägen zwischen 1,7 und 2,1 s. Abweichungen von 5 bis 10% seien akzeptabel. Zu tiefen Frequenzen (63 Hz) hin empfehle sich ein Anstieg der Nachhallzeit zwischen dem 1 bis 1,3-fachen der mittleren Nachhalldauern (Long, 2006, S. 586-587). Bevorzugte Werte der Klarheit lägen nach Long zwischen -4 und 0 dB (Long, 2006, S. 673). Für

den IACC lägen diese Werte im Bereich von 0,3, je kleiner der IACC sei, desto besser die Beurteilung (Long, 2006, S. 676). Für das Stärkemaß G gibt Long den bevorzugten Wert bei 5±1 dB an (Long, 2006, S. 678). Weitere Richtwerte lassen sich der Publikation entnehmen, jedoch basieren diese auf den Empfehlungen anderer Forscher, wie bspw. Beranek (1996). Es wird darauf verzichtet, diese Werte erneut aufzuführen.



(a) (b)

Abbildung 3.65: (a) Optimale mittlere Nachhallzeiten diverser Verwendungszwecke und (b) Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Long (2006)

In dem Sammelband „Handbook of acoustics“ von 2007 erläutert A. C. Gade diverse raumakustische Parameter (Gade, 2007, S. 301-350). In einer Tabelle empfiehlt Gade günstige Werte und Bereiche der Parameter für unbesetzte Konzert- und Kammermusiksäle (Gade, 2007, S. 313). Diese können Tabelle 3.12 entnommen werden. Die Werte gelten für Säle mit gepolsterten Sitzen, von denen er annimmt, dass sich die Nachhallzeit im besetzten Zustand um nicht mehr als 0,2 s reduziere. Die sonstigen Kriterien würden sich um den gleichen Unterschied verändern wie ihre berechneten Erwartungswerte auf Grundlage der Nachhallzeit. Hierzu gibt Gade für die Parameter Schwerpunktzeit, Stärkemaß und Klarheitsmaß Gleichungen für die Erwartungswerte an (Gade, 2007, S. 307-309). Für die Seitenschallgrade ließen sich keine Erwartungswerte, die mit der Nachhallzeit in Zusammenhang stehen, angeben (Gade, 2007, S. 309). Auch für die Parameter ST_{early}, ST_{late} und IACC werden keine Erwartungswerte angegeben. Nach den angegebenen Formeln nehmen, ausgehend von einer Nachhallzeit von 2,0 s im besetzten Zustand, das Stärkemaß um -0,41 dB ab, das Klarheitsmaß C_{80} um 0,53 dB zu und die Schwerpunktzeit um -14,5 ms ab. Die frühe Abklingzeit EDT entspreche der Nachhallzeit.

Tabelle 3.12: Empfohlene Bereiche und Werte raumakustischer Parameter nach (Gade, 2007, S. 313)

Parameter	**Kammermusiksaal**	**Konzertsaal**
T	1,5 s	2,0 bis 2,4 s
EDT	1,4 s	2,2 s
G	10 dB	3 dB
C_{80}	3 dB	-1 dB
LF	0,15 bis 0,20	0,20 bis 0,25
IACC	0,4	0,3
ST_{early}	-10 dB	-14 dB

Ahnert u. Tennhardt (2008) erläutern in einem Sammelband die gegenwärtig gebräuchlichsten raumakustischen Kriterien. Dabei unterscheiden sie zwischen Zeitkriterien, welche „[...] die Dauer bestimmter Prozesse im Abklingverhalten des Raums messen [...]“ und Energiekriterien, die „[...] bestimmte energetische Anteile innerhalb des Nachhalls [...] oder für verschiedene Einfallsrichtungen des Nachhalls [...] zueinander ins Verhältnis [...]“ setzen (Ahnert u. Tennhardt, 2008, S. 186). Zusätzlich geben die Autoren Richtwerte der Parameter an. Diese spiegeln, wie die Auswahl der Parameter, den Konsens der Forschung oder die Standardisierung der Zeit wieder. Daher ist es sinnvoll, die Vorgaben an dieser Stelle aufzuführen. Sie sind zusammen mit den entsprechenden Quellen in Tabelle 3.13 angegeben. Die Nachhallzeitempfehlungen (T) entsprechen mit gegebenfalls geringfügigen Abweichungen den Vorgaben der DDR-Wissenschaftler Fasold, Schmidt, Reichardt und den entsprechenden Publikationen Schmidt u. Reichardt (1984); Fasold u. a. (1987); Fasold u. Veres (1998). Die Richtwerte des Klarheitsmaßes beziehen sich in ihrer Reihenfolge auf klassische, romantische und sakrale Musik. Für das Klarheitsmaß geben die Autoren neben den zitierten Vorgaben einen Kompromissbereich von - 3 bis + 4 dB an (Ahnert u. Tennhardt, 2008, S. 199). Des Weiteren widmen die Autoren dem IACC einen Abschnitt und zitieren die Qualitätskategorien mit entsprechenden Messwerten des IACC von Beranek (1996). Die Angabe des Deutlichkeitsgrades D_{50} ist aus dem C_{50}-Wert berechnet. Zu beachten ist aber, dass die Größen auf die Verständlichkeit von Sprache oder Gesang beziehen.

Tabelle 3.13: Richtwerte raumakustischer Parameter nach (Ahnert u. Tennhardt, 2008, S. 188-205)

Raumakustischer Parameter	**Richtwert**	**Bemerkung**
T	2 s ± 20%	Fasold u. Veres (1998)
$T_{63\,Hz}$	1,55 · T60 ± 20%	
$T_{125\,Hz}$	1,2 · T60 ± 20%	
t_S	70 ... 150 ms	-
D_{50}	> 0,39	aus C_{50} berechnet
C_{50}	> - 2 dB	-
C_{80}	> - 1,6 dB > - 4,6 dB > - 5 dB - 3 bis + 4 dB	Reichardt u. a. (1975a) und Abdel Alim (1973) Kompromiss
LF	0,10 bis 0,25	-
ST1	- 15 bis - 12 dB	-
G	4 bis 5,5 dB	Beranek (1996)

4 Diskussion

4.1 Mittlere Nachhallzeit

4.1.1 Empfehlungen aus der Wissenschaft

Konzertsäle

Der erste Wissenschaftler, der im Rahmen der Recherche für diese Arbeit auswertbare Empfehlungen zur Nachhallzeit angibt, ist Watson (1923). Exemplarisch für die erste Generation von Raumakustikern ermittelt er seine Empfehlungen anhand der Erfahrung mit existierenden Sälen, von denen er annimmt, dass ihr guter Ruf auf die Nachhallzeit zurückzuführen sei. Diese ist zu seiner Zeit das einzige Qualitätsmerkmal der Raumakustik und es erscheint nicht unrechtmäßig zu behaupten, dies sei die logische Folge der noch fehlenden Erkenntnisse in objektiver und psychologischer Raumakustik. Doch scheut sich diese erste Generation nicht, eigene Hörversuche zu unternehmen, um zu ergründen, was eine gute Akustik ausmacht. W. C. Sabine hatte es bereits vorgemacht: Bei der Einstellung der Nachhallzeit in fünf kleinen Räumen des 'New England Conservatory of Music'[1] auf Werte zwischen 0,95 und 1,16 s, verließ er sich auf das Urteil von Musikern (Sabine, 1922, S. 71-76). Bagenal (1925) und weitere machten es ihm gleich. Und so unternimmt auch Watson (1928) solche Versuche mit zweierlei Ergebnis. Zum einen erkennt er, dass Aufführende höhere Nachhalldauern bevorzugten als ihre Zuhörer. Zum anderen erwähnt er die förderliche Schallreflexion an nahen Flächen zum Hörort, wobei er dies auf die Bedingungen der Musiker bezieht. Konsequenzen für den Status der Nachhallzeit als alleiniges Gütekriterium scheint diese zweite Beobachtung nicht zu haben. Seine empfohlenen Nachhallzeiten korrigiert er allerdings ein beachtliches Stück nach unten (s. Abb. 4.2).

Lifshitz (1925) wählt einen ähnlichen Ansatz. Er findet für einen 350 m^3 fassenden Raum in Hörversuchen die optimale Nachhallzeit von 1,03 s für Sprache und Musik und versucht

[1] Mit Volumen von 74 bis 210 m^3 .

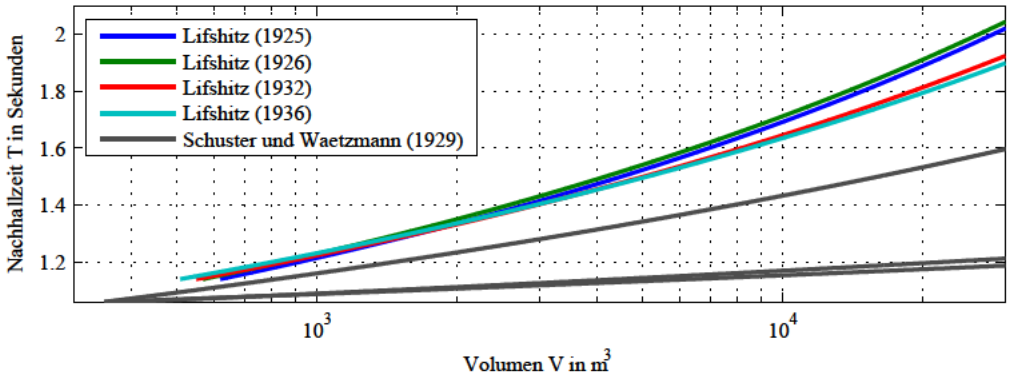


Abbildung 4.1: Mittlere Nachhallzeit nach Lifshitz, Schuster und Waetzmann

diesen Orientierungswert mit psychologischen Annahmen auf große Räume zu übertragen. Schließlich vergleicht er die errechneten günstigen Nachhallzeiten mit einigen existierenden Räumen guter und schlechter Akustik und sieht seine Formel bestätigt. Trotzdem korrigiert er diese einige Male, wie Abbildung 4.1 zeigt, mit nur geringfügigen Änderungen. Schuster u. Waetzmann (1929) kritisieren seine Methode, doch ihre Annahmen führen in verschiedenen Formeln zu immer kleineren Nachhallzeiten. Sie geben aber zu, dass es sich nicht um endgültige Werte handeln könne, sondern nur um eine Diskussionsgrundlage.

P. E. Sabine (1928) gibt als Grundlage seiner Empfehlungen die Erfahrung mit akustisch gelungenen Sälen an. Während er 1928 ein scharfes Optimum für die Nachhallzeit annimmt, bestimmt Sabine 1932 auf dieser Grundlage einen Bereich optimaler Nachhallzeiten (Sabine, 1932).[2] Walter McNair (1930) dagegen entwickelt eine Beziehung zwischen Nachhall und Raumvolumen mit ähnlichen Annahmen wie Lifshitz. Bagenal u. Wood (1931) verlassen sich wiederum auf die Erfahrung und leiten dieser einen Bereich optimaler Nachhallzeiten ab, dessen untere Grenze von einem für Musik und Sprache vereinten Verwendungszweck gegeben ist. Die obere Grenze sei durch günstige Nachhallzeiten choraler Werke gebildet, während der Mittelwert beider Grenzen das Optimum für Musik darstelle und mit 'orchestral' bezeichnet wird. Im Vergleich zu den früheren Empfehlungen ist dies eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Verwendungszwecken.

Was all diese ersten Empfehlungen gemein haben, ist ihre Abhängigkeit vom Raumvolu-

[2] Die hierzu von Sabine (1932) gemachten Angaben lassen keine genaue Reproduktion für einen Vergleich einer Nachhallzeit-Volumen-Kurve mit anderen Empfehlungen zu. Für Volumen zwischen 3 000 m^3 und 30 000 m^3 liegt das 1928er Optimum aber innerhalb dieses relativ breiten Bereichs.

men. Natürlich ist diese dadurch begründet, dass ein großer Raum den Hörer eine entsprechend größere Halligkeit erwarten lässt als ein kleinerer. Darüber hinaus ist der Anstieg der Nachhallzeit mit dem Raumvolumen unvermeidbar und dem ist zu dieser Zeit mit entsprechenden Mitteln noch schwer entgegen zu wirken. Knudsen (1931) trägt mit seinen Empfehlungen zur Nachhallzeit als erster dem musikalischen Repertoire Rechnung. Er gibt kein scharfes volumenabhängiges Optimum an, sondern einen relativ breiten günstigen Bereich der Nachhallzeit, dem sich Musikgenre und Repertoire unterordnen.

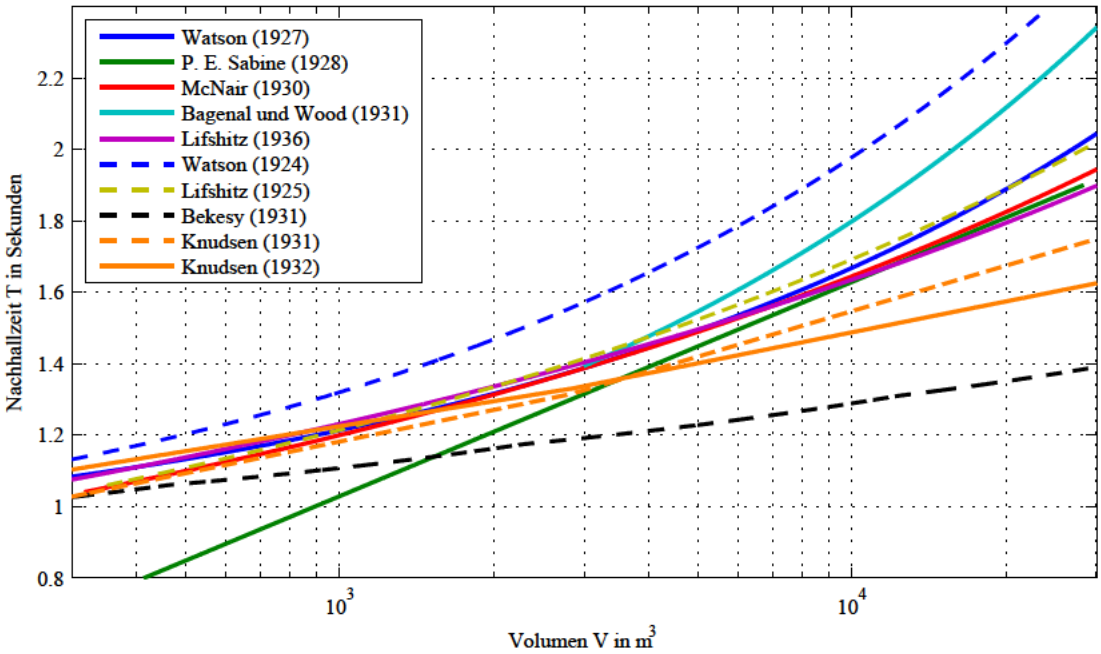


Abbildung 4.2: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1924 und 1936

An dieser Stelle bietet sich ein Vergleich der Empfehlungen der bisher erwähnten Wissenschaftler an. Die gestrichelten Linien der Abbildung 4.2 außer Acht gelassen, ist zunächst festzuhalten, dass die Kurven im relevanten Volumenbereich, also für Volumen etwa größer 3 000 m^3, durch zwei Extrema eingeschlossen werden. Die untere Grenze bildet Knudsen (1932), die obere bilden Bagenal u. Wood (1931) - hierbei handelt es sich um Empfehlungen, die in der Folgezeit eine gewisse Lehrmeinung besitzen.[3] Die Kurven dazwischen unterscheiden sich um nicht mehr als ca. 0,1 s (für 20 000 m^3), während der größte Unterschied der Grenzkurven 0,4 bis 0,5 s beträgt.

[3]Die Empfehlung von Knudsen (1931) liegt etwas höher als Knudsen (1932). Dies liegt wahrscheinlich weniger im Sinne des Wissenschaftlers, als an der Interpretation der Abbildungen 3.19 (S. 51) und 3.30 (S. 80) und Erstellung der beiden Kurven, welche sich an den Einträgen für 'Opera, Orchestra' und 'Solo and Chamber' orientiert.

Die verschiedenen Neigungen der Kurven sind mit den Annahmen der Wissenschaftler zu begründen, wie die Nachhallzeit mit dem Volumen des Raumes steigt. Es werden hier einerseits von Lifshitz (1925, 1936), McNair (1930)[4] und Békésy (1931) komplexe Beziehungen zwischen Raumvolumen und Nachhallzeit angewendet, die auf psychologisch-physikalischen Annahmen beruhen. Andererseits nehmen Bagenal u. Wood (1931)[5] und Watson (1924, 1927) einen zur dritten Wurzel des Raumvolumens proportionalen Anstieg der Nachhallzeit an, welcher der Beziehung $T = n + m \cdot \sqrt[3]{V}$ entspricht, wohingegen Sabine (1928) und Knudsen (1931, 1932) von einem Anstieg der Nachhallzeit proportional zum Logarithmus des Volumens $T = n + m \cdot \log V$ ausgehen. Man beachte, dass Knudsens Kurven aus je zwei zusammengesetzten Kurven bestehen und der gesamte Verlauf so im Gegensatz zu Sabines Kurve einen 'Knick' aufweist.[6]

Die Erfahrungen mit bestehenden Sälen, an denen sich die Mehrheit der Wissenschaftler orientiert, scheinen sich stark zu unterscheiden. Diese unterschiedlichen Erfahrungswerte könnte man auf die Herkünfte der Wissenschaftler zurückzuführen. Bagenal und Wood stammen aus Europa (England), wie auch Lifshitz (UdSSR). Die restlichen Forscher stammen aus Nordamerika (USA). Einzig Watson und Bagenal u. Wood nennen jedoch Säle, an denen sie sich orientieren (vgl. m. Abb. 3.28, S. 78 und 3.9b, S. 38). Doch liegt auch die Zeichnung der Kurve anhand der Erfahrungswerte im Ermessen der Wissenschaftler, so dass sich unterschiedliche Werte ergeben.

Das Stichwort Erfahrungswerte führt noch zu einer anderen Überlegung. Es wirft die Frage auf, wie die Nachhallzeiten der Säle, an denen man sich orientiere, bestimmt wurden. Kuhl (1954) bemerkt hierzu, dass die Nachhalldauern, auf die sich diese Wissenschaftler stützen, berechnet seien. Da sich in der Kalkulation der Absorptionskoeffizienten sicherlich Diskrepanzen ergeben, kann es sein, dass sich verschiedene Wissenschaftler zwar auf dieselben 'guten' Erfahrungen stützen, damit jedoch verschiedene Nachhallwerte verknüpfen. Ein weiterer Unterschied besteht in der Verwendung der Nachhalltheorie, was auch Knudsen (1932) anmerkt. Er benutzt im Unterschied zu seinen Zeitgenossen die Eyring'sche Nachhallformel, welche er für genauer hält. Im Gegensatz zur Sabine'schen

[4] McNairs Kurve wurde aus dem Mittel der von ihm angegebenen Formel Werte für 500 und 1 000 Hz bestimmt

[5] Die Kurve von Bagenal und Wood reicht nur bis zu einem minimalen Volumen von ca. 3 000 m^3. Darunter weicht die Approximation von dem Original ab, die Beziehung zwischen Raumvolumen und Nachhallzeit ist nicht durch $T \sim \sqrt[3]{V}$ gegeben.

[6] Knudsens Kurve wurde aus zwei 'logarithmischen' Geraden gebildet, die sich für kleine Volumen an dem Eintrag 'Solo and Chamber', für große an der Markierung 'Opera, Orchestra' in den Orignaldiagrammen orientieren.

Formel produziert diese jedoch geringere Werte.

Des Weiteren könnten Unterschiede auf verschiedene Besetzungszustände zurückzuführen sein, doch werden dazu nicht immer Angaben gemacht. Watsons sowie Bagenal u. Woods Kurven beziehen sich auf die volle Besetzung des Zuschauerraumes. Da die Autoren zumeist auch ein günstiges spezifisches Volumen nennen, könnte man davon ausgehen, dass sie den Besetzungsgrad des Zuschauersaals mit berücksichtigen und die Kurven zumindest nicht für den leeren Saal gelten.

G. Békésy (1931), der von der Dikussion der Abb. 4.2 zunächst ausgeschlossen wurde, erlangt seine Empfehlung über psychologisch-physikalische Annahmen auf der Grundlage von Versuchen. Für große Räume reicht seine Empfehlung gerade an 1,4 s heran und liegt damit unter allen anderen. Doch hält Békésy fest, dass die Kurve von der Art der musikalischen Darbietung abhänge.[7] Weitere Untersuchungen von Békésy führen zu noch geringeren Werten. Interessanterweise widerspricht Békésy 1934 der Abhängigkeit des Nachhallwertes vom Repertoire und stellt für Stücke verschiedener Epochen (Romantik, Klassik) in einem Raum von 2 000 m^3 dieselben günstigen Nachhallzeiten fest (Békésy, 1934b).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die betrachteten Wissenschaftler, abgesehen von Sabine (1928), unter Vernachlässigung eines geringen Unterschiedes in ihren Kurven über die günstige Nachhallzeit kleiner Räume einig sind. Sie gehen allerdings von unterschiedlichen Anstiegen des Nachhallwertes mit dem Volumen aus, was zu einer Auffächerung der Kurvenschar und einer breiten Varianz der Empfehlungen zwischen 1,35 und 2,1 s für einen 20 000 m^3 fassenden musikalischen Aufführungsraum führt. Von weiteren Abhängigkeiten der Nachhallzeit, bspw. zum Musikgenre oder Repertoire, z. B. Oper oder Konzert, gehen erst die Wissenschaftler Bagenal u. Wood (1931) und Knudsen (1931) aus.

Zwischen den Jahren 1932 und 1940 werden keine auswertbaren Empfehlungen zur Nachhallzeit gemacht. Es scheint, als stellten die oben betrachteten eine erste Welle der Vorstöße auf dem Gebiet der Raumakustik dar. Die abschließenden Empfehlungen von Knudsen und Bagenal u. Wood geben als zueinander konträre Meinungen in der Folgezeit Orientierungswerte vor. Die Empfehlungen werden vielschichtiger. Man geht nicht mehr nur von einer Nachhallzeit für ein bestimmtes Volumen aus, sondern von einem volumenabhängigen Bereich, dem sich Musikgenre oder der Raumverwendungszweck und das Repertoire

[7] Die Kurve sei für klassische Musik mit Gesang, Cello, Violine und Klavier gültig.

unterordnen.

Nach Watson (1941) geben Maxfield u. Potwin (1940) in einer Publikation einen solchen Bereich volumenabhängiger Nachhallzeiten für verschiedene Verwendungszwecke an.[8] Ihre Empfehlungen sind im nächsten Diagramm zum Vergleich verschiedener Meinungen zur günstigen Nachhallzeit aufgetragen (Abb. 4.3). Maxfield versucht etwas später mit Albersheim eine Größe zu entwickeln, die wiederum die zuvor erkannten vielfältigen raumakustischen Bedingungen von Auditorien auf einen Einzahlkennwert reduziert (Maxfield u. Albersheim, 1947). Die Autoren entwickeln dabei mit Verweis auf McNair und Lifshitz mittels psychologischer Annahmen eine Formel für die optimale Nachhallzeit (Abb. 4.3) (Maxfield, 1948).

Zuvor fordert Rettinger (1947) einen logarithmischen Anstieg der Nachhallzeit mit dem Raumvolumen. Seine Empfehlung beruhe auf einem zu zwei Dritteln besetzten Auditorium und erreicht fast gleiche Werte wie Knudsen (1932). Rettinger greift ebenfalls auf Eyrings Nachhallformel zurück. Erwähnenswert ist, dass es sich mit Rettinger um einen Absolventen der Unversität handelt, an der Knudsen als Professor lehrte. So könnte man davon ausgehen, dass Knudsens Lehre Rettingers Ansichten beeinflusst hätten. Doch ein Vergleich zwischen beiden Wissenschaftlern geschieht besser anhand zeitnaher Veröffentlichungen. Knudsen u. Harris (1950) Empfehlung zur günstigen Nachhallzeit musikalischer Aufführungsräume wird in Abbildung 4.3 zweigeteilt dargestellt. Das Forscherteam gibt einen Bereich der optimalen Nachhallzeit an. Abbildung 4.3 zeigt einen Durchschnittswert für Musik, an welchem man sich für Opern- oder Konzertsäle orientieren könnte, sowie eine Volumen-Nachhall-Beziehung für kleinere Kammermusiksäle. Die gestrichelten Bereiche der Kurven sollen geeignete Volumen für hier behandelte Aufführungsräume grob andeuten. Rettingers Kurve kompensiert offensichtlich mit einem stärkeren Anstieg und kleineren Start-Nachhallwert (für kleine Volumen) die einfache Empfehlung. Erneut wird deutlich, dass Knudsen ein Verfechter geringer Halligkeit und großer Deutlichkeit ist. Rettinger schließt sich dieser Meinung offenbar an.

Die übrigen Nachhallzeitempfehlungen, die von Abbildung 4.3 zusammengefasst werden, Brüel (1951) ausgenommen, streuen im unteren Volumenbereich zwischen 0,9 und 1,2 s, bilden aber im oberen erneut zusammenlaufende Gruppen. Für kleine Volumen orientiert sich die Kurve von Maxfield u. Potwin (1940) an Knudsens u. Harris' Durchschnittswert, für große Volumen verläuft sie knapp unter der theoretisch entwickelten Empfehlung von

[8] Watson (1941) zeigt hierzu eine Abbildung der Forscher, die der Publikation entnommen sei, welche auch in dieser Arbeit betrachtet wurde. Leider konnte diese dort nicht aufgefunden werden.

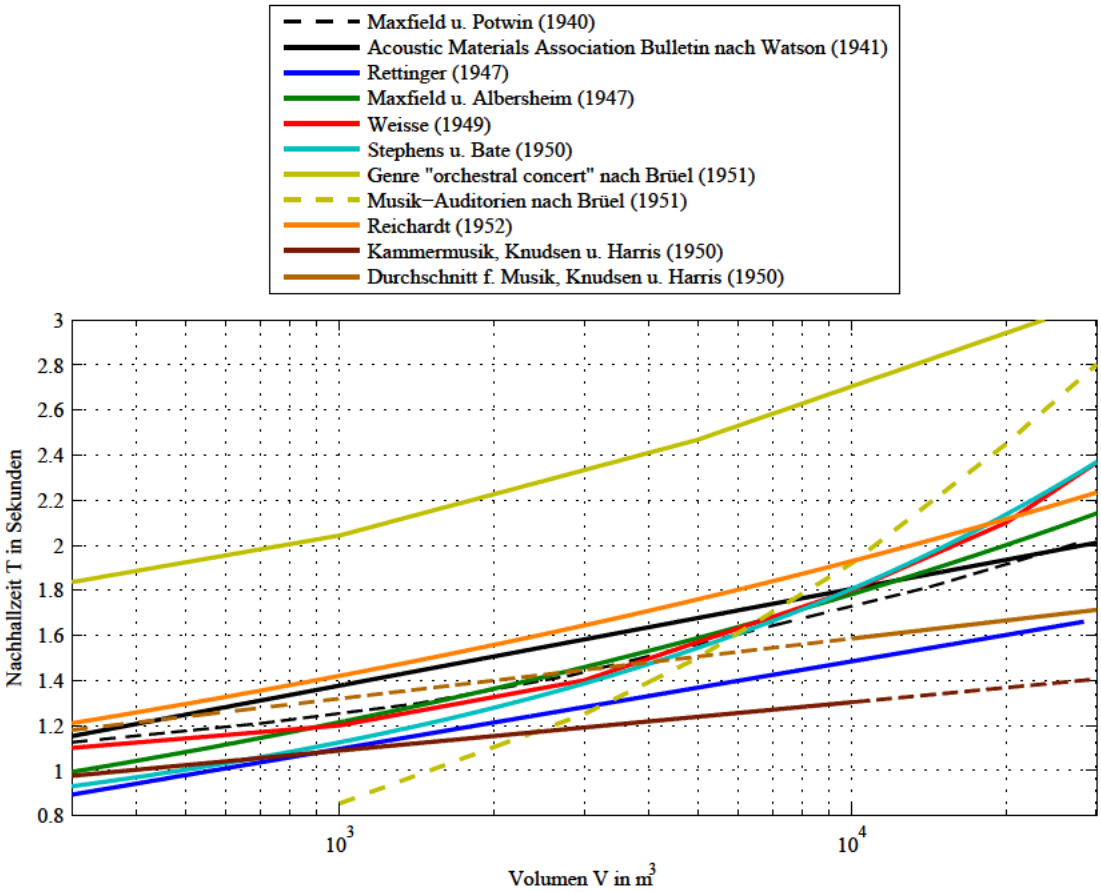


Abbildung 4.3: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1940 und 1952

Maxfield u. Albersheim (1947) und erreicht bei 20 000 m^3 1,9 s.

Zwischen den Europäern Stephens u. Bate (1950) und Weisse (1949) herrscht offenbar Einigkeit über den günstigen Nachhallwert großer Raumvolumen. Ihr Optimum von etwa 2,1 s für einen 20 000 m^3 großen Konzertsaal unterscheidet sich dennoch stark von dem ihrer amerikanischen Kollegen Knudsen u. Harris (1950) und Rettinger (1947) mit ca. 1,7 bzw. 1,6 s. Reichardt (1952), der von einer doppelt logarithmischen Beziehung der Form $\log T = n + m \cdot \log V$ ausgeht, liegt 0,1 bis 0,2 s über den Empfehlungen seiner europäischen Zeitgenossen und stimmt mit ihnen bei 20 000 m^3 über einen Nachhallwert von 2,1 s überein. Des Weiteren ist eine gute Übereinstimmung der Europäer, insbesondere Weisse und Stephens u. Bate mit Bagenal u. Wood (1931) aus Abb. 4.2 auffällig.

Die Berechnungen von Brüel (1951) stellen hier einen Ausreißer dar. Die durchgezogene Linie sei durch eine Mittelung diverser Autoren zustande gekommen, die gestrichelte hingegen aus Daten von diversen musikalischen Aufführungsräumen und Musikstudios

abgeleitet. Die Zusammenfassung dieser unterschiedlichen Aufführungsräume, unter denen sich auch Kirchen mit relativ langen Nachhallzeiten befinden, führt wohl zu dieser Kurve. Dass eine Mittelung der Daten diverser Autoren allerdings die hohen Nachhallzeiten produziert, die von der durchgezogene Kurve erreicht werden, überrascht angesichts dessen, dass diese sich auf voll besetzte Auditorien beziehen solle.

In diesem Diagramm ist eine Empfehlung des 'Acoustic Materials Association Bulletin VII' dargestellt, die Watson in seiner Monographie von 1941 mit der Bemerkung zitiert, diese wäre in den letzten Jahren oft angewendet worden (Watson, 1941, S. 43). Gemeint sind wahrscheinlich die Jahre zwischen 1930 und 1940. Diese T-logV-Beziehung erreicht bei 20 000 m^3 moderate 1,9 s.

Vergleicht man diese beiden Zeitabschnitte, lässt sich abermals feststellen, dass im unteren Volumenbereich größere Einigkeit zwischen den Empfehlungen besteht als im oberen Bereich, welche im ersten Diagramm stärker ausgeprägt ist. Durch die unterschiedlichen Anstiege der Nachhallzeit mit dem Volumen[9] werden in beiden Diagrammen für 20 000 m^3 schließlich Werte zwischen etwa 1,6 und 2,1 s erreicht, Brüel (1951), Békésy (1931) und Watsons (1924) korrigierte Empfehlung ausgeschlossen.[10]

Die beginnende zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts stellt eine Wende in zweierlei Hinsicht dar. Zum einen weisen einige Publikationen auf einen Unterschied zwischen europäischen und amerikanischen Optima hin, was sich bis in die 1950er Jahre hinein nachvollziehen lässt. Hierauf wird am Ende dieses Unterkapitels näher eingegangen. Zum anderen wird die Tradition der volumenabhängigen Nachhallzeitempfehlungen aufgeweicht und es werden vermehrt volumenunabhängige Bereiche der optimalen Nachhallzeit für verschiedene Genres und unterschiedliches Repertoire gegeben.

Letzteres wird offenbar durch Kuhl (1954) ausgelöst und kann auf die stärkere Einbeziehung subjektiver Urteile zur Hörsamkeit und eine differenziertere Betrachtung der raumakustischen Bedingungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zurückgeführt werden. Fortschritte auf dem Gebiet der Messtechnik und damit verbundene Erkenntnisse in der Raumakustik tragen hierzu sicherlich bei. Kuhl (1954) empfiehlt auf der Grundlage eines aufwändigen Ringversuchs volumenunabhängige optimale Nachhallzeiten für

[9] $T \sim \sqrt[3]{V}$, $T \sim \sqrt[6]{V}$, $\log T \sim \log V$, $T \sim \log V$

[10] Kammermusiksäle nach Knudsen u. Harris (1950) sind von diesem Fazit ausgeschlossen, da man hier maximale Raumvolumen von 10 000 m^3 annehmen kann. Brüels Werte sollte man von diesem Fazit ebenfalls ausschließen, da nicht ganz klar ist, welchen von den zwei Werten von 2,4 und 2,9 s er empfiehlt.

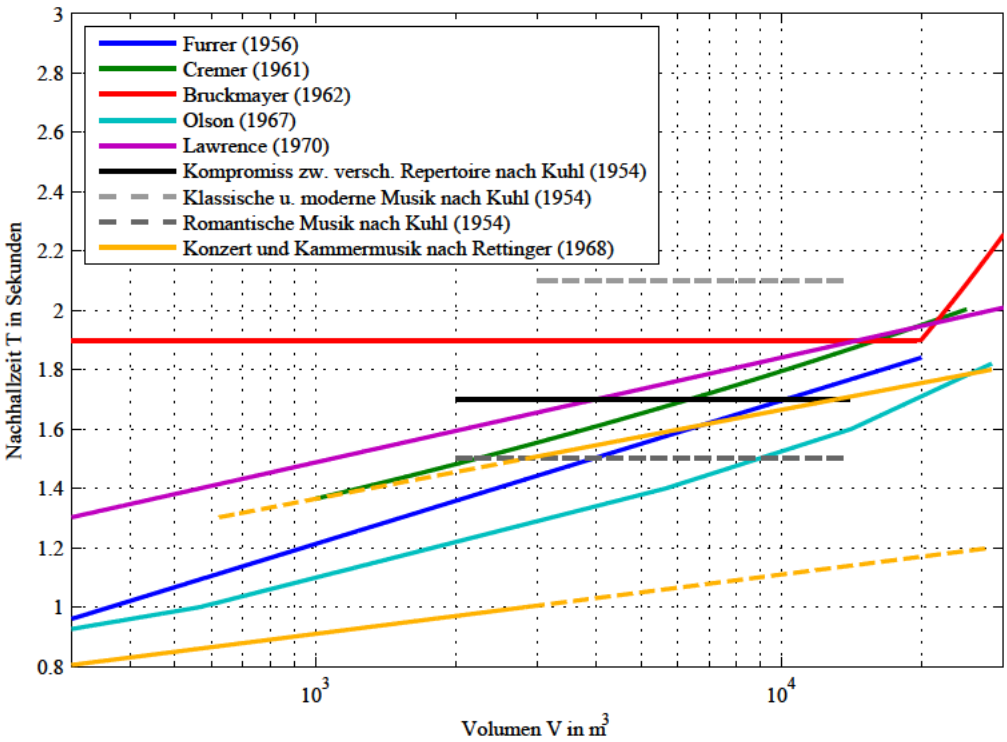


Abbildung 4.4: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1954 und 1970

klassische und moderne (etwa 1,5 s) sowie für romantische Musik (2,1 s). Diese für die einkanalige Rundfunkübertragung gefundenen Werte könnten nach den Ansichten Kuhls auch auf Konzertsäle übertragen werden, eventuell kämen hier etwas größere Werte in Frage. Furrer (1956) stimmt mit Kuhl überein, wohingegen andere Wissenschaftler dies in Frage stellen (Reichardt u. a., 1955) oder gar gegenteiliger Meinung sind (Beranek, 1955). Kuhls Kompromiss zwischen romantischer und klassischer Musik von 1,7 s sowie die zwischen dem Repertoire unterscheidenden Erkenntnisse sind als waagerechte Linien in Abbildung 4.4 über dem Volumen der bei dem Versuch benutzten Räume eingezeichnet.

Reichardt u. a. (1955) unternehmen Hörversuche zur Nachhallzeit und werten nach Bekanntwerden von Kuhls Ergebnissen ihren Versuch mit der Kuhl'schen Methodik aus. Sie kommen zu ähnlichen, doch etwas anderen Werten von 1,2 s für rhythmisch ausgeprägte, 1,85 s für romantische sinfonische und im Mittel 1,6 s für sonstige sinfonische Musik. Diese Werte sind allerdings nicht in das Diagramm eingetragen, da sie die Übertragung der Ergebnisse auf Konzertsäle als fragwürdig ansehen.

Abbildung 4.4 stellt die volumenabhängigen Empfehlungen zwischen 1954 und 1968 gra-

fisch dar. Auffällig ist, dass hier weniger Kurven zusammengetragen wurden als in den letzten Diagrammen, die einen vergleichbaren Zeitraum zusammenfassen. Dieser Trend verstärkt sich, wenn man die folgenden Abbildungen 4.5 und 4.6 betrachtet. Dies liegt unter anderem an der oberhalb erwähnten Tendenz zu volumenunabhängigen günstigen Bereichen. Allenfalls wird bei solchen Empfehlungen angemerkt, dass man sich für große Volumen an der oberen Grenze orientieren solle. Andererseits werden auch vermehrt volumenabhängige Kurven zu verschiedenen Raumnutzungen (Oper, Kammermusik, Konzert, Orgelmusik) gegeben.

Bruckmayer (1962) sticht unter den Kurven in Abb. 4.4 heraus. Er gibt sowohl günstige Bereiche der Nachhallzeit für verschiedene Raumnutzungen als auch volumenabhängige Empfehlungen, die sich mit einem von ihm erkannten Trend zu halligeren Schallplattenaufnahmen begründen. Für einen Konzertsaal empfiehlt er ab einem Volumen von 20 000 m^3 einen relativ starken Anstieg der Nachhallzeit. Bis 20 000 m^3 beträgt seine Empfehlung konstant 1,9 s. Die Kurven der Abbildung sammeln sich bei dem typischen Volumen zwischen 1,7 und 1,95 s, mit den amerikanischen Optima von Olson (1967) und Rettinger (1968) an der unteren Grenze und dem europäischen Optimum von Cremer (1961) an der oberen.[11] Der zweite Europäer Furrer (1956) liegt etwa im Mittel dieser Grenzen bei 1,85 s. Cremers sowie Furrers Optima stammen aus einer Mittelung volumenabhängiger Bereiche, die für 20 000 m^3 1,5 bis 2,4 s bzw. 1,7 s bis 2 s betragen.

Die volumenunabhängigen Empfehlungen dieses Zeitraums geben das Spektrum der Nachhallzeiten für 20 000 m^3 der Abbildung 4.4 in etwa wieder. Winckel hält 1958 in einer Analyse einer Auswahl von Konzertsälen einen „bewährten Wert“ von 2 s fest (Winckel, 1958, S. 54) und spricht sich 1962 erneut für dieses Optimum aus (Winckel, 1962, S. 81). Beranek (1962) rät auf Grundlage seiner Untersuchungen zu einer mittleren Nachhallzeit von 1,9 s und Meyer u. Neumann (1967) empfehlen den günstigen Bereich von 1,7 bis 2 s.

Im nächsten betrachteten Zeitbereich, welchen die Abbildung 4.5 zeigt, liegen die volumenabhängigen Empfehlungen zur Nachhallzeit für 20 000 m^3, von der Empfehlung von Egan (1988) abgesehen, in einem sehr schmalen Bereich zwischen 1,9 und 2 s. Der steile Anstieg der Kurve von Kinsler u. a. (1982) ist ungewöhnlich und auf die einfache Beziehung $0,07 \cdot \sqrt[3]{V}$, welche die Autoren angeben, zurückzuführen. Das Optimum von Cremer u. Müller (1978) ist erneut das Mittel eines günstigen Bereiches, der für 20 000 m^3 zwi-

[11] Über die Herkunft bzw. den Einfluss von Lawrence lässt sich mit Gewissheit nichts aussagen. Sie stammt aus Australien oder Amerika.

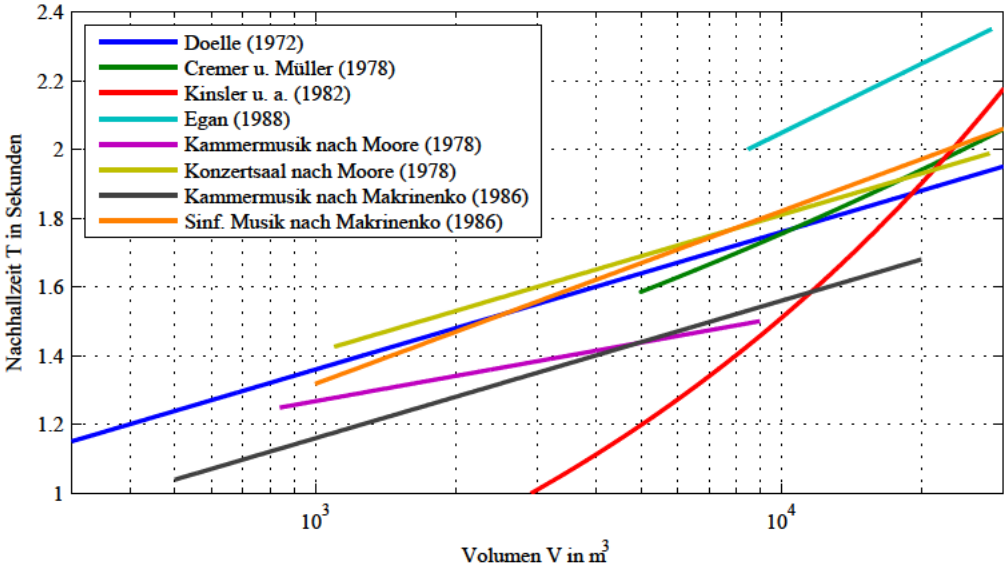


Abbildung 4.5: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1972 und 1988

schen 1,6 und 2,3 s liegt. Ein Unterschied zwischen europäischen und amerikanischen Optima lässt sich anhand der Abbildung nicht feststellen, zumal die höchsten Werte von Egan, einem Amerikaner, erreicht werden.

Die volumenunabhängigen Empfehlungen dieses Zeitraums bestätigen diesen schmalen Bereich nicht, schließen ihn aber ein. Egan (1972) fasst die Vielfalt des Repertoires in einem Bereich zwischen 1,4 und 2,1 s zusammen, wohingegen Meyer (1972) hier zu 1,7 bis 2,1 s rät. Kuttruff (1973) empfiehlt einen Bereich von 1,6 bis 2,1 s, wohingegen er 1978, wie auch Fasold u. Winkler (1976), 1,7 bis 2,1 s annimmt. Die weiteren Empfehlungen von bspw. Parkin u. a. (1979) mit 1,7 bis 2,2 s oder Fasold u. a. (1987) mit 1,7 bis 2,1 s, lassen ersichtlich werden, dass sich der Konsens der Wissenschaft, abgesehen von einigen Ausnahmen, wie Jordan (1981) mit 1,4 bis 2,8 s oder Ando (1985)[12], zunehmend auf einen Wert um 2 s oder einen Bereich zwischen 1,7 und 2,1 s einpendelt.

Abbildung 4.6 schließt die Betrachtung der volumenabhängigen Nachhallzeitempfehlungen ab. Für ein typisches Volumen von 20 000 m^3 orientieren sich die Kurven erneut an einer günstigen Nachhallzeit von 2 s, in einem Bereich zwischen 1,9 und 2,1 s. Man beachte, dass sich die Empfehlungen von Rettinger (1988) und Fry (1988) unmittelbar an den vorher betrachteten Zeitbereich anschließen und zu den chronologisch nächsten von

[12] Er geht von zwei Arten von Konzertsälen aus und empfiehlt für diese Bereiche von 0,7 bis 2 s und 2 bis 3 s.

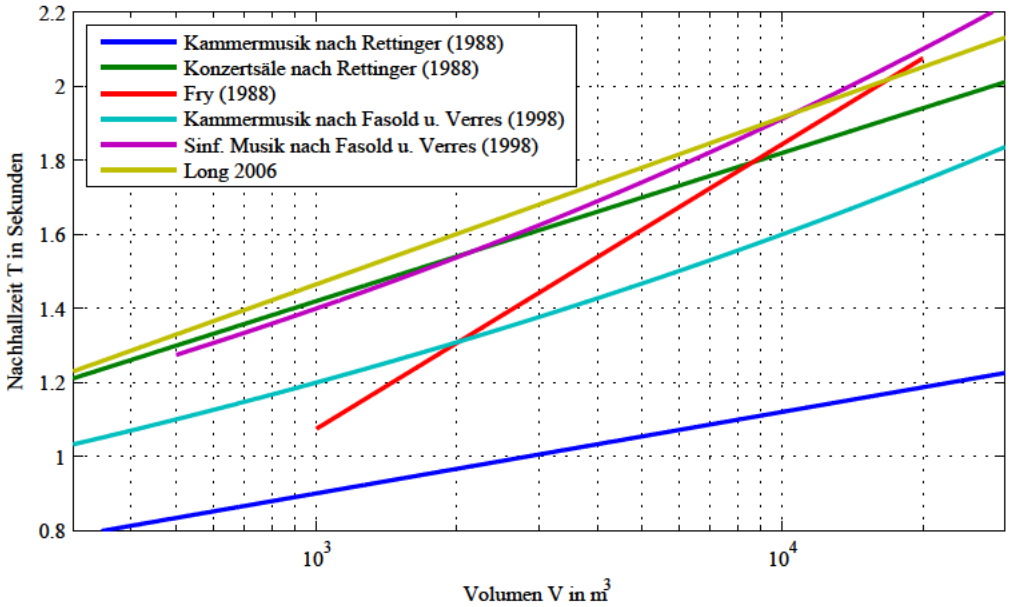


Abbildung 4.6: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1988 und 2006

Fasold u. Veres (1998) eine Lücke von 10 Jahren besteht. Diese Lücke lässt sich auf die Tendenz der Angabe von volumenunabhängigen günstigen Bereichen der Nachhallzeit zurückführen.

Barron berücksichtigt bspw. die unterschiedlichen Anforderungen des Repertoires mit einem Bereich von zusammengefasst 1,6 bis 2,2 s (Barron, 1993, S. 29) und gibt des Weiteren einen günstigen Bereich orchestraler Musik zwischen 1,8 und 2,2 s an. Beranek (1996) rät zu einer Toleranz von 1,8 und 2 s. Auch Templeton (1997) sind zwei Empfehlungen von 1,7 bis 2,2 s und 1,7 bis 2,5 s zu entnehmen. Kuttruff (2000) gibt den gleichen Bereich wie 1973 von 1,6 bis 2,1 s an, Beranek (2004) erhöht seine Empfehlung auf 1,8 bis 2,1 s und schließlich geben Ahnert u. Tennhardt (2008) einen günstigen Wert der mittleren Nachhallzeit mit 2 s $\pm$ 20% an, was 1,6 bis 2,4 s entspricht.

Eine komplette Übersicht der recherchierten Empfehlungen für einen typischen sinfonischen Konzertsaal von 1920 bis in die Gegenwart zeigt Abbildung 4.7. Darin lässt sich der Übergang von einem angenommenen scharfen Optimum zu einem günstigen Bereich gut erkennen. Dies stellt allerdings keine Unterscheidung zwischen volumenabhängigen und -unabhängigen Empfehlungen dar. Bei der Sammlung der Daten wurde die eventuelle Angabe der Wissenschaftler, dass man sich für große Räume an der oberen Grenze des empfohlenen Bereiches orientieren solle, vernachlässigt, da dies eine gewisse Willkür in der Auswahl eines Wertes aus dem Bereich verlangen würde.

Eine Mittelung der Grenzen aller roten Bereiche führt auf die Spanne von 1,67 bis 2,21 s, in welcher die großzügigen Bereiche von Ando (1985) oder Jordan (1981) mit eingeschlossen sind. Vernachlässigt man diese, erhält man 1,69 bis 2,17 s, worin man die angemerkte Tendenz zu einem günstigen Bereich der Nachhallzeit von etwa 1,7 bis 2,1 s bestätigt sehen kann.

In Tabelle A.1 im Anhang A sind die Empfehlungen der Abbildung 4.7 zusammengestellt. Es werden auch Formeln der volumenabhängigen Nachhallzeiten angegeben, insofern ihre Approximation dies zulässt.

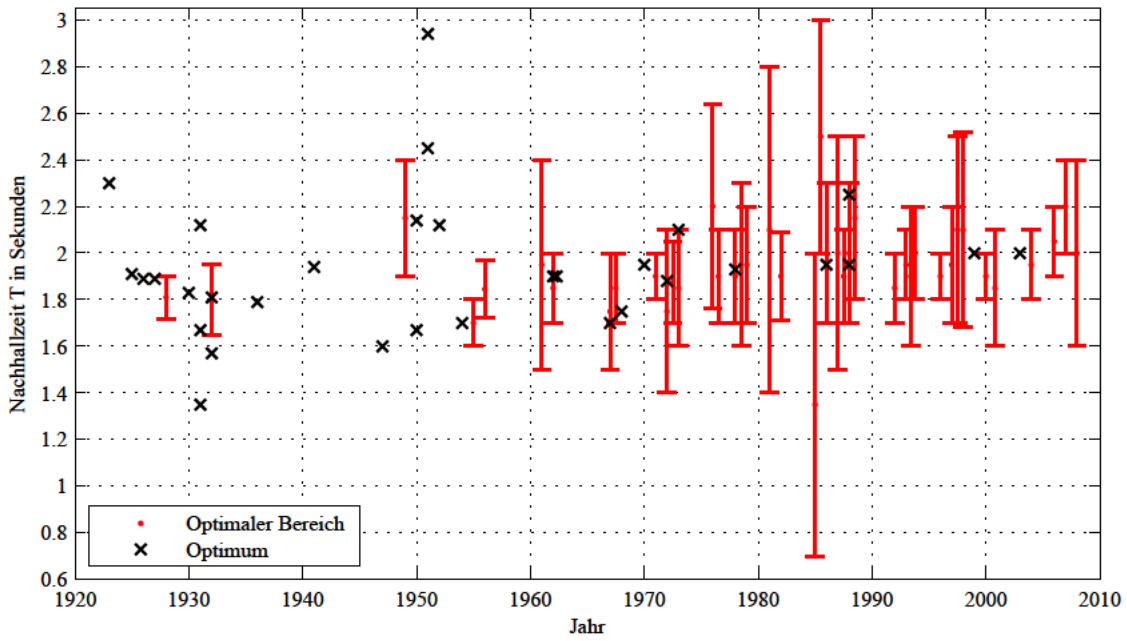


Abbildung 4.7: Empfehlungen günstiger Nachhallzeiten für sinfonische Konzertsäle, V = 20 000 m^3

Zum Unterschied zwischen amerikanischen und europäischen Empfehlungen

Einige Publikationen erwähnen einen Unterschied zwischen amerikanischen und europäischen Nachhallzeitoptima. Winckel (1950) erkennt zwischen amerikanischen und deutschen Empfehlungen einen Unterschied und zeigt diesen für einen 10 000 m^3 fassenden Konzertsaal in einem Diagramm. Nach deutscher Auffassung ergebe sich eine mittlere Nachhallzeit von 1,8 s, nach amerikanischer eine von 1,6 s (vgl. mit Abb. 3.22, S. 55).

Nickson u. Muncey (1959) halten fest, Bagenals und Woods Empfehlung befriedige englische, Knudsens und Harris' Empfehlung hingegen amerikanische Anforderungen an die

Nachhallzeit und führen dies auf verschiedene Gewohnheiten der Länder zurück (Nickson u. Muncey, 1959, S. 319). Die Nachhallzeiten Australischer Konzertsäle lägen darüber hinaus über dem Optimum von Bagenal u. Wood.

Hawkes u. Douglas (1971) versuchen den Unterschied amerikanischer und europäischer Nachhalloptima mit verschiedenen Besetzungsstärken der Orchester zu begründen: „The American R.T. optima are shorter, perhaps because American orchestras are generally larger, and can achieve the same loudness with less reverberation.“ (Hawkes u. Douglas, 1971, S. 240).

Diese Publikationen deuten an, dass es nicht nur einen Unterschied zwischen den Nachhallzeiten insofern gibt, dass Amerikaner kleinere mittlere Nachhallzeiten wünschten, sondern auch, dass auf der amerikanischen Seite Knudsen (1932) bzw. Knudsen u. Harris (1950), auf europäischer Bagenal u. Wood (1931) als Leitbild dieser unterschiedlichen Nachhallwerte gelten. Dass diese beiden Empfehlungen oftmals als Planungsoptima angesehen werden, deuten bspw. Berichte über die Gestaltung der Akustik von Konzertsälen an (z. B. Parkin u. a., 1953).

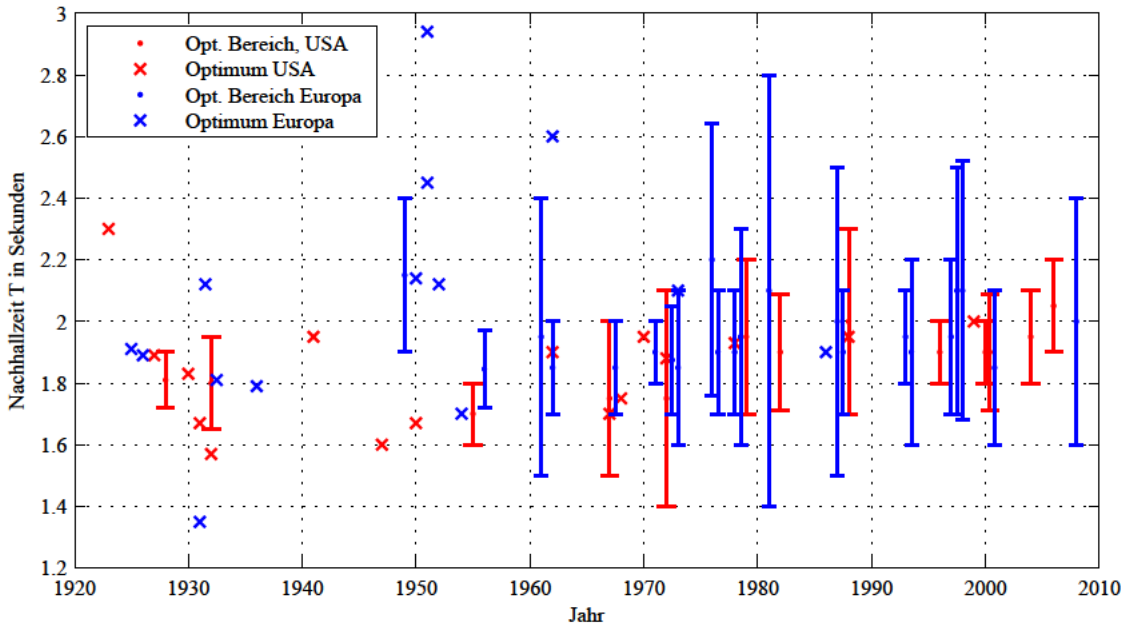


Abbildung 4.8: Unterschied zwischen den USA und Europa, V = 20 000 m^3

Abbildung 4.8 zeigt einen chronologischen Überblick amerikanischer und europäischer Empfehlungen ähnlich der letzten Abbildung, nur dass die Empfehlungen nach Herkunft

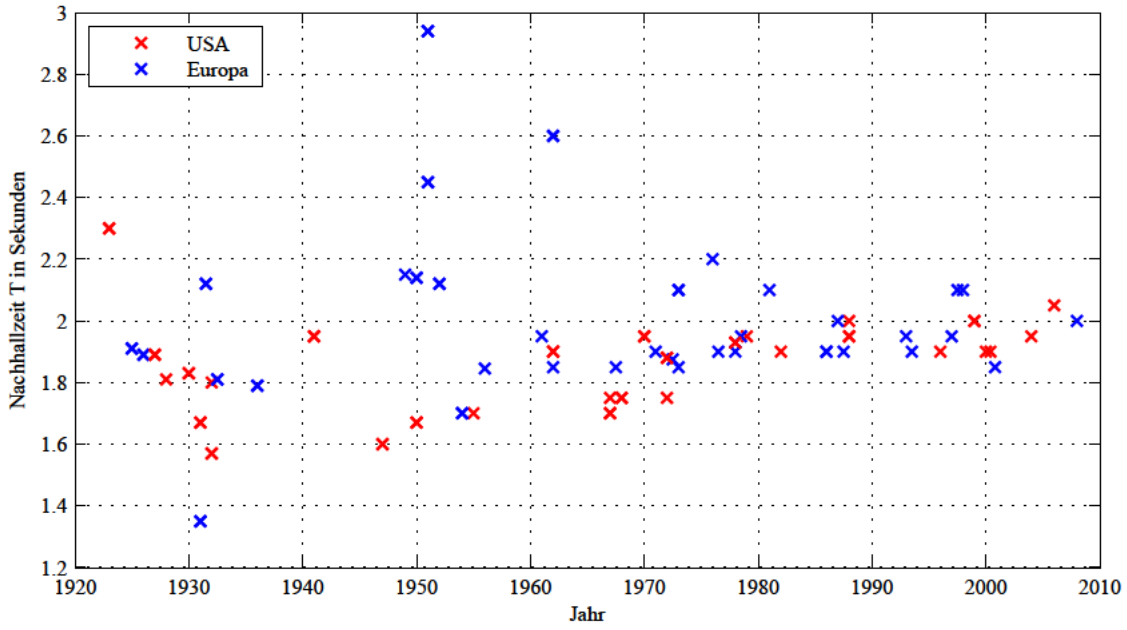


Abbildung 4.9: Unterschied zwischen den USA und Europa, V = 20 000 m^3; die günstigen Bereiche wurden durch ihren Mittelwert ersetzt.

farblich getrennt sind. Auf den ersten Blick fällt auf, dass europäische Empfehlungen günstiger Bereiche der Nachhallzeit die amerikanischen zahlenmäßig übertreffen. Die europäischen Bereiche nehmen zudem höhere Maximalwerte an und umfassen eine größere Spanne von maximal 1,4 bis 2,8 s.

Für den Zeitraum zwischen 1920 und etwa 1960 lässt es sich feststellen, dass amerikanische Empfehlungen im Mittel unter den europäischen liegen, wobei die Entwicklung der amerikanischen Optima ab 1923 eine Tendenz zu kürzeren Nachhallwerten beschreibt. Die zuvor genannten Publikationen können sich nur auf diesen Zeitraum beziehen. Darüber hinaus erfahren die amerikanischen Empfehlungen ab etwa 1960 eine rückläufige Tendenz zu längeren Nachhallzeiten von 2 s. Dies wird um so deutlicher, wenn man die Bereiche durch ihre Mittelwerte ersetzt, wie dies in Abbildung 4.9 gezeigt wird. In den Jahren zwischen 1920 und 1950 sinken die empfohlenen mittleren Nachhallzeiten auf ein Minimum von etwa 1,6 s, wohingegen sie sich ab 1960 langsam wieder einem Wert um 2 s herum annähern. Die europäischen Optima orientieren sich dagegen sowohl an den niedrigen amerikanischen Empfehlungen als auch an Werten über 2 s und beschreiben bereits in den 1950er Jahren eine Tendenz zu Nachhallzeiten um einen ungefähren Mittelwert von 2 s.

Opernsäle

Den betrachteten Publikationen können weniger Empfehlungen zu Opernsälen entnommen werden. Dies zeigen die Abbildungen 4.10 und 4.11, welche volumenabhängige Empfehlungen aufführen, sowie Abbildung 4.12, in welcher zu diesen ersten zusätzlich volumenunabhängige Richtwerte über dem Jahr ihrer Publikation aufgetragen sind.

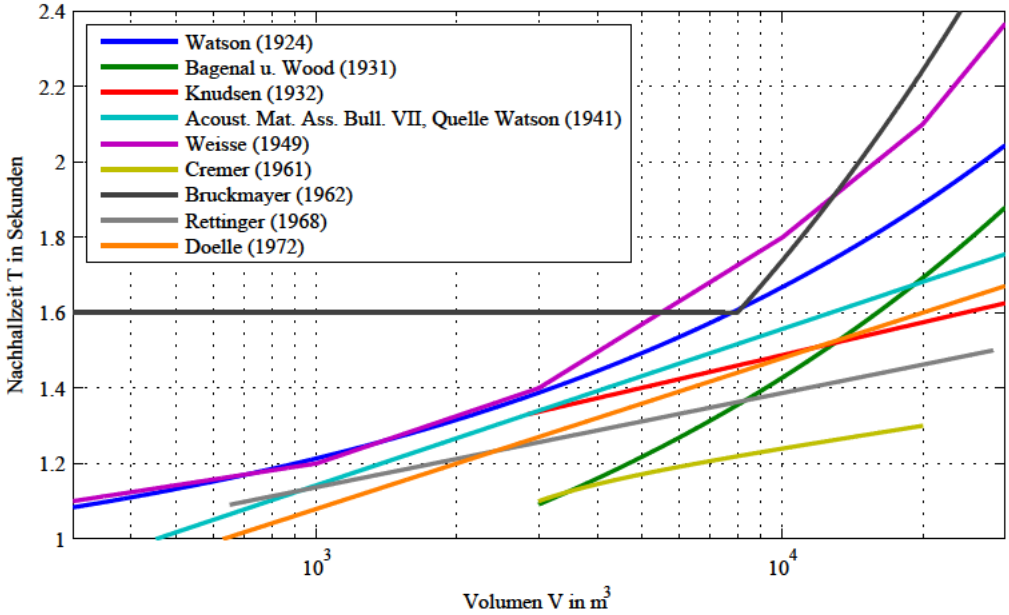


Abbildung 4.10: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten für Opernsäle zwischen 1924 und 1972

Abbildung 4.10 stellt den Zeitabschnitt zwischen 1924 und 1972 dar. Die Empfehlungen decken für ein typisches Volumen einen breiten Bereich von etwa 1,3 bis 2,2 s ab. Die frühen Empfehlungen von Watson (1924) und Bagenal u. Wood (1931), welche im Übrigen Kompromisse zwischen sprachlichen und musikalischen Darbietungen darstellen, sowie von Knudsen (1932), welche der Kurve für Konzertsäle entspricht, erzielen bei 20 000 m^3 unterschiedliche Werte von 1,9, 1,7 bzw. 1,55 s. Eine Übereinstimmung zeitnaher Empfehlungen ist demnach nicht gegeben. Die beiden Extrema, mit Cremer (1961) als Minimum und Bruckmayer (1962) als Maximum, folgen ebenfalls zeitlich dicht aufeinander, liegen in ihren optimalen Werten jedoch weit voneinander entfernt. Bei Bruckmayer besteht allerdings berechtigter Zweifel, ob er ein typisches Volumen eines Opernsaales mit 20 000 m^3 annehmen würde, oder ob der Anstieg der Funktion ein geringeres maximales Volumen voraussetzt. Seine Empfehlung von 1,6 s bis zu einem Volumen von 8 000 m^3,

sowie der von ihm zusätzlich empfohlene volumenunabhängige Bereich von 1,4 bis 1,7 s liegen zumindest weit unter dem Wert von 2,2 s. Die Kurve von Weisse (1949) besitzt Gültigkeit für Oper und Konzert und erreicht wahrscheinlich aus diesem Grund 2,1 s. Cremers Kurve stellt den Mittelwert eines günstigen Bereiches dar, dessen untere Grenze konstant bei 1 s liegt.

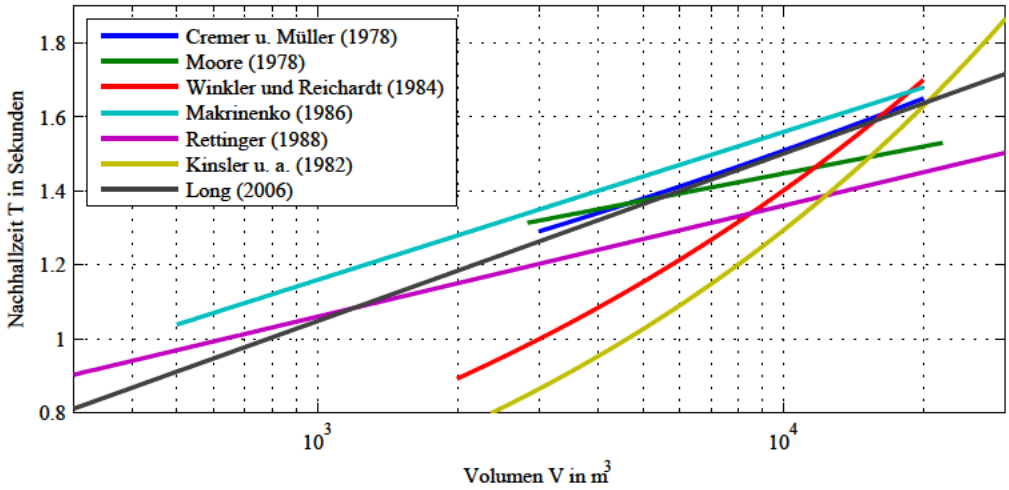


Abbildung 4.11: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten für Opernsäle zwischen 1978 und 2006

Im darauf folgenden Zeitraum zwischen 1978 und 2006 liegen die einzelnen Kurven dichter beieinander. Sie erreichen bei 20 000 m^3 Nachhallwerte zwischen etwa 1,4 und 1,7 s. Die Kurve von Cremer u. Müller (1978) stellt auch hier wieder den Mittelwert eines günstigen Bereichs dar, nur dass die untere Grenze ebenfalls mit dem Volumen des Aufführungsraumes steigt. Die beiden Wissenschaftler raten zu 1,6 s, Cremer korrigiert seine Empfehlung um 0,3 s zu einem höheren Nachhalloptimum. Rettinger (1988) rät hingegen bei 20 000 m^3 mit 1,45 s zu einem seiner Empfehlung von 1968 von knapp 1,5 s vergleichbaren Nachhallwert.

Obwohl sich ihre absoluten Werte unterschieden, nehmen Winkler u. Reichardt (1984) und Kinsler u. a. (1982) doch ähnliche Anstiege der Nachhallzeit mit dem Volumen an und grenzen sich damit von den übrigen Kurven ab, die in diesem Punkt ebenfalls vergleichbar sind. Die Nachhallzeiten von etwa 1,7 und 1,6 s entsprechen wiederum den übrigen.

Abbildung 4.12 deutet eine Entwicklung in den Empfehlungen über den Verlauf des betrachteten Zeitraums an. Zwischen 1920 und etwa 1960 gibt es zunächst einen geringen Konsens. Die Empfehlungen bestehen hier jedoch zum Teil aus Kompromissen. Sabine

(1932) und Weisse (1949) geben einen für Sprache und Musik bzw. Oper und Konzert gültigen Bereich an, Bagenal u. Wood (1931) hierfür ein scharfes Optimum. Knudsen (1932, 1931) vermerkt den volumenabhängigen Bereich, welcher das Repertoire von Verdi bis Wagner begünstige, entlang seinem Richtwert für orchestrale Musik. Erst ab den 1960er Jahren werden auch Empfehlungen für den genuinen Opersaal gemacht. Es besteht hier immer noch kein allgemeiner Konsens, im folgenden Verlauf der Zeit nehmen die Empfehlungen jedoch zunehmend einen Bereich zwischen 1,2 und 1,7 s ein. Der mittlere günstige Bereich beträgt 1,3 bis 1,7 s, der Mittelwert über alle Empfehlungen 1.59 s.

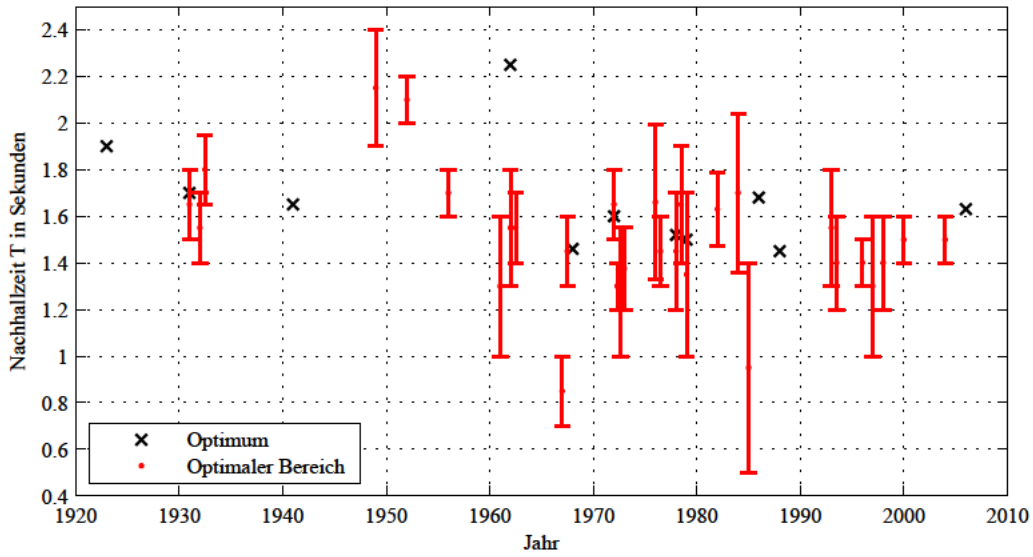


Abbildung 4.12: Empfehlungen günstiger Nachhallzeiten für Opernsäle, V = 20 000 m^3

Kammermusiksäle

Volumenabhängige Empfehlungen der günstigen Nachhallzeit für Kammermusiksäle wurden in den Abbildungen 4.2 bis 4.6 mit aufgenommen, da diese von den Empfehlungen für Konzertsäle zum Teil nicht zu trennen sind. Abbildung 4.13 zeigt diese übersichtliche Anzahl an Nachhallzeitkurven. Das typische Volumen eines Kammermusiksaales wurde mit 10 000 m^3 angenommen, was bereits eine obere Grenze darstellt. Nicht wenige Wissenschaftler gehen von geringeren Volumen zwischen 1 000 m^3 und 5 000 m^3 aus. Problematisch bei der Betrachtung der Empfehlungen ist die Interpretation, ob die für einen Konzertsaal gegebene Volumen-Nachhallzeit-Beziehung auch für einen Kammermusiksaal gelten soll. Nimmt man dies an, so ergeben sich teilweise sehr hohe Nachhallwerte,

wohingegen der Anstieg einiger Kurven oder die bei einem Volumen von 10 000 m³ erhaltenen Werte wiederum für Kammermusiksäle geeignet erscheinen.

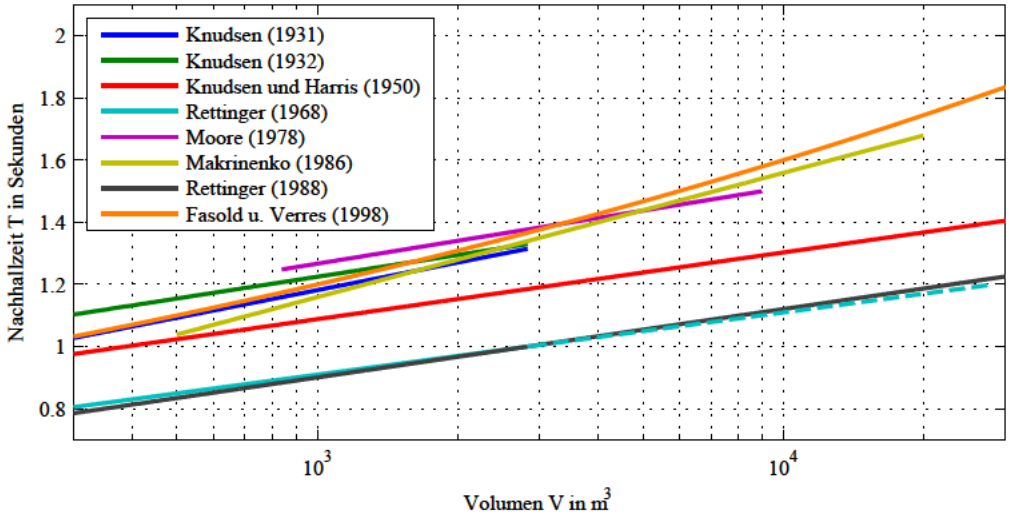


Abbildung 4.13: Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten für Kammermusiksäle zwischen 1931 und 1998

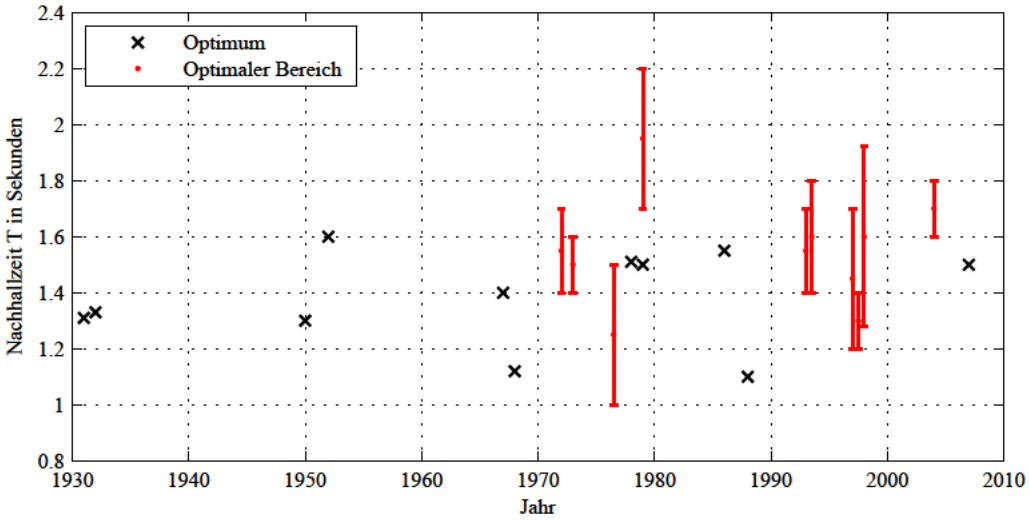


Abbildung 4.14: Empfehlungen günstiger Nachhallzeiten für Kammermusiksäle, V = 10 000 m³

Nach Abbildung 4.13 liegen die Empfehlungen größtenteils in einem schmalen Bereich von weniger als 0,1 s Breite. Die Kurven von Knudsen u. Harris (1950), Rettinger (1968) und Rettinger (1988), welche offensichtlich kürzere Nachhallzeiten bevorzugen, liegen darunter. Insgesamt beträgt der Bereich der Empfehlungen für ein typisches Volumen von 10 000 m³ 1,1 bis 1,6 s. Bemerkenswert ist, dass die frühen Kurven von Knudsen (1931,

1932) über den von ihnen eingenommen Volumenbereichen mit der späten Empfehlung von Fasold u. Veres (1998) gut übereinstimmen.

Abbildung 4.14 ist um einige volumenunabhängige Optima und günstige Bereiche der Nachhallzeit erweitert, die Menge der Empfehlungen zwischen 1931 und 2007 ist dennoch übersichtlich. Der Mittelwert aller Empfehlungen beträgt 1,46 s. Es lässt sich keine Entwicklung ableiten.

4.1.2 Standardisierung

Abbildung 4.15 zeigt die volumenabhängigen Nachhallzeitvorgaben der recherchierten Richtlinien. Man beachte, dass lediglich die Kurven der us-amerikanischen Richtlinien (Heyl, 1926, 1930, 1931; Heyl u. Chrisler, 1938), sowie der TGL 10687/04 (1981) und der DIN 18041 (2004) nachgewiesen werden können, da nur diese Standards im Volltext vorliegen. Über die verbleibenden Kurven können nur Annahmen, begründet durch Verweise in Monographien, gemacht werden. Diese Kurven sind daher gestrichelt dargestellt.

Die Kurve der Standards (Heyl, 1926, 1930) stammt aus einer Mittelung des vom Autor angegeben günstigen Bereichs der Nachhallzeit. Die Vorgabe der Folgeausgaben, (Heyl, 1931; Heyl u. Chrisler, 1938) sind Knudsen (1931) entnommen, die Standards zeigen eine Abbildung aus Knudsens Publikationen (s. Abb. 3.3, S. 22). Die Kurven der ÖNORM B8115 sind Knudsen u. Harris (1950) entnommen. Die Vorgaben der 1982er Ausgabe des DDR-Standards stammen aus (Fasold u. a., 1987) bzw. (Fasold u. Winkler, 1976), die eine entsprechende Abbildung des Standards zeigen (s. Abb. 3.46, S. 103). Die Kurve der TGL 10687/04 (1981) ist der entsprechenden Abbildung nachempfunden, die der DIN 18041 (2004) basiert auf Formel 3.1 (S. 26).

Die nachgewiesenen us-amerikanischen (1926, 1930) und deutschen Kurven weisen unterschiedliche Verläufe über dem Volumen auf, stimmen im oberen Volumenbereich zwischen 10 000 und 20 000 m^3 allerdings gut übererein. TGL und DIN erreichen bei dem typischen Volumen eines Konzertsaales genau 2 s, der US-Standard knapp 2,05 s. Die deutschen Normen nennen Publikationen von Fasold und anderen im Literaturverzeichnis, so dass man davon ausgehen könnte, dass diese Wissenschaftler die Standardisierung beeinflussen. Eine weiterführende Diskussion dieses Aspektes folgt im Abschnitt 4.2.2.

Das sinfonische Optimum der Folgeausgabe der TGL von 1982, liegt mit 2,2 s höher als

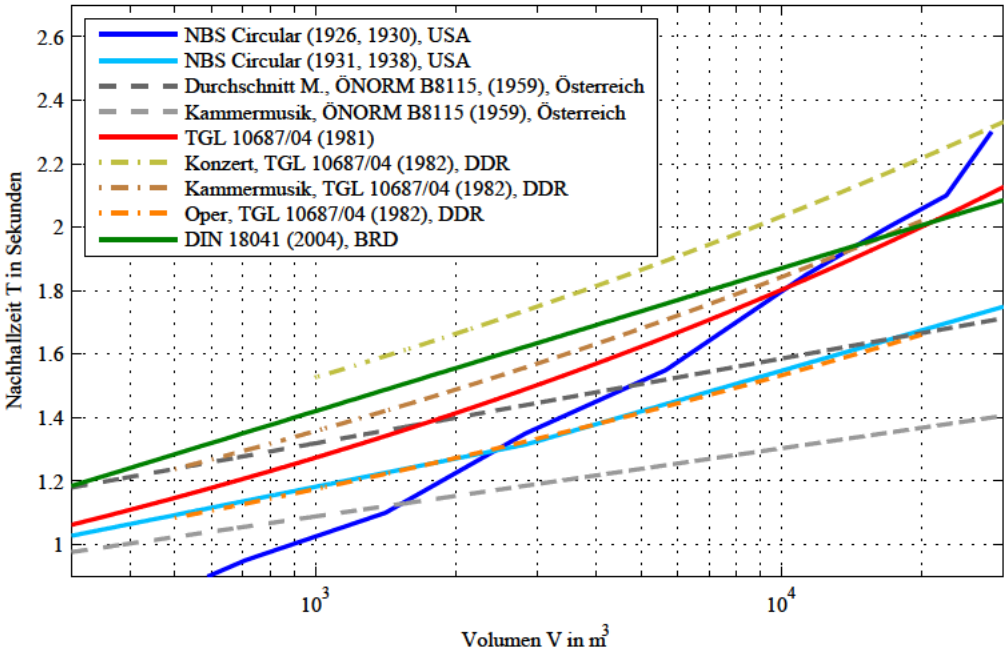


Abbildung 4.15: Richtlinien zur mittleren Nachhallzeit

die übrigen deutschen Optima. Das kammermusikalische Optimum derselben Norm entspricht in etwa dem Optimum für Musik der Vorgängerausgabe und erreicht bei 10 000 m^3 1,8 s. Doch da die Existenz der Norm TGL 10687/04 von 1982 nur durch Abbildungen und Verweise in Publikationen aus der Wissenschaft und nicht mit einem Volltext belegt werden kann, beruht eine Analyse der Kurve nur auf Spekulationen. Gleiches gilt für die restlichen Kurven dieser TGL.

Die zweite Volumen-Nachhallzeit-Beziehung des amerikanischen Standards (1931, 1938) weist dagegen niedrige mittlere Nachhallzeiten über dem gesamten Volumenbereich auf. Wie bereits erwähnt, geht diese, wie auch die Kurven der ÖNORM, auf den Wissenschaftler Knudsen zurück. Knudsen beeinflusst offensichtlich über den Atlantik hinaus die Standardisierung. Man kann an dieser Stelle auf eine Tendenz zu kürzeren Nachhallzeiten schließen, welche im Abschnitt 4.4 ausführlich diskutiert wird.

Bemerkenswert ist des Weiteren eine fast deckungsgleiche Übereinstimmung der Kurve 'Oper' der TGL von 1982 mit derjenigen nach Heyl (1931). Beide Kurven weisen im relevanten Volumenbereich zwischen 10 000 und 20 000 m^3 wiederum eine gute Übereinstimmung zur ÖNORM für durschnittliche Musik auf. Aber da hier zwei von drei Kurven auf Knudsen basieren, ist dies nicht verwunderlich. Dennoch lässt es sich festhalten, dass

Standard-Optima für Konzertsäle eines gewissen Zeitraumes, den die hellblaue Kurve von der einen Seite und die grau-gestrichelte von der anderen her eingrenzen, offenbar der Vorstellung für Opernmusik eines späteren Zeitraumes entsprechen, der durch die TGL von 1982 in etwa gegeben wird. Zu beachten gilt jedoch erneut der Umstand, dass die Kurve der ÖNORM nur durch eine Zitierung von Bruckmayer (1962) belegt werden kann.

4.2 Frequenzverlauf der Nachhallzeit

4.2.1 Empfehlungen aus der Wissenschaft

Die ersten Publikationen, die sich mit dem Verlauf der Nachhallzeit über der Frequenz befassen, diskutieren mehrere an physikalischen oder gehör-psychologischen Aspekten orientierte Kriterien.

McNair (1930) rät zu einem Frequenzverlauf der Nachhallzeit, der die Empfindlichkeit des Ohres berücksichtigt. Seine Empfehlung beruht auf dem subjektiv gleichzeitigen Abklingen purer Töne bei einer Lautheit der Darbietung von 73.[13] Dies resutltiert in einem Nachhallzeitfrequenzverlauf, der bereits unterhalb von 700 Hz zu tiefen Frequenzen hin und oberhalb von 5 kHz zu hohen Frequenzen ansteigt. Bei 125 Hz erreicht die Nachhallzeit so das etwa 1,6-fache ihres mittleren Wertes.

Knudsen (1932) diskutiert mehrere Frequenzverläufe der Nachhallzeit und verwirft eine frequenzunabhängige und eine mit der Frequenz steigende Nachhallzeit. Knudsen spricht sich stattdessen für eine Frequenzcharakteristik aus, mit der alle Freuqenzkomponenten der Darbietung zugleich in die Unhörbarkeit (inaudibility) abklingen. Dies führt wiederum zu einem Anstieg der tiefen und hohen Tonlagen, im Gegensatz zu McNairs Kriterium jedoch unterhalb von 500 Hz zu tiefen und oberhalb von 2 kHz zu hohen Frequenzen.

Rettinger (1934) schlägt hingegen vor, die Nachhallzeit müsse der Wahrnehmbarkeitsunterschiedsschwelle der Frequenz folgen. Dies führt ebenfalls zu einem Anstieg zu tiefen Frequenzen. Zu hohen Frequenzen zwischen etwa 1 und 4 kHz ergibt sich nach seinen Ausführungen eine Absenkung der Nachhallzeit.

Diese sehr genau bestimmten Nachhallzeitverläufe werden in Abbildung 4.16 gezeigt.

[13] Eine Einheit der Lautheit gibt McNair über den gesamten Text der Publikation nicht an.

Die Verläufe wurden grafisch aus den Abbildungen der entsprechenden Publikationen bestimmt und normiert, so dass sie bei 500 Hz den Wert 1 annehmen.

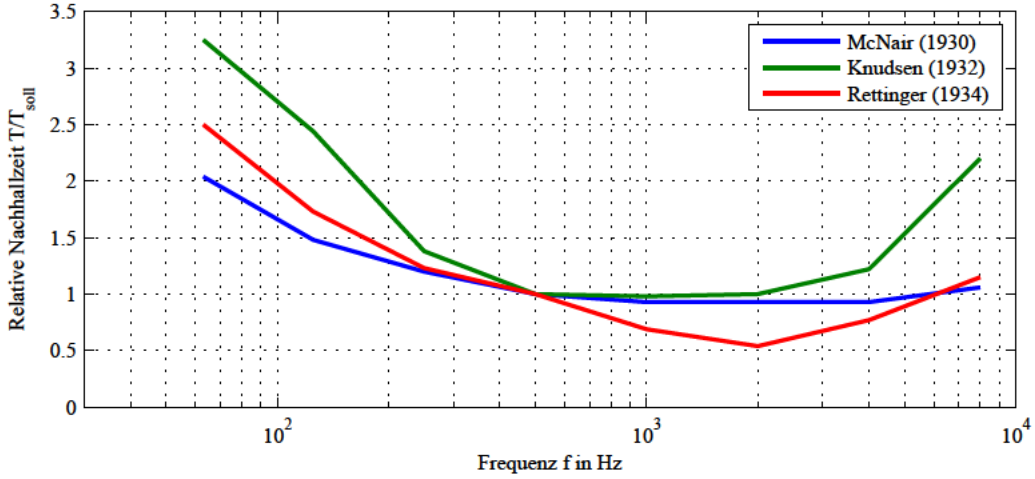


Abbildung 4.16: Vorgeschlagene Nachhallzeitfrequenzverläufe der frühen 1930er Jahre nach McNair (1930), Knudsen (1932) und Rettinger (1934)

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die verschiedenen Annahmen der drei Wissenschaftler zwar prinzipiell zu einem Anstieg der hohen und tiefen Frequenzen im Nachhallzeitverlauf führen, dass diese Anstiege jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Die Publikationen der folgenden Zeit orientieren sich an diesen ersten Versuchen. Übereinstimmung herrscht darüber, dass die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin steigen muss. Ein Teil der Publikationen liefert hierzu Grafiken, aus denen die Stärke des Anstiegs hervorgeht, ein anderer Teil bemerkt dies im Fließtext mit oder ohne einer Frequenzwertangabe. Dabei stellt es natürlich einen Unterschied dar, welche Oktave oder Frequenz benannt wird, ob 63 oder 125 Hz. Einige Publikationen geben ein variables Verhältnis der Nachhallzeit tiefer oder hoher Frequenzen an. Die Stärke des Anstiegs zu tiefen Frequenzen hängt dabei, wie der mittlere Nachhallwert selbst, vom Volumen des Aufführungsraumes ab. Bei 20 000 m^3 ergeben in diesen Fällen zum starren Verhältnis vergleichbare Werte. Maxfield u. Potwin (1940) empfehlen bei 128 Hz das 1,55-fache (1,95 bei 64 Hz), Rettinger (1947) rät bei 100 Hz zur 1,65-fachen Nachhallzeit (2,0 bei 50 Hz), Olson (1967) zur 1,4-fachen (1,65 bei 50 Hz). Im Mittel beträgt der geforderte Nachhallzeitanstieg bei 125 Hz das etwa 1,5-fache, wobei viele Publikationen eine Toleranz vom 1 bis 1,5-fachen angeben, sei es im Fließtext oder in einer Grafik.

Darüber hinaus berichten einige Publikationen von einem europäisch-amerikanischen oder

deutsch-amerikanischen Unterschied, was die Stärke des Anstiegs, den Frequenzwert, ab dem die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin ansteigen soll sowie einen Anstieg zu hohen Tonlagen betrifft.

Winckel (1955) vergleicht amerikanische und deutsche Auffassung über die Nachhallzeit und kommt zu dem Schluss, dass der Tiefenanstieg der Nachhallzeitkurve Konsens sei, Deutsche auf einen Anstieg unterhalb von 250 Hz plädierten, wohingegen Amerikaner sich für eine Startfrequenz dieses Anstieges bei etwa 700 Hz aussprächen.[14] In Amerika werde des Weiteren ein Anstieg zu hohen Frequenzen gefordert.

Barron (1993) kommentiert diesen Unterschied mit: „In this respect there is something of an Atlantic divide, with Americans considering that one cannot have too much bass, while some consultants in Europe have striven for a flat characteristic with music.“ (Barron, 1993, S. 29). Barron schließt sich der amerikanischen Meinung an.

Die Angaben der betrachteten Publikationen bestätigen beide Sachverhalte, Winckels Abbildung zumindest darin, dass nach amerikanischen Geschmack der Nachhallzeitanstieg bei einer höherer Frequenz erfolgt, als nach deutscher Auffassung. In amerikanischen Veröffentlichungen wird der Anstieg vorwiegend ab bereits 500 Hz gefordert, in deutschen hingegen ein solcher ab 250 Hz, wobei hier (Reichardt, 1952) die erste Publikation darstellt, die dies befürwortet. Zuvor rät Weisse (1949) zu einem Anstieg nach amerikanischem Vorbild (Weisse, 1949, S. 63).[15]

Mit einen Blick auf den von Barron (1993) empfohlenen Anstieg wird ersichtlich, dass der 500 Hz-Startwert nicht ein ausschließlich amerikanisches Phänomen ist. Der Deutsche Kuttruff (2000) erkennt darin gar einen allgemeinen Konsens. Barrons Beobachtung findet Bestätigung darin, dass keine amerikanische Publikation einen konstanten Frequenzverlauf der Nachhallzeit von Konzertsälen empfiehlt, wohingegen Békésy (1934a) auf europäischer Seite sich für einen solchen frequenzunabhängigen Verlauf ausspricht, dies allerdings auf kleine Räume bezieht und die Möglichkeit einer frequenzabhängigen Nachhallzeit großer Räume nicht ausschließt (Békésy, 1934b). Cremer (1961) stützt sich auf die Akustik anerkannter Säle, in denen die Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen hin konstant sei oder gar sinke und rät zu einem möglichst gleichmäßigen Frequenzverlauf. Meyer (1972) befürwortet hingegen einen Anstieg der Nachhallzeit in Konzertsälen, aber einen konstanten Verlauf oder Abfall in Opernsälen. Cremer u. Müller (1978) empfehlen für

[14] Vergleiche mit Abb. 3.21, S. 54.

[15] Nach Weisse betrage die Nachhallzeit bei 256 Hz das 1,15-fache des mittleren Wertes.

weniger als 11 000 m^3 fassende Räume eine frequenzunabhängige Nachhallzeit, für andere eine mit der Frequenz fallende Nachhallzeit.[16] Schmidt u. Reichardt (1984) erwägen in Opernsälen einen konstanten Verlauf. Die Frage der optimalen Nachhallkurve wird in Europa scheinbar differenzierter betrachtet.

Ein Anstieg der Nachhallzeit bei hohen Frequenzen wird ausschließlich von amerikanischen Publikationen gefordert. Die Dämpfungseigenschaften der Luft beeinflussen den Verlauf in den hohen Tonlagen jedoch stärker, als es dem akustischen Berater möglich wäre. Und so stellt dies mit einem Verweis auf McNair (1930), Knudsen (1932) und Rettinger (1934) einen anfänglichen Trend dar, der zwar im Verlauf der Zeit von einzelnen Publikationen immer wieder befürwortet wird, in gegenwärtigen aber nicht anzutreffen ist. Winckel hält diesen Anstieg mit einem Verweis auf die Nachhallkurve der alten Berliner Philharmonie für nicht 'entscheidend' (Winckel, 1950, S. 499) und spricht sich dagegen aus, „denn eine „Verbesserung“ nach den Höhen hin liegt nicht im Sinne des Klangbildes der damaligen Komponisten, da hierbei nichtbeabsichtigte emotionale Wirkungen ausgelöst werden.“ (Winckel, 1958, S. 52). Er empfiehlt im Kontrast dazu einen oberhalb von 2 kHz fallenden Nachhallzeitverlauf. Der allgemeine Konsens im Verlauf zu den Höhen besteht darin, dass der Abfall der Nachhallzeit ab etwa 2 kHz sowie ein konstanter Verlauf als möglich erachtet werden.

Der Unterschied zwischen amerikanischen und deutsch-europäischen Nachhallverläufen lässt sich abschließend damit zusammenfassen, dass erstere einen Anstieg unterhalb von 500 Hz bis auf das etwa 1,5-fache, letztere einen solchen unterhalb von 250 Hz bis auf das etwa 1,3-fache der mittleren Nachhallzeit bei 125 Hz aufweisen. Es besteht der minimale Konsens der Anhebung der Nachhallzeit tiefer Frequenzen.

4.2.2 Standardisierung

Zum Verlauf der Nachhallzeit über der Frequenz geben nur die Normen TGL 10687/04 (1981) und DIN 18041 (2004) Richtwerte an. Letztere schließt Räume mit besonderen akustischen Anforderungen, mit denen sich diese Arbeit befasst, jedoch aus. Dennoch gibt die Norm einen Verlauf an, der den Empfehlungen der Wissenschaft auf deutscher Seite entspricht. Beide Standards geben einen identischen Verlauf vor. Zudem verweist die DDR-Norm auf die Publikation (Fasold u. Winkler, 1976), die DIN-Norm hingegen

[16] zwischen 125 und 2 000 Hz um 0,1 bis 0,2 s pro Oktave

auf (Fasold u. a., 1984) und (Fasold u. Veres, 1998). Den normativen Richtlinien entsprechende Abbildungen sind diesen Publikationen mit einem Verweis auf die TGL-Norm entnehmbar.[17] Durch diese beidseitigen Verweise lässt sich nichts mit Gewissheit darüber aussagen, ob die Vorgaben des DDR-Standards auf Empfehlungen eines Kreises aus Wissenschaftlern um Fasold herum basieren. Da sich die Standardisierung natürlich an den Erkenntnissen der Forschung orientiert, kann man dies zumindest annehmen. Darüber hinaus lässt sich annehmen, dass entweder ein Abgleich der DIN mit der TGL-Norm stattfand oder dass hier wiederum Publikationen von Fasold und anderen den Normungsprozess beeinflussten. Des Weiteren lässt sich die durch die Publikationen Fasolds und anderen begründete Vermutung äußern, dass die weiteren Ausgaben der TGL von 1970 und 1982 den Frequenzverlauf der Nachhallzeit entsprechend der 1981er Ausgabe regeln.

Die Nachhallzeitkurve, wie sie von beiden Normen angegeben werden, zeigt Abbildung 4.17 (linke Y-Achse). Daraus wird ein mittlerer Anstieg der Nachhallzeit unterhalb von 250 Hz bis auf das 1,25-fache bei 125 Hz (1,45 bei 63 Hz), ein optionaler Abfall der Nachhallzeit oberhalb von 2 kHz sowie eine Toleranz über die gesamte Nachhallkurve von ±20% ersichtlich. Verknüpft man diesen Frequenzgang der Nachhallzeit mit den von beiden Normen für das Volumen von 20 000 m³ vorgegebenen mittleren Richtwert von 2 s, so ergeben sich die Nachhallwerte, wie sie von der rechten Y-Achse der Abbildung 4.17 abgelesen werden können.

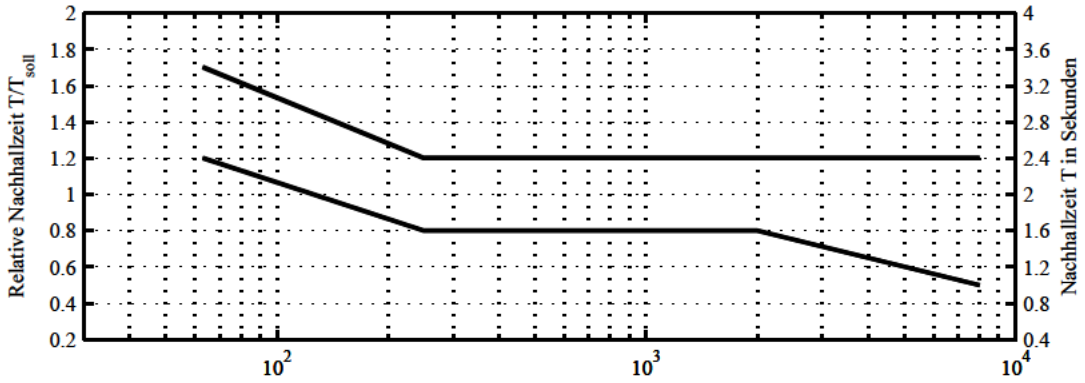


Abbildung 4.17: Frequenzverlauf der Nachhallzeit T/T_{soll} (linke Y-Achse) und eines Konzertsaales mit V = 20 000 m³ (rechte Y-Achse) nach TGL 10687/04 (1981) und DIN 18041 (2004)

[17] (Fasold u. Veres, 1998) verweisen nicht auf den DDR-Standard.

4.3 Sonstige raumakustische Kriterien

In den folgenden Unterkapiteln werden die Empfehlungen und Vorgaben der weiteren raumakustischen Parameter ausgewertet, soweit es die Daten zulassen. Ein Unterschied zur Gliederung der Abschnitte 4.1 und 4.2 besteht darin, dass Standardisierung und Empfehlungen pro Parameter in einem Abschnitt behandelt werden. Dies ist sinnvoll, da normative Regelungen der Parameter nur durch einen Standard bestehen (DIN EN ISO 3382-1, 2009) und somit keine Vergleichsmöglichkeiten gegeben sind. Ein direkter Vergleich zwischen den darüber hinaus wenigen Empfehlung der Wissenschaft und der Normung wird angestrebt.

4.3.1 Deutlichkeit D und Klarheitsmaß für Sprache C_{50}

Der gesammelte Datensatz der Empfehlungen zur Deutlichkeit D und zur korrespondierenden Größe, dem Klarheitsmaß C_{50} für Sprache, ist übersichtlich. Dies lässt sich mit der geringen Relevanz der Maße für raumakustische Bedingungen musikalischer Aufführungsräume erklären. Hierfür wird das Klarheitsmaß C_{80} verwendet, welches die Grenze zwischen dem förderlichen frühen Reflexionsschall und dem späten Nachhall anstelle von 50 auf 80 ms festlegt. Unter Wissenschaftlern und raumakustischen Beratern besteht allgemeiner Konsens, dass diese Grenze die Eigenschaften und subjektive Wahrnehmung musikalischer Darbietungen besser berücksichtigt.

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick der Empfehlungen von D und C_{50} mit Angabe der Quellen inklusive dem von der DIN EN ISO 3382-1 (2009) empfohlenen üblichen Bereich. Die D-Werte wurden in C_{50}-Werte umgerechnet.[18] Es gilt zu beachten, dass Ahnert u. Tennhardt (2008) ihre Angaben auf die Verständlichkeit von Sprache, Beranek u. Schultz (1965) und Gottlob (1973) sich hingegen auf musikalische Darbietungen beziehen. Die Angabe von Beranek u. Schultz (1965) wurde aus den von ihnen als akzeptabel betrachteten Werten bei 500 und 1 000 Hz gemittelt. Die Werte von Meyer u. Thiele (1956) stellen weniger eine Empfehlung als übliche Deutlichkeitswerte von Zuschauerplätzen dar, die von Tonmeistern überwiegend für die Mikrofonierung bei Aufnahmen benutzt wurden.

Wie Tabelle 4.1 zeigt, orientiert sich die untere Grenze des üblichen Bereichs der DIN EN ISO 3382-1 (2009) zum einen an den für musikalische Darbietungen festgestellten

[18] Ahnert u. Tennhardt (2008) geben einen C_{50}-Wert an, welcher umgekehrt in einen D-Wert überführt wurde.

oder empfohlenen niedrigen Werten in der Größenordnung von D = 0,3. Durch die obere Grenze von D = 0,7 wird zum anderen die Sprachverständlichkeit entsprechender Darbietungen sichergestellt, soweit es durch diese Größe möglich ist.

Tabelle 4.1: Empfehlungen für Deutlichkeit D und Klarheitsmaß für Sprache C_{50}

Quelle	**Deutlichkeit D**	**Klarheit C_{50}**
Meyer u. Thiele (1956)	0,38 bis 0,76	-2,12 bis 5 dB
Beranek u. Schultz (1965)	0,26 bis 0,32	-4,54 bis -3,27 dB
Gottlob (1973)	0,34	-2,88 dB
Schmidt u. Reichardt (1984)	> 0,5	> 0 dB
Fasold u. Stephenson (1993)	> 0,5	> 0 dB
Ahnert u. Tennhardt (2008)	> 0,39	> -2 dB
DIN EN ISO 3382-1 (2009)	0,3 bis 0,7	-3,67 bis 3,67 dB

4.3.2 Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient IACC

Der Standard DIN EN ISO 3382-1 (2009) besagt, es bestehe zum IACC noch kein allgemeiner Konsens der Wissenschaft. Dies betreffe die Zeitgrenzen der Integration, sowie die Auswahl der Frequenzbereiche. Man kann dennoch festhalten, dass ein ungefährer Konsens in der Unterscheidung zwischen dem frühen und späten IACC oder der kompletten Auswertung der Impulsantwort besteht. Die Zeitgrenzen hierfür basieren auf denselben Grenzen, die für das Klarheitsmaß oder die Seitenschallgrade festgelegt werden (80 ms). Bei der Auswahl der Frequenzbereiche wird oftmals auf Beranek verwiesen (Gade, 2007; Ahnert u. Tennhardt, 2008), der den frühen IACC über die Oktaven zwischen 500 und 2 000 Hz mittelt. Des Weiteren besteht Übereinstimmung darüber, dass der frühe IACC in den Zeitgrenzen zwischen 0 und 80 ms möglichst klein zu halten ist, um eine hohe Diffusität oder Räumlichkeit des Schallfeldes zu erreichen. Für den Kammermusiksaal lässt sich auf Grundlage einer Empfehlung zum IACC und im Vergleich zu den Seitenschallgraden aussagen, dass eine geringere Räumlichkeit erwünscht ist. Abbildung 4.18 liefert eine Übersicht der Empfehlungen über der Zeit, Tabelle 4.2 führt diese mit Angabe der Quellen auf. Wenn kein Musikgenre angegeben wird, bezieht sich der Wert auf sinfonische Konzertsäle. Der Standard DIN EN ISO 3382-1 (2009) gibt keinen üblichen Bereich des IACC an.

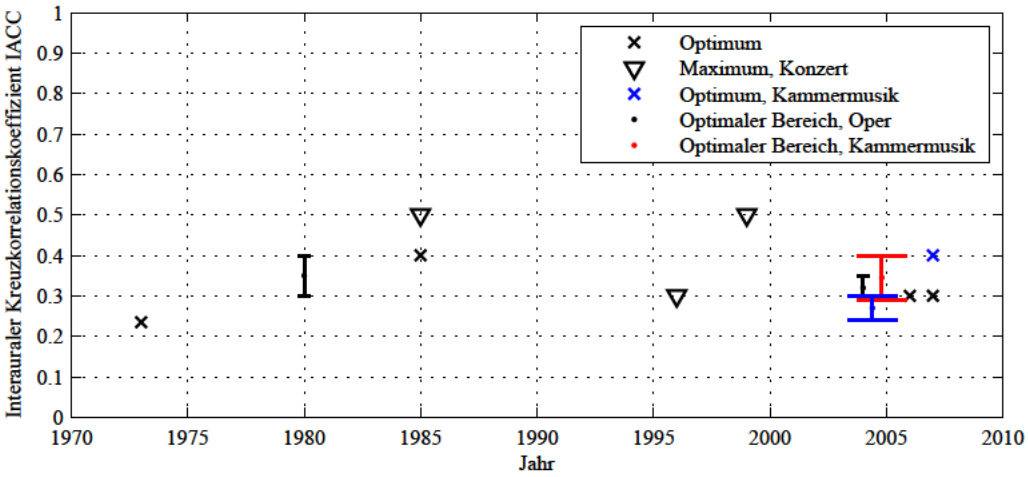


Abbildung 4.18: Günstige Bereiche, Maxima und Optima des Interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten IACC

Tabelle 4.2: Empfehlungen zum interauralen Kreuzkorrelationskoeffiezienten IACC

Quelle	IACC	Bemerkung
Gottlob (1973)	0,23	
Kohlrausch u. Alrutz (1980)	0,30 bis 0,40	
Ando (1985)	<0,5	für eine einzelne Schallquelle auf der Bühne
Ando (1985)	0,40	Unterste Grenze der Variation im Versuch
Beranek (1996)	<0,30	
Siebein u. Kinzey (1999)	<0,50	
Beranek (2004)	0,29 bis 0,35	
Beranek (2004)	0,24 bis 0,30	Kammermusik
Beranek (2004)	0,29 bis 0,40	Oper
Long (2006)	0,30	
Gade (2007)	0,30	
Gade (2007)	0,40	Kammermusik

4.3.3 Schwerpunktzeit t_S

Die Empfehlungen zur Schwerpunktzeit für Konzertsäle orientieren sich an einer oberen Grenze von 150 ms. Abdel Alim (1973) leitet dem Zusammenhang zwischen Schwerpunktzeit und Klarheitsmaß einen Bereich von 97 bis 131 ms ab. Lehmann (1976) rät

zu einer oberen Grenze von 140 ms. Eine größere Schwerpunktzeit deutet auf einen für sinfonische Konzerte zu großen Energieanteil des diffusen Nachhalls hin, eine geringere Transparenz oder Klarheit des Schallfeldes ist die Folge. Für Kammermusik und Oper sind kleinere Schwerpunktzeiten von maximal 100 bzw. 90 ms erwünscht, wie die Empfehlungen von Schmidt u. Reichardt (1984) zeigen.

Die DIN EN ISO 3382-1 (2009) empfiehlt einen sehr breiten üblichen Bereich der Schwerpunktzeit von 60 bis 260 ms. Dies kann mit den recherchierten Empfehlungen aus der Wissenschaft nicht erklärt werden. Selbst die in Abbildung 4.19 nicht aufgeführte Empfehlung von 120 bis 180 ms von Schmidt u. Reichardt (1984) für Orgelmusik und Oratorium liegt weit unterhalb der oberen Grenze. Der Erwartungswert der Schwerpunktzeit[19] $t_{S,exp} = \frac{T}{13.8}$ lässt Rückschlüsse auf eine den Grenzen entsprechende Nachhallzeit zu (Formel 9.10 Gade, 2007, S. 308). Durch Umstellung der Formel und Einsetzen der Grenzwerte erhält man Nachhallzeiten zwischen 0,82 und 3,59 s, die diesem üblichen Bereich der Schwerpunktzeit in etwa entsprechen. Dies lässt vermuten, dass Aufführungsräume mit geringen Nachhallzeiten um etwa 1 s, wie die Opernhäuser in Mailand oder Paris (Meyer, 1972, S. 124), und Räume für Oratorium und Orgelmusik oder gar Kirchenmusik mit diesem Bereich berücksichtigt werden sollen. Tabelle 4.3 führt die Empfehlungen auf.

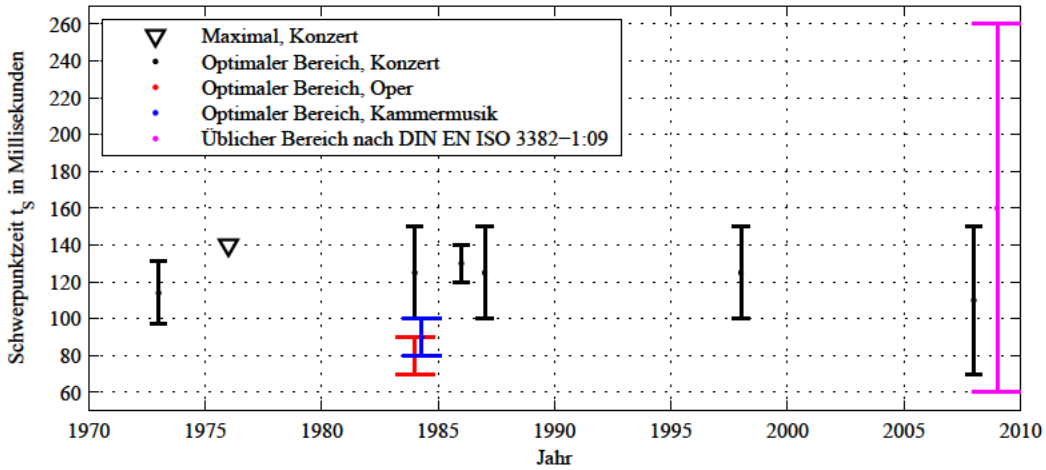


Abbildung 4.19: Günstige Bereiche und Minima der Schwerpunktzeit t_S

[19] Mit $t_{S,exp}$ in Sekunden.

Tabelle 4.3: Empfehlungen zur Schwerpunktzeit t_S

Quelle	**Schwerpunktzeit in ms**	**Bemerkung**
Abdel Alim (1973)	97 bis 131	
Lehmann (1976)	< 140	
Schmidt u. Reichardt (1984)	100 bis 150	
Schmidt u. Reichardt (1984)	80 bis 100	Kammermusik
Schmidt u. Reichardt (1984)	70 bis 90	Oper
Makrinenko (1994)	120 bis 140	bereits 1986 publiziert
Fasold u. a. (1987)	100 bis 150	
Fasold u. Veres (1998)	100 bis 150	
Ahnert u. Tennhardt (2008)	70 bis 150	
ISO 3382-1 (2009)	60 bis 260	

4.3.4 Frühe Abklingzeit EDT

Die Empfehlungen zur frühen Abklingzeit bestehen in der Angabe von Einzahloptima und günstigen sowie akzeptablen Bereichen. Die Empfehlungen sind trotz allgemeiner Akzeptanz der Messgröße übersichtlich, wie Abbildung 4.20 und Tabelle 4.4 zeigen. Die Spanne der Empfehlungen umfasst einen Bereich zwischen 1,7 und 2,6 s. Für Konzertsäle liegt der mittlere optimale Bereich zwischen 1,86 und 2,37 s. Der Mittelwert aller Empfehlungen beträgt 2,16 s.

Die ISO 3382-1 (2009) gibt einen üblichen Bereich der EDT zwischen 1 und 3 s an. Dies stellt, wie bei der Schwerpunktzeit, einen sehr breiten Bereich dar, der über die ermittelten Empfehlungen der Wissenschaft hinausgeht. Möglicherweise ist dies damit zu begründen, dass die frühe Abklingzeit über den Zuschauerbereich im Vergleich zur Nachhallzeit stark variiert. Eine Entsprechung von Nachhall- und EDT-Werten ist darüber hinaus nicht gegeben, wie Publikationen zeigen, die sowohl günstige Bereiche der Nachhallzeit, als auch der frühen Abklingzeit empfehlen. Jordan (1981) nennt bspw. akzeptable Werte der Nachhallzeit zwischen 1,4 und 2,8 s und berichtet, dass dieser Bereich für die EDT mit 1,8 und 2,6 s schmaler ausfalle. Beranek (1996) gibt das Optimum der Nachhallzeit zwischen 1,8 und 2,0 s an, wohingegen er für die EDT 2,0 bis 2,3 s empfiehlt. Nach Makrinenko (1994) allerdings stimmten empfohlene Bereiche für Nachhallzeit und EDT mit 1,7 bis 2,3 s überein. Barron (1993) gibt ebenfalls dieselben günstigen Bereiche von Nachhallzeit und früher Abklingzeit an. Der Großteil der Publikationen nennt dennoch Bereiche

der EDT, die mindesten 0,1 s über den günstigen Nachhallbereichen liegen und gegebenfalls breiter sind. Der übliche Bereich der ISO 3382-1 (2009) kann des Weiteren auch auf die Berücksichtigung diverser Raumarten vom kleineren Kammermusiksaal bis hin zum großen Konzertsaal oder den verschiedenen akustischen Anforderungen des Repertoires zurückgeführt werden.

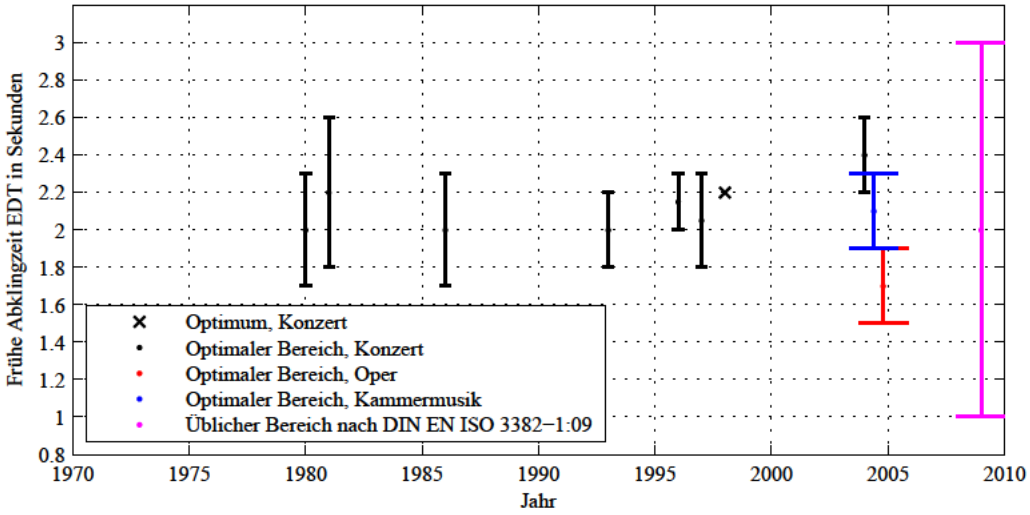


Abbildung 4.20: Günstige Bereiche und Optima der Frühen Abklingzeit EDT

Tabelle 4.4: Empfehlungen zur frühen Abklingzeit EDT

Quelle	**EDT in Sekunden**	**Bemerkung**
Kohlrausch u. Alrutz (1980)	1,7 bis 2,3	
Jordan (1981)	1,8 bis 2,6	
Makrinenko (1994)	1,7 bis 2,3	bereits 1986 publiziert
Barron (1993)	1,8 bis 2,2	
Beranek (1996)	2,0 bis 2,3	
Templeton (1997)	1,8 bis 2,3	
Fasold u. Veres (1998)	2,2	
Beranek (2004)	2,2 bis 2,6	
Beranek (2004)	1,9 bis 2,3	Kammermusik
Beranek (2004)	1,5 bis 1,9	Oper
ISO 3382-1 (2009)	1,0 bis 3,0	

4.3.5 Klarheitsmaß für Musik C_{80}

Zum Klarheitsmaß lassen sich aus der Literatur die meisten Angaben gewinnen. Die Empfehlungen sind vielfältig. Die gesammelten Daten unterscheiden zwischen dem Repertoire, orchesternahen und -fernen Plätzen, Opern-, Kammermusik- und Konzertsälen, optimalen Bereichen und Werten, minimalen Werten sowie akzeptablen Bereichen und Werten. Dies macht eine gemeinsame Auswertung in Form einer verständlichen Abbildung unmöglich.

Abbildung 4.21 gibt einen Überblick über empfohlene günstige Bereiche des Klarheitsmaßes sowie minimaler und optimaler Werte ohne weitere Einschränkung hinsichtlich einer Orchesternähe oder des Repertoires. Darin stellen die chronologisch ersten minimalen C_{80}-Werte die minimalen brauchbaren Klarheiten für klassische, moderne und romantische Musik nach Abdel Alim (1973) dar.[20] Der optimale Bereich zwischen 1,5 und 6,5 dB stammt aus einer Mittelung der Angaben von Reichardt u. Lehmann (1981) für orchesterferne und -nahe Plätze. Zeitgleiche Empfehlungen innerhalb eines Jahres wurden zur besseren Übersicht etwas verschoben, doch nicht über das Datum der entsprechenden Publikation hinaus. Tabelle A.4 im Anhang A gibt einen Überblick der gesammelten Werte für diese Messgröße.

Eine Entwicklung lässt sich aus den Daten nicht ableiten. Die optimalen Bereiche, welche Reichardt u. Lehmann (1981) nach umfassenden Versuchen für vordere und hintere Plätze fanden, wurden oft zitiert. Der Verfasser der Arbeit hat den Eindruck gewonnen, dass angegebene Bereiche oftmals der Wirklichkeit angepasst werden und die unter Laborbedingungen erhaltenen Optima nicht typisch für den praktischen Konzertbetrieb sind.

Es lässt sich festhalten, dass in Opern- und Kammermusiksälen eine höhere Klarheit erforderlich ist als in Konzertsälen. In Opernsälen steht die Verständlichkeit des Gesanges stärker im Vordergrund, doch das Repertoire zwischen melodiöser und romantischer Oper verlangt einen breiteren Spielraum, der wiederum in Klarheitsmaße mündet, die vergleichbar mit denen für sinfonische Konzerte sind. Obwohl der Begriff der Kammermusik bis ins heutige Konzertwesen eine Wandlung erfahren hat, grenzt dieser sich unter anderem durch eine kleinere Orchesterbesetzung und kleineren Aufführungsräumen vom sinfonischen Konzert ab. Dies und die Art der Kompositionen (Repertoire) begründen die Forderung einer höheren Klarheit als im Konzertsaal.

[20] in dieser Reihenfolge von oben nach unten

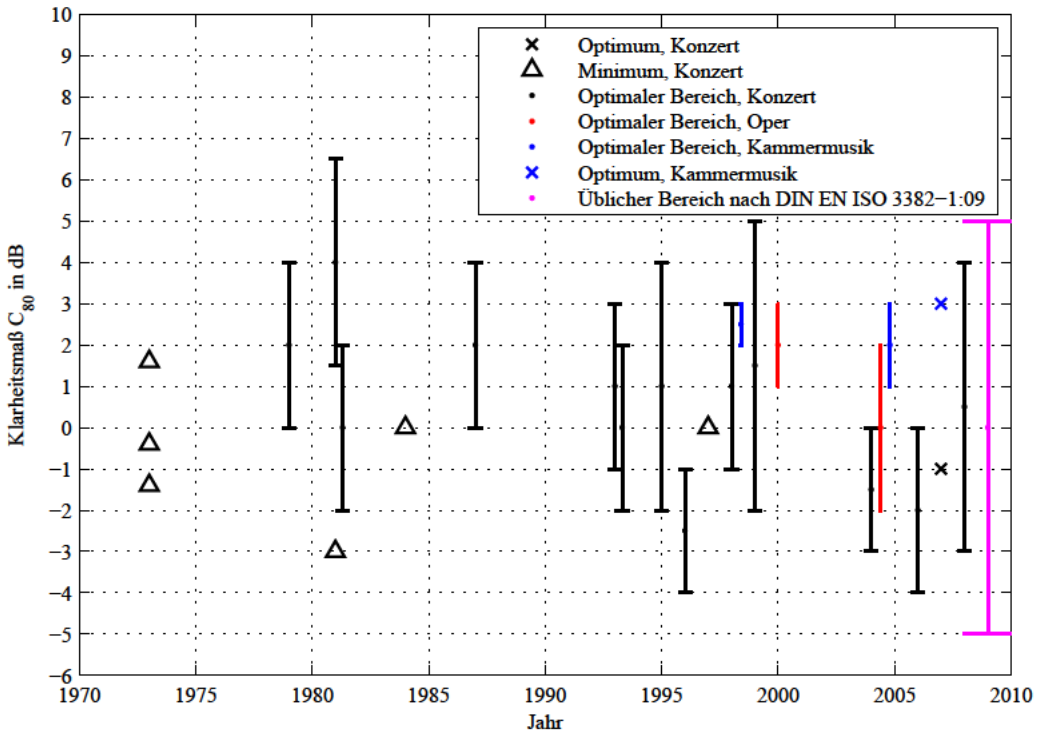


Abbildung 4.21: Günstige Bereiche, Minima und Optima des Klarheitsmaßes, C_{80}

Die DIN EN ISO 3382-1 (2009) empfiehlt einen üblichen Bereich des Klarheitsmaßes zwischen -5 und +5 dB. Dies deckt, wie Abbildung 4.21 zeigt, die empfohlenen Bereiche zum großen Teil ab. Werte kleiner Null berücksichtigen die geringe erforderliche Durchsichtigkeit in bspw. romantischen Sinfonien oder Opernwerken, wohingegen positive Werte die Forderung nach höherer Klarheit und Transparenz des Schallfeldes in kammermusikalischen oder klassischen Werken anerkennen. Die Einteilung des Klarheitsmaßes nach den Durchsichtigkeitskategorien unbrauchbar, Grenzbereich und brauchbar wird durch den Standard nicht vorgenommen. Die Handhabbarkeit dieser Einteilung in der Praxis kann in Frage gestellt werden und möglicherweise ist dies eine Begründung.

4.3.6 Stärkemaß G

Die erste Empfehlung für das Stärkemaß stammt aus der Untersuchung, in der es definiert wird. Lehmann (1976) schlägt ein minimales G von 3 dB vor. Nach Barron (1993) sei dies bereits zu hoch, da britische Konzertsäle diese Bedingung nicht erfüllten. Fasold u. Veres (1998) geben einen breiten Bereich zwischen 1 und 10 dB an und berücksichtigen

damit diverse musikalische Aufführungsräume. Während Beranek (1996) noch einen relativ schmalen Bereich für Konzertsäle angibt, empfiehlt er 2004 für je Kammermusik, Oper und Konzert auf der Grundlage der Beurteilung eines ausgewählten Expertenkreises und diversen Messdaten entsprechende Bereiche.

In Opernsälen wird ein geringeres Stärkemaß gewünscht, da die Forderung nach Verständlichkeit des Gesangs im Zusammenspiel mit dem Orchester eine obere Grenze des Stärkemaßes vorgibt. Die einzelne Stimme muss trotz eines großen Orchester verständlich bleiben. Zudem spielt das Orchester in einem Graben oder ist gar vollständig, wie im Festspielhaus Bayreuth, von einer Abdeckung verdeckt, so dass sich auf natürlichem Wege eine geringe instrumentale Lautstärke ergibt. Hidaka u. Beranek (2000) geben bspw. für eine Schallquelle auf der Bühne das optimale Stärkemaß mit 1 bis 3 dB an. Für eine Quelle im Orchestergraben empfehlen sie dagegen negative Werte.

Kammermusiksäle weisen durch ihre geringeren Volumen und eine kleinere Quellen-Empfänger-Distanz ein höheres Stärkemaß auf.

Abbildung 4.22 stellt die Empfehlungen zum Stärkemaß über dem Jahr ihrer Veröffentlichung dar. Tabelle 4.5 führt diese auf.

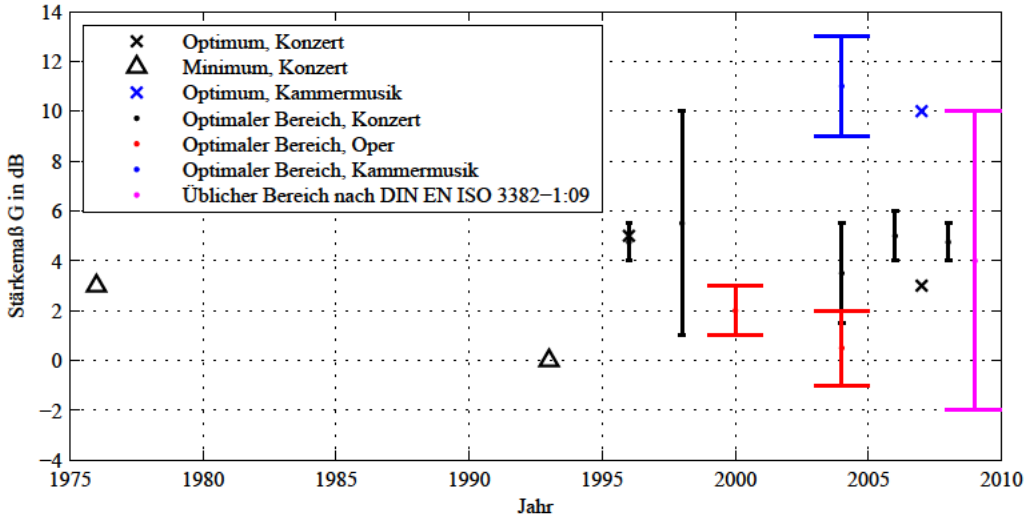


Abbildung 4.22: Günstige Bereiche, Optima und Minima des Stärkemaßes G

Die DIN EN ISO 3382-1 (2009) berücksichtigt die Unterschiede zwischen den Aufführungsräumen mit einem großzügigen Bereich von -2 bis +10 dB. Die untere Grenze ist wahrscheinlich den erläuterten Lautstärkenverhältnissen in Opernsälen geschuldet, wo-

hingegen die obere Grenze möglicherweise die unangenehme subjektive Wirkung hoher Lautstärken berücksichtigt.

Tabelle 4.5: Empfehlungen zum Stärkemaß G

Quelle	Stärkemaß G in dB	Bemerkung
Lehmann (1976)	> 3	
Barron (1993)	> 0	
Beranek (1996)	4 bis 5,5	
Beranek (1996)	5	
Fasold u. Veres (1998)	1 bis 10	
Hidaka u. Beranek (2000)	1 bis 3	Oper, Schallquelle auf der Bühne
Hidaka u. Beranek (2000)	< 0	Oper, Schallquelle im Orchestergraben
Beranek (2004)	1,5 bis 5,5	
Beranek (2004)	-1 bis 2	Oper
Beranek (2004)	9 bis 13	Kammermusik
Long (2006)	4 bis 6	
Gade (2007)	3	
Gade (2007)	10	Kammermusik
Ahnert u. Tennhardt (2008)	4 bis 5,5	
ISO 3382-1 (2009)	-2 bis 10	

4.3.7 Frühe und späte Seitenschallgrade LF, LFC und LG

Zu den Seitenschallgraden konnten fast ausschließlich Empfehlungen für den LF nach Barron ermittelt werden. Eine Ausnahme stellt die Angabe eines typischen Bereichs des LFC nach Kleiner mit 0,2 bis 0,4 dar. Dies ist jedoch keine Empfehlung sondern das Mittel verschiedener Messwerte (Bradley, 1994).

Die Empfehlungen und typischen Werte des LF liegen zwischen 0,1 und 0,4. Die ISO 3382-1 (2009) gibt einen üblichen Bereich der Parameter LF und LFC zwischen 0,05 und 0,35 an. Dies ist zwar ein geringfügiger Unterschied zwischen Konsens der Forschung und Standardisierung, wirft aber trotzdem die Frage auf, weshalb beide Grenzen um 0,05 reduziert in die Standardisierung eingehen. Mit den ermittelten Empfehlungen lässt sich dies nicht erklären.

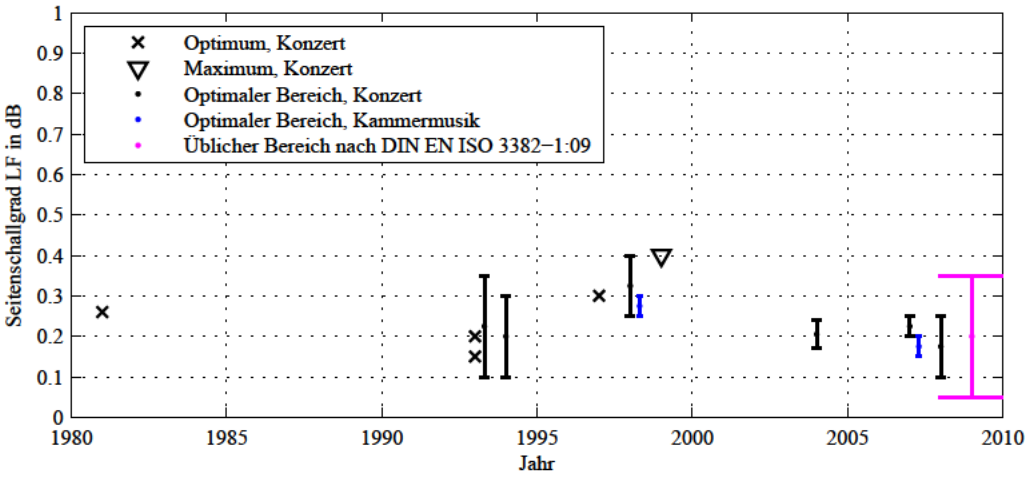


Abbildung 4.23: Günstige Bereiche, Maxima und Optima des Seitenschallgrades LF

Tabelle 4.6: Empfehlungen zum Seitenschallgrad LF

Quelle	**Seitenschallgrad LF**	**Bemerkung**
Jordan (1981)	0,26	
Fasold u. Stephenson (1993)	0,20	
Barron (1993)	0,15	Typischer Wert
Barron (1993)	0,10 bis 0,35	
Bradley (1994)	0,10 bis 0,30	Gemittelte Messwerte
Templeton (1997)	0,30	
Fasold u. Veres (1998)	0,25 bis 0,40	
Fasold u. Veres (1998)	0,25 bis 0,30	Kammermusik
Siebein u. Kinzey (1999)	< 0,40	
Beranek (2004)	0,17 bis 0,24	Messwerte der besten Säle
Gade (2007)	0,20 bis 0,25	
Gade (2007)	0,15 bis 0,20	Kammermusik
ISO 3382-1 (2009)	0,05 bis 0,35	

Der späte Seitenschallgrad besitze nach der ISO 3382-1 (2009) einen üblichen Bereich zwischen -14 und 1 dB. Für den Parameter konnten keine typischen oder günstigen Werte aus den Publikationen extrahiert werden. Tabelle 4.6 zeigt die recherchierten Empfehlungen des LF, Abbildung 4.23 stellt diese über dem Jahr der Publikation dar.

4.3.8 Frühe und späte Unterstützung

Die Empfehlungen zum Parameter Unterstützung sind nicht sehr vielfältig. Es besteht allgemeiner Konsens, dass gute Unterstützung durch Werte des ST1 zwischen -10 und -15 dB gegeben ist. In Kammermusiksälen liegt dieser günstige Bereich etwas höher. Ein minimales ST1 wird für diesen Aufführungsraum von Beranek (2004) mit -12 dB empfohlen, ein optimales von Gade (2007) mit -10 dB.

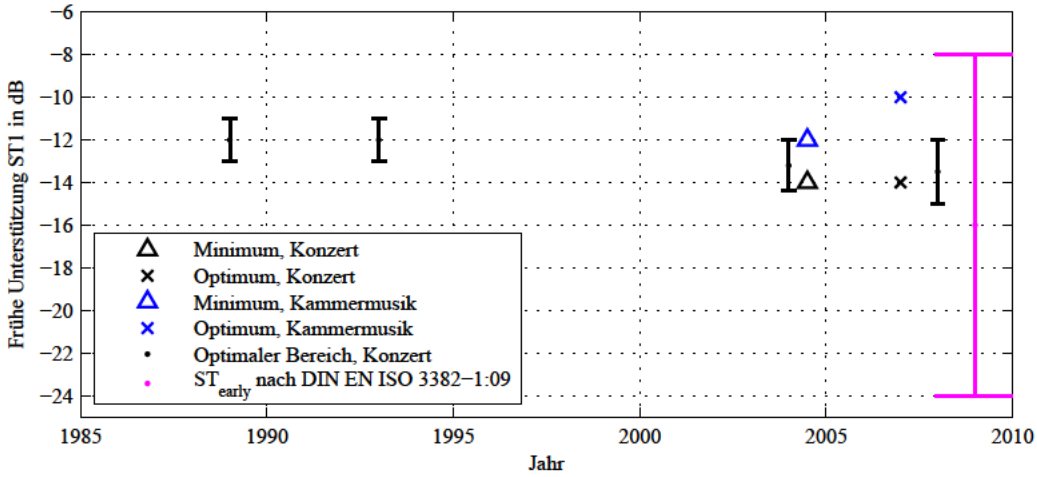


Abbildung 4.24: Günstige Bereiche, Minima und Optima der frühen Unterstützung ST1

Tabelle 4.7: Empfehlungen zur frühen Unterstützung ST1

Quelle	Frühe Unterstützung ST1 in dB	Bemerkung
Gade (1989b)	-13 bis -11	
Barron (1993)	-13 bis -11	Autor des Abschnitts ist Gade
Beranek (2004)	-14,4 bis -12	
Beranek (2004)	> -14	Minimum
Beranek (2004)	> -12	Minimum Kammermusik
Gade (2007)	-14	
Gade (2007)	-10	Kammermusik
Ahnert u. Tennhardt (2008)	-15 bis -12	
ISO 3382-1 (2009)	-24 bis -8	

Die ISO 3382-1 (2009) gibt den üblichen Bereich mit -24 bis -8 dB an. Die obere Grenze

lässt sich auf die höheren Werte in kleineren Sälen (Kammermusik) zurückführen. Die untere Grenze kann mit den Angaben aus der Wissenschaft nicht erklärt werden.

Für den zweiten durch die Standardisierung erfassten Parameter, ST_{late}, konnten keine Empfehlungen aus der Wissenschaft recherchiert werden. Die ISO 3382-1 (2009) gibt für diesen den üblichen Bereich von -24 bis -10 dB an.

Abbildung 4.24 stellt die Empfehlungen über dem Jahr der entsprechenden Veröffentlichung dar, Tabelle 4.7 gibt einen Überblick aller Empfehlungen.

4.4 Veränderung der Vorstellung über eine „gute Akustik“

Mehrere Publikationen deuten eine Geschmacksveränderung in der Vorstellung über gute Hörsamkeit an. Winckel (1950) bemerkt einen Geschmackswandel zu steigender Halligkeit von Rundfunkaufnahmen, der „sich überraschend schnell vollzieht“ (Winckel, 1950, S. 499). Jüngste Aufnahmen seien aus diesem Grunde für Wiederholungssendungen nicht mehr geeignet. Auch Bruckmayer (1962) bemerkt eine zunehmende Halligkeit in Schallplattenaufnahmen und fügt seinen Empfehlungen eine Zusatzangabe hinzu für den Fall, dass sich diese Tendenz auf die Aufführung musikalischer Darbietung übertrage (Bruckmayer, 1962, S. 527).

Zuvor erkennt Knudsen (1954) eine Tendenz zu kürzeren Nachhallzeiten in den vergangenen 25 Jahren: „Over the period under review there has been an unmistakable trend toward shorter reverberation times in nearly all types of rooms.“ (Knudsen, 1954, S. 648) und führt dies auf eine intensive Benutzung und Möglichkeit der Benutzung von Schallabsorptionsmaterialien und dem Einsatz von elektroakustischen Beschallungsanlagen zurück.

Winckels Analyse und Vergleich der im 19. Jahrhundert und nach dem zweiten Weltkrieg erbauten Konzertsäle, fördert kürzere Nachhallzeiten letzterer unter 2 s zutage. Winckel begründet dies mit dem Einfluss der Rundfunkstudioentwicklung, bei der durch die einfachen elektroakustischen Mittel ihrer Anfangszeit, Räume höherer Deutlichkeit und geringer Halligkeit angestrebt wurden. Die rückläufige Tendenz von kürzeren Nachhallzeiten bis zu 1,5 s zu einem Wert von 2 s begrüßt Winckel und führt dies auf den Einfluss der Schallplattenindustrie zurück (Winckel, 1958, S. 53-54).

Meyer (1972) bestätigt diese Geschmacksveränderung der Musiker und Zuhörer zu zu-

nächst kürzeren Nachhallzeiten in den Nachkriegsjahren und entgegengesetzt zu höheren Werten seiner Zeit. Darüber hinaus erkennt Meyer „[...] eine geringfügige Wandlung zu halligeren Räumen [...]“ bei Opernsälen (Meyer, 1972, S. 124).

Fasold u. Winkler (1976) halten eine Tendenz der vergangenen Jahrzehnte zu längeren Nachhallzeiten fest (Fasold u. Winkler, 1976, S. 136) und schließlich konstatiert Reichardt (1979) die Forderung von Nachhallzeiten über 2 s „[...] in zunehmenden Maße [...]“ (Reichardt, 1979, S. 86).

Diese Publikationen fassen einen zweifachen Wandel des Geschmacks zusammen, welcher sich in der gewünschten Transparenz, Deutlichkeit und Klangfülle des Schallfeldes äußert. Die angestrebten Nachhallzeiten von Konzertsaalbauten dienen den Autoren als Indikator dieser Entwicklung. Demnach hätte man nach dem zweiten Weltkrieg eine geringere Klangfülle und höhere Deutlichkeit angestrebt. Wenn diese Entwicklung, wie Winckel (1958) behauptet, mit der Aufnahme- und Rundfunkindustrie zu begründen ist, die zunächst eine geringere Halligkeit der Aufnahmeräume anstrebte, so kann man den Start dieser Entwicklung sicher etwas weiter zurückdatieren, vielleicht auf die Anfänge der Aufnahme- und Rundfunkindustrie, doch hierfür fehlen konkrete Anhaltspunkte. Nach Knudsen beginne diese Entwicklung in den 1920er Jahren. Die gegenläufige Tendenz zu längeren Nachhallzeiten datieren die Publikationen zwischen 1950 und 1980, wobei Winckel 1958 von einer Rückkehr zu einer Nachhallzeit von 2 s und Reichardt 1979 von Nachhallzeiten über 2 s spricht. Bereits 1950 bestehe nach Winckel ein Trend zu halligeren Aufnahmen, welche den Geschmack der Rezeption musikalischer Darbietungen in Aufführungsräumen beeinflusse. Knudsen sieht 1954 hingegen die Tendenz zu kürzeren Nachhallzeiten als noch nicht abgeschlossen an.

Die zweite Begründung der Entwicklung zu kürzeren Nachhallzeiten nach Knudsen steht nicht im Kontrast zur Begründung oberhalb, da die Rundfunkentwicklung als Auslöser oder Einfluss auf die Forderung kürzerer Nachhallzeiten, den intensiven Einsatz von Absorptionsmaterialien als Mittel zur Umsetzung dieser Forderung betrachten werden kann. Diese beiden Aspekte hängen natürlich mit dem Fortschritt beider Wissenschaften, den raumakustischen Erkenntnissen einerseits und den elektroakustischen Entwicklungen andererseits, zusammen. Während man in den Anfängen der Raumakustik durch fehlende Kenntnisse akustischen Defekten durch verstärkte Absorptionsmaßnahmen entgegnete und damit die mittlere Nachhallzeit signifikant senkte, führten neue Erkenntnisse, etwa wie man frühe Reflexionen zur Erhaltung einer gewünschten Transparenz trotz längerer Nachhallzeiten beeinflusst (Maxfield u. Potwin, 1940), zu einer umgekehrten Entwick-

lung.

Dieser beschriebene zweifache Wandel lässt sich mit einem Blick auf Abbildung 4.7 (S. 147) bestätigen, in der sich die Empfehlungen für einen 20 000 m^3 fassenden Konzertsaal zwischen 1920 und 1950 zunächst bis auf einen minimalen Wert von etwa 1,6 s reduzieren, danach wiederum eine umgekehrte Tendenz um einen Nachhallwert von 2 s beschreiben. Deutlicher wird dies in Abbildung 4.9 (S. 149), in der die günstigen Bereiche amerikanischer und europäischer Empfehlungen durch ihren Mittelwert ersetzt wurden. Bis etwa 1960 ist daraus zwar eine größere Streuung der Empfehlungen über der Achse der Nachhallzeit ermittelbar, gleichzeitig orientiert sich die Mehrheit der Empfehlungen dennoch an einem geringeren Nachhallwert. Nach 1960 wird die Streuung zunehmend kleiner und der bevorzugte Nachhallwert orientiert sich gegen die 2 s-Horizontale. Es lässt sich darüber hinaus festhalten, wie es in Abschnitt 4.1.1 (ab S. 147) bereits diskutiert wurde, dass sich die Tendenz zu längeren Nachhallzeiten in Amerika langsamer vollzieht als in Europa, was durch die Überlegungen von Knudsen (1954) unterstützt wird.

4.5 Fazit

Es wurden parallel zur Forschung Normen und Standards zur Raumakustik musikalischer Aufführungsräume zwischen 1926 und 2009 nachgewiesen. Der chronologische Überblick der Standardisierung ist aus Gründen eingeschränkter Recherche- und Erschließungsmöglichkeiten im Rahmen dieser Arbeit zwar nicht vollständig, dennoch wurden wesentliche Normen im deutschsprachigen und internationalen Raum nachgewiesen und erschlossen.

Standards zwischen 1926 und 1982 regeln die mittlere Nachhallzeit und einen geeigneten Frequenzverlauf der Nachhallzeit. Diese orientieren sich zwar an den Erkenntnissen der gesamten Forschung, beruhen jedoch zum Teil auf den Empfehlungen einzelner Wissenschaftler oder Gruppen von Wissenschaftlern, auf die der jeweilige Standard verweist. Natürlich bauen die Erkenntnisse dieser Forscher auf dem jeweiligen Stand der Wissenschaft ihrer Gegenwart auf, der aus der kollaborativen Arbeit vieler entstand, und so fließt gewissermaßen die Forschung der gesamten Wissenschaft und nicht nur einzelner referenzierter Personen in die Standardisierung mit ein.

Gegen Ende des betrachteten Zeitraums um die Jahrhundertwende ist ein enormer Wissensstand um die Raumakustik musikalischer Aufführungsräume und die Mehrdimensio-

nalität ihrer subjektiven Rezeption vorhanden. Die Konsequenz ist eine Ausschließung musikalischer Aufführungsräume mit 'besonderen Anforderungen' von den normativen Regelungen. Die mittlere Nachhallzeit und ihr Frequenzverlauf wird weiterhin vorgegeben, bspw. durch die Norm DIN 18041 (2004), doch die Regeln gelten nicht für Konzert-, Kammermusik- oder Opernsäle.

Gleichzeitig fließen weitere raumakustische Messgrößen in den Standardisierungsprozess mit ein (ISO 3382, 1997). Darüber hinaus werden zu einem späteren Zeitpunkt sogar übliche Größenordnungen der Kriterien genannt (ISO 3382-1, 2009). Eine Festlegung der raumakustischen Bedingungen stellt dies jedoch nicht dar.

Es bleibt die Frage offen, warum die Nachhallzeit musikalischer Aufführungsräume mit besonderen Anforderungen nicht gegebenenfalls mit einem weit auslegbaren Bereich oder Orientierungwerten durch normative Richtlinien geregelt wird, wohingegen doch ein allgemeiner Konsens der Forschung von etwa 1,7 bis 2,2 s besteht und der von bspw. der DIN 18041 gegebene Bereich für solche Räume geeignet wäre. Die Antwort liegt wohl in der Mehrdimensionalität der Wahrnehmung, der untergeordneten Rolle der Nachhallzeit und nicht zuletzt in der Bewahrung eines musikalischen Interpretationsspielraums. Die Wissenschaft hat über ihren Verlauf zunehmend die Vielfalt des musikalischen Repertoires mit unterschiedlichen Empfehlungen zu geeigneten mittleren Nachhallzeiten berücksichtigt. Eine Regelung würde dem entgegenstehen.

Der Hinweis des internationalen Standards ISO 3382-1 auf weitere raumakustische Kriterien inklusive üblicher Bereiche und der Regelung ihrer Bestimmung erscheint als richtiger Ansatz. Dieser trägt zur Vergleichbarkeit raumakustischer Messungen bei, da neben einer einheitlichen Bestimmung der Kriterien auf die Verwendung einer Auswahl von Messgrößen hingewiesen wird, die mit wesentlichen subjektiven Beurteilungskriterien korreliert sind. Dem steht jedoch die Aussage der ISO 3382-1 gegenüber, dass raumakustische Qualität ausschließlich durch die Nachhallzeit festgelegt sei (DIN EN ISO 3382-1, 2009, S. 4). Dies stellt einen Widerspruch zur nachgewiesenen Mehrdimensionalität der subjektiven Wahrnehmung und den oberhalb aufgeführten Überlegungen dar.

Normen und Standards

[DIN 18041 1968] Norm DIN 18041 Oktober 1968. *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*

[DIN 18041 2004] Norm DIN 18041 Mai 2004. *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*

[DIN 52216 1965] Norm DIN 52216 Mai 1965. *Messung der Nachhallzeit in Zuhörerräumen*. – abgedruckt in: DIN-Taschenbuch 35, Beuth-Verlag 1997

[DIN EN ISO 3382 2000] Norm DIN EN ISO 3382 März 2000. *Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Bezug auf andere akustische Parameter*

[DIN EN ISO 3382-1 2009] Norm DIN EN ISO 3382-1 Oktober 2009. *Messung von Parametern der Raumakustik, Teil 1: Aufführungsräume*

[Heyl 1926] HEYL, P. R.: Architectural Acoustics. In: *Circular of the Bureau of Standards* 300 (1926)

[Heyl 1930] HEYL, P. R.: Architectural Acoustics. In: *Circular of the Bureau of Standards* 380 (1930)

[Heyl 1931] HEYL, P. R.: Architectural Acoustics. In: *Circular of the Bureau of Standards* 396 (1931)

[Heyl u. Chrisler 1938] HEYL, P. R. ; CHRISLER, V. L.: Architectural Acoustics. In: *Circular of the Bureau of Standards* (1938)

[ISO 3382 1975] Norm ISO 3382 Dezember 1975. *Messung der Nachhallzeit von Auditorien*

[ISO 3382 1997] Norm ISO 3382 Juni 1997. *Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Bezug auf andere akustische Parameter*

[ISO 3382-1 2009] Norm ISO 3382-1 Juni 2009. *Messung von Parametern der Raumakustik, Teil 1: Aufführungsräume*

[TGL 10687/04 1981] Norm TGL 10687 Oktober 1981. *Schallschutz: Schallabsorption in Räumen*

Literaturverzeichnis

[Fry 1988] Design Targets. In: FRY, Alan (Hrsg.): *Noise Control in Building Services*. Oxford u.a. : Pergamon Press, 1988, Kapitel 4

[Per 2012] *Perinorm*. `http:\www.perinorm.com`. Version: 2012. – Referenz-Datenbank zur Suche und Verwaltung nationaler, europäischer sowie internationaler Normen

[Abdel Alim 1973] ABDEL ALIM, Osny A.: *Abhängigkeit der Zeit- und Registerdurchsichtigkeit von raumakustischen Parametern bei Musikdarbietungen*, Technische Universität Dresden, Diss., 1973

[Ahnert u. Tennhardt 2008] AHNERT, Wolfgang ; TENNHARDT, Hans P.: Raumakustik. In: WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2008, Kapitel 5, S. 181–266

[Ando u. a. 1982] ANDO, Y. ; OKURA, M. ; YUASA, K.: On the preferred Reverberation Time in Auditoriums. In: *Acustica* 50 (1982), Nr. 2, S. 134–140

[Ando 1985] ANDO, Yoichi: *Concert Hall Acoustics*. Berlin u.a. : Springer-Verlag, 1985

[Atal u. a. 1965] ATAL, B. S. ; SCHROEDER, M. R. ; SESSLER, G. M.: Subjective reverberation time and its relation to sound decay. In: *5. International Congress on Acoustics, Liège* Bd. Ib, 1965

[Bagenal 1925] BAGENAL, H.: Designing for musical tone. In: *Journal of the Royal Institute of British Architects* 32 (1925), S. 625–629

[Bagenal u. Wood 1931] BAGENAL, Hope ; WOOD, Alex: *Planning for good Acoustics*. London : Methuen and Co., 1931

[Barron 2000] BARRON, M.: Measured Early Lateral Energy Fractions in concert halls and opera houses. In: *Journal of Sound and Vibration* 232 (2000), Nr. 1, S. 79–100

[Barron u. Marshall 1981] BARRON, M. ; MARSHALL, A. H.: Spatial Impression due to Early Lateral Reflections in Concert Halls: the Derivation of a Physical Measure. In: *Journal of Sound and Vibration* 77 (1981), Nr. 2, S. 211–232

[Barron 1993] BARRON, Michael: *Auditorium acoustics and architectural design*. London : Spon Press, 1993

[Beljajew 1926] BELJAJEW, S.: Akustik großer Räume. In: *Deutsche Bauzeitung* 7 (1926), Nr. 1, S. 70–71

[Beranek 1950] BERANEK, L. L.: Developments in Studio Design. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 38 (1950), S. 470–474

[Beranek 1955] BERANEK, L. L.: Broadcast Studio Redesign. In: *Journal of the Society of Motion Picture and Television Engineers* 64 (1955), S. 550–559

[Beranek 1992] BERANEK, L. L.: Concert hall acoustics-1992. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 92 (1992), Nr. 1, S. 1–39

[Beranek u. Schultz 1965] BERANEK, L. L. ; SCHULTZ, T. J.: Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays. In: *Acustica* 15 (1965), S. 307–316

[Beranek 1962] BERANEK, Leo L.: *Music, Acoustics and Architecture*. New York : John Wiley and Sons, Inc., 1962

[Beranek 1996] BERANEK, Leo L.: *Concert and Opera Halls - How they sound*. Woodbury, NY : Acoustical Society of America, 1996

[Beranek 2004] BERANEK, Leo L.: *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. 2. New York : Springer-Verlag, 2004

[Bies u. Hansen 2003] BIES, David A. ; HANSEN, Colin H.: *Engineering Noise Control; Theory and Practice*. 3. London : Spon Press, 2003

[Békésy 1931] BÉKÉSY, G. v.: Bemerkungen zur Theorie der günstigen Nachhalldauer von Räumen. In: *Annalen der Physik* 5. Folge (1931), Nr. 8, S. 851–873

[Békésy 1934a] BÉKÉSY, G. v.: Über die Hörsamkeit kleiner Musikräume. In: *Annalen der Physik* 5. Folge (1934), Nr. 19, S. 665–679

[Békésy 1934b] BÉKÉSY, G. v.: Über die Hörsamkeit von Konzert- und Rundfunksälen. In: *Elektrische Nachrichten-Technik* 11 (1934), Nr. 11, S. 369–375

[Bradley 1994] BRADLEY, J. S.: Subjective evaluation of new room acoustic measures. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 96 (1994), Nr. 6, S. 3525–3535

[Bradley u. a. 2000] BRADLEY, J. S. ; REICH, R. D. ; NORCROSS, S. G.: On the combined

effects of early- and late-arriving sound on spatial impression in concert halls. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 108 (2000), Nr. 2, S. 651–661

[Bradley u. Soloudre 1995a] BRADLEY, J. S. ; SOLOUDRE, G. A.: The influence of late arriving energy on spatial impression. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 97 (1995), Nr. 4, S. 2263–2271

[Bradley u. Soloudre 1995b] BRADLEY, J. S. ; SOLOUDRE, G. A.: Objective measures of listener envelopment. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 98 (1995), Nr. 5, S. 2590–2597

[Brüel 1951] BRÜEL, Per V.: *Sound Insulation and Room Acoustics*. London : Chapman and Hall, 1951

[Brooks 2003] BROOKS, Christopher N.: *Architectural Acoustics*. Jefferson : McFarland and Company, 2003

[Bruckmayer 1962] BRUCKMAYER, Friedrich: *Schalltechnik im Hochbau*. Wien : Franz Deuticke, 1962

[Cavanaugh u. Wilkes 1999] CAVANAUGH, William J. (Hrsg.) ; WILKES, Joseph A. (Hrsg.): *Architectural Acoustics*. New York u.a. : Jon Wiley and Sons, 1999

[Choi u. Fricke 2005] CHOI, Y.-J. ; FRICKE, F. R.: Evaluation of the relative acoustic performance of two auditoria using measurements and auralization. In: *Acta Acustica united with Acustica* 91 (2005), S. 1051–1062

[Cochrane 1966] COCHRANE, Rexmond C.: *Measures for Progress - A History of the National Bureau of Standards*. National Bureau of Standards; U.S. Departement of Commerce, 1966

[Cowan 2000] COWAN, James: *Architectural Acoustics Design Guide*. New York u.a. : McGraw-Hill, 2000

[Cremer 1961] CREMER, L.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. 2: Statistische Raumakustik*. Stuttgart : Hirzel Verlag, 1961

[Cremer u. Müller 1978] CREMER, Lothar ; MÜLLER, Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*. Bd. 2. 2. Stuttgart : Hirzel Verlag, 1978

[Damaske u. Ando 1972] DAMASKE, P. ; ANDO, Y.: Interaural cross-correlation for multichannel loudspeaker reproduction. In: *Acustica* 27 (1972), Nr. 4, S. 232–238

[Davis u. Kaye 1927] DAVIS, A. H. ; KAYE, G. W. C.: *The Acoustics of Buildings*. London : G. Bell and Sons, 1927

[Doelle 1965] DOELLE, Leslie L.: *Acoustics in Architectural Design*. Ottawa : National Research Council, Canada, Division of Building Research, 1965

[Doelle 1972] DOELLE, Leslie L.: *Environmental Acoustics*. New York u.a. : McGraw-Hill, 1972

[Egan 1972] EGAN, M. D.: *Concepts in Architectural Acoustics*. New York u.a. : McGraw-Hill, 1972

[Egan 1988] EGAN, M. D.: *Architectural Acoustics*. New York u.a. : McGraw-Hill, 1988

[Eichler 1952] EICHLER, Friedrich: *Schall im Hochbau - Bau- und Raumakustik*. Berlin : Verlag Technik, 1952

[Engl 1939] ENGL, Josef: *Raum- und Bauakustik - Ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure*. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft M. B. H., 1939

[Fasold u. a. 1984] FASOLD, W. (Hrsg.) ; KRAAK, W. (Hrsg.) ; SCHIRMER, W. (Hrsg.): *Taschenbuch Akustik, Teil 2*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1984

[Fasold u. Stephenson 1993] FASOLD, W. ; STEPHENSON, U.: Gute Akustik von Auditorien; Planung mittels Rechnersimulation und Modellmeßtechnik. In: *Bauphysik* 15 (1993), Nr. 2, S. 40–49

[Fasold u. a. 1987] FASOLD, Wolfgang ; SONNTAG, Ernst ; WINKLER, Helgo: *Bau-und Raumakustik*. Berlin : VEB Verlag für Bauwesen, 1987

[Fasold u. Veres 1998] FASOLD, Wolfgang ; VERES, Eva: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1998

[Fasold u. Winkler 1976] FASOLD, Wolfgang ; WINKLER, Helgo: *Bauphysikalische Entwurfslehre, Bd. V - Raumakustik*. Berlin : VEB Verlag für Bauwesen, 1976

[Furrer 1942] FURRER, W.: Beitrag zur Akustik von Radio-Studios. In: *Schweizer Archiv* 8 (1942), S. 77–85

[Furrer 1956] FURRER, Willi: *Raum und Bauakustik für Architekten*. 1. Basel und Stuttgart : Birkhäuser, 1956

[Furrer 1961] FURRER, Willi: *Raum- und Bauakustik; Lärmabwehr*. 2. Basel und Stuttgart : Birkhäuser, 1961

[Furrer u. Lauber 1972] FURRER, Willi ; LAUBER, Anselm: *Raum- und Bauakustik; Lärmabwehr*. 3. Basel und Stuttgart : Birkhäuser, 1972

[Gade 1989a] GADE, A. C.: Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: methods and laboratory experiments. In: *Acustica* 69 (1989), Nr. 5, S. 193–203

[Gade 1989b] GADE, A. C.: Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: field experiments and synthesis of results. In: *Acustica* 69 (1989), Nr. 6, S. 249–262

[Gade 1992] GADE, A. C.: Practical Aspects of Room Acoustical Measurements on Orchestra Platforms. In: *Proc. of 14th ICA*. Beijing, 1992. – laut *http://www.icacommission.org/proceedg.html* nicht mehr erhältlich

[Gade 2007] GADE, A. C.: Acoustics in Halls for Speech and Music. In: ROSSING, Thomas D. (Hrsg.): *Springer Handbook of Acoustics*. New York : Springer, 2007, Kapitel 9

[Gottlob 1973] GOTTLOB, Dieter: *Vergleich objektiver akustischer Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen*, Georg-August-Universität zu Göttingen, Diss., 1973

[Hawkes u. Douglas 1971] HAWKES, R. J. ; DOUGLAS, H.: Subjectice acoustic experience in concert auditoria. In: *Acustica* 24 (1971), Nr. 5, S. 235–250

[Hidaka u. Beranek 2000] HIDAKA, T. ; BERANEK, L. L.: Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europ, Japan, and the Americas. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 107 (2000), Nr. 1, S. 368–383

[Jordan 1968] JORDAN, V. L.: Einige Bemerkungen über Anhall und Anfangsnachhall in Musikräumen. In: *Applied Acoustics* 1 (1968), S. 29–36

[Jordan 1969] JORDAN, V. L.: Room acoustics and architectural acoustics development in recent years. In: *Applied Acoustics* 2 (1969), S. 59–81

[Jordan 1970] JORDAN, V. L.: Acoustical Criteria for Auditoriums and their relation to model techniques. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 47 (1970), Nr. 2A, S. 408–412

[Jordan 1980] JORDAN, V. L.: *Acoustical Design of Concert Halls and Theatres*. London : Applied Science Publischers LTD, 1980

[Jordan 1981] JORDAN, V. L.: A group of objective acoustical criteria for concert halls. In: *Applied Acoustics* 14 (1981), S. 253–266

[Keet 1968] KEET, W. de V.: The influence of early lateral reflections on the spatial impression. In: *Reports of the 6th International Congress on Acoustics* Bd. 3E. Tokyo, 1968

[Kinsler u. a. 1982] KINSLER, L. E. ; FREY, A. R. ; COPPENS, A. B. ; SANDERS, J. V.: *Fundamentals of Acoustics*. New York : Jon Wiley and Sons, 1982

[Kinsler u. a. 2000] KINSLER, L. E. ; FREY, A. R. ; COPPENS, A. B. ; SANDERS, J. V.: *Fundamentals of Acoustics*. 4. New York : Jon Wiley and Sons, 2000

[Kleiner 1989] KLEINER, Mendel: A new way of measuring the lateral energy fraction. In: *Applied Acoustics* 27 (1989), Nr. 4, S. 321 – 327

[Knudsen 1954] KNUDSEN, V. O.: Review of architectural acoustics during the past twenty-five years. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 26 (1954), Nr. 5, S. 646–650

[Knudsen 1932] KNUDSEN, Vern O.: *Architectural Acoustics*. New York : Jon Wiley and Sons, 1932

[Knudsen u. Harris 1950] KNUDSEN, Vern O. ; HARRIS, Cyril M.: *Acoustical Designing in Architecture*. New York : Jon Wiley and Sons, 1950

[Knudsen u. Harris 1978] KNUDSEN, Vern O. ; HARRIS, Cyril M.: *Acoustical Designing in Architecture*. 2. New York : American Institute of Physics, 1978

[Knudsen 1931] KNUDSEN, V.O.: Acoustics of music rooms. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 2 (1931), S. 434–467

[Kohlrausch u. Alrutz 1980] KOHLRAUSCH, A. ; ALRUTZ, H.: Subjektive Untersuchungen zur Nachhallzeit und zum Korrelationsgrad. In: *Fortschritte der Akustik*. München : VDE-Verlag, 1980, S. 387–390

[Kürer 1969] KÜRER, R.: Zur Gewinnung von Einzahlkriterien bei Impulsmessungen in der Raumakustik. In: *Acustica* 21 (1969), S. 370–372

[Kürer 1971] KÜRER, R.: Einfaches Messverfahren zur Bestimmung der Schwerpunktzeit raumakustischer Impulsantworten. In: *Proceedings of the 7. International Congress on Acoustics* Bd. 2. Budapest, 1971

[Kuhl 1954] KUHL, W.: Über Versuche zur Ermittlung der günstigen Nachhallzeit grosser Musikstudios. In: *Acustica* 4 (1954), S. 618–634

[Kuhl 1957] KUHL, W.: Optimal Acoustic Design of Rooms for Performing, Listening and Recording. In: *Proceedings of the 2. International Congress on Acoustics*. Cambridge, Massachusetts, USA, 1957, S. 53–58

[Kuttruff 1973] KUTTRUFF, H.: *Room Acoustics*. 1. London : Applied Science Publishers, 1973

[Kuttruff 1978] KUTTRUFF, Heinrich: Gelöste und ungelöste Fragen der Konzertsaalakustik. In: *Vorträge / Rheinisch-Westphälische Akademie der Wissenschaften: Natur-, Ingenieur - u. Wirtschaftswiss. ; N278*. Opladen : Westdeutscher Verlag, 1978

[Kuttruff 2000] KUTTRUFF, Heinrich: *Room Acoustics*. 4. London : Spon-Press, 2000

[Lacatis u. a. 2008] LACATIS, R. u. a.: Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters, 2008

[Lawrence 1970] LAWRENCE, Anita: *Architectural Acoustics*. Amsterdam u.a. : Elsevier Publishing Company, 1970

[Lehmann u. Wilkens 1980] LEHMANN, P. ; WILKENS, H.: Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien. In: *Acustica* 45 (1980), Nr. 4, S. 256–268

[Lehmann 1976] LEHMANN, Peter: *Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen der Hörsamkeit*, Technische Universität Berlin, Diss., 1976

[Lifshitz 1925] LIFSHITZ, S.: Optimum reverberation for an auditoriums. In: *Physical Review* 25 (1925), Nr. 3, S. 391–394

[Lifshitz 1926] LIFSHITZ, S.: Mean intensity of sound in an auditorium and optimum reverberation. In: *Physical Review* 27 (1926), Nr. 5, S. 618–621

[Lifshitz 1932] LIFSHITZ, S.: Acoustic of large auditoriums. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 4 (1932), S. 112–121

[Lifshitz 1936] LIFSHITZ, S.: Apparent duration of sound perception and musical optimum reverberation. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 7 (1936), S. 213–221

[Long 2006] LONG, Marshall: *Architectural Acoustics*. Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2006

[Makrinenko 1994] MAKRINENKO, L. I.: *Acoustics of Auditoriums in Public Buildings*. Woodbury : Acoustical Society of America, 1994

[Marshall u. Klapper 1999] MARSHALL, L. G. ; KLAPPER, D. L.: Acoustical Design: Places for Listening. In: CAVANAUGH, William J. (Hrsg.) ; WILKES, Joseph A. (Hrsg.): *Architectural Acoustics*. New York u.a. : Jon Wiley and Sons, 1999, Kapitel 4

[Maxfield 1948] MAXFIELD, J. P.: The time integral basic to optimum reverberation time. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 20 (1948), Nr. 4, S. 483–486

[Maxfield u. Albersheim 1947] MAXFIELD, J. P. ; ALBERSHEIM, W. J.: An acoustic constant of enclosed spaces correlatable with their apparent liveness. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 19 (1947), S. 71–79

[Maxfield u. Potwin 1940] MAXFIELD, J. P. ; POTWIN, C. C.: Planning functionally for good acoustics. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 11 (1940), S. 390–395

[McNair 1930] MCNAIR, W.: Optimum reverberation time for auditoriums. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 1 (1930), S. 242–248

[Meyer u. Neumann 1967] MEYER, E. ; NEUMANN, E.-G.: *Physikalische und Technische Akustik*. Braunschweig : Friedr. Vieweg und Sohn, 1967

[Meyer u. Thiele 1956] MEYER, E. ; THIELE, R.: Raumakustiche Untersuchungen in zahlreichen Konzertsälen und Rundfunkstudios unter Anwendung neuerer Meßverfahren. In: *Acustica* 6 (1956), S. 425–444

[Meyer 1972] MEYER, Jürgen: *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*. Frankfurt am Main : Verlag das Musikinstrument, 1972

[Meyer 1995] MEYER, Jürgen: *Akustik und Aufführungspraxis*. 3. Frankfurt am Main : Erwin Bochinsky, 1995

[Moore 1978] MOORE, John E.: *Design for good Acoustics and Noise Control*. London : The MacMillan Press, 1978

[Nickson u. Muncey 1953] NICKSON, A. F. B. ; MUNCEY, R. W.: Reverberation times of some australian concert halls. In: *Australian Journal of Applied Science* 4 (1953), S. 186–188

[Nickson u. Muncey 1959] NICKSON, A. F. B. ; MUNCEY, R. W.: The acoustic conditions accepted by listeners in an auditorium. In: *Acustica* 9 (1959), S. 316–320

[NIST 2012] NIST: *National Institute of Standards and Technology*. `http://www.nist.gov/public_affairs/general_information.cfm#`. Version: Mai 2012

[Olson 1967] OLSON, H. F.: *Music, Physics and Engineering*. 2. New York : Dover Publications, 1967

[Olson u. Massa 1939] OLSON, H. F. ; MASSA, F.: *Applied Acoustics*. 2. Philadelphia : P. Blakiston's Son & Co., 1939

[Ormestad u. a. 1960] ORMESTAD, H. J. ; SHANKLAND, R. S. ; BENADE, A. H.: Reverberation time characteristics of Severence Hall. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 32 (1960), Nr. 3, S. 371–375

[Parkin u. a. 1953] PARKIN, P. H. ; ALLEN, W. A. ; PURKIS, H. J. ; SCHOLES, W. E.: The acoustics of the Royal Festival Hall, London. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 25 (1953), S. 246–259

[Parkin u. a. 1979] PARKIN, P. H. ; HUMPHREYS, H. R. ; COWELL, J. R.: *Acoustics, Noise and Buildings*. 4. London : Faber and Faber, 1979

[Parkin u. a. 1952] PARKIN, P. H. ; SCHOLES, W E. ; DERBYSHIRE, A. G.: The reverberation times of ten British concert halls. In: *Acustica* 2 (1952), Nr. 3, S. 97–100

[Reichardt u. a. 1975a] REICHARDT, W. ; ABDELALIM, O. ; SCHMIDT, W.: Definitionen und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietungen. In: *Acustica* 32 (1975), Nr. 3, S. 126–137

[Reichardt u. a. 1974] REICHARDT, W. ; ALIM, O. A. ; SCHMIDT, W.: Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art des Musikmotives, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit. In: *Applied Acoustics* 7 (1974), S. 243–264

[Reichardt u. a. 1975b] REICHARDT, W. ; ALIM, O. A. ; SCHMIDT, W.: Zusammenhang zwischen Klarheitsmaß C und anderen objektiven raumakustischen Kriterien. In: *Zeitschrift für elektrische Informations- und Energietechnik* 5 (1975), S. 144–155

[Reichardt u. a. 1955] REICHARDT, W. ; KOHLSDORF, E. ; MUTSCHER, H.: Die optimale Nachhallzeit für Studioräume. In: *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* 64 (1955), Nr. 1, S. 18–25

[Reichardt u. Lehmann 1981] REICHARDT, W. ; LEHMANN, U.: Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulschalltests. In: *Acustica* 48 (1981), Nr. 3, S. 174–185

[Reichardt 1952] REICHARDT, Walter: *Grundlagen der Elektroakustik*. 1. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, 1952

[Reichardt 1960] REICHARDT, Walter: *Grundlagen der Elektroakustik*. 3. Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, 1960

[Reichardt 1979] REICHARDT, Walter: *Gute Akustik - aber wie?* Berlin : Verlag Technik, VEB, 1979

[Rettinger 1934] RETTINGER, M.: Note on reverberation characteristics. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 6 (1934), S. 51–52

[Rettinger 1988] RETTINGER, M.: *Handbook of Architectural Acoustics and Noise Control*. Tab Books, 1988

[Rettinger 1947] RETTINGER, Michael: *Applied Architectural Acoustics*. Brooklyn,New York : Chemical Publishing Co., Inc., 1947

[Rettinger 1968] RETTINGER, Michael: *Acoustics - Room Design and Noise Control*. New York : Chemical Publishing, 1968

[Sabine 1928] SABINE, P. E.: The acoustics of sound recording rooms. In: *Transactions of the Society of Motion Picture Engineers* 12 (1928), Nr. 35, S. 809–822

[Sabine 1932] SABINE, Paul E.: *Acoustics and Architecture*. New York and London : McGraw-Hill, 1932

[Sabine 1922] SABINE, W. C.: *Collected Papers on Acoustics*. Cambridge : Harvard University Press, 1922

[Schmidt u. Reichardt 1984] SCHMIDT, W. ; REICHARDT, W.: Raumakustische Kriterien für Sprache und Musik. In: FASOLD, W. (Hrsg.) ; KRAAK, W. (Hrsg.) ; SCHIRMER, W. (Hrsg.): *Taschenbuch Akustik, Teil 2*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1984, S. 1188–1207

[Schroeder u. a. 1966] SCHROEDER, M. R. ; ATAL, B. S. ; SESSLER, G. M. ; WEST, J. E.: Acoustical measurements in Philharmonic Hall (New York). In: *Journal of the Acoustical Society of America* 40 (1966), Nr. 2, S. 434–440

[Schroeder u. a. 1974] SCHROEDER, M. R. ; GOTTLOB, D. ; SIEBRASSE, K. F.: Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric

and acoustic parameters. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 56 (1974), Nr. 4, S. 1195–1201

[Schuster u. Waetzmann 1929] SCHUSTER, K. ; WAETZMANN, E.: Über den Nachhall in geschlossenen Räumen. In: *Annalen der Physik* 5. Folge (1929), Nr. 1, S. 671–695

[Shankland 1968] SHANKLAND, R. S.: Quality of reverberation. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 43 (1968), Nr. 3, S. 426–430

[Siebein u. Kinzey 1999] SIEBEIN, G. W. ; KINZEY, B. Y.: Recent Innovations in Acoustical Design and Research. In: CAVANAUGH, William J. (Hrsg.) ; WILKES, Joseph A. (Hrsg.): *Architectural Acoustics*. New York u.a. : Jon Wiley and Sons, 1999, Kapitel 6

[Siebrasse 1973] SIEBRASSE, Karl F.: *Vergleichende subjektive Untersuchungen zur Akustik von Konzertsälen*, Georg-August-Universität zu Göttingen, Diss., 1973

[Somerville 1953] SOMERVILLE, T.: Subjective comparison of concert halls. In: *BBC Quarterly* 8 (1953), S. 125–128

[Somerville 1955] SOMERVILLE, T.: Bemerkungen zu der Arbeit 'W. Kuhl, Über Versuche zur Ermittlung der günstigen Nachhallzeit großer Musikstudios'. In: *Acustica* 5 (1955), S. 99–100

[Stephens u. Bate 1950] STEPHENS, R. W. B. ; BATE, A. E.: *Wave Motion and Sound*. 1. London : Edward Arnold & Co, 1950

[Stephens u. Bate 1966] STEPHENS, R. W. B. ; BATE, A. E.: *Acoustics and vibrational Physics*. 2. London : Edward Arnold, 1966

[Tarnoczy 1954] TARNOCZY, Th.: Raumakustische Verbesserungen des Budapester Statdtheaters. In: *Acustica* 4 (1954), S. 665–671

[Templeton 1997] TEMPLETON, Duncan: Design acoustics. In: TEMPLETON, Duncan (Hrsg.): *Acoustic in the Built Environment - Advice for the design team*. 2. Oxford : Architectural Press, 1997

[Templeton u. Saunders 1987] TEMPLETON, Duncan ; SAUNDERS, David: *Acoustic Design*. London : The Architectural Press, 1987

[Thiele 1953] THIELE, R.: Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen. In: *Acustica* 3 (1953), S. 291–302

[Watson 1923] WATSON, F. R.: *Acoustics of Buildings*. New York : Jon Wiley and Sons, 1923

[Watson 1924] WATSON, F. R.: Acoustics of auditoriums. In: *Journal of the Franklin Institute* 198 (1924), S. 73–83

[Watson 1927] WATSON, F. R.: Acoustics of auditoriums. In: *Architecture* (1927), Mai, S. 251–254

[Watson 1928] WATSON, F. R.: Ideal auditorium acoustics. In: *Journal of the American Institute of Architects* (1928), July, S. 259–267

[Watson 1941] WATSON, F. R.: *Acoustics of Buildings*. 3. New York : Jon Wiley and Sons, 1941

[Weisse 1949] WEISSE, Karlhans: *Leitfaden der Raumakustik für Architekten*. Berlin : Verlag des Druckhauses Tempelhof, 1949

[Wilkens 1977] WILKENS, H.: Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen. In: *Acustica* 38 (1977), S. 10–23

[Wilkens 1975] WILKENS, Henning: *Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen*, Technische Universität Berlin, Diss., 1975

[Winckel 1950] WINCKEL, F.: Konzertfähige Akustik. In: *Funktechnik* 5 (1950), S. 498–499

[Winckel 1955] WINCKEL, F.: Die besten Konzertsäle der Welt. In: *Baukunst und Werkform* 8 (1955), S. 751–757

[Winckel 1962] WINCKEL, F. W.: Optimum acoustic criteria of concert halls for the performance of classical music. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 34 (1962), Nr. 1, S. 81–86

[Winckel 1958] WINCKEL, Fritz: Raumakustische Kriterien hervorragender alter und neuer Konzertsäle. In: *Frequenz* 12 (1958), Nr. 2, S. 50–58

[Winkler u. Reichardt 1984] WINKLER, H. ; REICHARDT, W.: Raumakustische Maßnahmen in Auditorien von Kultur- und Gesellschaftsbauten. In: FASOLD, W. (Hrsg.) ; KRAAK, W. (Hrsg.) ; SCHIRMER, W. (Hrsg.): *Taschenbuch Akustik, Teil 2*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1984, S. 1259–1272

A Liste der Empfehlungen

Tabelle A.1: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Konzertsaal mit V = 20 000 m^3

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Watson (1923, 1924)	2,3	$T = 0,75 + 0,057 \cdot \sqrt[3]{V}$ [1]
Lifshitz (1925)	1.91	$(10,23 - \log V)T + 0,97(0,4 - \log V)\sqrt{T} = 6$
Lifshitz (1926)	1,89	$\log V = 8,5 + \log T - \frac{6,194}{\sqrt{T}}$
Watson (1927)	1,89	$T = 0,0394 \cdot \log V + 0,82$
Sabine (1928)	1,72 - 1,90	$T = 0,6 \cdot \log \frac{V}{0.3048^3} - 1,7 \pm 5\%$
McNair (1930)	1,83	$\log V = 10,4 + \log T_{opt} - \frac{6,35}{\sqrt{T_{opt}}}$
Sabine (1932)	1,65 - 1,95	
Békésy (1931)	1,35	
Bagenal u. Wood (1931)	2,12	$T = 0,057 \cdot \sqrt[3]{V} + 0.57$
Knudsen (1931)	1,67	$T = 0,424 \cdot \log V - 0,15$
Knudsen (1932)	1,57	$T = 0,287 \cdot \log V + 0,336$
Lifshitz (1932)	1,81	$\log V = 9,237 + \log T_{opt} - \frac{6,996}{\sqrt{T_{opt}}}$
Lifshitz (1936)	1,79	$\log V = 9,534 + \log T_{opt} - \frac{7,35}{\sqrt{T_{opt}}}$
Acoustic Materials Association Bulletin[2]	1,94	$T = 0,43 \cdot \log V + 0,09$
Rettinger (1947)	1,6	$T = 0,39 \cdot \log V - 0,07$
Weisse (1949)	1,9 - 2,4	
Knudsen u. Harris (1950)	1,67	$T = 0,27 \cdot \log V + 0,52$
Stephens u. Bate (1950)	2,14	$T = (0,0118 \cdot \sqrt[3]{V} + 0,107) \cdot 5$
Brüel (1951)	2,94	$T = 0,787 \cdot \log V - 0,44$
Brüel (1951)	2,45	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

[1] Formel gilt für Watson (1924)

[2] nach Watson (1941)

Tabelle A.1: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Konzertsaal mit V = 20 000 m^3, Fortsetzung

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Reichardt (1952)	2,12	$T = 0,133 \cdot \log V - 0,246$
Kuhl (1954)	1,7	
Beranek (1955)	1,6 - 1,8	
Furrer (1956)	1,72 - 1,97	$T_u = 0,483 \cdot \log V - 0,36$ $T_o = 0,483 \cdot \log V - 0,11$
Cremer (1961)	1,5 - 2,4	$\log T_u = 0,088 \cdot \log V - 0,20$ $\log T_o = 0,14 \cdot \log V - 0,223$
Bruckmayer (1962)	1,7 - 2,0	
Bruckmayer (1962)	1,9	
Beranek (1962)	1,9	
Olson (1967)	1,7	
Olson (1967)	1,5 - 2,0	
Meyer u. Neumann (1967)	1,7 - 2,0	
Rettinger (1968)	1,75	$T = 0,3 \cdot \log \frac{V}{0,3048^3}$
Lawrence (1970)	1,95	$T = 0,353 \cdot \log V + 0,43$
Hawkes u. Douglas (1971)	1,8 - 2,0	
Egan (1972)	1,4 - 2,1	
Meyer (1972)	1,7 - 2,05	
Doelle (1972)	1,88	$T = 0,4 \cdot \log V + 0,16$
Gottlob (1973)	2,1	
Kuttruff (1973)	1,6 - 2,1	
Fasold u. Winkler (1976)	1,7 - 2,1	
Kuttruff (1978)	1,7 2,1	
Cremer u. Müller (1978)	1,6 - 2,3	$\log T_u = 0,15 \cdot \log V - 0,44$ $\log T_o = 0,143 \cdot \log V - 0,257$
Moore (1978)	1,93	$T = 0,4 \cdot \log V + 0,21$
Parkin u. a. (1979)	1,7 - 2,2	
Jordan (1981)	1,4 - 2,8	
Kinsler u. a. (1982)	1,71 - 2,09	$0,07 \cdot \sqrt[V]{V} \pm 10\%$
Makrinenko (1994)	1,7 -2,3	
Makrinenko (1994)	1,95	$T = 0,5 \cdot \log V - 0,19$
Ando (1985)	0,7 - 2,0	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.1: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Konzertsaal mit V = 20 000 m^3, Fortsetzung

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Ando (1985)	2,0 - 3,0	
Rettinger (1988)	1,95	$0,4 \cdot \log V + 0,22$
Templeton u. Saunders (1987)	1,5 - 2,5	
Fasold u. a. (1987)	1,7 -2,1	
Egan (1988)	2,25	$0,67 \cdot \log V - 0,63$
Egan (1988)	1,7 - 2,3	
Fry (1988)	1,8 - 2,5	$T_u = 0,57 \cdot \log V - 0,72$ $T_o = 0,98 \cdot \log V - 1,73$
Beranek (1992)	1,7 - 2,0	
Fasold u. Stephenson (1993)	1,8 - 2,1	
Barron (1993)	1,6 - 2,2	
Barron (1993)	1,8 - 2,2	
Beranek (1996)	1,8 - 2,0	
Templeton (1997)	1,7 - 2,2	
Templeton (1997)	1,7 - 2,5	
Fasold u. Veres (1998)	1,68 - 2,52	$T = 0,538 \cdot \log V - 0,21 \ \pm 20\%$
Siebein u. Kinzey (1999)	2,0	
Cowan (2000)	1,8 - 2,0	
Kuttruff (2000)	1,6 - 2,1	
Brooks (2003)	2,3	
Beranek (2004)	1,8 - 2,1	
Long (2006)	1,9 - 2,2	$T_u = 0,46 \cdot \log V - 0,05$ $T_o = 0,442 \cdot \log V + 0,27$
Gade (2007)	2,0 - 2,4	
Ahnert u. Tennhardt (2008)	1,6 - 2,4	

Tabelle A.2: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Opernsaal mit V = 20 000 m^3

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Watson (1923, 1924)	1,9	$T = 0,0394 \cdot \log V + 0,82$
Knudsen (1931)	1,5 - 1,8	
Bagenal u. Wood (1931)	1,7	$T = 0,047 \cdot \sqrt[3]{V} + 0,41$
Knudsen (1932)	1,4 - 1,7	
Sabine (1932)	1,65 - 1,95	
Acoustic Materials Association Bulletin[3]	1,65	$T = 0,41 \cdot \log V - 0,1$
Weisse (1949)	1,9 - 2,4	
Reichardt (1952)	2,0 - 2,2	
Kuhl (1957)	1,6 - 1,8	
Cremer (1961)	1,0 -1,6	$T_u = 1$ $\log T_o = 0,1 \cdot \log V - 0,21$
Beranek (1962)	1,3 - 1,8	
Bruckmayer (1962)	2,25	$T = 0,09 \cdot \sqrt[3]{V} - 0,2$
Bruckmayer (1962)	1,4 - 1,7	
Olson (1967)	0,7 - 1	
Meyer u. Neumann (1967)	1,3 - 1,6	
Rettinger (1968)	1,46	$T = 0,25 \cdot \log \frac{V}{0,3048^3}$
Egan (1972)	1,5 - 1,8	
Doelle (1972)	1,2 - 1,4	
Doelle (1972)	1,6	$T = 0,4 \cdot \log V - 0,12$
Meyer (1972)	1,0 - 1,55	
Kuttruff (1973)	1,2 - 1,55	
Kuttruff (1978)	1,2 - 1,7	
Cremer u. Müller (1978)	1,4 - 1,9	$\log T_u = 0,125 \cdot \log V - 0,39$ $\log T_o = 0,133 \cdot \log V - 0,29$
Moore (1978)	1,52	$T = 0,24 \cdot \log V + 0,48$
Parkin u. a. (1979)	1,0 - 1,7	
Reichardt (1979)	1,5	
Kinsler u. a. (1982)	1,47 - 1,79	$T = 0,06 \cdot \sqrt[3]{V} \pm 10\%$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

[3] nach Watson (1941)

Tabelle A.2: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Opernsaal mit V = 20 000 m^3, Fortsetzung

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Winkler u. Reichardt (1984)	1,36 - 2,04	$\log T = 0,28 \cdot \log V - 0,97$
Ando (1985)	0,5 - 1,4	
Makrinenko (1994)	1,68	$T = 0,4 \cdot \log V - 0,04$
Rettinger (1988)	1,45	$T = 0,3 \cdot \log V + 0,16$
Barron (1993)	1,3 - 1,8	
Barron (1993)	1,2 - 1,6	
Beranek (1996)	1,3 - 1,5	
Templeton (1997)	1,0 - 1,6	
Fasold u. Veres (1998)	1,2 - 1,6	
Hidaka u. Beranek (2000)	1,4 - 1,6	
Beranek (2004)	1,4 - 1,6	
Long (2006)	1,63	$T = 0,45 \cdot \log V - 0,31$

Tabelle A.3: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Kammermusiksaal mit V = 10 000 m^3

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Knudsen (1931)[4]	1,31	$T = 0,295 \cdot \log V + 0,297$
Knudsen (1932)[2]	1,33	$T = 0,232 \cdot \log V + 0,53$
Knudsen u. Harris (1950)	1,3	$T = 0,215 \cdot \log V + 0,44$
Reichardt (1952) [2]	1,6	
Meyer u. Neumann (1967)	1,4	
Rettinger (1968)	1,11	$T = 0,2 \cdot \log \frac{V}{0,3048^3}$
Egan (1972)	1,4 - 1,7	
Kuttruff (1973)	1,4 - 1,6	
Fasold u. Winkler (1976)	1,0 - 1,5	
Moore (1978)	1,51	$T = 0,244 \cdot \log V + 0,534$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

[4]Die Angaben sind einem Volumen von 3 000 m^3 entnommen, dem von den Wissenschaftlern angenommene Maximalvolumen für Kammermusiksäle.

Tabelle A.3: Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Kammermusiksaal mit V = 10 000 m^3, Fortsetzung

Quelle	**Mittlere Nachhallzeit in Sekunden**	**Formel**
Parkin u. a. (1979)	1,7 - 2,2	
Reichardt (1979)	1,5	
Makrinenko (1994)	1,56	$T = 0,4 \cdot \log V - 0,04$
Rettinger (1988)	1,12	$0,22 \cdot \log \frac{V}{0,3048^3} - 0,1$
Barron (1993)	1,4 - 1,7	
Barron (1993)	1,4 - 1,8	
Templeton (1997)	1,2 - 1,7	
Templeton (1997)	1,2 - 1,4	
Fasold u. Veres (1998)	1,28 - 1,92	$T = 0,35 \cdot \log V + 0,2 \pm 20\%$
Beranek (2004)	1,6 - 1,8	
Gade (2007)	1,5	

Tabelle A.4: Empfehlungen für das Klarheitsmaß C_{80}

Quelle	**Klarheitsmaß[5] C_{80} in dB**	**Bemerkung**
Abdel Alim (1973)	> 1,6	klassische Musik, gut
	-1,6 bis 1,6	klassische Musik, brauchbar
	> 0,4	moderne Musik, gut
	-3,6 bis 0,4	moderne Musik, brauchbar
	> -1,4	romantische Musik, gut
	-4,6 bis -1,4	romantische Musik, brauchbar
Fasold u. Winkler (1976)	< -2 und > 12	unbrauchbar, vordere Plätze
	< -5 und > 9	unbrauchbar, hintere Plätze
Reichardt (1979)	0 bis 4	
Reichardt u. Lehmann (1981)	> -3	praktischer Konzertbetrieb
	3 bis 8	gut,vordere Plätze
	-2 bis 3 und > 8	brauchbar, vordere Plätze
	0 bis 5	gut, hintere Plätze

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.4: Empfehlungen für das Klarheitsmaß C_{80}, Fortsetzung

Quelle	**Klarheitsmaß C_{80} in dB**	**Bemerkung**
	-5 bis 0 und 5 bis 9	brauchbar, hintere Plätze
Jordan (1981)	-2 bis 2	
Schmidt u. Reichardt (1984)	> 0	Konzert und Kammermusik
	> 2	Oper, vordere Plätze
	> 0	Oper, hintere Plätze
Fasold u. a. (1987)	0 bis 4	
Fasold u. Stephenson (1993)	-1 bis 3	
Barron (1993)	- 2 bis 2	
Meyer (1995)	-2 bis 4	
	> -5	bühnenentfernte Plätze
Beranek (1996)	-4 bis -1	
Templeton (1997)	> 0	
Fasold u. Veres (1998)	-1 bis 3	
Marshall u. Klapper (1999)	- 2 bis 5	
Hidaka u. Beranek (2000)	1 bis 3	Oper, Schallquelle auf der Bühne
	< 0	Oper, Schallquelle im Orchestergraben
Beranek (2004)	-3 bis 0	Konzert
	-2 bis 2	Kammermusik
	1 bis 3	Oper
Long (2006)	-4 bis 0	
Gade (2007)	-1	
Gade (2007)	3	Kammermusik
Ahnert u. Tennhardt (2008)	-3 bis 4 dB	

[5] Die Werte beziehen sich, wenn es nicht anders angegeben wird, auf Konzertsäle.

B Abbildungsverzeichnis

3.1 Abbildung der originalen Tabelle, in der Heyl (1926) den günstigen Bereich der Nachhallzeit für vollbesetzte Auditorien wiedergibt 21
3.2 Günstiger Bereich der Nachhallzeit für vollbesetzte Auditorien nach obiger Tabelle nach Heyl (1926), U.S. Bureau of Standards 21
3.3 Eine Knudsen (1931) nachempfundene Abbildung der Ausgaben von 1931 und 1938 22
3.4 Sollwert der Nachhallzeit nach DIN 18041:04 27
3.5 Nachhallzeitverlauf über der Frequenz nach DIN 18041:04 27
3.6 Spezifische Volumen verschiedener Raumhauptnutzungen nach TGL 10687/04 (1981) 29
3.7 Vorgegebene mittlere Nachhallzeiten (500/1 000 Hz) und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach TGL 10687/04 (1981) 29
3.8 Akustische Größen nach ISO 3382-1:2009-10 34
3.9 'Modifizierte' günstige Nachhallzeiten musikalischer Aufführungsräume nach Watson (1924) und optimale Nachhallzeiten für Musiker und Zuhörer nach Watson (1927) 38
3.10 Optimale Nachhallzeiten nach Watson (1928) 40
3.11 Optimale Nachhallzeit nach (a) Lifshitz (1926), Quelle: Beljajew (1926) und (b) Lifshitz (1932) 42
3.12 Optimale Nachhallzeiten und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Lifshitz (1936) 43
3.13 Optimale Nachhallzeit nach P. E. Sabine (1928) 44
3.14 Diskussion der günstigen Nachhallzeit auf Grundlage von Lifshitz Berechnungen nach Schuster u. Waetzmann (1929) 45
3.15 Optimale mittlere Nachhallzeit und Verlauf der Nachhallzeit nach McNair (1930) 46
3.16 Günstige mittlere Nachhallzeiten verschiedener Genres und Nachhallzeiten verschiedener Frequenzen relativ zum Referenzwert bei 512 Hz 47
3.17 Optimale Nachhallzeit nach Maxfield u. Albersheim (1947) u. Maxfield (1948) 48
3.18 Günstige Nachhalldauer nach Békésy (1931) und günstige frequenzunabhängige Nachhallzeit nach Békésy (1934b) 49
3.19 Optimale Nachhallzeiten diverser musikalischer Aufführungsräume nach Knudsen (1931) 51
3.20 Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Rettinger (1934) 52
3.21 Gegenüberstellung deutscher (1) und amerikanischer (2) Empfehlungen zum Frequenzverlauf der Nachhallzeit, Winckel (1950) 54

3.22 Vergleich der Nachhallkurven 'der besten Konzertsäle vor 1945' (oben) und nach 1945 gebauter Säle (unten), Winckel (1958) 55
3.23 Vergleich verschiedener Nachhallkurven, Beranek (1950) und optimale Nachhallzeitbereiche nach Beranek (1955) 61
3.24 Messungen der 'Modifizierten' Deutlichkeit nach Beranek u. Schultz (1965) einiger Konzertsäle 62
3.25 Vergleich der mittleren Nachhallzeit britischer und australischer Konzertsäle nach Nickson u. Muncey (1953) 63
3.26 Subjektive Präferenz der Early Decay Time und faktorieller Präferenzraum des Korrelationsgrades 68
3.27 Günstige Nachhallzeiten nach Watson (1923) 76
3.28 Günstige Nachhallzeit musikalischer Aufführungsräume nach Bagenal u. Wood (1931) 78
3.29 Günstige Nachhallzeit musikalischer Aufführungsräume nach Sabine (1932) 79
3.30 Optimale Nachhallzeiten diverser musikalischer Aufführungsräume und Musikgenres und Frequenzcharakteristik der Nachhallzeit für 'music rooms' nach Knudsen (1932) 80
3.31 Optimale Nachhallzeiten zitiert von Watson (1941) 81
3.32 Optimale Nachhallzeiten nach Rettinger (1947) und Weisse (1949) 83
3.33 Optimale Nachhallzeiten nach Knudsen u. Harris (1950) 84
3.34 Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Knudsen u. Harris (1950) 84
3.35 Optimale Nachhallzeiten für verschiedene Musikgenres und proportional zur dritten Wurzel des Raumvolumens Brüel (1951) 86
3.36 Optimaler Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Brüel (1951) 87
3.37 Optimale mittlere Nachhallzeit nach Furrer (1956) 88
3.38 Optimale mittlere Nachhallzeit und günstiger Verlauf der Nachhallzeit nach Reichardt (1960) 90
3.39 Toleranzbereich der günstigen Nachhallzeit für Opernsäle und Konzertsäle nach Cremer (1961) 91
3.40 Optimale mittlere Nachhallzeiten nach ÖNORM B8115 und nach Bruckmayer (1962) 94
3.41 Optimale Nachhallzeiten nach Olson (1967) 95
3.42 Optimale Nachhallzeiten nach Rettinger (1968) 96
3.43 Optimale mittlere Nachhallzeiten nach Lawrence (1970) 98
3.44 Optimale mittlere Nachhallzeiten nach Egan (1972) 99
3.45 Optimale mittlere Nachhallzeiten und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Doelle (1972) 100
3.46 Sollwerte der mittleren Nachhallzeit und Nachhallzeitfrequenzgang nach TGL 10687/04 (1970), Quelle Fasold u. Winkler (1976) 103
3.47 Bereiche anzustrebener Nachhallzeiten für Konzertsäle und Opernhäuser nach Cremer u. Müller (1978) 104
3.48 Nachhallzeitfrequenzgang mit überlappenden Terzen gemessen 106
3.49 Optimale Nachhallzeiten verschiedener Frequenzen nach Moore (1978) . . 107
3.50 Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit nach Parkin u. a. (1979)) 108

3.51 Anzustrebende mittlere Nachhallzeit und Toleranzbereich und Frequenzgang der Nachhallzeit für Musikdarbietungen nach TGL 10687/04 (1970), Schmidt u. Reichardt (1984) 110
3.52 Anzustrebende mittlere Nachhallzeit und Toleranzbereich und Frequenzgang der Nachhallzeit von Operntheatern nach Winkler u. Reichardt (1984) 111
3.53 Bevorzugte Nachhallzeiten $[T_{sub}]_p$ und effektive Längen der Autokorrelationsfunktionen τ_e verschiedener Musikmotive nach Ando (1985) 112
3.54 Günstige mittlere Nachhallzeit und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Fasold u. a. (1987) 114
3.55 Optimale Nachhallzeiten verschiedener Raumverwendungszwecke nach Egan (1988) 115
3.56 Günstiger Nachhallzeitverlauf über der Frequenz nach Rettinger (1988) . . 117
3.57 Günstige mittlere Nachhallzeit nach Rettinger (1988) 117
3.58 Günstige mittlere Nachhallzeit nach Fry (1988) 118
3.59 Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Barron (1993) 119
3.60 Optimale Nachhallzeiten für Oratorium und Orgelmusik (1), sinfonische Musik (2), Kammermusik und Oper (3) nach Makrinenko (1994) 121
3.61 Optimale mittlere Nachhallzeiten nach Templeton (1997) 125
3.62 Optimale mittlere Nachhallzeiten diverser Verwendungszwecke und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Fasold u. Veres (1998) 127
3.63 Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Siebein u. Kinzey (1999) 128
3.64 Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Kinsler u. a. (2000) 130
3.65 Optimale mittlere Nachhallzeiten diverser Verwendungszwecke und Frequenzverlauf der Nachhallzeit nach Long (2006) 132

4.1 Mittlere Nachhallzeit nach Lifshitz, Schuster und Waetzmann 136
4.2 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1924 und 1936 137
4.3 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1940 und 1952 141
4.4 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1954 und 1970 143
4.5 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1972 und 1988 145
4.6 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten zwischen 1988 und 2006 146
4.7 Empfehlungen günstiger Nachhallzeiten für sinfonische Konzertsäle, V = 20 000 m^3 147
4.8 Unterschied zwischen den USA und Europa, V = 20 000 m^3 148
4.9 Unterschied zwischen den USA und Europa, V = 20 000 m^3; die günstigen Bereiche wurden durch ihren Mittelwert ersetzt. 149
4.10 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten für Opernsäle zwischen 1924 und 1972 150

4.11 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten für Opernsäle zwischen 1978 und 2006 151
4.12 Empfehlungen günstiger Nachhallzeiten für Opernsäle, V = 20 000 m^3 . . 152
4.13 Empfehlungen volumenabhängiger günstiger Nachhallzeiten für Kammermusiksäle zwischen 1931 und 1998 153
4.14 Empfehlungen günstiger Nachhallzeiten für Kammermusiksäle, V = 10 000 m^3 153
4.15 Richtlinien zur mittleren Nachhallzeit 155
4.16 Vorgeschlagene Nachhallzeitfrequenzverläufe der frühen 1930er Jahre nach McNair (1930), Knudsen (1932) und Rettinger (1934) 157
4.17 Frequenzverlauf der Nachhallzeit T/T_{soll} (linke Y-Achse) und eines Konzertsaales mit V = 20 000 m^3 (rechte Y-Achse) nach TGL 10687/04 (1981) und DIN 18041 (2004) 160
4.18 Günstige Bereiche, Maxima und Optima des Interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten IACC 163
4.19 Günstige Bereiche und Minima der Schwerpunktzeit t_S 164
4.20 Günstige Bereiche und Optima der Frühen Abklingzeit EDT 166
4.21 Günstige Bereiche, Minima und Optima des Klarheitsmaßes, C_{80} 168
4.22 Günstige Bereiche, Optima und Minima des Stärkemaßes G 169
4.23 Günstige Bereiche, Maxima und Optima des Seitenschallgrades LF 171
4.24 Günstige Bereiche, Minima und Optima der frühen Unterstützung ST1 . . 172

C Tabellenverzeichnis

3.1 Versionsverlauf der DIN 18041 24
3.2 Versionsverlauf der ISO 3382 30
3.3 Raumakustische Parameter und Empfehlungen nach ISO 3382-1:2009-06 . 35
3.4 Messwerte des bevorzugten Schallfeldes der Untersuchung von Choi u. Fricke (2005) 75
3.5 Günstige Nachhallzeiten verschiedener Raumarten nach Rettinger (1968) . 97
3.6 Raumakustische Parameter und Kenngrößen von Aufführungsräumen nach Schmidt u. Reichardt (1984) [1] 109
3.7 In Hörversuchen ermittelte und mit τ_e berechneten bevorzugten Nachhallzeiten nach Ando (1985) 112
3.8 Volumenkennzahlen und maximale Volumen nach Fasold u. a. (1987) . . . 114
3.9 Empfohlene Nachhallzeiten nach Templeton (1997) und den 'Sound Research Laboratories' (SRL) 124
3.10 Empfohlene mittlere Nachhallzeiten, spezifische Volumen und maximale Raumvolumen nach Fasold u. Veres (1998) 126
3.11 Empfehlungen raumakustischer Parameter nach (Beranek, 2004, S. 536) . 130
3.12 Empfohlene Bereiche und Werte raumakustischer Parameter nach (Gade, 2007, S. 313) 133
3.13 Richtwerte raumakustischer Parameter nach (Ahnert u. Tennhardt, 2008, S. 188-205) 134

4.1 Empfehlungen für Deutlichkeit D und Klarheitsmaß für Sprache C_{50} . . . 162
4.2 Empfehlungen zum interauralen Kreuzkorrelationskoeffiezienten IACC . . 163
4.3 Empfehlungen zur Schwerpunktzeit t_S 165
4.4 Empfehlungen zur frühen Abklingzeit EDT 166
4.5 Empfehlungen zum Stärkemaß G 170
4.6 Empfehlungen zum Seitenschallgrad LF 171
4.7 Empfehlungen zur frühen Unterstützung ST1 172

A.1 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Konzertsaal mit V = 20 000 m^3 191
A.1 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Konzertsaal mit V = 20 000 m^3, Fortsetzung 192
A.1 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Konzertsaal mit V = 20 000 m^3, Fortsetzung 193
A.2 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Opernsaal mit V = 20 000 m^3 194

A.2 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Opernsaal mit V = 20 000 m^3, Fortsetzung 195
A.3 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Kammermusiksaal mit V = 10 000 m^3 195
A.3 Empfehlungen zur mittleren Nachhallzeit für einen Kammermusiksaal mit V = 10 000 m^3, Fortsetzung 196
A.4 Empfehlungen für das Klarheitsmaß C_{80} 196
A.4 Empfehlungen für das Klarheitsmaß C_{80}, Fortsetzung 197