

DIN EN ISO 3382-1



ICS 91.120.20

Mit DIN EN ISO 3382-2:2008-09
Ersatz für
DIN EN ISO 3382:2000-03

**Akustik –
Messung von Parametern der Raumakustik –
Teil 1: Aufführungsräume (ISO 3382-1:2009);
Deutsche Fassung EN ISO 3382-1:2009**

Acoustics –
Measurement of room acoustic parameters –
Part 1: Performance spaces (ISO 3382-1:2009);
German version EN ISO 3382-1:2009

Acoustique –
Mesurage des paramètres acoustiques des salles –
Partie 1: Salles de spectacles (ISO 3382-1:2009);
Version allemande EN ISO 3382-1:2009

Gesamtumfang 31 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN
Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN



Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 3382-1:2009) wurde vom Komitee ISO/TC 43/SC 2 „Building acoustics“, dessen Sekretariat vom DIN (Deutschland) gehalten wird, in Abstimmung mit dem Technischen Komitee CEN/TC 126 „Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden“, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird, erarbeitet. Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-02-31 AA „Schalldämmung und Schallabsorption, Messung und Bewertung“ im Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen.

IEC 61260 siehe DIN EN 61260

IEC 61672-1 siehe DIN EN 61672-1

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 3382:2000-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Inhalt in zwei Norm-Teile aufgeteilt und erweitert;
- b) 4.3 „Messpunkte“ abgeändert;
- c) 5.3.3 „Integration der Impulsantwort“ geändert;
- d) Abschnitt 6 „Auswertung der Abklingkurven“ abgeändert;
- e) Abschnitt 7 „Messunsicherheit“ hinzugefügt;
- f) Anhang C „Aus Impulsantworten abgeleitete Bühnennmessgrößen“ hinzugefügt.

Frühere Ausgaben

DIN 52216: 1965-08

DIN EN ISO 3382: 2000-03

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61260, *Elektroakustik — Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven*

DIN EN 61672-1, *Elektroakustik — Schallpegelmesser — Teil 1: Anforderungen*

Deutsche Fassung

**Akustik —
Messung von Parametern der Raumakustik —
Teil 1: Aufführungsräume
(ISO 3382-1:2009)**

Acoustics —
Measurement of room acoustic parameters —
Part 1: Performance spaces
(ISO 3382-1:2009)

Acoustique —
Mesurage des paramètres acoustiques des salles —
Partie 1: Salles de spectacles
(ISO 3382-1:2009)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 14. Juni 2009 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Messbedingungen	7
5 Messverfahren.....	10
6 Auswertung der Abklingkurven	13
7 Messunsicherheit.....	13
8 Räumliche Mittelwertbildung.....	14
9 Angabe der Ergebnisse.....	15
Anhang A (informativ) Aus Impulsantworten abgeleitete Messgrößen (Gütemaße) für den Zuhörerraum.....	16
Anhang B (informativ) Binaurale Messgrößen in Zuhörerräumen, hergeleitet aus Impulsantworten.....	25
Anhang C (informativ) Aus Impulsantworten abgeleitete Bühnen-Messgrößen	27
Literaturhinweise	29

Vorwort

Dieses Dokument (EN ISO 3382-1:2009) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 43 „Acoustics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 126 „Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Dezember 2009, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Dezember 2009 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN ISO 3382:2000.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 3382-1:2009 wurde vom CEN als EN ISO 3382-1:2009 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Diese erste Ausgabe der ISO 3382-1 stellt eine technische Überarbeitung dar und ersetzt zusammen mit ISO 3382-2 und ISO 3382-3 die ISO 3382:1997. Anhang A wurde um die Informationen über JND („Unterscheidungsschwelle“, en: just noticeable difference), die empfohlene Frequenz-Mittelwertbildung und die Einbeziehung eines neuen Parameters für die LEV (Zuhörer-Einhüllung, en: Listener Envelopment) erweitert. Es wurde ein neuer Anhang C hinzugefügt, der die Parameter für die akustischen Bedingungen auf der Orchesterbühne behandelt.

ISO 3382 besteht aus folgenden Teilen unter dem Haupttitel *Akustik — Messung von Parametern der Raumakustik*:

Teil 1: Aufführungsräume

Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen

Durchgehende Räume werden das Thema eines zukünftigen Teil 3 sein.

Einleitung

Die Nachhallzeit eines Raumes galt bisher als wesentliche Kenngröße für seine akustischen Eigenschaften. Wenn die Nachhallzeit auch weiterhin als wichtiger Parameter angesehen wird, so besteht doch weitgehend Übereinstimmung darüber, dass andersartige Messungen wie diejenige des relativen Schalldruckpegels, des Verhältnisses von früh zu spät eintreffender Energie, des Seitenschallgrads, interauraler Kreuzkorrelationsfunktionen und des Störpegels zu einer umfassenderen Bewertung der akustischen Eigenschaften von Räumen erforderlich sind. Diese Internationale Norm legt weiterhin raumakustische Qualität nur durch die Nachhallzeit fest, führt aber zwei weitere Komplexitätsebenen bei raumakustischen Messungen ein.

In diesem Teil der ISO 3382 wird ein Messverfahren beschrieben, mit dem die Nachhallzeiten aus Impulsantworten und aus abgeschaltetem Rauschen erhalten werden. In den Anhängen werden Grundlagen und Einzelheiten von Verfahren zur Messung einiger neuerer Größen eingeführt; diese Anhänge sind jedoch nicht Bestandteile der verbindlichen Festlegungen in diesem Teil der ISO 3382. Es sollte ermöglicht werden, Messungen der Nachhallzeit untereinander mit größerer Sicherheit zu vergleichen, und der Gebrauch der neuen Größen und die allgemeine Übereinstimmung bei deren Anwendung sollte gefördert werden.

Im Anhang A werden Messgrößen behandelt, deren Grundlage quadrierte Impulsantworten sind: eine weitere Größe für den Nachhall (frühe Abklingzeit) und solche für den relativen Schallpegel, das Verhältnis von früh zu spät eintreffender Energie und den Seitenschallgrad in Zuhörerräumen. Innerhalb dieser Gruppen von Messgrößen ist noch zu entscheiden, welche der Größen für eine Normung am besten geeignet sind, wobei es jedoch angemessen ist, die Impulsantwort als Grundlage für die Normmessungen einzuführen, da alle anderen Größen aus Impulsantworten abgeleitet werden können. Anhang B behandelt binaurale Messungen und die Kopf- und Rumpf-Nachbildungen (Kunstköpfe), die für solche Messungen erforderlich sind. In Anhang C werden die unterstützenden Messgrößen vorgestellt, die sich bei der Beurteilung akustischer Bedingungen vom Standpunkt des Musikers aus als hilfreich erwiesen haben.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der ISO 3382 legt Verfahren für die Messung der Nachhallzeit und anderer raumakustischer Parameter in Aufführungsräumen fest. Sie beschreibt das Messverfahren, die benötigten Geräte, die erforderliche Messpunktdichte und das Verfahren zur Auswertung der Daten und zum Erstellen des Prüfberichts. Er ist für die Anwendung moderner digitaler Messtechniken und die Bewertung raumakustischer, aus Impulsantworten abgeleiteter Parameter vorgesehen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 61260, *Electroacoustics — Octave-band and fractional-octave-band filters*

IEC 61672-1, *Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Abklingkurve

graphische Darstellung der Abnahme des Schalldruckpegels in einem Raum als Funktion der Zeit nach dem Abschalten der Schallquelle

[ISO 354:2003, 3.1]

ANMERKUNG 1 Dieser Abklingvorgang kann entweder nach dem tatsächlichen Abschalten einer kontinuierlich tönenden Schallquelle im Raum gemessen oder aus der Rückwärts-Integration der quadrierten Impulsantwort des Raumes abgeleitet werden (siehe Abschnitt 5).

ANMERKUNG 2 Der nach nicht-kontinuierlicher Anregung eines Raumes (z. B. durch Aufzeichnung eines Pistolenschusses mit einem Pegelschreiber) direkt gewonnene Abklingvorgang wird für eine genaue Auswertung der Nachhallzeit nicht empfohlen. Dieses Verfahren sollte nur für überschlägige Messungen nach dem Kurzverfahren angewendet werden. Das Abklingen der Impulsantwort in einem Raum ist üblicherweise kein einfaches exponentielles Abklingen und dementsprechend ist der Anstieg anders als der der integrierten Impulsantwort.

3.2

Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen

Verfahren mit dem die Abklingkurven durch direkte Aufzeichnung des abklingenden Schalldruckpegels bestimmt werden, wenn die Anregung eines Raumes mit Breitbandrauschen oder Rauschen mit Bandbegrenzung erfolgt

[ISO 354:2003, 3.3]

3.3

Verfahren mit integrierter Impulsantwort

Verfahren mit dem die Abklingkurven durch Rückwärtsintegration der quadrierten Impulsantworten bestimmt werden

[ISO 354:2003, 3.4]

3.4

Impulsantwort

zeitliche Entwicklung des Schalldrucks, der an einem Ort in einem Raum als Ergebnis der Emission eines Dirac-Impulses an einem anderen Ort im Raum beobachtet wird

[ISO 354:2003, 3.5]

ANMERKUNG In der Praxis ist es nicht möglich echte Diracsche Delta-Funktionen zu erzeugen und abzustrahlen, jedoch können kurze, transiente Schallvorgänge (z. B. von Pistolenschüssen) für praktische Messungen hinreichend genaue Näherungen bieten. Ein alternatives Messverfahren beruht jedoch auf der Verwendung einer Periode eines Signals vom Typ einer Maximalfolge (en: maximum-length sequence, MLS) oder eines anderen deterministischen Signals mit flachem Spektrum wie ein Sinus-Sweep und Rück-Umrechnung der gemessenen Antwort in eine Impulsantwort.

3.5

Nachhallzeit

T

<raumakustische Parameter> Zeit, die erforderlich ist, damit die räumlich gemittelte Schallenergiedichte in einem geschlossenen Raum um 60 dB sinkt, nachdem die Schallquelle abgeschaltet wurde.

ANMERKUNG 1 Die Nachhallzeit wird in Sekunden angegeben.

ANMERKUNG 2 T kann basierend auf einem kürzeren Dynamikbereich als 60 dB ermittelt und auf eine Abklingzeit von 60 dB extrapoliert werden. Sie wird dann entsprechend gekennzeichnet. So wird sie, wenn T aus der Zeit ermittelt wird, zu der die Abklingkurve erstmalig die Werte 5 dB und 25 dB unter dem Anfangspegel erreicht, mit T_{20} , gekennzeichnet. Werden Abklingwerte von 5 dB bis 35 dB unter dem Anfangspegel verwendet, werden sie mit T_{30} gekennzeichnet.

3.6

Besetzungszustände

3.6.1

unbesetzter Zustand

Zustand eines Raumes, der für Nutzung vorbereitet und für die Sprecher oder vortragenden Künstler und das Publikum bereit ist, in dem jedoch keine dieser Personen anwesend ist und in dem bei Konzerthallen und Opernhäusern die Stühle für die Künstler, Notenständer und Perkussionsinstrumente usw. vorzugsweise vorhanden sind

3.6.2

Studiozustand

<Räume für Sprach- und Musikdarbietungen> Zustand eines Raumes, in dem sich nur Künstler oder Sprecher befinden und kein Publikum (zum Beispiel bei Proben oder während Tonaufnahmen); die Anzahl an Künstlern oder anderen Personen, wie Technikern, entspricht dabei der üblichen Anzahl

3.6.3

besetzter Zustand

Zustand einer Zuhörerräume oder Theaters, in dem 80 % bis 100 % der Sitzplätze belegt sind

ANMERKUNG Die in einem Raum gemessene Nachhallzeit wird von der Anzahl anwesender Personen bestimmt und die oben genannten Besetzungszustände wurden für Messzwecke definiert.

4 Messbedingungen

4.1 Allgemeines

Die Messungen der Nachhallzeit können mit dem Raum in jeglichem oder allen Besetzungszuständen durchgeführt werden. Wenn der Raum mit einstellbaren Komponenten zur Herstellung variabler akustischer Bedingungen ausgestattet ist, kann es von Bedeutung sein, getrennte Messungen mit diesen Komponenten in jeder ihrer Normaleinstellungen durchzuführen. Die Temperatur und relative Luftfeuchte im Raum sollten mit einer Grenzabweichung von $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\pm 5 \text{ } \%$ gemessen werden.

Eine genaue Beschreibung des Besetzungszustandes des Raumes ist von entscheidender Bedeutung bei der Beurteilung der durch Messung der Nachhallzeit erhalten Ergebnisse.

In Theatern muss zwischen „Sicherheitsvorhang auf“ und „Sicherheitsvorhang zu“ sowie zwischen „Orchestergraben offen“ und „Orchestergraben geschlossen“ bzw. „Orchester sitzt auf der Bühne“ mit oder ohne Konzertsimmerraufbau unterschieden werden. In all diesen Fällen können Messungen hilfreich sein. Bei offenem Sicherheitsvorhang ist die Bühnenausstattung von Bedeutung und muss beschrieben werden.

Wenn variable Komponenten aktive (z. B. elektronische) Technik enthalten, sollten deren Auswirkungen ebenfalls gemessen werden, da jedoch bestimmte Arten elektronischer Nachhall-Verbesserungssysteme zeitlich nichtstationäre Bedingungen im Raum hervorrufen, wird es keine einheitliche Impulsantwort geben und ist bei der Ausführung synchroner Mittelwertbildung während des Messverlaufs mit Vorsicht vorzugehen.

4.2 Prüfeinrichtungen

4.2.1 Schallquelle

Die Schallquelle muss so ungerichtet wie möglich sein (siehe Tabelle 1). Sie muss einen genügend hohen Schallpegel erzeugen, so dass sich Abklingkurven mit dem erforderlichen Mindest-Dynamikbereich ohne ungünstigen Störpegel-Einfluss ergeben. Wenn Impulsantworten mit pseudostatistischen Folgen gemessen werden, darf der erforderliche Schalldruckpegel ziemlich niedrig sein, weil eine deutliche Verbesserung des Störabstands durch synchrone Mittelung möglich ist. Bei Messungen, bei denen kein synchrones (oder anderes) Mittelungsverfahren zur Vergrößerung des Abklingbereiches angewendet wird, ist eine Schallquelle erforderlich, deren Abstrahlung um wenigstens 45 dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband liegt. Wenn nur T_{20} gemessen werden soll, genügt es, einen Pegel von wenigstens 35 dB über dem Störpegel zu erzeugen.

In Tabelle 1 sind die höchstzulässigen Abweichungen von kugelförmiger Abstrahlung angegeben, gemittelt über „gleitende“ 30°-Bogenbereiche in einem Freifeld. Falls kein Drehteller verwendet werden kann, sollte in 5°-Schritten gemessen werden mit anschließender „gleitender“ Mittelung über jeweils sechs benachbarte Punkte. Der Bezugswert ist aus einem 360°-Energie-Mittel in der Messebene zu bestimmen. Der Minimal-Abstand zwischen Quelle und Mikrofon muss 1,5 m betragen.

Tabelle 1 — Höchstzulässige Abweichungen der Schallquelle in Dezibel für die Anregung mit Oktavbändern des Rosa-Rauschens bei Messung im Freifeld

Frequenz, Hertz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Höchstabweichung, Dezibel	± 1	± 1	± 1	± 3	± 5	± 6

4.2.2 Mikrofone, Aufnahme- und Analysegeräte

4.2.2.1 Allgemeines

Zur Ermittlung des Schalldrucks sind ungerichtete Mikrofone einzusetzen, deren Ausgangssignale entweder eingespeist werden:

- direkt in einen Verstärker, eine Filterbaugruppe und ein System zur Darstellung der Abklingkurven oder einem Analysegerät zur Ableitung der Impulsantworten; oder
- in ein Signalaufzeichnungsgerät zur späteren Analyse.

4.2.2.2 Mikrofone und Filter

Das Messgerät muss den in IEC 61672-1 an ein Schallpegelmessgerät vom Typ 1 gestellten Anforderungen genügen. Die Oktav- oder Terzfilter müssen IEC 61260 entsprechen. Das Mikrofon sollte so klein wie möglich sein und vorzugsweise einen Membrandurchmesser von höchstens 13 mm aufweisen. Mikrofone mit Durchmessern bis zu 26 mm sind zulässig, wenn es sich um reine Druckempfänger handelt oder sie als Freifeld-Mikrofone mit einem Diffusor-Vorsatz ausgestattet sind, womit sich bei diffusem Schalleinfall eine frequenz-unabhängige Übertragungscharakteristik ergibt.

4.2.2.3 Aufnahmegerät

Wenn das Abklingen des Schalls anfänglich auf Magnetband oder einer digitalen Aufzeichnungseinrichtung aufgezeichnet wird, dürfen keine automatischen Verstärkungsregler oder andere Schaltungen für die dynamische Optimierung des Rauschabstandes verwendet werden. Die Aufnahmedauer muss bei jedem Abklingen lange genug sein, um die Bestimmung des dem Abklingen folgenden Dauerstörpegels zu erlauben; als Mindestdauer werden 5 s plus der erwarteten Nachhallzeit empfohlen.

Das Aufnahmegerät muss für die jeweilige Kombination aus angewendeter Aufzeichnungs- und Wiedergabegeschwindigkeit folgende Eigenschaften haben.

- a) Der Frequenzgang muss über den Frequenzbereich der Messung flach sein mit einer Grenzabweichung kleiner als ± 3 dB.
- b) Der Dynamikbereich muss ausreichend sein, um den erforderlichen Mindestbereich der Abklingkurve zuzulassen. Im Fall von Abklingvorgängen mit abgeschaltetem Rauschen, muss das Aufzeichnungsgerät einen Rauschabstand von mindestens 50 dB in jedem betrachteten Frequenzband bieten können.
- c) Das Verhältnis der Wiedergabegeschwindigkeit zur Aufnahmegeschwindigkeit muss auf ± 2 % genau $10^{0,1 \cdot n}$ betragen, wobei n eine ganze Zahl, null eingeschlossen, ist.

ANMERKUNG Wenn bei der Wiedergabe eine Geschwindigkeitsumsetzung angewendet wird, dann wird die zugehörige Frequenzumsetzung eine ganze Zahl Standard-Terzbandabstände oder, wenn n ein Vielfaches von Drei ist, Oktavbandabstände sein.

Wenn ein Tonbandgerät verwendet wird, dann bezieht sich T (siehe 4.2.2.4) bezüglich der Ansprechgeschwindigkeit der Apparatur zur Aufzeichnung der Schalldruckpegel-Abnahme mit der Zeit auf die Effektivnachhallzeit des wiedergegebenen Signals. Diese wird sich von der wahren Nachhallzeit des geschlossenen Raumes nur unterscheiden, wenn die Wiedergabegeschwindigkeit von der Aufnahmegeschwindigkeit abweicht.

Wenn das Abklingen für die Wiedergabe durch Filter und eine Integriereinrichtung aufgenommen wurde, kann es nützlich sein, die Antwortsignale während der Wiedergabe zeitlich umzukehren (siehe [10]).

4.2.2.4 Apparatur zur Erzeugung der Aufzeichnung des Pegelabklingvorgangs

Die Apparatur zur Erzeugung (und Darstellung und/oder Auswertung) der Aufzeichnung des Abklingvorgangs muss eines der folgenden Verfahren anwenden:

- a) Exponentialmittelwertbildung mit einer kontinuierlichen Kurve als Ausgangssignal;
- b) Exponentialmittelwertbildung mit aufeinander folgenden diskreten Abtastwerten aus dem fortlaufend gebildeten Mittelwert als Ausgangssignal;
- c) lineare Mittelwertbildung mit aufeinander folgenden diskreten Linear-Mittelwerten als Ausgangssignal (manchmal mit kleinen Pausen zwischen den Mittelwertbildungen).

Die Mittelungszeit, d. h. die Zeitkonstante einer Einrichtung für Exponentialmittelwertbildung (oder eines geeigneten Äquivalents) muss kleiner als $T/30$, jedoch möglichst nahe diesem Wert sein. Entsprechend muss die Mittelwertbildungszeit für eine Einrichtung zur linearen Mittelwertbildung kleiner als $T/12$ sein. Dabei ist T die gemessene Nachhallzeit oder, falls angebracht, die im vorletzten Absatz von 4.2.2.3 beschriebene Effektivnachhallzeit.

Bei Geräten, die die Abkling-Aufzeichnung als Folge diskreter Abtastwerte erzeugen, muss das Zeitintervall zwischen je zwei Punkten der Aufzeichnung kleiner als das 1,5fache der Mittelungszeit des Geräts sein.

In allen Fällen, in denen die Auswertung der Abkling-Aufzeichnung visuell erfolgt, ist die Zeitskala der Anzeige so einzurichten, dass die Neigung der Aufzeichnungslinie möglichst nahe bei 45° liegt.

ANMERKUNG 1 Die Mittelungszeit einer Einrichtung für Exponentialmittelung ist gleich $4,34 \text{ dB } [= 10 \lg(e)]$, geteilt durch die Abklingrate der Einrichtung in Dezibel je Sekunde.

ANMERKUNG 2 Handelsübliche Pegelschreiber, die den Schalldruckpegel als Funktion der Zeit graphisch darstellen, entsprechen üblicherweise Mittelwertbildnern für Exponentialmittelung.

ANMERKUNG 3 Bei Anwendung eines Mittelwertbildners für Exponentialmittelwertbildung bringt es kaum einen Vorteil, die Mittelungszeit sehr viel kleiner als $T/30$ einzustellen. Bei Anwendung einer Einrichtung für lineare Mittelwertbildung bringt es keinen Vorteil, das Intervall zwischen zwei Punkten sehr viel kleiner als $T/12$ zu wählen. Bei einigen sequentiellen Messverfahren ist es möglich, die Mittelungszeit für jedes Frequenzband angemessen einzustellen. Bei anderen Verfahren ist dies nicht möglich; dann muss eine Mittelungszeit oder ein Intervall, die/das wie vorstehend mit Bezug auf die kürzeste Nachhallzeit in jedem Band ausgewählt wurde, für die Messungen in allen Bändern verwendet werden.

4.2.2.5 Übersteuerung

Übersteuerung darf in keiner Stufe der Messapparatur auftreten. Beim Gebrauch von Impuls-Schallquellen sind zur Überwachung gegen Übersteuerung Spitzenwert-Anzeiger anzuwenden.

4.3 Messpositionen

Die Senderpositionen sollten an den entsprechend der Nutzung des Raumes üblichen Positionen angeordnet werden. Es müssen mindestens zwei Senderpositionen genutzt werden. Die Höhe des akustischen Zentrums der Schallquelle sollte 1,5 m über dem Boden liegen.

Die Mikrofonpositionen sollten sich an Stellen befinden, die für die bei Nutzung des Raumes vorgesehenen Zuhörerpositionen repräsentativ sind. Bei Messungen der Nachhallzeit ist es wichtig, dass die Messpositionen den gesamten Raum erfassen; für die in den Anhängen A und B beschriebenen raumakustischen Parameter sollten sie auch so ausgewählt werden, dass sie Informationen über mögliche systematische Änderungen mit der Position im Raum liefern. Die Mikrofonpositionen müssen mindestens eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sein, d. h. im üblichen Frequenzbereich etwa 2 m. Der Abstand jeder Mikrofonposition zur nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche, einschließlich des Bodens, muss mindestens ein Viertel der Wellenlänge betragen, d. h. üblicherweise etwa 1 m. Bezüglich weiterer Einzelheiten siehe, A.4.

Es darf sich keine Mikrofonposition zu nah an einer Senderposition befinden, um einen zu starken Einfluss des Direktschalls zu vermeiden. In Räumen für Sprach- und Musikdarbietungen sollte die Höhe der Mikrofone über dem Boden entsprechend der Ohrhöhe des durchschnittlichen Zuhörers in üblichen Sitzen 1,2 m betragen.

Es muss eine Verteilung der Mikrofonpositionen gewählt werden, die die Haupteinflüsse vorwegnimmt, die wahrscheinlich über den gesamten Raum auftretende Unterschiede in den Nachhallzeiten verursachen. Offensichtliche Beispiele sind die Unterschiede für Sitzbereiche nahe von Wänden, unter Logen oder in entkoppelten Raumbereichen (z. B. in Kirchen-Querschiffen und -altarräumen im Vergleich zu Kirchen-Mittelschiffen). Dies erfordert die Beurteilung der Gleichmäßigkeit der „akustischen“ Verteilung auf die verschiedenen Sitzbereiche, der Gleichmäßigkeit der Kopplung von getrennten Volumenteilen und der Nähe zu lokalen Störungen.

Für die Messung der Nachhallzeit kann es hilfreich sein, den Raum bezüglich folgender Kriterien zu beurteilen (in den meisten Fällen ist nur eine visuelle Beurteilung erforderlich), um zu bestimmen, ob einzelne räumliche Mittelwerte den Raum angemessen beschreiben:

- a) die Werkstoffe der Grenzflächen und jeglicher hängender Bauelemente sind so, dass sie bei Beurteilung hinsichtlich ihrer Absorptions- und Streueigenschaften angemessen gleichmäßig auf den Oberflächen, die den Raum einschließen, verteilt sind und
- b) alle Teile des Raumvolumens kommunizieren angemessen gleichwertig miteinander, in welchem Fall drei oder vier Mikrofonpositionen ausreichen - die wiederum so zu wählen sind, dass der Sitzbereich in einer gleichmäßigen räumlichen Anordnung erfasst wird - und die Messergebnisse gemittelt werden können.

Bezüglich obigen Listenpunkts a) gilt, dass die Verteilung als annehmbar gleichmäßig betrachtet werden kann, wenn die Decke, Seiten-, Vorder- und Rückwände bei einzelner Beurteilung keine Bereiche haben, die mehr als 50 % der jeweiligen Wandfläche einnehmen, deren Eigenschaften sich jedoch von denen der restlichen Oberflächen unterscheiden (in einigen Räumen kann es hilfreich sein, die Raumgeometrie für die Beurteilung auf einen Quader zu nähern).

Bezüglich obigen Listenpunkts b) gilt, dass das Raumvolumen in seiner Wirkung als ein einziger Raum betrachtet werden kann, wenn es keine Teile der Bodenfläche gibt, von denen aus die Sichtlinie zu irgendeinem Teil des Raumes, das größer als 10 % des gesamten Raumvolumens ist, blockiert wird.

Wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, so gibt es im Raum vermutlich Bereiche mit unterschiedlichen Nachhallzeiten, die getrennt untersucht und gemessen werden müssen.

5 Messverfahren

5.1 Allgemeines

In diesem Teil der ISO 3382 werden zwei Verfahren zum Messen der Nachhallzeit beschrieben: das Verfahren des abgeschalteten Rauschens und das Verfahren der integrierten Impulsantwort. Beide Verfahren haben denselben Erwartungswert. Der Frequenzbereich hängt vom Zweck der Messungen ab. Wenn es keine Anforderung für bestimmte Frequenzbänder gibt, sollte der Frequenzbereich für das Kurzverfahren mindestens 250 Hz bis 2 000 Hz umfassen. Für das Standardverfahren und das Präzisionsverfahren sollte der Frequenzbereich mindestens 125 Hz bis 4 000 Hz in Oktavbändern oder 100 Hz bis 5 000 Hz in Terzbändern umfassen.

5.2 Verfahren des abgeschalteten Rauschens

5.2.1 Anregung des Raumes

Als Schallquelle ist ein Lautsprecher zu verwenden, und das dem Lautsprecher zugeführte Signal ist mit breitbandigem statistischem oder pseudo-statistischem elektrischem Rauschen zu erzeugen. Sofern pseudo-statistisches Rauschen genutzt wird, ist es auf Zufallsbasis zu unterbrechen, ohne eine wiederholte Folge zu nutzen. Der Sender muss einen Schalldruckpegel erzeugen können, der ausreicht, eine Abklingkurve sicherzustellen, die mindestens 35 dB oberhalb des Störpegels im entsprechenden Frequenzband beginnt. Ist T_{30} zu messen, muss ein Pegel erzeugt werden, der in jedem Frequenzband mindestens 45 dB oberhalb des Störpegels liegt.

Die Bandbreite des Signals muss bei Messungen in Oktavbändern größer als eine Oktave und bei Messungen in Terzbändern größer als eine Terz gewählt werden. Das Spektrum muss im jeweils zu messenden Oktavband angemessen flach sein. Alternativ darf das breitbandige Rauschspektrum so geformt sein, dass sich für den stationären Nachhall-Schall im Raum ein rosa Spektrum zwischen 88 Hz und 5 657 Hz ergibt. Somit umfasst der Frequenzbereich die Terzbänder mit Bandmittenfrequenzen von 100 Hz bis 5 kHz oder die Oktavbänder von 125 Hz bis 4 kHz.

Für das Standardverfahren und das Präzisionsverfahren muss die Anregungsdauer des Raumes so lang sein, dass das Schallfeld den stationären Zustand erreicht, bevor der Sender abgeschaltet wird. Dementsprechend ist es wesentlich, das Geräusch mindestens einige Sekunden und nicht weniger als die halbe Nachhallzeit lang abzustrahlen.

Beim Kurzverfahren kann, als Alternative zum abgeschalteten Rauschsignal, eine kurze Anregung oder ein Impulssignal verwendet werden. In diesem Fall liegt jedoch die Messgenauigkeit unter der in 7.1 angegebenen.

5.2.2 Mittelung der Messergebnisse

Die Anzahl der verwendeten Mikrofonpositionen wird durch die geforderte Messgenauigkeit bestimmt (siehe Anhang A). Mit Blick auf den Zufallscharakter des Sendersignals ist es jedoch erforderlich, an jeder Position einen Mittelwert aus einer Reihe von Messwerten zu bilden, um eine vertretbare Messunsicherheit zu erreichen (siehe 7.1). Die Mittelwertbildung kann auf zwei Arten erfolgen, entweder

- durch Feststellen der einzelnen Nachhallzeiten aller Abklingkurven und Bilden des Mittelwertes daraus, oder
- durch Bilden eines Scharmittelwertes der quadrierten Abklingvorgänge des Schalldruckes und Ermitteln der Nachhallzeit für die sich ergebende Abklingkurve.

Die einzelnen Abklingvorgänge werden mit ihren synchronisierten Anfangspunkten überlagert. Die diskreten quadrierten Abtastwerte des Schalldruckes werden für jedes Zeitintervall der zunehmenden Abklingvorgänge summiert, und die Folge dieser Summen wird als einzelner Gesamt-Scharabklingvorgang genutzt, mit dessen Hilfe dann T ausgewertet wird (siehe [20]). Es ist wichtig, dass die vom Sender abgestrahlte Schallleistung bei allen Messungen gleich bleibt. Dies ist das bevorzugte Verfahren.

5.3 Verfahren der integrierten Impulsantwort

5.3.1 Allgemeines

Die Impulsantwort von einer Sender- an eine Empfängerposition in einem Raum ist eine gut definierte Größe, die auf unterschiedliche Weise gemessen werden kann (z. B. unter Verwendung von Pistolenschüssen, Impulsen von Funkenstrecken, Rausch-Impulsen, „Chirps“ oder Maximalfolgen als Signal). Es ist nicht das Ziel dieses Teils der ISO 3382, weitere Verfahren, die eine korrekte Impulsantwort liefern können, auszuschließen.

5.3.2 Anregung des Raumes

Die Impulsantwort kann direkt gemessen werden, indem eine Impulsquelle wie ein Pistolenschuss oder eine beliebige andere Schallquelle genutzt wird, die selbst nicht nachhallend ist und solange ihr Spektrum hinreichend breit ist, um die Bedingungen nach 5.2.1 zu erfüllen. Der Impulssender muss einen Spitzen-Schalldruckpegel erzeugen können, der ausreicht, einen Beginn der Abklingkurve bei mindestens 35 dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband sicherzustellen. Ist T_{30} zu messen, so ist es erforderlich, einen Pegel zu erzeugen, der mindestens 45 dB über dem Störpegel liegt.

Es dürfen besondere Schallsignale angewendet werden, die die Impulsantwort erst nach spezieller Verarbeitung des aufgezeichneten Mikrofonsignals liefern (siehe ISO 18233). Damit kann ein verbesserter Störabstand erreicht werden. Sinus-Sweeps oder pseudo-statistisches Rauschen (z. B. MLS) dürfen angewendet werden, wenn die Anforderungen an das Spektrum und an die Richtcharakteristik des Senders eingehalten werden. Wegen der Verbesserung beim Störabstand können die Anforderungen an die Aussteuerbarkeit des Senders beträchtlich niedriger sein als im vorstehenden Absatz angegeben. Wird Zeitmittelung angewendet, ist es erforderlich sicherzustellen, dass die Mittelwertbildung die gemessene Impulsantwort nicht verändert. Bei der Anwendung dieser Messverfahren stellt die Frequenzfilterung häufig einen festen Bestandteil der Signalanalyse dar. Es ist ausreichend, dass das Anregungssignal die zu messenden Frequenzbänder abdeckt.

5.3.3 Integration der Impulsantwort

Die Abklingkurve jedes Oktavbands ist durch Rückwärts-Integration der quadrierten Impulsantwort zu erzeugen. Im Idealfall ohne Störpegel sollte die Integration am Ende der Impulsantwort (t_8) beginnen und bis zum Anfang der quadrierten Impulsantwort laufen. Daher ergibt sich der Abklingvorgang als Funktion der Zeit nach Gleichung (1) zu:

$$E(t) = \int_t^{t_8} p^2(\tau) d\tau = \int_t^{t_8} p^2(\tau) d(-\tau) \quad (1)$$

Dabei ist

p der Schalldruck der Impulsantwort als Funktion der Zeit;

E die Energie der Abklingkurve als Funktion der Zeit;

t die Zeit.

Dieses Integral in umgekehrter Zeitrichtung wird oft durch die Durchführung von zwei Integrationen wie in Gleichung (2) erhalten:

$$\int_t^{t_8} p^2(\tau) d\tau = \int_0^{t_8} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau \quad (2)$$

Um den Einfluss des Störpegels auf den letzten Teil der Impulsantwort zu minimieren, darf das folgende Verfahren angewendet werden.

Ist der Störpegel bekannt, muss der Anfangswert der Integration t_1 als Schnittpunkt einer Horizontalen durch den Störpegel und einer geneigten Linie durch einen repräsentativen Teil der mittels dB-Skala dargestellten quadrierten Impulsantwort bestimmt und die Abklingkurve nach Gleichung (3) berechnet werden:

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C \quad (3)$$

Dabei ist

$$t < t_1, \text{ und}$$

C eine wählbare Korrektur für die integrierte quadrierte Impulsantwort zwischen t_1 und unendlich.

Das verlässlichste Resultat wird erhalten, wenn für die Berechnung von C angenommen wird, dass die Energie exponentiell im gleichen Maß abklingt, wie sich durch die quadrierte Impulsantwort zwischen t_0 und t_1 ergibt. Dabei ist t_0 der Zeitpunkt, der einem um 10 dB höheren Pegel als demjenigen bei t_1 entspricht.

Wenn C gleich null gesetzt wird, führt der endliche Integrations-Anfang dazu, dass die Nachhallzeit systematisch zu klein ermittelt wird. Für eine maximale Unterbewertung von 5 % muss der Störpegel mindestens dem Auswertebereich plus 15 dB unter dem Maximum der Impulsantwort liegen. Zum Beispiel muss zur Bestimmung von T_{30} der Störpegel mindestens 45 dB unter dem Maximum liegen.

6 Auswertung der Abklingkurven

Für die Bestimmung von T_{30} beträgt der ausgewertete Bereich der Abklingkurven 5 dB bis 35 dB unterhalb des stationären Pegels. Für das Verfahren der integrierten Impulsantwort handelt es sich beim stationären Pegel um den Gesamtpegel der integrierten Impulsantwort. Innerhalb des Auswertungsbereichs ist für die Kurve rechnerisch eine Gerade nach der Anpassung mit Hilfe des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadrate zu erstellen, oder es ist, sofern die Abklingkurven direkt mit einem Pegelschreiber aufgezeichnet werden, eine Gerade manuell so gut wie möglich an die Abklingkurve anzupassen. Weitere Algorithmen, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen, dürfen angewendet werden. Die Neigung der Geraden ergibt die Abklingrate d in Dezibel je Sekunde, woraus die Nachhallzeit als $T_{30} = 60/d$ berechnet wird. Für die Bestimmung von T_{20} beträgt der Auswertungsbereich 5 dB bis 25 dB.

Falls das Verfahren zur Bestimmung der Nachhallzeit darauf beruht, dass Pegelschreiber-Diagramme ausgewertet werden, so kann eine visuell bestimmte Kurve „bester Näherung“ eine berechnete Regressionskurve ersetzen, sie ist jedoch nicht so zuverlässig wie eine Regressionsanalyse.

Um eine Nachhallzeit festzulegen, müssen die Abklingkurven annähernd einer geraden Linie folgen. Sind die Kurven wellenförmig oder gekrümmt, kann dies auf eine Mischung aus Abklingarten mit verschiedenen Nachhallzeiten hinweisen, womit das Ergebnis unzuverlässig sein kann.

7 Messunsicherheit

7.1 Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen

Aufgrund des Zufallscharakters des Anregungs-Signals hängt beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens die Messunsicherheit stark von der Anzahl der ausgeführten Mittelungen ab. Die Scharmittelung und die Mittelung einzelner Werte der Nachhallzeit weisen die gleichen Abhängigkeiten von der Anzahl der Mittelwertbildungen auf. Die Standardabweichung des Messergebnisses $\sigma(T_{20})$ oder $\sigma(T_{30})$ kann aus den Gleichungen (4) und (5) abgeschätzt werden:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88 \cdot T_{20} \sqrt{\frac{1 + 1,90/n}{N B T_{20}}} \quad (4)$$

$$\sigma(T_{30}) = 0,55 \cdot T_{30} \sqrt{\frac{1 + 1,52/n}{N B T_{30}}} \quad (5)$$

Dabei ist

- B die Bandbreite, in Hertz;
- n die Anzahl der an jeder Position gemessenen Abklingvorgänge;
- N die Anzahl der unabhängigen Messpunkte (Kombinationen aus Sender- und Empfängerpositionen);
- T_{20} die Nachhallzeit, in Sekunden, beruhend auf einem 20 dB Auswertebereich;
- T_{30} die Nachhallzeit, in Sekunden, beruhend auf einem 30 dB Auswertebereich.

Die Gleichungen (4) und (5) sind [21] und [22] entnommen und beruhen auf bestimmten Annahmen zum Mittelwertbildner.

Für ein Oktavfilter gilt $B = 0,71 \cdot f_c$ und für ein Terzfilter $B = 0,23 \cdot f_c$, wobei f_c die Bandmittenfrequenz, in Hertz, des Filters ist. Oktavbandmessungen führen bei derselben Anzahl von Messpunkten zu einer höheren Messgenauigkeit als Terzbandmessungen.

7.2 Verfahren der integrierten Impulsantwort

Theoretisch bezieht sich die integrierte Impulsantwort auf die Mittelwertbildung aus einer unendlichen Anzahl Anregungen mit abgeschaltetem Rauschen [11]. Bei der praktischen Beurteilung der Messunsicherheit beim Verfahren der integrierten Impulsantwort kann davon ausgegangen werden, dass sie in derselben Größenordnung liegt wie bei Anwendung eines Mittelwerts von $n = 10$ Messungen an jeder Position beim Verfahren des abgeschalteten Rauschens. Es ist keine zusätzliche Mittelung erforderlich, um die statistische Messgenauigkeit für jede Position zu erhöhen.

7.3 Untere Grenzwerte für zuverlässige Ergebnisse, bedingt durch das Filter und den Detektor

Im Falle sehr kurzer Nachhallzeiten kann die Abklingkurve durch das Filter und den Detektor beeinflusst werden. Wird die herkömmliche Vorwärts-Analyse angewendet, so müssen, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, die unteren Grenzwerte entsprechend den Gleichungen (6) und (7) sein:

$$B T > 16 \text{ und} \tag{6}$$

$$T > 2 \cdot T_{\text{det}} \tag{7}$$

Dabei ist

- B die Filterbandbreite, in Hertz;
- T die gemessene Nachhallzeit, in Sekunden;
- T_{det} die Nachhallzeit, in Sekunden, des Mittelwert bildenden Detektors.

8 Räumliche Mittelwertbildung

Zur Bestimmung räumlicher Mittelwerte können die für den Bereich der Sender- und Mikrofonpositionen gemessenen Ergebnisse entweder für getrennt ausgewiesene Flächenbereiche oder für den gesamten Raum kombiniert werden. Diese räumliche Mittelung muss durch arithmetische Mittelung der Nachhallzeiten erzielt werden. Der räumliche Mittelwert wird erhalten, indem der Mittelwert der einzelnen Nachhallzeiten für alle unabhängigen Sender- und Mikrofonpositionen gebildet wird. Um ein Maß für die Genauigkeit und die räumliche Varianz der Nachhallzeit zu erhalten, kann die Standardabweichung bestimmt werden. Siehe auch A.4.

9 Angabe der Ergebnisse

9.1 Tabellen und Kurven

Die für jede Messfrequenz ermittelten Nachhallzeiten sind in Diagrammform und in einer Tabelle anzugeben.

Im Falle eines Diagramms müssen die Punkte mittels Geraden verbunden werden. Die Abszisse muss die Frequenz auf einer logarithmischen Skale mit einer Strecke von 1,5 cm je Oktave darstellen, während die Ordinate entweder eine lineare Zeitskala, in der 2,5 cm einer Sekunde entsprechen, oder eine logarithmische Skale, in der 10 cm einer Dekade entsprechen, aufweisen muss. Die Nennwerte der Bandmittenfrequenzen für Oktavbänder nach IEC 61260 sollten auf der Frequenzachse markiert werden.

Ein Einzahl-Wert $T_{30,\text{mid}}$ der Nachhallzeit kann durch Mittelung von T_{30} in den 500-Hz- und 1 000-Hz-Oktav-Bändern errechnet werden; auch $T_{20,\text{mid}}$ darf verwendet werden. Alternativ sind die Mittelwerte über die sechs Terzbänder von 400 Hz bis 1 250 Hz zu bilden.

9.2 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss folgende Angaben enthalten:

- a) eine Angabe, dass die Messungen in Übereinstimmung mit diesem Teil der ISO 3382 durchgeführt wurden;
- b) Bezeichnung und Ort des untersuchten Raumes;
- c) Grundriss des Raumes, mit Angabe des Maßstabs;
- d) Volumen des Raumes — falls es sich nicht um einen vollständig abgeschlossenen Raum handelt, ist zu erläutern, wie das angegebene Raumvolumen definiert wird;
- e) bei Räumen für Sprach- und Musikdarbietungen, die Anzahl und Art der Sitze, z. B. ob gepolstert oder nicht, und wenn die Informationen dazu vorhanden sind, die Dicke und die Art der Polsterung, Art des Bezugs (poröse oder unporöse, erhöhte oder abgesenkte Sitze) und in welchen Bereichen die Sitze überzogen sind;
- f) eine Beschreibung der Form und des Materials der Raumwände und -decke;
- g) Besetzungszustand oder -zustände während der Messungen und Anzahl der anwesenden Personen;
- h) Bedingungen bezüglich jeglicher veränderlicher Einrichtungen wie Vorhänge, Ansprachesystem, elektronische Nachhall-Verbesserungssysteme usw.;
- i) bei Theatern, ob der Sicherheitsvorhang oder dekorative Vorhänge offen oder zu waren;
- j) falls erforderlich, Beschreibung der Bühnenausstattung, einschließlich eines Konzertzimmeraufbaus usw.;
- k) Temperatur und relative Luftfeuchte im Raum während der Messung;
- l) Beschreibung des Messgeräts, der Schallquelle und der Mikrofone und die Angabe, ob Tonbandgeräte eingesetzt wurden;
- m) Beschreibung des eingesetzten Schallsignals;
- n) gewählte Messpunktdichte, einschließlich der Einzelheiten zu den Sender- und Mikrofonpositionen, vorzugsweise in einem Plan zusammen mit einer Angabe der Höhe der Positionen dargestellt;
- o) Datum der Messung und Bezeichnung der die Messung durchführenden Organisation.

Anhang A (informativ)

Aus Impulsantworten abgeleitete Messgrößen (Gütemaße) für den Zuhörerraum

A.1 Allgemeines

Subjektive Untersuchungen der akustischen Eigenschaften von Zuhörerräumen haben gezeigt, dass verschiedene Messgrößen, die sich aus gemessenen Impulsantworten ableiten lassen, mit gewissen subjektiven Merkmalen der akustischen Beschaffenheit eines Zuhörerraums korrelieren. Während die Nachhallzeit den akustischen Charakter eines Zuhörerraums grundlegend beschreibt, wird durch die Hinzunahme von Werten dieser neueren Messgrößen eine umfassendere Darstellung der akustischen Bedingungen im Raum erhalten. Die in diesen Anhang aufgenommenen Messgrößen beschränken sich auf solche, die sich als subjektiv wichtig erwiesen haben, und die durch Integration von Impulsantworten direkt erhalten werden können. Wird Publikum in einen Zuhörerraum aufgenommen, so ist zu erwarten, dass dies die Nachhallzeit und die im Folgenden dargestellten Messgrößen beeinflusst.

Es gibt fünf Gruppen oder Typen von Messgrößen (siehe Tabelle A.1). Zu jeder Gruppe gehören meist mehr als eine Größe, jedoch hat sich gezeigt, dass die Werte der verschiedenen Größen innerhalb jeder Gruppe meist stark miteinander korrelieren. Jede Gruppe umfasst daher eine Anzahl annähernd gleichwertiger Größen, und es ist unnötig, Werte von allen diesen zu errechnen, jedoch sollte wenigstens eine Größe aus jeder der fünf Gruppen herangezogen werden.

Tabelle A.2 — Akustische Größen, nach Zuhöreraspekten gruppiert

Subjektiver Zuhöreraspekt	Akustische Größe	Einzel Frequenz-Mittelwertbildung ^a Hz	Unterscheidungsschwelle (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 Einzel Frequenz-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 000m ³ .				

A.2 Definitionen der Messgrößen

A.2.1 Stärkemaß

Das Stärkemaß G kann mit einem kalibrierten Kugelstrahler gemessen werden und zwar als logarithmisches Verhältnis der Schalleinwirkung, (d. h. des quadrierten und integrierten Schalldrucks) der gemessenen Impulsantwort zu derjenigen der in 10 m Entfernung vor derselben Schallquelle im Freifeld gemessenen Antwort, wie in den Gleichungen (A.1) bis (A.3) in dB angegeben:

$$G = 10 \cdot \lg \frac{\int_0^8 p^2(t) dt}{\int_0^8 p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \quad (\text{A.1})$$

wobei

$$L_{pE} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T_0} \int_0^8 \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad (\text{A.2})$$

und

$$L_{pE,10} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T_0} \int_0^8 \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

$p(t)$	der Augenblickswert des Schalldrucks der Impulsantwort, der am Messpunkt gemessen wurde;
$p_{10}(t)$	der Augenblickswert des Schalldrucks der Impulsantwort, der im Abstand von 10 m im Freifeld gemessen wurde;
p_0	20 µPa;
T_0	=1 s;
L_{pE}	der Schalldruck-Wirkpegel von $p(t)$;
$L_{pE,10}$	der Schalldruck-Wirkpegel von $p_{10}(t)$.

In den obigen Gleichungen entspricht $t = 0$ dem Start-Zeitpunkt des Direktschalls, und 8 sollte einer Zeit entsprechen größer oder gleich derjenigen am Punkt, an dem die Direktschall-Abklingkurve um 30 dB gefallen ist.

Falls ein großer reflexionsarmer Raum zur Verfügung steht, kann $L_{pE,10}$ direkt mit einem Abstand von 10 m zwischen Schallquelle und Empfänger gemessen werden. Falls dies nicht möglich ist, kann der Schalldruck-Wirkpegel $L_{pE,d}$ an einem um d ($= 3$ m) von der Quelle entfernten Punkt gemessen und daraus $L_{pE,10}$ nach Gleichung (A.4) in dB bestimmt werden:

$$L_{pE,10} = L_{pE,d} + 20 \lg(d/10) \quad (\text{A.4})$$

Wird eine solche Messung in einem Freifeld ausgeführt, ist es erforderlich, in Schritten von $12,5^\circ$ rings um die Schallquelle zu messen und den Energie-Mittelwert des Schalldruck-Wirkpegels zu errechnen, um so über die Richtcharakteristik der Schallquelle zu mitteln.

ANMERKUNG 1 Als Alternativverfahren kann der Bezugs-Schalldruck-Wirkpegel $L_{pE,10}$ in einem Hallraum nach Gleichung (A.5) [7], [8] in dB bestimmt werden:

$$L_{pE,10} = L_{pE} + 10 \lg(A/S_0) - 37 \quad (\text{A.5})$$

Dabei ist

L_{pE} der räumliche Mittelwert des im Hallraum gemessenen Schalldruck-Wirkpegels;

A die äquivalente Schallabsorptionsfläche in Quadratmetern;

$S_0 = 1 \text{ m}^2$.

A kann aus der Nachhallzeit im Raum nach Gleichung (A.6) (Sabinesche Gleichung) erhalten werden:

$$A = 0,16 V/T \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist

V das Luftvolumen des Hallraums in Kubikmeter;

T die Nachhallzeit des Raums in Sekunden.

ANMERKUNG 2 G kann alternativ durch Anwendung einer stationären ungerichteten Schallquelle nach Gleichung (A.7) bestimmt werden:

$$G = L_p - L_{p,10} \quad (\text{A.7})$$

Dabei ist

L_p der Schalldruckpegel, gemessen an jedem Messpunkt im untersuchten Raum;

$L_{p,10}$ der Schalldruckpegel, gemessen im Abstand von 10 m im Freifeld.

Falls ein großer echofreier Raum vorliegt, kann $L_{p,10}$ durch Anwenden eines Sender-Empfänger-Abstands von 10 m direkt gemessen werden. Wenn diese Bedingung nicht erzielbar ist, kann der Schalldruck-Wirkpegel an einem Punkt von d ($= 3 \text{ m}$) zur Schallquelle ($L_{p,d}$) gemessen und $L_{p,10}$ dann nach Gleichung (A.8) in dB erhalten werden:

$$L_{p,10} = L_{p,d} + 20 \lg(d/10) \quad (\text{A.8})$$

In diesem Fall ist es auch notwendig, die Richtwirkung der Schallquelle wie oben erwähnt zu mitteln.

Bei Anwendung einer ungerichteten Schallquelle, deren Schallleistungspegel bekannt ist, kann das Stärkemaß G nach Gleichung (A.9) in dB erhalten werden:

$$G = L_p - L_W + 31 \quad (\text{A.9})$$

Dabei ist

L_p der an jedem Messpunkt gemessene Schalldruckpegel;

L_W der Schallleistungspegel der Schallquelle.

Der Schallleistungspegel der Schallquelle sollte nach ISO 3741 gemessen werden.

A.2.2 Messungen der frühen Abklingzeit

Die frühe Abklingzeit (en: early decay time (*EDT*)) muss (wie die herkömmliche Abklingzeit) aus der Neigung der integrierten Impulsantwort-Kurven ermittelt werden. Die Neigung der Abklingkurve sollte aus linearen Regressions-Geraden bester Anpassung aus den anfänglichen 10 dB (zwischen 0 dB und –10 dB) des Abklingvorgangs ermittelt werden. Die Abklingzeiten sollten aus der Steigung innerhalb der Zeit, die für einen 60 dB–Abklingvorgang erforderlich ist, ermittelt werden.

Es sollte sowohl *EDT* als auch *T* berechnet werden. *EDT* ist subjektiv bedeutsamer und hängt mit der Nachhall-Empfindung zusammen, während *T* zu den physikalischen Eigenschaften des Zuhörerraums in Bezug steht.

A.2.3 Balance zwischen früh und spät eintreffender Energie

Es gibt zwar verschiedene Parameter, die in dieser Gruppe verwendet werden können, jedoch ist einer der einfachsten das Verhältnis des früh eintreffenden zum spät eintreffenden Energie-Anteil. Dieses kann entweder für eine Zeitgrenze der frühen Energie von 50 ms oder von 80 ms nach Gleichung (A.10) in dB berechnet werden, je nachdem, ob beabsichtigt ist, die Ergebnisse auf Bedingungen von Sprache bzw. von Musik zu beziehen.

$$C_{t_e} = 10 \cdot \lg \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e} p^2(t) dt} \quad (\text{A.10})$$

Dabei ist

C_{t_e} eine Früh-zu-Spät-Index genannte Kennzahl;

t_e die frühe Zeitgrenze von entweder 50 ms oder 80 ms (C_{80} wird üblicherweise „Klarheitsmaß“ genannt);

$p(t)$ der Momentanschalldruck der Impulsantwort, gemessen am Messpunkt.

ANMERKUNG 1 Es kann auch ein Verhältnis der früh eintreffenden zur Gesamt-Schallenergie gemessen werden. Beispielsweise wird D_{50} („Tonschärfe“ oder „Deutlichkeit“) manchmal für Sprach-Bedingungen benutzt, nach Gleichung (A.11):

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,050} p^2(t) dt}{\int_0 p^2(t) dt} \quad (\text{A.11})$$

Dies steht mit C_{50} durch die Beziehung in Gleichung (A.12) in dB in genauem Zusammenhang:

$$C_{50} = 10 \cdot \lg \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad (\text{A.12})$$

Demzufolge ist es nicht notwendig, beide Größen zu messen.

Schließlich kann in dieser Gruppe von Messgrößen mit Hilfe von Gleichung (A.13) die Schwerpunktzeit T_S in Sekunden gemessen werden, die dem Zeitpunkt des ersten Momentes in der quadrierten Impulsantwort entspricht:

$$T_S = \frac{\int_0^8 t p^2(t) dt}{\int_0^8 p^2(t) dt} \quad (\text{A.13})$$

T_S vermeidet die diskrete Trennung der Impulsantwort in Früh- und Spätperiode.

Die Messgrößen in dieser Gruppe stehen in Bezug zur empfundenen Deutlichkeit, Klarheit oder des Gleichgewichts zwischen Klarheit und Nachhall (Halligkeit) oder Sprachverständlichkeit.

ANMERKUNG 2 Die Sprachverständlichkeit kann auch durch Messen des „Speech Transmission Index (STI)“ ermittelt werden (siehe [5]). Diese Größe wurde ursprünglich mittels speziell modulierter Rauschsignale gemessen, was in diesem Teil der ISO 3382 nicht beschrieben wird, aber sie kann auch durch nachträgliche Bestimmung der Impulsantwort ermittelt werden.

A.2.4 Messgrößen für den frühen Seitenschallgrad

Der Energie-Anteil J_{LF} aus seitlichen Richtungen, der innerhalb der ersten 80 ms eintrifft, kann mit Hilfe von Gleichung (A.14) aus Impulsantworten bestimmt werden, die mit einem Kugelmikrofon und einem mit Achter-Richtcharakteristik erhalten wird:

$$J_{LF} = \frac{\int_0^{0,080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad (\text{A.14})$$

Dabei ist

- $p_L(t)$ der Momentanschalldruck in der Zuhörerraum-Impulsantwort, gemessen mit einem Gradientenmikrofon;
- $p(t)$ der Momentanschalldruck der Impulsantwort, gemessen am Messpunkt.

Die Null-Richtung des Gradientenmikrofons sollte dabei auf eine mittlere Schallquellen-Stellung auf der Hauptbühne zeigen oder genau auf einzelne Quellen-Stellungen, so dass das Mikrofon vorzugsweise die aus seitlichen Richtungen eintreffende Schallenergie aufnimmt und nicht merklich durch den Direktschall beeinflusst wird.

Weil die Richtcharakteristik des Gradientenmikrofons im Wesentlichen kosinusförmig ist und die Druckwerte quadriert werden, variiert der sich ergebende Beitrag einer einzelnen Reflexion zur Seitenschall-Energie wie das Quadrat des Kosinus des Einfallswinkels der Reflexion bezogen auf die Achse größter Mikrofon-Empfindlichkeit.

Alternativ kann die folgende Näherung zum Erhalt der Seitenenergie-Anteile J_{LFC} deren Beiträge wie der Kosinus des Winkels variieren, angewendet werden, welche für subjektiv genauer gehalten wird (siehe Gleichung (A.15)):

$$J_{LFC} = \frac{\int_0^{0,080} |p_L(t) \bullet p(t)| dt}{\int_0^{0,080} p^2(t) dt} \quad (\text{A.15})$$

Dabei ist

$p_L(t)$ der Momentanschalldruck in der Zuhörerraum-Impulsantwort, gemessen mit einem Gradientenmikrofon;

$p(t)$ der Momentanschalldruck der Impulsantwort, gemessen am Messpunkt.

Seitenschallgrade stehen in Bezug zur scheinbaren Breite der Schallquelle.

Auch Messgrößen für die interaurale Kreuzkorrelation stehen offenbar in Bezug zum Raumeindruck. Sie werden in Anhang B beschrieben.

A.2.5 Messgrößen für den späten Seitenschallgrad

Der relative Pegel der spät eintreffenden Schallenergie L_J kann mit einer kalibrierten ungerichteten Schallquelle aus der im Zuhörerraum mit einem Mikrofon mit Achter-Richtcharakteristik erhaltenen Impulsantwort mit Gleichung (A.16) in dB bestimmt werden:

$$L_J = 10 \cdot \lg \left[\frac{\int_0^8 p_L^2(t) dt}{\int_0^8 p_{10}^2(t) dt} \right] \quad (A.16)$$

Dabei ist

$p_L(t)$ der Momentanschalldruck der Impulsantwort, der mit einem Gradientenmikrofon gemessen wurde;

$p_{10}(t)$ der Momentanschalldruck der Impulsantwort, der mit einem ungerichteten Mikrofon im Abstand von 10 m im Freifeld gemessen wurde.

Die Null-Richtung des Mikrofons mit Achter-Richtcharakteristik sollte dabei auf eine mittlere Schallquellen-Stellung auf der Hauptbühne zeigen oder genau auf einzelne Quellen-Stellungen, so dass das Mikrofon vorzugsweise die aus seitlichen Richtungen eintreffende Schallenergie aufnimmt und nicht merklich durch den Direktschall beeinflusst wird.

Der frequenz-gemittelte späte Seitenschallgrad $L_{J,avg}$ wird nach Gleichung (A.17) in dB berechnet:

$$L_{J,avg} = 10 \lg \left[0,25 \sum_{i=1}^4 10^{\frac{L_{J_i}}{10}} \right] \quad (A.17)$$

Dabei ist

L_{J_i} der Wert im Oktavband i ;

i jedes der vier Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz und 1 000 Hz.

Der späte Seitenschallgrad bezieht sich auf die wahrgenommene Zuhörer-Einhüllung oder Räumlichkeit im Zuhörerraum.

A.3 Messverfahren

A.3.1 Schallquelle

Die Schallquelle und die zugehörigen Geräte sollten so beschaffen sein, dass ein Messsignal ausreichend hohen Pegels in allen Oktavbändern von 125 Hz bis 4 000 Hz abgestrahlt wird, damit sich in jedem Oktavband ein hinreichend großer Abkling-Bereich ergibt. Die Quelle muss so ungerichtet wie möglich sein (siehe 4.2.1).

Für Prüfungen mit Bezug auf Sprecher-Bedingungen sollte eine Schallquelle mit einer Richtwirkung verwendet werden, die einen menschlichen Sprecher annähert. Kunstköpfe entsprechend [6] können ohne besondere Prüfung der Richtcharakteristik verwendet werden.

A.3.2 Mikrofone

Zur Messung der Impulsantworten für alle Messgrößen sollte ein Kugelmikrofon benutzt werden.

Für J_{LF} -Werte ist auch ein Gradientenmikrofon erforderlich und es sollten die relativen Empfindlichkeiten des Kugel- und des Gradientenmikrofons in der Richtung maximaler Empfindlichkeit im Freifeld kalibriert werden.

Für G -Werte muss die Empfindlichkeit des Kugelmikrofons kalibriert werden.

A.3.3 Impulsantworten

Für die Berechnung aller Messgrößen sind in Oktavbändern gemessene Impulsantworten notwendig. Diese können unter Benutzung einer Impulsschallquelle, wie einer Platzpatronen-Pistole, oder mit komplizierterer Technik erzeugt werden, die die Berechnung der Impulsantwort aus Signalen verschiedener Art erfordert, die von Lautsprechern abgestrahlt werden. Falls die sich ergebende Impulsantwort nicht genau wiederholbar ist, sollten die Ergebnisse als Mittelwerte über mehrere wiederholte Messungen am gleichen Messort bestimmt werden.

Platzpatronen-Pistolen lassen sich so herrichten, dass sie fast kugelförmig abstrahlen, jedoch ergeben sich damit nicht genau wiederholbare Impulsantworten. Sie können sehr hohe Schallpegel erzeugen, die dann Ergebnisse mit einem wünschenswert großen Dynamikbereich liefern; dies kann jedoch zu nicht-linearen Effekten im Nahbereich der Pistole führen.

Verfahren mit einem Lautsprecher als Schallquelle sind durch den Frequenzbereich und die Richtcharakteristik des Lautsprechers eingeschränkt. Der mittlere Frequenzgang kann bis zu einem gewissen Grad korrigiert werden, Richtungs-Schwankungen lassen sich jedoch nicht ausschließen, und sie werden bei höheren Frequenzen beträchtlich groß. Es bewährt sich im Allgemeinen nicht sonderlich, einen Lautsprecher zur Abstrahlung von Impuls-Signalen verschiedener Art zu benutzen, weil der Dynamikbereich der erzeugten Impulsantwort begrenzt ist, sofern nicht viele Impulsantworten synchron gemittelt werden. Eine Kreuzkorrelation des Quellen- und des Empfänger-Signals kann Impulsantworten mit gutem Dynamikbereich und Unempfindlichkeit gegen Störgeräusche liefern (siehe ISO 18233). Die Anwendung der schnellen Hadamard-Transformation und von MLS-Signalen stellt einen erfolgreichen Korrelations-Ansatz dar [14]. Andere Signale mit breitbandig glattem Spektrum, wie „Chirps“ und gleitende Sinustöne, lassen sich ebenfalls mit Erfolg verwenden.

A.3.4 Zeitfenster-Bildung und Filtern der Antworten

Impulsantworten sollten in Oktavbereichen gefiltert werden.

Filter rufen Zeitverzögerungen in den Signalen hervor, die für die Oktavbänder niedriger Frequenz mit geringerer Bandbreite beträchtlich sein können. Daher wird der Beginn des gefilterten Signals gegenüber dem ungefilterten Signal verzögert, und ebenso dauert das gefilterte Signal nach dem Ende des ungefilterten Signals noch an. Dies bereitet besondere Schwierigkeiten für Messgrößen wie C_{80} oder Energieanteil J_{LF} , bei denen die Anteile der kurzen Anfangs-Zeitabschnitte der Signale in Oktavbändern gefiltert werden.

Den besten Ansatz zur Vermeidung der Probleme, die sich aus der Zeitverzögerung durch die Filter ergeben, bietet die Zeit-Fensterung der breitbandigen Impulsantwort vor dem Filtervorgang. Der Anfangspunkt der Impulsantwort für die Gleichungen in A.2 sollte aus der breitbandigen Impulsantwort dort bestimmt werden, wo sich das Signal erstmalig deutlich aus dem Störpegel abhebt, jedoch mindestens 20 dB unterhalb des Maximalwerts liegt. Die frühen und späten Teile der Impulsantwort werden getrennt gefiltert, und die Integrationsbereiche in den Gleichungen in A.2 werden vergrößert, um auch die durch die Filter verzögerte Energie zu erfassen.

Eine Näherung für die beschriebene Fensterung vor dem Filtern ergibt sich durch Anwendung einer Fenster-Korrektur [7]. Wenn die Impuls-Signale zunächst in Oktavbändern gefiltert werden, sollte der Integrations-Beginn in den Gleichungen in A.2 als derjenige Punkt bestimmt werden, wo sich das gefilterte Signal deutlich aus dem Störpegel abhebt, jedoch mindestens 20 dB unter dem Maximalwert liegt. Das frühe Zeitintervall t_e muss an diesem Triggerpunkt beginnen und t_e Sekunden vermehrt um die halbe Verzögerungszeit des Filters andauern. Das späte Zeitintervall sollte am Zeitpunkt t_e , in Sekunden, vermehrt um die halbe Verzögerungszeit des Filters nach dem Triggerpunkt beginnen. In diesem Zusammenhang ist die Filter-Verzögerungszeit diejenige Zeit, in der die Hälfte der Energie das Filter verlässt, wenn dieses mit einem Impuls gespeist wird.

Weil der direkt und früh eintreffende Schall niedriger Frequenz merklich gedämpft sein kann, ist es möglich, dass sich der Anfang der niederfrequenten Antworten nicht ermitteln lässt. Es kann dann erforderlich sein, die Anfangszeit aus den breitbandigen oder den Impulsantworten höherer Frequenz und aus der gemessenen Zeitverzögerung der Filter zu bestimmen.

A.3.5 Abklingkurven

Das Verfahren der integrierten Impulsantwort (Rückwärts-Integration) nach 5.3.3 sollte angewendet werden, um integrierte Oktavband-Abklingkurven zu erhalten, aus denen die Abklingzeiten errechnet werden. Es ist vorteilhaft, auch andere Messgrößen aus diesen Abklingkurven zu berechnen, vorausgesetzt dass eine korrekte Zeit-Fensterung stattfindet. Diese Vorgehensweise erfordert die genaue Bestimmung des Anfangszeitpunkts jeder oktavgefilterten Antwortfunktion aus der breitbandigen Antwort. Unter anderen Bedingungen kann die Vorwärts-Integration zur getrennten Bestimmung der Werte anderer Messgrößen benutzt werden.

A.4 Messpositionen

Die verschiedenen Messgrößen sind keine statistischen Merkmale des gesamten Zuhörerraums, sie schwanken vielmehr systematisch von Sitzplatz zu Sitzplatz. Es ist daher wichtig, eine angemessene Anzahl von Schallquellen- und Empfängerpositionen einzubeziehen, um den Gesamtraum zu charakterisieren.

Üblicherweise sind mindestens drei Schallquellenstellungen auf der Bühne zu verwenden. In Räumen mit großen Bühnen oder Orchestergräben sind noch weitere Stellungen zu wählen. In kleinen Hörsälen, in denen sich die übliche Schallquelle nur an einem Ort im Raum befindet, genügt nur eine Position für die Mess-Schallquelle.

Die Schallquelle sollte sich an solchen Orten befinden, die üblicherweise von den Aufführenden im Raum genutzt werden. Weil die meisten Räume symmetrisch zur Mittelachse sind, können die Aufstellungsorte des Empfängers auf nur einer Seite des Raumes gewählt werden bei Schallquellenstellungen symmetrisch zur Mittelachse. Demzufolge könnte eine zentrale Schallquellenstellung zugleich mit anderen Quellenstellungen genutzt werden, die sich rechts und links auf der Bühne in gleicher Entfernung von der Mittelachse befinden. Für die Schallquelle wird eine Höhe von 1,5 m empfohlen, um tieffrequente Veränderungen der Ausgangsleistung der Schallquelle im Frequenzbereich der Messung zu vermeiden.

Falls die Richtwirkung der Schallquelle den in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerten nahekommt, sollte die Messung wiederholt werden, wobei die Quelle in wenigstens drei Schritten einmal um sich selbst gedreht wird. Die Werte der Parameter, die sich für die verschiedenen Winkel ergeben, sollten arithmetisch gemittelt werden.

Abhängig von der Größe des Raumes sollten mindestens 6 bis 10 typische Mikrofonstellungen gewählt werden. In Tabelle A.2 ist die Mindestanzahl der Empfängerstellungen angegeben, wie sie als Funktion der Raumgröße empfohlen wird. Die Empfängerpositionen sollten gleichmäßig über alle Flächen verteilt werden, die mit Zuhörern besetzt werden. Falls der Raum in einzelne Bereiche, wie Emporen und Flächen unter Emporen, aufgeteilt ist, sind weitere Empfängerstellungen erforderlich.

Das Mikrofon sollte in 1,2 m Höhe über dem Fußboden an Zuhörer-Sitzplätzen aufgestellt werden, um repräsentativ für die Höhe des Ohrs eines sitzenden Zuhörers zu sein.

Die Stellungen der Schallquelle und des Empfängers und ihre Höhen sollten zusammen mit den Ergebnissen notiert werden. Ebenso sollten die Gegebenheiten auf der Bühne, wie das Vorhandensein von Stühlen und Notenpulten, schriftlich festgehalten werden, weil sie sich messbar auf die Ergebnisse auswirken.

Tabelle A.2 — Mindestanzahl an Empfängerpositionen als Funktion der Größe des Zuhörerraums

Anzahl an Sitzplätzen	Mindestanzahl an Mikrofonpositionen
500	6
1 000	8
2 000	10

A.5 Angabe der Ergebnisse

Zusätzlich zur Darstellungsform der Ergebnisse wie für die Nachhallzeit T beschrieben, lassen sich Werte in knapperer Form angeben, indem Mittelwerte aus den Ergebnissen für Paare von Oktavbereichen gebildet werden. So werden die Werte aus den 125-Hz- und 250-Hz-Bereichen arithmetisch gemittelt, um ein Ergebnis für tiefe Frequenzen zu liefern, für den mittleren Frequenzbereich werden die 500-Hz- und 1 000-Hz-Ergebnisse gemittelt und die 2 000-Hz- und 4 000-Hz-Ergebnisse für den hohen Frequenzbereich. Seitenschall-Anteile im 4 000-Hz-Oktavband werden üblicherweise nicht als subjektiv bedeutsam angesehen.

Für einen Einzahl-Wert der Parameter gilt der arithmetische Mittelwert für die Oktavbänder, außer für L_J , der energetisch gemittelt werden muss [Gleichung (A.17)]. Die in Tabelle A.1 angegebene Frequenzmittelung sollte angewendet werden und das Formelzeichen sollte dann mit dem Index m (für Wichtung) versehen werden.

BEISPIEL 1 G_m für das in 500-Hz- bis 1 000-Hz-Oktavbändern gemittelte Stärkemaß.

BEISPIEL 2 J_{LFm} für den in 125-Hz- bis 1 000-Hz-Oktavbändern gemittelten frühen Seitenschallgrad.

Die Messergebnisse für die in diesem Anhang beschriebenen Messgrößen sollten normalerweise nicht über alle Mikrofonpositionen im Raum gemittelt werden, da von den Messgrößen angenommen wird, dass sie die örtlichen akustischen Bedingungen beschreiben. Im Fall eines sehr großen Raums kann es hilfreich sein, die Ergebnisse in einigen Raumabschnitten (Stände, erster Rang usw.) zu mitteln. Einige Messgrößen wie das Stärkemaß G verändern sich mit dem Abstand und eine graphische Darstellung von G als Funktion des Abstandes zwischen Schallquelle und Empfänger kann dementsprechend hilfreich sein.

Anhang B (informativ)

Binaurale Messgrößen in Zuhörerräumen, hergeleitet aus Impulsantworten

B.1 Allgemeines

Der Hörvorgang vollzieht sich binaural. Subjektive Untersuchungen von Zuhörerräumen haben gezeigt, dass interaurale Kreuzkorrelationskoeffizienten (en: Inter-aural cross correlation coefficient, IACC) gemessen entweder mit einem Kunstkopf oder mit einem wirklichen Kopf mit Abmessungen annähernd gleich denen des Kunstkopfs, und mit kleinen Mikrofonen am Eingang der Gehörgänge gut mit dem subjektiven Merkmal „Räumlichkeitseindruck“ in einem Konzertsaal korrelieren. (Messgrößen für die früh eintreffende Seitenschall-Energie werden ebenso als in Bezug zur Räumlichkeit stehend angesehen (siehe Anhang A) behandelt.

Der räumliche Eindruck kann in zwei Unterklassen eingeteilt werden:

- Unterklasse 1: Verbreiterung der Schallquelle, d. h. scheinbare Quellenbreite (en: apparent source width, ASW);
- Unterklasse 2: Eindruck inmitten des Schalls bzw. von diesem eingehüllt zu sein, d. h. Zuhörer-Einhüllung (en: listener envelopment, LEV).

B.2 Definition von IACC

Die normalisierte interaurale Kreuzkorrelationsfunktion (en: inter-aural cross correlation function, IACF) ist zuerst unter Verwendung von Gleichung (B.1) definiert:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (B.1)$$

Dabei ist

$p_l(t)$ die Impulsantwort am Eingang zum linken Ohrkanal;

$p_r(t)$ die Impulsantwort am Eingang zum rechten Ohrkanal.

Die interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten IACC sind dann durch Gleichung (B.2) gegeben:

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, \quad \text{für } -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms} \quad (B.2)$$

B.3 Messköpfe

B.3.1 Kunstkopf

Ein Kunstkopf mit Ohrmuschel (Pinna) und Gehörgängen ist als Normal für eine vorgegebene Menge von Messungen zu wählen. Kunstköpfe nach [6] dürfen ohne weitere Prüfung der Geometrie oder des akustischen Verhaltens benutzt werden. Die Auswahl und Verwendung eines Kunstkopfs müssen im Prüfbericht deutlich angegeben werden, und die Ausrichtung des Kunstkopfs ist im Einzelnen zu beschreiben.

Bei Messungen in einem Zuhörer Raum sollte die Höhe der Gehörgänge des Kunstkopfs über dem Fußboden etwa 1,2 m betragen.

B.3.2 Natürliche Köpfe

Natürliche Köpfe dürfen anstelle des Kunstkopfs zur Bestimmung von $p_L(t)$ genutzt werden, falls $K_1 < [\text{Kopfbreite vermehrt um das Doppelte der Differenz zwischen der Kopflänge und dem Abstand vom Ohr-Eingangspunkt (en: ear entrance point, EEP) zum Hinterkopf-(Okzipital-)Knochen]} < K_2$, wobei K_1 und K_2 sich aus Vergleichen mit dem Kunstkopf derart bestimmen, dass die IACC-Werte, die mit den wirklichen Köpfen gemessen werden, mit denen der Kunstköpfe innerhalb $r = 0,85$ oder besser korrelieren. Die Auswahl und Nutzung wirklicher Köpfe sollten im Prüfbericht deutlich angegeben werden, und die den Personen gegebenen Anweisungen sowie der Typ der benutzten Mikrofone sollten im Einzelnen beschrieben werden.

B.4 Verwendung der IACC

Für die Anwendungen von IACC besteht noch keine allgemeine Übereinstimmung. Wie bei J_{LF} und J_{LFC} sind Gebrauch und subjektive Bedeutung von IACC noch Gegenstand von Diskussion und Forschung. Ebenso sind verschiedene Möglichkeiten zur Wahl der Zeitgrenzen t_1 und t_2 sowie zur Frequenz-Filterung der Signale vorgeschlagen worden [8].

Die allgemeinste Form von IACC wird mit $t_1 = 0$ und $t_2 = 8$ (in der Raumakustik eine Zeit von der Größenordnung der Nachhallzeit) und mit einem breiten Frequenzband definiert. Wie bei monauralen Messungen wird IACC im Allgemeinen in Oktavbändern zwischen 125 Hz und 4 000 Hz gemessen.

IACC kann gemessen werden, um zu beschreiben, wie das Signal an den beiden Ohren in ungleicher Form eintrifft, entweder für die frühen Reflexionen ($t_1 = 0$ s und $t_2 = 0,08$ s) oder für den Nachhall-Schall ($t_1 = 0,08$ s und t_2 gleich einer Zeit größer als die Nachhallzeit im Raum).

Für die Unterscheidungsschwelle (en: just noticeable difference, JND) des IACC wird ein Wert von 0,075 angenommen.

B.5 Messverfahren

Das Messverfahren sollte im Allgemeinen dem in Anhang A angegebenen Verfahren entsprechen.

Anhang C (informativ)

Aus Impulsantworten abgeleitete Bühnen-Messgrößen

C.1 Allgemeines

In Konzertsälen und anderen Aufführungsräumen ist es wichtig, dass es die akustischen Bedingungen den Musikern erlauben, sich gegenseitig zu hören, und dass die Raumantwort ausreichend ist. Zur objektiven Bewertung dieser Bedingungen hat es sich als hilfreich erwiesen, Messungen auf der Orchesterbühne mit nahe zueinander angeordneter Schallquelle und Mikrofon durchzuführen [19]. Aus den Messungen können zwei verschiedene Parameter abgeleitet werden (siehe Tabelle C.1).

Tabelle C.1 — Auf Orchesterbühnen gemessene akustische Parameter

Subjektiver Zuhöreraspekt	Akustische Größe	Einzelfrequenz-Mittelwertbildung Hz	JND (Unterscheidungsschwelle)	Üblicher Bereich
Ensemblebedingungen	Frühe Unterstützung ST_{early} , in Dezibel	250 bis 2 000	Unbekannt	–24 dB; –8 dB
Wahrgenommene Halligkeit	Späte Unterstützung ST_{late} , in Dezibel	250 bis 2 000	Unbekannt	–24 dB; –10 dB

C.2 Definition der Messgrößen

C.2.1 Frühe Unterstützung

Dies ist das Verhältnis der reflektierten Energie innerhalb der ersten 0,1 s relativ zum Direktschall (inklusive Bodenreflexion), beide bei einem Abstand von 1,0 m zum akustischen Zentrum einer ungerichteten Schallquelle in dB gemessen. Andere reflektierende Flächen sollten mehr als 2 m von der Messposition entfernt sein, siehe Gleichung (C.1):

$$ST_{\text{early}} = 10 \cdot \lg \left[\frac{\int_{0,020}^{0,100} p^2(t) dt}{\int_0^{0,010} p^2(t) dt} \right] \quad (\text{C.1})$$

Dabei ist

$p(t)$ der Momentanschalldruck der Impulsantwort, der am Messpunkt gemessen wurde; und

$t = 0$ entspricht dem Eintreffen des Direktschalls.

Die frühe Unterstützung bezieht sich auf das Ensemble, d. h. wie leicht andere Mitglieder des Orchesters gehört werden können.

C.2.2 Späte Unterstützung

Dies ist das Verhältnis der reflektierten Energie, in Dezibel, nach der ersten 0,1 s relativ zum Direktschall (einschließlich der Bodenreflexion), beide bei einem Abstand von 1,0 m zum akustischen Zentrum einer ungerichteten Schallquelle gemessen. Andere reflektierende Flächen oder Objekte sollten mehr als 2 m von der Messposition entfernt sein, siehe Gleichung (C.2):

$$ST_{\text{late}} = 10 \cdot \lg \left[\frac{\int_{0,100}^{1,000} p^2(t) dt}{\int_0^{0,010} p^2(t) dt} \right] \quad (\text{C.2})$$

Dabei ist

$p(t)$ der Momentanwert des Schalldrucks der Impulsantwort, der am Messpunkt gemessen wurde; und

$t = 0$ entspricht dem Eintreffen des Direktschalls.

Die späte Unterstützung bezieht sich auf die wahrgenommene Halligkeit, d. h. das vom Musiker gehörte Hallverhalten.

C.2.3 Messpositionen

Die Höhe der Schallquelle und des Mikrofons muss die gleiche sein, entweder 1,0 m oder 1,5 m über dem Boden. Normalerweise sollten mindestens drei verschiedene Quellen- und Empfängerpositionen genutzt werden. Die Messungen sollten vorzugsweise mit auf der Orchesterbühne befindlichen Stühlen und Notenständern durchgeführt werden, wobei die nächsten Stühle und Notenpulte innerhalb von 2 m zur Schallquelle und zum Mikrophon entfernt werden sollten, um den Schall nicht direkt zum Mikrophon zu reflektieren. Die Schallquellen- und Empfängerpositionen sowie deren Höhe sollten zusammen mit den Ergebnissen angegeben werden.

C.2.4 Angabe der Ergebnisse

Die Messungen erfolgen in Oktavbändern. Das arithmetisch gemittelte Ergebnis in den vier Oktavbändern von 250 Hz bis 2 000 Hz und in den drei Positionen sollte als ein Einzahl-Ergebnis berechnet werden.

Die Standardabweichung des Ergebnisses in einer Einzelposition in einem Oktavband wird auf 1 dB eingeschätzt. Die Standardabweichung des frequenz- und positionsgemittelten Einzahl-Ergebnisses wird auf 0,3 dB eingeschätzt.

Literaturhinweise

- [1] ISO 354:2003, *Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*
- [2] ISO 3741, *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for reverberation rooms*
- [3] ISO 18233, *Acoustics — Application of new measurement methods in building and room acoustics*
- [4] IEC 60268-1, *Sound system equipment — Part 1: General*
- [5] IEC 60268-16, *Sound system equipment — Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*
- [6] ITU Recommendation P.58:1994, *Head and torso simulator for telephonometry*
- [7] BARRON, M., *Impulse Response Testing Techniques for Auditoria*, App. Acoust., Vol. **17**, 1984, S. 165
- [8] KEET, W. de V., *The Influence of Early Lateral Reflections on Spatial Impression*, 6th International Congress on Acoustics, Tokyo, 1968
- [9] KLEINER, M. A. *New Way of Measuring Lateral Energy Fractions*, App. Acoust., Vol. **27**, 1989, S. 321
- [10] RASMUSSEN, B., RINDEL, J. H. und HENRIKSEN, H., *Design and Measurement of Short Reverberation Times at Low Frequencies in Talks Studios*, J. Audio Eng. Soc., Vol. **39**, 1991, S. 47
- [11] SCHROEDER, M. R., *New Method of Measuring Reverberation Time*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. **37**, 1965, S. 409
- [12] SCHROEDER, M. R., GOTTLOB, D. und SIEBRASSE, D. F. *Comparative Study of European Concert Halls: Correlation of Subjective Preference with Geometric and Acoustic Parameters*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. **56**, 1974, S. 1195
- [13] VORLÄNDER, M. und BIETZ, H. *Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time*, *Acustica*, Vol. **80**, 1994, S. 205
- [14] KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*, 3rd edition, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1991, chapter VIII
- [15] TACHIBANA, H. et al., *Definition and Measurement of Sound Energy Level of a Transient Sound Source*, J. Acoust. Soc. Jpn (E), Vol. 8 Nr. 6, 1987, S. 235
- [16] KOYASU, M. et al., *Measurement of Equivalent Sound Absorption Area by Stationary and Impulsive Reference Sound Sources*, Proc. of Inter-Noise 94, 1994, S. 1501
- [17] BRADLEY, J. S. und SOULODRE, G. A., *Objective measures of listener envelopment*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. **98**, 1995, S. 2590
- [18] BARRON, M., *Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results*, *Acoustical Science and Technology*, Vol. **26**, 2005, S. 162–169
- [19] GADE, A. C., *Practical Aspects of Room Acoustical Measurements on Orchestra Platforms*, Proc. of 14th ICA, Beijing, 1992, Paper F3–5
- [20] BARTEL, T. W. und YANIV, S. L., *Curvature of sound decays in partially reverberant rooms*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. **72**, 1982, S. 1838–1844
- [21] DAVY, J.L., DUNN, I.P., DUBOUT, P., *The variance of decay rates in reverberation rooms*. *Acustica* 1979, 43, pp. 12–25
- [22] DAVY, J.L., *The variance of impulse decays*. *Acustica* 1980, 44, pp. 51–56