

	DIN 38457	
ICS 17.140.01	Einsprüche bis 2024-07-03	
Entwurf		
Akustik – Software für die Berechnung von Schall in Arbeitsräumen – Qualitätssicherung der implementierten Verfahren Acoustics – Software for the calculation for workspaces – Quality assurance of software-implemented methods Acoustique – Logiciels de prévision de bruit des espaces de travail – Assurance qualité des méthodes mises en œuvre par logiciel Anwendungswarnvermerk Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-05-03 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Weil das beabsichtigte Dokument von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren. Stellungnahmen werden erbeten – vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben; – oder als Datei per E-Mail an nals@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden; – oder in Papierform an den DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin. Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen. Gesamtumfang 49 Seiten DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS)		

Inhalt

	Seite
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Berechnungsverfahren	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Reflexionsberechnung mit geometrischen Verfahren	8
4.3 Deterministische und stochastische Verfahren	9
4.4 Schallquellen	12
4.5 Berücksichtigung von Absorption, Transmission und Reflexion	12
4.6 Beugung von Schall und Pegelminderung durch Abschirmung	13
5 Prognoseberechnung für Arbeitsstätten	13
5.1 Schallquellen-Modellierung	13
5.2 Kalibrierung auf der Basis von vorgegebenen Emissionswerten oder von Messwerten . .	14
5.2.1 Die Verwendung von L_{WA} und L_{pA} – die kennzeichnenden Emissionswerte nach Maschinenrichtlinie	14
5.2.2 Die Verwendung von bereinigten Messwerten im Umfeld der Maschine	15
5.2.3 Die Simulation des Hüllflächen-Verfahrens zur Kontrolle der effektiven Emission	15
5.2.4 Die Simulation des Hallraumverfahrens zur Kontrolle des Schallleistungspegels	15
5.3 Berechnung des Beurteilungspegels an Arbeitsplätzen	15
5.4 Berechnung der energiebezogenen Impulsantwort und abgeleiteter Kenngrößen	16
5.5 Berechnung der Nachhallzeit	16
5.6 Berechnung des STI	17
6 Testaufgaben	17
6.1 Allgemeines	17
6.2 T01 – Freie Schallausbreitung	18
6.3 T02 – Freie Schallausbreitung – Prüfung Isotropie auf Kugelfläche	20
6.4 T03 – Freie Schallausbreitung über reflektierendem Boden	22
6.5 T04 – Pegel im Hallraum (diffuses Schallfeld)	23
6.6 T05 – Nachhallzeit im leeren Hallraum	25
6.7 T06 – Nachhallzeit mit absorbierender Prüffläche im Hallraum	26
6.8 T07 – Bestimmung der Absorption einer Kulissenanordnung im Hallraum	27
6.9 T08 – Schallübertragung zwischen gekoppelten Räumen	30
6.10 T09 – Schallausbreitung mit Abschirmung im Freifeld	33
6.11 T10 – Schallausbreitung in dicht mit Objekten belegten Räumen	34
6.12 T11 – Schallausbreitung mit Abschirmung im Raum-Schallfeld	38
6.13 T12 – Berechnung des Speech Transmission Index STI mit Raumeinfluss für Diffusfeld-Bedingungen	39
6.14 T13 – Berechnung des Speech Transmission Index STI mit Raumeinfluss bei nicht diffusem Schallfeld	43
6.15 T14 – Berechnung des Speech Transmission Index STI mit Abschirmung	45
6.16 T15 – Berechnung des Speech Transmission Index STI mit Abschirmung und Fremdgeräuschen	46
7 Dokumentation der Ergebnisse und Zuordnung zum Anwendungsbereich	47
Literaturhinweise	49

Bilder

Bild 1 — Spiegelnde Reflexion (a) und diffuse Reflexion (b) am Flächenelement F	8
Bild 2 — Konstruktion der Strahlwege mit Spiegelquellen	9
Bild 3 — Spiegelung des Originalraums an seinen Begrenzungsflächen nach VDI 3760	10
Bild 4 — Strahlweg von der Punktschallquelle zum Immissionsort beim Radiosity-Verfahren, hier exemplarisch für eine Reflexion an zwei Wandelementen dargestellt	11
Bild 5 — Das stochastische Teilchenverfahren mit zufallsgesteuerter Aussendung von Teilchen oder Strahlen s durch eine Punktschallquelle S und Zählung der im Kontrollvolumen V um den Immissionsort R ankommenden Teilchen	11
Bild 6 — Absorption, Transmission und Reflexion des auf das Bauteil mit Leistung P auftreffenden Schalls	12
Bild 7 — Anordnung von Quelle S und Immissionsorten R (Abstände bis 20 m)	19
Bild 8 — Auf einer Achtel-Kugeloberfläche um die Quelle angeordnete Immissionspunkte	21
Bild 9 — Direkter und am Boden spiegelnd reflektierter Strahl	22
Bild 10 — Simulationsmodell eines Hallraums	24
Bild 11 — Modellhallraum mit einer Prüffläche	26
Bild 12 — Bestimmung des Schallabsorptionsgrads einer Kulissenanordnung im Hallraum	28
Bild 13 — Die kennzeichnenden geometrischen Parameter der Kulissenkonstruktion	28
Bild 14 — Die aneinandergrenzenden Räume T_1 (Senderraum) und T_2 mit Trennwand und Prüföffnung in Aufsicht	30
Bild 15 — Ansicht der über die Prüföffnung gekoppelten Räume	30
Bild 16 — Modellraum mit Schallschirm, Quelle und Immissionspunkten	33
Bild 17 — Flachraum dicht belegt mit schallstreuenden Objekten	35
Bild 18 — Die frequenznormierte Schallausbreitungskurve nach VDI 3760	36
Bild 19 — Quelle und Immissionspunkte sowie Schallschirm im Raum	38
Bild 20 — Ansicht mit den beiden durch den rechtwinkelig verlaufenden Schirm gebildeten Bereich	43
Bild 21 — Aus der Impulsantwort berechnete Abklingkurven für die 7 Frequenzbänder im absorbierend begrenzten Teilbereich	44
Bild 22 — Die für den Hauptraum bestimmten Abklingkurven für die 7 Frequenzbänder	44
Bild 23 — Raum mit Schirm, Quelle und Empfängerpositionen	45

Tabellen

Tabelle 1 — Anwendungsbereiche für die verschiedenen Testaufgaben	18
Tabelle 2 — Luftschalldämpfung bei Normalbedingungen für die Oktavband-Mittenfrequenzen	19
Tabelle 3 — Die Schalldruckpegel im Freifeld (die Pegel in Oktav-Frequenzbändern sind linear, die Summenpegel sind A-bewertet)	20
Tabelle 4 — Koordinaten der Immissionspunkte R_n und A-bewertete Gesamtschalldruckpegel	21
Tabelle 5 — Absorptionsgrad der reflektierenden Bodenplatte	23
Tabelle 6 — Die Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Abstand (die Pegel in Oktav-Frequenzbändern sind linear, die Gesamtschalldruckpegel sind A-bewertet)	23
Tabelle 7 — Pegel im diffusen Schallfeld — Sollwerte und Simulationsergebnis	25
Tabelle 8 — Ermittlung der Nachhallzeiten — Sollwerte und Simulationsergebnis	26
Tabelle 9 — Lage der Prüffläche (achsenparallel)	27
Tabelle 10 — Ermittelte Nachhallzeiten und Absorptionsgrade — Sollwerte und Simulationsergebnis	27
Tabelle 11 — Bestimmung der Absorptionsgrade α für die Kulissenanordnung	29
Tabelle 12 — Analytische Berechnung nach Gleichung (11) bis Gleichung (15) für die beiden gekoppelten Modell-Hallräume	32
Tabelle 13 — Schalldruckpegel in Raum 1 (Trennwand ohne Öffnung) in dB	32

Tabelle 14 — Schalldruckpegel in Raum 1 (Trennwand mit Öffnung) in dB	32
Tabelle 15 — Schalldruckpegel in Raum 2 (Trennwand mit Öffnung) in dB	32
Tabelle 16 — Differenz der Schalldruckpegel	33
Tabelle 17 — Schalleistungspegel der Quelle (bandbezogene Pegel und Gesamtpegel A-bewertet)	34
Tabelle 18 — Pegelminderungen dL_A (Differenz der A-bewerteten Gesamtpegel ohne und mit Schirm)	34
Tabelle 19 — Frequenzabhängige Eingabeparameter	35
Tabelle 20 — Bezugsspektrum zur Bildung der auf den Gesamtpegel bezogenen Schallausbreitungskurve SAK (A-bewertetes-Rosa-Rauschen entsprechend VDI 3760, Tabelle 1)	36
Tabelle 21 — Berechnung der Kennwerte $DL_f(nah)$ und $DL_f(mittel)$ für die SAK des Modellraums (gilt für konstante Streukörperdichte im gesamten Raum)	37
Tabelle 22 — Schalleistungspegel der Quelle (bandbezogene Pegel und Gesamtpegel A-bewertet)	39
Tabelle 23 — Pegelminderung dL_A bezogen auf den A-bewerteten Gesamtpegel	39
Tabelle 24 — Nachhallzeiten, MTF-Werte und STI für Hallraum leer (von TA 05)	40
Tabelle 25 — Nachhallzeiten, MTF-Werte und STI für Hallraum mit Prüffläche (TA 06)	41
Tabelle 26 — Nachhallzeiten, MTF-Werte und STI für Hallraum mit Kulissen (TA 07)	42
Tabelle 27 — Die für diese drei Hallraumkonfigurationen mit dem zu prüfenden Verfahren ermittelten STI-Werte	42
Tabelle 28 — Die zulässigen Ergebnisintervalle für den jeweils ermittelten Signalpegel und den STI	45
Tabelle 29 — Die zulässigen Ergebnisintervalle für den jeweils ermittelten Signalpegel und den STI	46
Tabelle 30 — Zuordnung der linearen Schalldruckpegel in dB in Oktav-Frequenzbändern zum Gesamtpegel in dB(A) für Sprachgeräusche	46
Tabelle 31 — Die für den berechneten Wert des STI (mit Hintergrundgeräusch) geltenden Ergebnisintervalle	47
Tabelle 32 — Angaben zur Bearbeitung der Testaufgaben (ankreuzen)	47
Tabelle 33 — Anwendungsbereiche, für die der Nachweis mit den Testaufgaben erbracht wurde	48

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 001-02-03 AA „Schallausbreitung, Schallschutz und Lärminderung“ im DIN-Normenausschuss DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) erarbeitet.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Einleitung

Für die Berechnung der Schallausbreitung im Freien gibt es ein umfängliches Repertoire an genormten Berechnungsverfahren wie z. B. die ISO 9613-2 [1] sowie zur Sicherstellung und zum Nachweis einer korrekten Implementierung ein Regelwerk wie die Normenreihe ISO 17534 [2] mit entsprechenden Testaufgaben und vorgegebenen Ergebnisintervallen. Letzteres ist vor allem für die Berechnungsverfahren erforderlich, die in gesetzlich geregelten Bereichen angewendet werden, damit die erforderliche Präzision bei der Anwendung unterschiedlicher Softwareprodukte gewährleistet werden kann.

Eine ähnliche Strategie soll bei der softwaregestützten Berechnung der Schallausbreitung in Räumen verfolgt werden. Dies ist vor allem dann von Interesse, wenn mit den hier angewendeten Berechnungsverfahren die Einhaltung von maximal zulässigen Beurteilungspegeln an Arbeitsplätzen, die angestrebte akustische Qualität von Arbeitsräumen oder andere die Optimierung der Schallsituation betreffende Parameter im Zuge der Planung sichergestellt und nachgewiesen werden sollen.

Allerdings können sowohl die Berechnungsverfahren wie auch die zur Qualitätssicherung entwickelten Testaufgaben nicht ohne Weiteres vom Bereich der Schallausbreitung im Freien auf die Schallausbreitung in Räumen übertragen werden. Im Freien ist die weitestgehend bodenparallele Schallausbreitung wesentlich, während in Räumen aufgrund der an den Begrenzungsflächen erfolgenden Mehrfachreflexion alle drei Dimensionen grundsätzlich gleichberechtigt sind und somit bei der Berechnung der Strahlwege berücksichtigt werden müssen.

Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Zuordnung der Immissionsorte zu den Schallquellen. In Büroumgebungen mit der oft kleinräumigen Anordnung von Arbeitsplätzen und akustisch wirksamen Einrichtungsobjekten ergibt sich für jedes Paar Quelle – Empfänger eine Vielzahl von relevanten und bei der Berechnung zu berücksichtigenden Ausbreitungswegen.

Die Arbeitsplätze in industriellen Fertigungs- und Verpackungsanlagen befinden sich oft in Abständen von geräuschbestimmenden Maschinen und Einrichtungen, die von gleicher Größenordnung oder gar kleiner als die Abmessungen der Quellbereiche sind. Bei der Berechnung kann dieses Problem gelöst werden, indem zur Beschreibung des Direktschallanteils einer Quelle am zugeordneten Arbeitsplatz deren Emissions-Schalldruckpegel L_{pA} und für die Berechnung aller anderen von ihr verursachten Immissionsbeiträge ihr Schallleistungspegel L_{WA} verwendet wird.

Die Gewichtung der akustischen Einflussfaktoren wird vom Zweck der vorgesehenen Schallberechnung wesentlich beeinflusst. Während es bei der **Lärmprognose** für industrielle Arbeitsstätten vorwiegend darauf ankommt, den von Schallquellen gegebener Emission an vorgegebenen Immissionsorten verursachten Schalldruckpegel zu berechnen, ist es bei der für Büroräume und andere Arbeitsstätten oft zu untersuchenden **Nachhallzeit** oder des zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit zu ermittelnden **Sprachübertragungsindex** (STI, en: **Speech Transmission Index**) wichtig, die Laufzeit von Schallsignalen zur Berechnung der energiebezogenen Impulsantwort zu berücksichtigen.

Da mit den verfügbaren in Software implementierten Berechnungsverfahren je nach der im Vordergrund stehenden Anwendung unterschiedliche Strategien angewendet werden, wird mit diesem Dokument zur Qualitätssicherung der Schallberechnung für Arbeitsstätten auch kein „qualitätssicherbares“ Berechnungsverfahren unter Einbeziehung der anzuwendenden Algorithmen festgelegt. Vielmehr werden die wichtigsten für diese Zwecke geeigneten Berechnungsstrategien im Folgenden nur allgemein zusammenfassend beschrieben. Die erforderliche Qualitätssicherung wird über einen geeigneten Satz von Testaufgaben erreicht. Diese sind so gewählt, dass die Ergebnisse mit den vereinbarten Intervallgrenzen als gesichert vorausgesetzt und somit auch für eine die einzelnen Schallstrahlen bzw. Teilchenwege berücksichtigende Detailberechnung als „Prüfnormal“ betrachtet werden können.

Die Qualitätsprüfung nach diesem Dokument ist eine wesentliche Voraussetzung zur Verwendung eines Softwareprodukts für die Lärminderung und schalltechnisch optimale Gestaltung von Arbeitsstätten im Sinne der hierzu geltenden Regelwerke [3].

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Verfahren für die Qualitätssicherung von softwarebasierten Berechnungsverfahren von akustischen Kenngrößen in Arbeitsräumen fest.

Es ist anwendbar für Berechnungsverfahren, mit denen auf der Basis eines dreidimensionalen Datenmodells des Arbeitsraumes zur schalltechnischen Beurteilung benötigte Kennwerte ermittelt werden, wie z. B. die Schalldruckpegel an Arbeitsplätzen auf der Basis der Emissionskennwerte der Schallquellen (Lärmprognose), sowie die Nachhallzeit und der Sprachübertragungsindex (STI) für vorgegebene Schallquellen- und Hörerpositionen.

Die Qualitätssicherung nach diesem Dokument ist eine wesentliche Voraussetzung für ein in Software implementiertes Verfahren, damit es zur Berechnung der zu erwartenden Lärm-Expositionspegel auf der Basis von Emissionskennwerten der vorgesehenen lärmrelevanten Einrichtungen und damit zur Gefährdungsbeurteilung im Sinne der in TRLV-Lärm [4] bei der Planung einer Arbeitsstätte verwendet werden kann. Diese Voraussetzung gilt auch in Fällen, in denen die in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR [5] genannten Anforderungen an die für den Raum zu erwartenden akustischen Kenngrößen im Planungsstadium beurteilt bzw. sichergestellt werden sollen.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term/>
- DKE-IEV: verfügbar unter <https://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Nachhallzeit

T

Dauer zwischen dem Abschalten der Quelle und dem Zeitpunkt, an dem die räumlich gemittelte Schallenergie-dichte um 60 dB abgenommen hat

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Nachhallzeit wird in Sekunden angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: T kann aus einem kleineren Dynamikbereich als 60 dB ermittelt und auf eine Abklingzeit bei 60 dB extrapoliert werden.

[QUELLE: DIN EN ISO 3382-2:2008-09, 3.5, Anmerkung 2 nicht vollständig übernommen]

3.2

Sprachübertragungsindex

STI , en: speech transmission index

Maß zwischen 0 und 1, dass die Übertragungsqualität von Sprache im Hinblick auf die Verständlichkeit eines Sprachübertragungskanal darstellt

[QUELLE: DIN EN IEC 60268-16:2021-10, 3.3]

3.3

Streugrad

s_θ

en **scattering coefficient**

Wert, berechnet durch 1 minus das Verhältnis der spiegelnd reflektierten Schallenergie zur gesamten reflektierten Schallenergie

Anmerkung 1 zum Begriff: Theoretisch kann s_θ Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 eine vollständig spiegelnd reflektierende Oberfläche und 1 eine vollständig streuende Oberfläche bedeutet. Der tiefgestellte Index θ kann verwendet werden, um den Einfallswinkel relativ zur Flächennormalen anzugeben.

[QUELLE: ISO 17497-1:2004, 3.3, übersetzt aus dem Englischen, Anmerkung 1 nicht vollständig übernommen]

4 Berechnungsverfahren

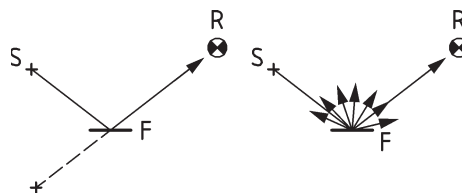
4.1 Allgemeines

Die im Rahmen dieses Dokuments anwendbaren Verfahren zur Berechnung der Schallausbreitung sind dem Bereich der geometrischen Akustik (GA-Verfahren) zuzurechnen. Sie dienen dazu, die von einer Punktschallquelle an einem festgelegten Ort verursachte Schallimmission zu bestimmen. Die wichtigste Zielgröße für diesen Anwendungsbereich ist der A-bewertete Schalldruckpegel als Momentanwert oder als äquivalenter auf eine vorgegebene Zeitspanne bezogener Mittelungspegel. Weitere Zielgrößen können die pauschal für einen Raum geltenden oder ortsabhängig aus der energiebezogenen Impulsantwort abgeleiteten Nachhallzeiten sowie der STI sein. Die Schallbeiträge aller Punktschallquellen und aller bei der Berechnung berücksichtigten Ausbreitungswege werden ohne Berücksichtigung der Phasen energetisch addiert.

Die Voraussetzung der Inkohärenz ist im Rahmen von Schallberechnungen für den Lärmschutz in Arbeitsstätten keine wesentliche Einschränkung. Durch die Vielzahl von Punktschallquellen und Ausbreitungswegen spielen Interferenzeffekte nur sehr selten eine Rolle, wenn der A-bewertete Schalldruckpegel am Arbeitsplatz der Zielwert ist. Die Berücksichtigung von Phasenlagen und den dadurch bedingten Interferenzen würde für übliche Umgebungsbedingungen in Arbeitsstätten den erforderlichen Aufwand bei der Datenerhebung in einem Maße erhöhen und die Präzision derart verringern, dass eine Sonderbehandlung solcher seltener Problemstellungen im Sinne des Anwendungsbereichs geboten ist. Die folgenden allgemeinen Erläuterungen entsprechen im Wesentlichen der in [6] gewählten Klassifizierung.

4.2 Reflexionsberechnung mit geometrischen Verfahren

Die Richtungsverteilung des von reflektierenden Flächen zurückgeworfenen Schalls hängt von deren geometrischer Struktur ab.



Legende

S Schallquelle

R Immissionspunkt (en: receiver)

F Fläche, an welcher der Schall zurückgeworfen wird

Bild 1 — Spiegelnde Reflexion (a) und diffuse Reflexion (b) am Flächenelement F

Bei Flächen, die im Hinblick auf die relevanten Wellenlängen als akustisch „glatt“ betrachtet werden können, erfolgt spiegelnde Reflexion, wodurch Einfallswinkel und Ausfallswinkel gleich sind (siehe Bild 1 a)). Bei gegebener Lage der Schallquelle und einer ebenen reflektierenden Fläche erfolgt die Abstrahlung eines Flächenele-

ments nur in der Richtung, die diesem Spiegelungsprinzip entspricht. Der reflektierte Strahl ergibt sich durch die Verbindungslinie der an der Reflexionsfläche gespiegelten Quelle mit dem Immissionsort – nur wenn der hierdurch festgelegte Reflexionspunkt innerhalb der betrachteten Fläche liegt, wird dieser reflektierte Schallanteil bei der Berechnung berücksichtigt.

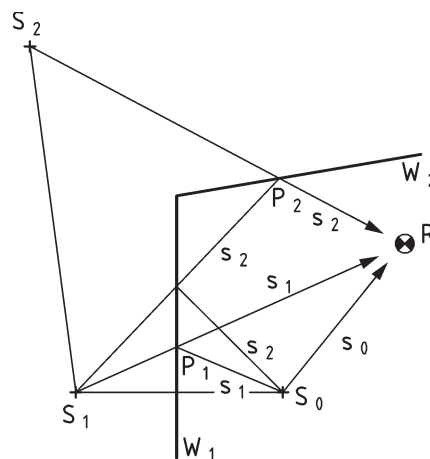
Ist die vom Schall getroffene Oberfläche durch Unebenheiten gekennzeichnet, deren Dimension nicht mehr klein relativ zu den relevanten Wellenlängen ist, wird der Schall in unterschiedliche Richtungen bzw. diffus reflektiert (siehe Bild 1 b)). In der Regel wird bei dieser diffusen Reflexion das Lambert – Abstrahlungsgesetz angewendet, wobei die Energie des reflektierten Schalls proportional zum Kosinus des Winkels zwischen der Flächennormalen und der betrachteten Abstrahlrichtung ist.

4.3 Deterministische und stochastische Verfahren

Mit den deterministischen Verfahren sind die für die Immission relevanten Schallwege von der Quelle zum Immissionsort eindeutig bestimmt.

Für reflektierten Schall, der bei der Schallausbreitung in Räumen eine wesentliche, in vielen Fällen die dominierende Rolle spielt, werden im Rahmen der ingenieurtechnisch wesentlichen deterministischen Verfahren zwei unterschiedliche Strategien zur Berechnung angewendet. Sie sollen hier nur kurz und keineswegs vollständig erläutert werden, da nicht das jeweils angewendete Berechnungsverfahren, sondern die Erzielung von Ergebnissen in vorgegebenen Intervallgrenzen das Ziel der Qualitätssicherung im Sinne dieses Dokuments ist.

Mit dem **Spiegelquellen-Verfahren** wird das genannte Prinzip der spiegelnden Reflexion generell und für alle reflektierenden Flächen sowie auch für mehrfache Reflexion ein und desselben Strahls angewendet. Als Beispiel zeigt Bild 2 den direkten Schallweg s_0 , den Schallweg s_1 des an Wand 1 reflektierten Schalls (Reflexion 1. Ordnung) und den Schallweg s_2 des an Wand 1 und zusätzlich an Wand 2 reflektierten Schalls (Reflexion 2. Ordnung).



Legende

- S_0 Quelle
- S_n Spiegelquelle n-ter Ordnung
- s_n Schallstrahl n-ter Ordnung
- P_n letzter Reflexionspunkt des Schallstrahls n-ter Ordnung
- R Immissionspunkt
- W reflektierende Wand

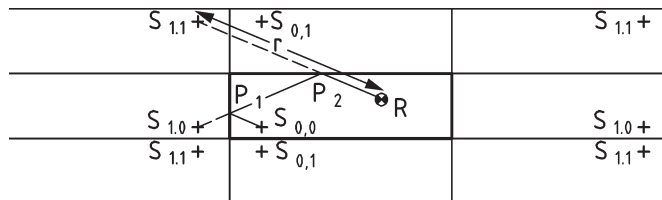
Bild 2 — Konstruktion der Strahlwege mit Spiegelquellen

Zur Bestimmung der Reflexion 1. Ordnung s_1 wird die an der Wand gespiegelte Quelle S_1 mit dem Immissionspunkt verbunden. In ähnlicher Weise ergibt sich die Reflexion 2. Ordnung s_2 durch die Spiegelquellen S_1 und S_2

Obwohl mit diesem Spiegelquellen-Verfahren zumindest im Prinzip alle möglichen Strahlwege gefunden werden, stößt es mit steigender Zahl von reflektierenden Flächen aufgrund des exponentiellen Anstiegs der Zahl von zu prüfenden Wegen und der dann ebenso exponentiell ansteigenden Rechenzeiten schnell an seine Grenzen. Dies gilt insbesondere dann, wenn wegen geringer Absorption bis zu hohen Reflexionsordnungen gerechnet werden muss.

Der typische Anwendungsbereich ist die Berechnung von Reflexionen niedriger Ordnungszahl und die Anbindung anderer Verfahren wie Teilchenmodelle oder Radiosity-Verfahren für höhere Reflexionsordnungen (Hybrid-Verfahren).

Das Verfahren nach **VDI-Richtlinie 3760** [7] ist eine qualitätssicherbare Ausbildung des Spiegelquellen-Verfahrens. Dabei werden Räume stets durch Quaderform angenähert und somit durch 3 Abmessungen geometrisch definiert. Durch diese Annahme bildet der quaderförmige Raum mit seinen in den drei Koordinatenrichtungen gespiegelten Räumen (siehe Bild 3) ein algorithmisch sehr einfach beschreibbares Gesamtsystem. Dies führt bei gegebener Aufgabenstellung zu einer gegenüber nicht quaderförmigen Raumformen erheblichen Verringerung von Rechenzeiten. Allerdings wird diese Einsparung aufgrund der Entwicklung der Rechnertechnik der letzten Jahre stark relativiert, wodurch dieses Verfahrens nur mehr in speziellen Fällen von Bedeutung ist.



Legende

P_n n-ter Reflexionspunkt des dargestellten Strahlwegs 2. Ordnung

R Immissionspunkt

$S_{n,m}$ Spiegelschallquellen n-fach an vertikalen und m-fach an horizontalen Flächen gespiegelt

Bild 3 — Spiegelung des Originalraums an seinen Begrenzungsflächen nach VDI 3760

Jede der 6 Begrenzungsflächen ist in akustischer Hinsicht durch ein mittleres Oktavband-Spektrum der Absorption bestimmt und der Einfluss aller im Raum befindlichen Objekte wie Maschinen und technischen Einrichtungen wird über eine pauschale Streukörperdichte als Eingabeparameter berücksichtigt.

Das Verfahren eignet sich insbesondere zur Berechnung einer den gesamten Raum kennzeichnenden Schallausbreitungskurve SAK und der aus ihr abgeleiteten raumakustischen Kenngrößen. Aufgrund der Fortschritte der Rechnertechnik im Hinblick auf die Rechenzeiten und wegen der Beschreibung aller strukturellen Einbauten wie bautechnischer und maschinentechnischer Einrichtungen durch eine den gesamten Raum beschreibende Streukörperdichte entspricht das Verfahren nicht mehr dem Stand der Technik, wenn die Schallimmission an Arbeitsplätzen in Maschinenhallen mit größeren und damit auch abschirmenden Einrichtungen berechnet werden soll.

Mit dem **Radiosity-Verfahren** werden die Oberflächen entsprechend Bild 4 in einzelne Elemente unterteilt und es wird für jedes dieser Elemente berechnet, wieviel Schallenergie von der Quelle unter Berücksichtigung seiner Ausdehnung eintrifft. Im nächsten Schritt wird die von jedem Flächenelement auf jedes andere Flächenelement eingestrahlte Schallenergie berechnet und gespeichert. Prinzipiell kann mit diesem Verfahren jedes beliebige Reflexionsgesetz realisiert werden, in der Praxis hat es sich aber vorwiegend zur Simulation von diffuser Reflexion bewährt.

In Bild 4 ist einer dieser Strahlwege von einer Punktquelle über zwei aneinander angrenzende Wände zum Immissionsort dargestellt. Wird die erste Wand in n_1 und die zweite Wand in n_2 Flächenelemente aufgeteilt, so sind somit $n_1 \times n_2$ Berechnungen durchzuführen, um den Einfluss der Reflexion zweiter Ordnung unter Beteiligung dieser beiden Wände zu berechnen.

Das Radiosity-Verfahren eignet sich insbesondere zur Simulation von Reflexionen bei höheren Ordnungen, da mehrfach reflektierte Schallstrahlen in ausgestatteten Räumen ohnehin durch Streuvorgänge aufgefächert sind und da die Zahl der erforderlichen Berechnungen nicht wie bei den anderen Verfahren mit steigender Ordnungszahl exponentiell ansteigt. Damit ist es insbesondere zur Berechnung von Zielgrößen interessant, für die auch Schall mit längerer Laufzeit einbezogen werden muss.

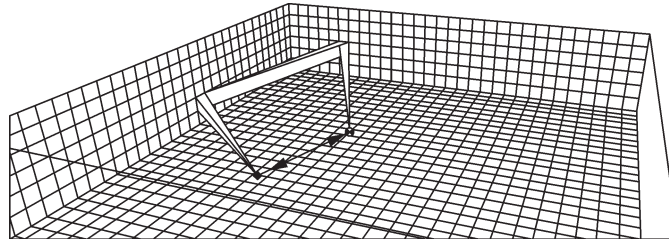
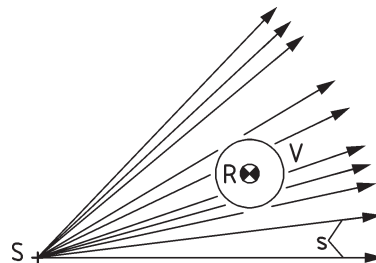


Bild 4 — Strahlweg von der Punktschallquelle zum Immissionsort beim Radiosity-Verfahren, hier exemplarisch für eine Reflexion an zwei Wandelementen dargestellt

Beim **stochastischen strahl- oder teilchenbezogenen Verfahren** sind die zu berechnenden Strahlwege nicht präzise vorgegeben und somit bei wiederholter Berechnung in der Regel nicht identisch. Ausgehend von jeder Punktschallquelle werden viele geradlinige Strahlwege unabhängig von der Lage von Immissionsorten verfolgt, wobei die einzelne Abstrahlrichtung zufällig gewählt und quasi numerisch so „ausgewürfelt“ wird, dass bei ungerichteter Schallabstrahlung die raumwinkelbezogene Dichte der ausgesendeten Schallstrahlen konstant ist. Eine Richtwirkung der Abstrahlung kann z. B. durch eine entsprechend angepasste richtungsabhängige Abstrahldichte oder durch die energetische Gewichtung der Schallstrahlen oder -teilchen berücksichtigt werden. Am Immissionsort wird die eintreffende Schallenergie bzw. der Schalldruckpegel aus der Zahl der Teilchen bestimmt, die ein diesen Punkt umhüllendes gedachtes Kontrollvolumen treffen (siehe Bild 5).



Legende

- S Punktschallquelle
- R Immissionspunkt
- V Kontrollvolumen
- s Teilchenbahn bzw. Strahlweg

Bild 5 — Das stochastische Teilchenverfahren mit zufallsgesteuerter Aussendung von Teilchen oder Strahlen s durch eine Punktschallquelle S und Zählung der im Kontrollvolumen V um den Immissionsort R ankommenden Teilchen

Beim **Teilchenverfahren** werden die als Polygon mit geraden Teilstrecken darstellbaren Strahlwege als Ausbreitungswege von punktförmigen Teilchen aufgefasst, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortbewegen. Jedes Teilchen transportiert eine bestimmte Schallenergie und damit kann jedem von dem Teilchen erreichten Ort neben dieser von ihm repräsentierten Energie auch die Zeit zugeordnet werden, die seit der Aussendung von der Quelle vergangen ist. Damit können auch ortsabhängige Nachhallzeiten in beliebig komplexer Raumgeometrie und andere von der zeitlichen Historie eines abgestrahlten Schallsignals abhängige Ergebniswerte berechnet werden.

Die Ausbreitungswege können sowohl als Strahl- wie auch als Teilchenwege betrachtet werden. Da für den ein Zählvolumen durchquerenden Weg bei der Betrachtung als Strahl oder als Teilchen die Laufzeit durch die Länge des Laufwegs und die Schallgeschwindigkeit eindeutig gegeben ist, sind die beiden Betrachtungsweisen äquivalent und führen auch zu denselben Ergebnissen.

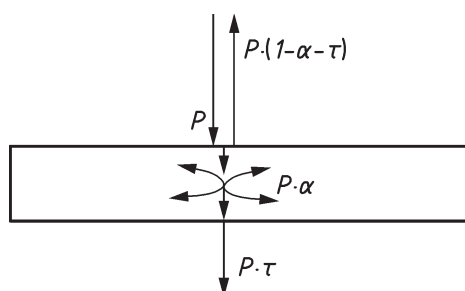
4.4 Schallquellen

Die Berechnung von Schall in Arbeitsstätten erfolgt stets unter der Voraussetzung von Punktschallquellen, deren strukturelle Ausdehnung als vernachlässigbar klein zu betrachten ist. Bei der Ausbreitung von Sprachschall, der bei Büro- und ähnlichen Räumen zugrunde zu legen ist, bilden Personen die relevanten Quellen und diese können im Rahmen der Modellierung durch Punktschallquellen beschrieben werden. Abstrahlende linienförmige Strukturen wie Rohrleitungen oder Verkehrswege sowie abstrahlende Flächen wie Maschinenbleche, Kapselwände oder sogar gesamte Ladebereiche mit Staplerbetrieb in industriellen Arbeitsstätten werden in so kleine Abschnitte bzw. Elemente unterteilt, dass diese für die Berechnung der anteiligen Schallimmission jeweils durch eine Punktschallquelle ersetzt werden können. Dieses Verfahren der Aufteilung wird im Folgenden nicht weiter behandelt.

Die Punktschallquelle wird im allgemeinsten Fall anhand ihrer Koordinaten, durch den für Oktavbänder angegebenen Schallleistungspegel L_W und für jedes Oktavband durch einen richtungsabhängigen Index D_c gekennzeichnet. Letzterer hängt im Allgemeinen von zwei Winkeln ab, mit denen die Lage der betrachteten Abstrahlrichtung zu einer mit der Quelle verknüpften Bezugsrichtung angegeben wird. Da eine von zwei Winkeln abhängige Richtwirkungsinformation für alle Frequenzbänder getrennt nur in den seltensten Fällen vorliegt, wird auch häufig Rotationssymmetrie und damit die Abhängigkeit von einem Winkel oder konstante richtungsunabhängige Abstrahlung zugrunde gelegt. Dies ist bei der Lärmprognose für Arbeitsstätten ein oft ausreichender Kompromiss zwischen Aufwand und erzielbarer Genauigkeit, wenn viele Schallanteile aus unterschiedlichen Richtungen auf den Arbeitsplatz einwirken.

4.5 Berücksichtigung von Absorption, Transmission und Reflexion

Die übliche Beschreibungsweise der kennzeichnenden akustischen Parameter eines plattenförmigen Bauteils ergibt sich aus Bild 6. Der im Bauteil absorbierte Schallanteil wird durch den dissipativen Absorptionsgrad α und der auf der Gegenseite abgestrahlte Schallanteil wird durch den Transmissionsgrad τ beschrieben. Damit wird ein Anteil $1 - \alpha - \tau$ reflektiert. Sämtliche genannten Parameter und damit auch das Ergebnis einer derartigen Berechnung sind auf das jeweils betrachtete Oktav-Frequenzband bezogen.



Legende

- P auftreffende Schallleistung
- α dissipativer Absorptionsgrad
- τ Transmissionsgrad

Bild 6 — Absorption, Transmission und Reflexion des auf das Bauteil mit Leistung P auftreffenden Schalls

Bei Anwendung des Teilchenmodells können diese Beziehungen durch entsprechende Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt werden. Beträgt der Absorptionsgrad 0,3 und der Transmissionsgrad 0,5, so wird der Anteil von $1 - 0,3 - 0,5 = 0,2$ der auftreffenden Schallleistung reflektiert. Dies wird realisiert, indem von N auftreffenden Teilchen 0,3 N Teilchen verschwinden, 0,5 N Teilchen die Platte unbeeinflusst durchlaufen und 0,2 N Teilchen

entsprechend dem geltenden Reflexionsgesetz zurückgeworfen werden. Allerdings werden diese Beziehungen aufgrund der stochastisch erfolgenden Auswahl der Teilchenbahn im Einzelfall erst bei ausreichend großen Teilchenzahlen erfüllt. Alternativ können auch die Energien entsprechend gewichtet werden.

4.6 Beugung von Schall und Pegelminderung durch Abschirmung

Die Beugung von Schall über ein den direkten Ausbreitungsweg blockierendes Hindernis ist ein eng mit der Welleneigenschaft verknüpftes Phänomen. Um diesen Aspekt dennoch auch mit Methoden der Geometrischen Akustik zu berücksichtigen, kommen unterschiedliche Strategien zur Anwendung.

Eine insbesondere für den Direktschall und für niedrige Reflexionsordnungen bei Anwendung des Spiegelquellen-Verfahrens angewendete Strategie besteht darin, die Schwächung des Schalls durch blockierende Hindernisse aus der Verlängerung des Strahlwegs durch den Umweg über die Hinderniskanten zu bestimmen. Dieses Verfahren wird auch bei der Berechnung von Umgebungslärm angewendet und ist für diesen Bereich in mehreren Normen und Richtlinien integriert.

Bei den stochastischen strahl- oder teilchenbezogenen Verfahren werden unterschiedliche Verfahren angewendet. So kann der Strahlweg bzw. die Teilchenbahn mit einem vom Abstand zur Schirmkante abhängigen Winkel so abgelenkt werden, dass sich im Schattenbereich näherungsweise die aus Messungen bekannte wellenlängenabhängige Energieverteilung ergibt. Keines der hierzu vorgeschlagenen und implementierten Verfahren ist bisher genormt oder in normenähnlicher Form beschrieben. Es besteht auch keine hinreichend einheitliche Fachmeinung zur Frage, ob und bis zu welcher Ordnung auch für reflektierten Schall die für den Direktschall durch Vergleich mit Messungen verifizierten Beugungsverfahren angewendet werden können.

Um für die nach dieser Richtlinie qualitätsgesicherten Berechnungsprogramme sicherzustellen, dass in dem durch die Testaufgaben beschriebenen Anwendungsbereich gleiche Ergebnisse erzielt werden, kann für die Referenzeinstellung programmspezifisch eine geeignete Begrenzung der pro Ausbreitungsweg einzubeziehenden Beugungsvorgänge und Reflexionsordnungen sinnvoll sein.

5 Prognoseberechnung für Arbeitsstätten

5.1 Schallquellen-Modellierung

Wird die Ausbreitung von Sprachschall behandelt und sind die Schallquellen somit Personen, werden diese durch Punktschallquellen repräsentiert. Ihre Höhe über Bodenniveau beträgt bei sitzenden Personen 0,8 m über der Sitzfläche, bei stehenden Personen 1,6 m über der Standfläche. Auch zur Bestimmung von Nachhallzeiten sowie von Kurven der Schallausbreitung entlang vorgegebener Pfade wird die bei Messungen verwendete Referenzschallquelle im Berechnungsmodell durch eine Punktschallquelle ersetzt.

Maschinen und andere lärmrelevante technische Einrichtungen können für die Zwecke der Lärmprognose mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad modelliert werden. Drei wesentliche Modellierungstypen können beispielhaft zur Einteilung betrachtet werden:

1) Das Punktmodell:

Eine Punktschallquelle ist im „akustischen Schwerpunkt“ angeordnet. Bei größeren Maschinen mit einzelnen die Emission bestimmenden Bereichen kann auch jeder dieser Bereiche durch eine Punktschallquelle modelliert werden. Voraussetzung ist dabei die Kenntnis der – z. B. aus Messungen im Nahbereich ermittelten – individuellen Emission dieser Bereiche.

2) Das Quadermodell:

Auf einer gedachten, die lärmrelevanten Teile der Maschine dicht umschließenden quaderförmigen Hüllfläche werden Punkt-, Linien- oder Flächenschallquellen mit dem anteiligen Schallleistungspegel so verteilt, dass die Richtungsabstrahlung möglichst genau nachgebildet wird. Diese Hüllfläche entspricht der Bezugsfläche nach DIN EN ISO 3744 [8].

3) Das Detailmodell:

Die Maschine wird sowohl hinsichtlich der Geometrie wie auch der Verteilung der schallemittierenden Oberflächen und Öffnungen möglichst detailliert nachgebildet. Die Abstrahlung dieser Oberflächenbereiche wird vorzugsweise durch Schallmessungen im geringen Abstand (Nahfeld) als flächenbezogener Schallleistungspegel des jeweiligen Bereichs ermittelt.

Dies ist nur eine grobe Unterteilung der möglichen Konzepte, wobei auch beliebige Mischformen möglich sind.

5.2 Kalibrierung auf der Basis von vorgegebenen Emissionswerten oder von Messwerten

5.2.1 Die Verwendung von L_{WA} und L_{pA} – die kennzeichnenden Emissionswerte nach Maschinenrichtlinie

Bei allen drei genannten Modellierungstechniken wird die Emission der Schallquellenbereiche so festgelegt, dass das zur Berechnung erstellte Modell den – als bekannt vorausgesetzten – Schallleistungspegel der realen Maschine aufweist. Dadurch unterscheiden sich die Modelle in der Möglichkeit, die reale Richtungsverteilung der Abstrahlung nachzubilden. Dies muss aber auf Grund von zahlreichen Schallbeiträgen und reflexionsbedingten Ausbreitungswegen beim üblichen Betrieb von Maschinen in Arbeitsstätten nicht zu wesentlichen Unterschieden bei der prognostizierten Schallimmission führen.

In der Regel sind im Planungsfall die Schallimmissionen an den festgelegten Arbeitsplätzen von Interesse. Sowohl nach EG-Maschinenrichtlinie [9] wie auch nach der Nationalen Umsetzung mit der 9.GPSGV [10] sind für die einer Maschine zugeordneten Arbeitsplätze die auf Halbfreifeld-Bedingungen bezogenen A-Schall-druckpegel als Emissions-Schalldruckpegel L_{pA} vom Maschinenhersteller anzugeben.

Durch Verwendung dieser auf die vorgesehenen Betriebsbedingungen bezogenen Werte kann für die arbeitsplatzbezogene Lärmprognose – das ist die Vorausberechnung der an den Arbeitsplätzen einer geplanten Maschinenanlage zu erwartenden A-Schalldruckpegel – für die den Maschinen zugeordneten Arbeitsplätze eine wesentliche Verbesserung der Balance zwischen Modellierungsaufwand und Prognosegenauigkeit erreicht werden. Die gerade für den Nahbereich nur schwer zu prognostizierende Detailstruktur der direkten Abstrahlung kann nach dieser Strategie durch das im L_{pA} ausgedrückte „Vorwissen“ durch den Direktschall inklusive des Anteils der ersten Bodenreflexion ersetzt und im Rahmen einer Substitution gegen den mit einem – für diesen Nahbereich vielleicht zu einfachen – Modell berechneten Pegelanteil ausgetauscht werden. Die im Folgenden genannten Pegelwerte werden dabei benötigt oder berechnet.

- 1) L_{pA} sei der bekannte, da vom Hersteller der Maschine angegebene und zugesicherte Emissions-Schalldruckpegel am betrachteten Arbeitsplatz.
- 2) $L_{pA,0}$ ist der im Zuge einer Vorberechnung nur mit dem Maschinenmodell (z. B. einer Punktschallquelle im „akustischen Schwerpunkt“), auf dessen zugeordneten Arbeitsplatz sich die Berechnung bezieht, bei ausschließlicher Berücksichtigung von Direktschall und Bodenreflexion ermittelte Schalldruckpegel. Bei der Berechnung von $L_{pA,0}$ werden die vollständige Reflexion des Bodens ($\alpha = 0$), alle übrigen Objekte im Raum als nicht existent und die übrigen Raumbegrenzungsflächen als voll absorbierend ($\alpha = 1$) im Sinne von Halbfreifeld-Bedingungen vorausgesetzt.
- 3) $L_{AP,0}$ ist der für den betrachteten Arbeitsplatz unter Berücksichtigung aller relevanten Schallquellen im Raum (inkl. der diesem Arbeitsplatz zugeordneten Maschine) und mit der vorgesehenen Raumausstattung berechnete Schalldruckpegel unter Berücksichtigung der Schallleistungspegel L_{WA} aller relevanten Quellen.
- 4) L_{AP} ist der für den betrachteten Arbeitsplatz prognostizierte Schalldruckpegel bei Betrieb dieser Maschine in dem Raum mit der vorgesehenen Ausstattung bei gleichzeitigem Betrieb aller Schallquellen, die bei der Berechnung des $L_{AP,0}$ berücksichtigt worden sind. Er berechnet sich aus

$$L_{AP} = 10 \cdot \lg \left(10^{0,1 \cdot L_{AP,0}} - 10^{0,1 \cdot L_{pA,0}} + 10^{0,1 \cdot L_{pA}} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

Bei der Berechnung der Pegel $L_{pA,0}$ und $L_{AP,0}$ werden nur die Emissionswerte L_{WA} der Schallquellen, nicht jedoch deren Emissions-Schalldruckpegel L_{pA} berücksichtigt. Dies gilt auch dann, wenn komplexere Maschinenmodelle mit mehreren Quellen oder entsprechend einer der drei in 5.1 genannten Gruppen verwendet werden.

5.2.2 Die Verwendung von bereinigten Messwerten im Umfeld der Maschine

Bei allen drei in 5.1 genannten Modellierungsstrategien kann eine Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung berücksichtigt werden. Beim Punktmodell erfolgt dies durch einen im allgemeinsten Fall von zwei Winkeln abhängigen Richtwirkungsindex, beim Quadermodell durch die Belegung der Abstrahlflächen mit Schallquellen unterschiedlicher Emission und beim Detailmodell durch konkrete Nachbildung der schallabstrahlenden und die – innerhalb der Bezugsfläche erfolgende – Beeinflussung der Schallausbreitung durch Strukturen mit festgelegter Absorption und Transmission.

Zum „Kalibrieren“ des Modells wird die Emission N unterschiedlicher Abstrahlbereiche der Quelle bestimmt, indem der an mindestens N Immissionsorten im Nahbereich der Quelle verursachte Schalldruckpegel durch Messung ermittelt wird. Beim einfachen Punktmodell sind die Abstrahlbereiche durch Winkelbereiche mit konstantem Richtwirkungsindex, beim Quadermodell durch Oberflächenbereiche mit deren Schallleistungspegel L_W oder flächenbezogenem Schalleistungspegel $L_{W''}$ gegeben. Damit können über ein lineares Gleichungssystem die anteiligen Schalleistungen jedes Abstrahlbereichs so bestimmt werden, dass sich die vorausgesetzten Schalldruckpegel an den Immissionsorten ergeben. Selbstverständlich gelten dabei eine Reihe von Anforderungen an diese Verteilung der Abstrahlbereiche in Abhängigkeit der Lage der Immissionsorte mit bekanntem auf Freifeld bezogenen Schalldruckpegel.

5.2.3 Die Simulation des Hüllflächen-Verfahrens zur Kontrolle der effektiven Emission

Werden komplexere Modelle entsprechend Fall 3 in 5.1 erstellt, so kann aufgrund von Reflexions- und Beugungsvorgängen innerhalb des Maschinenmodells der für das Fernfeld wirksame Schalleistungspegel von dem aus der Summe der Schalleistungen aller Teilquellen sich ergebenden Schalleistungspegel abweichen.

Die Kontrolle dieses auch mit komplexeren Modellen mit mehreren Teilquellen sich ergebenden, für das Fernfeld wirksamen Schalleistungspegels kann u. A. durch direkte Simulation des Hüllflächenverfahrens erfolgen. Hierzu werden die Immissionspunkte z. B. auf einer um den Maschinenmittelpunkt zentrierten halbkugelförmigen Hüllfläche oder auf einer Quaderfläche angeordnet. Zur Durchführung der Pegelberechnung werden – ähnlich wie in 5.2.1 bei der Bestimmung des $L_{pA,0}$ im Schritt 2 beschrieben – ideale Freifeldbedingungen mit reflektierendem Boden ohne Berücksichtigung aller übrigen Raumbegrenzungsflächen und Objekte vorausgesetzt. Die Bestimmung des Schalleistungspegels aus den an den Immissionspunkten der Hüllfläche berechneten Pegeln ist identisch mit dem bei der Messung angewendeten Verfahren.

Der Vorteil dieser rechnerischen Simulation des Hüllflächenverfahrens entsprechend DIN EN ISO 3744 besteht gegenüber dem nachfolgend genannten Hallraumverfahren darin, dass auch die Pegelunterschiede zwischen den Punkten der Hüllfläche korrekt ermittelt werden. Aus den Pegeln an den Punkten einer halbkugelförmigen Hüllfläche können somit auch die effektiven Richtwirkungen für beliebige Schnittebenen ermittelt werden.

5.2.4 Die Simulation des Hallraumverfahrens zur Kontrolle des Schalleistungspegels

Mit einem detaillierten Modell gemäß Fall 3 in 5.1 kann der gesamte für das Fernfeld wirksame Schalleistungspegel auch durch Simulation des Hallraum-Verfahren nach DIN EN ISO 3741 [11] ermittelt werden. Allerdings ergibt sich daraus keine Information zur Richtwirkung der Abstrahlung.

5.3 Berechnung des Beurteilungspegels an Arbeitsplätzen

Der neben der Schallausbreitungsberechnung für Büro- und ähnliche Umgebungen mit diesem Dokument behandelte Bereich ist die Prognose der an Arbeitsplätzen zu erwartenden Schalldruckpegel auf der Basis der für Maschinen und andere technische Einrichtungen zutreffenden Emissionswerte. Diese können durch Messungen an bereits installierten Maschinen beispielhaft ermittelt, aus der nach Maschinenrichtlinie [9] vom Hersteller verlangten Geräuschangabe abgeleitet oder aufgrund vertraglicher Garantien in den Kaufverträgen