

Abschlussbericht zum Projekt

## Verbesserung der akustischen Eigenschaften von Sporthallenböden

Durchgeführt an der Universität Stuttgart,  
Lehrstuhl für Bauphysik  
(seit 1. Juni 2017 Institut für Akustik und Bauphysik IABP)

im Auftrag des Bundesinstitutes für Sportwissenschaft  
vom 1. Februar 2016 bis 30. Juni 2017

# Inhalt

1	Einleitung	3
2	Stand des Wissens	3
3	Aufgabenstellung	5
4	Voruntersuchungen und Modellbetrachtungen	5
5	Messtechnische Untersuchungen	8
	5.1 Sportböden	8
	5.2 Anregung der Böden	9
	5.3 Messräume	11
	5.4 Messgrößen	13
	5.5 Auralisation	14
6	Messergebnisse	14
	6.1 Materialeigenschaften	14
	6.2 Schallabsorption	16
	6.3 Schallabstrahlung	17
	6.4 Körperschallübertragung	22
7	Maßnahmen zur Beeinflussung der akustischen Eigenschaften	28
8	Messungen in Sporthallen und Vergleich mit Laborergebnissen	34
9	Zusammenfassung und Wissenstransfer	38
10	Quellenverzeichnis	40

# 1 Einleitung

Die deutschlandweit mehr als 35.000 Sporthallen sind überwiegend für eine multifunktionale Nutzung konzipiert. So kann eine große Bandbreite der Sportnachfrage und auch der nicht sportbezogenen Nachfrage bedient werden. Dazu zählen der Spitzensport, der wettkampforientierte Vereinssport sowie der Breiten-, Gesundheits- und Schulsport bis hin zu nichtsportbezogenen Veranstaltungen. Die multifunktionale Sporthalle hat daher für die Sportbedarfsdeckung und eine sich weiter ausdifferenzierende Sportnachfrage einen hohen Stellenwert in der Sportentwicklung sowie bei nicht sportbezogenen Nutzungen eine wichtige Unterstützungsfunktion des Gemeinwohls. Daraus resultiert die Dringlichkeit der weiteren Aktualisierung und Optimierung der multifunktionalen Konzeption der Sporthallen. Dies gilt auch für die akustische Gestaltung der Hallen, bei der vor allem nutzungsspezifische Anforderungen in hoher Qualität zu berücksichtigen sind. Das wiederum setzt Wissen voraus, in welcher Art und Ausprägung sich die einzelnen Elemente des Sporthallengebäudes, wie Wände, Decke und Böden, auf die Nutzungsqualität auswirken.

In der Vergangenheit und bis heute gibt es jedoch eine Reihe von Anhaltspunkten, dass die Nutzung von Sporthallen hörbare Einschränkungen aufweist. Die Akustik mit ihren unterschiedlichen Facetten wurde und wird offenbar nicht angemessen berücksichtigt. Entsprechend auffällig sind z.B. Berichte von Sportlehrkräften über den oftmals ohrenbetäubenden Lärm beim Unterricht. Aber auch für Besucher von Sportveranstaltungen der Schulen und Vereine übersteigt der Geräuschpegel in den Hallen mitunter das selbst für lautstarke Begeisterung erträgliche Maß. Die Erfahrung ist keineswegs neu, dass gerade die akustische Qualität von Räumen und Gebäuden dem Kostendruck geopfert oder bei der Planung vernachlässigt wird. Die Gründe dafür sind unterschiedlich und reichen von fehlenden Argumenten zum Nutzen geeigneter akustischer Bedingungen bis zu unzureichendem Wissen um Planungs- und Gestaltungsspielräume. Neue Untersuchungen bestätigen die hohen Schallpegel bei der Nutzung von Sporthallen. Sie verursachen gesundheitliche Belastungen, beeinträchtigen die Kommunikation und gefährden die Sicherheit von Sportlern und Trainern, von Schülern und Lehrern. Eine bislang einzigartige bundesweite Studie „Lauter Sport in leisen Hallen“ [1] belegt erhebliche Defizite sowohl anhand der Beurteilung der akustischen Arbeitsbedingungen durch Sportlehrkräfte als auch anhand der gemessenen Situation vor Ort. Es ist zu laut, die akustischen Störungen sind lästig und mit erheblichen Beanspruchungen verbunden. Diese und andere Indikatoren begründen die vielerorts große Unzufriedenheit mit den akustischen Bedingungen in Sporthallen. Der Handlungsbedarf ist also erheblich. Angesichts der Nutzungsdauer einer Sporthalle von 50 Jahren und mehr müssen schließlich Generationen von Sportlern und Trainern, Schülerinnen, Schülern und Sportlehrkräften eine schlechte Akustik ertragen.

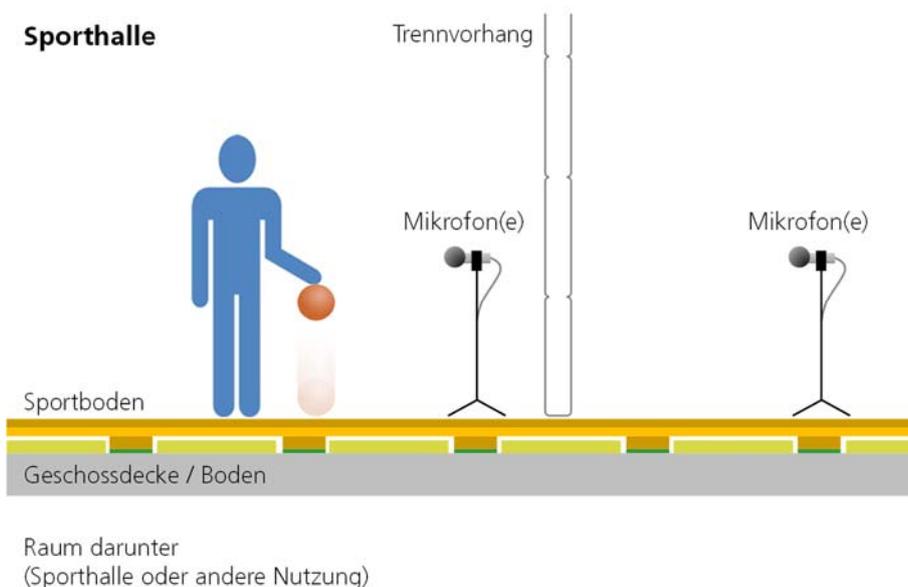
Dabei gibt es neben organisatorischen und pädagogischen Maßnahmen eine Reihe von technischen und baulichen Ansatzpunkten zur Reduzierung der Schallpegel und zur Erhöhung der Sprachverständlichkeit, z.B. die Raumdämpfung mit Schallabsorbern im Deckenbereich oder in Kombination mit Prallwänden sowie die sinnvolle Verwendung von Trennvorhängen einschließlich der schallabsorbierenden Gestaltung ihrer Oberflächen. Gute Beispiele zeigen, dass die Nutzer die positiven Auswirkungen dieser Maßnahmen spüren und honorieren.

Das schalltechnisch wirksame Potenzial der Sporthallenböden entzieht sich jedoch noch einer zielgerichteten Umsetzung. Die Gründe dafür liegen im bislang fehlenden Wissen um das akustische Verhalten der sport- und schutzfunktional komplexen Bodensysteme. Systematische wissenschaftliche Daten oder praktische Erfahrungen liegen nicht vor und auch in DIN V 18032 [2], die sich speziell den Sportböden widmet, werden die hörbaren Merkmale nur sehr kurz behandelt. Es wird eine geringe Entwicklung und Ausbreitung des Schalls gefordert, der bei ihrer Benutzung entsteht. Dass die Benutzung von Böden und Bodenbelägen zu erheblichen Geräuschen führt, ist offenkundig und auch in anders genutzten Gebäuden ein Schallschutz-Dauerthema. Das Problem besteht in der Frage, wie sich Sporthallenböden konkret akustisch charakterisieren und gestalten lassen. Ist diese Frage beantwortet, können die akustischen Merkmale als eine obligatorische Größe im Kontext aller Anforderungen an Sporthallenböden integriert werden.

## 2 Stand des Wissens

Im Gesamtsystem Sporthallen sind die Böden akustisch auf mehrfache Weise wirksam. Im Vordergrund steht sicher der erhebliche Anteil an der Geräuschenstehung sowohl beim Springen und Laufen als auch bei Ballsportarten. Der Hallenboden wird meist impulsartig zu Schwingungen angeregt und die aus sportphysiologischen Gründen beabsichtigte Elastizität bzw. Schwingfähigkeit der Sportböden macht sie akustisch zu einer Art Resonanzboden, der sich besonders leicht zur Schallabstrahlung anregen lässt. Die hohen und breitbandigen Pegel erreichen Werte im Bereich von 80 dB(A), wobei die Spitzenwerte noch deutlich darüber liegen.

Zur messtechnischen Untersuchung der Geräusche, die bei Verwendung von Bällen entstehen, wurde bereits in [1] untersucht, wie ein stabiles und reproduzierbares Verfahren aussehen könnte. Dazu gehört eine entsprechende, möglichst genormte Quelle, eine Prozedur zu deren Verwendung sowie die eigentliche Messgröße. Natürlich soll das Verfahren auch vor Ort praktikabel sein. Aus diesen Erwägungen heraus fiel die Wahl auf den so genannten „Japanischen Gummiball“ bekannt aus DIN 10140-5 [9] Anhang F.2 als schwere/weiche Trittschallquelle. Im Vergleich zu sportlich genutzten Bällen (Basketball, Fußball, u.a.) zeichnet er sich durch ein besonders geringes Eigengeräusch aus. Beim Anregungsvorgang trifft der Ball aus einer Fallhöhe von 100 cm auf den Boden, um so (ursprünglich für Wohngebäude gedacht) die Erzeugung von Gehgeräuschen oder Trittschall zu simulieren. In Sporthallen ermöglicht diese Methode hingegen die genormte Simulation von Lauf-, Spring- und insbesondere von Prallgeräuschen, so dass die akustische Reaktion von Böden oder Wänden beschrieben bzw. verglichen werden kann. Bild 2.1 zeigt den Aufbau der Messung, wobei der Boden mit dem Ball bei einer (Prell-) Frequenz von ca. 1 bis 2 Hz angeregt wird.



**Bild 2.1** Situation in Sporthallen bei Anregung des Sportbodens z.B. mittels Ballprellen

Die so vor Ort in Hallen gemessenen Pegelwerte bei Einzelereignissen schwanken nur gering im Frequenzbereich und die jeweiligen Summschallpegel ( $L_{Aeq}$ ) liegen zwischen 60 und 67 dB(A). Um den Vergleich dieser Geräuschpegel zu Geräuschmessungen im Sportunterricht ohne Nutzung von Geräten zu ermöglichen, lassen sich die Geräusche mit einem Ball auf den Fall hochrechnen, dass ca. 20 Personen einen solchen Ball gleichzeitig prellen lassen. Die dadurch entstehenden Summschallpegel reichen an Sprach-, Lauf- und Springschallpegel heran. Bei Frequenzen unter 250 Hz dominieren prellende Bälle das resultierende Gesamtgeräusch. Hier sei auf ein auffälliges Messergebnis besonders hingewiesen. In einer bestimmten Halle bewerteten die Sportlehrkräfte den Boden als „auffällig leiser“ im Vergleich zu anderen, ihnen bekannten Sporthallen, obwohl der gemessene Summschallpegel nicht geringer war. Der akustisch relevante Unterschied stellte sich in Form deutlich niedrigerer Pegel bei tiefen Frequenzen unterhalb von 125

Hz dar. Dieses reduzierte Dröhnen wird offenbar wahrgenommen und positiv bewertet. Natürlich bleibt eine begrenzte Aussagekraft für die Praxis, da die einzelnen Geräuschquellen und Böden genauer spezifiziert werden müssen. Der von einem prellenden „Japanischen Gummiball“ erzeugte Schall wird sicher nicht ohne weiteres repräsentativ für alle anderen Bälle und die je nach Nutzung damit verbundenen Geräusche sein. Allerdings sind die Ergebnisse bezüglich der Geräuschanfälligkeit von Sportböden evident und sie zeigen ein Schallminderungspotential, das sich gegebenenfalls auch auf Lauf- und Springgeräusche übertragen lässt. Neben seinem Charakter als Teil der Geräuschquelle überträgt der Sportboden, einmal durch mechanische Kraft oder auch Luftschall angeregt, Körperschall entlang der Halle und kann so die Schallschutzwirkung von Trennvorhängen beeinträchtigen (siehe Bild 4.1). Die Schwingungen können sich aber auch sonst im Gebäude ausbreiten und in anderen Räumen Störungen verursachen. Einerseits zeigt sich in [1] eine deutlich unterschiedliche Anregbarkeit von Schwingungen der Bodensysteme, bei tiefen Frequenzen bis zu Differenzen von 40 dB. Dies muss sich natürlich auch auf die Geräuschabstrahlung auswirken. Natürlich sind diese Pegel in unmittelbarer Nähe des Anregungsortes am höchsten. Die bodenspezifischen Unterschiede erweisen sich aber ebenso bei der Abnahme des Körperschallpegels mit der Entfernung zum Anregungsort.

Schließlich ist der Sporthallenboden auch eine große Schall reflektierende Fläche in der Halle. Als vibro-akustisches Resonanzsystem wird er durch kurzzeitige mechanische Anregung bei sehr tiefen (Resonanz-) Frequenzen Schall abstrahlen, kann aber ohne diese Anregung theoretisch auch auftreffenden Luftschall absorbieren. Zu all diesen Einzel- und Wechselwirkungen existieren kaum Daten, Aussagen oder Modelle, die wissenschaftlich verwertbar sind. Eine Ausnahme bilden die zitierten aktuellen Untersuchungen und Messergebnisse nach [1] zum Geräuschverhalten und zu Vorschlägen seiner experimentellen Erfassung. Zusammen mit grundlegenden schall- und schwingungstechnischen Vorkenntnissen zu anderen Bodensystemen bietet sich eine sehr gute Ausgangsbasis für eine zielgerichtete und fundierte Untersuchung des vibro-akustischen Verhaltens von Sporthallenböden.

### **3 Aufgabenstellung**

Aus der Differenz von Wissensbedarf und bereits vorhandenen Kenntnissen resultieren die Forschungsziele. An erster Stelle steht die messtechnische akustische Charakterisierung (Methodik aus Anregung, Messumgebung, Aus- und Bewertung) einer praktisch repräsentativen Auswahl von Sporthallenböden einschließlich Belägen. Sie muss sinnvollen Ansprüchen an Präzision, Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit genügen. Eng damit verbunden ist die Analyse der akustisch relevanten konstruktiven Einflussparameter und Gestaltungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der sonstigen normativen sport- und schutzfunktionalen Anforderungen an die Sporthallenböden. Schließlich sind praktikable Mess- und Anforderungsgrößen für die Anwendung im Labor (Forschung und Entwicklung, Qualitätssicherung und Zertifizierung) und vor Ort (Planung, bauliche Umsetzung und Überwachung) herzuleiten.

### **4 Voruntersuchungen und Modellbetrachtungen**

Auch wenn sich z.B. Geräuschpegel unkompliziert bestimmen lassen, ist für ihre Interpretation ein grundlegendes Verständnis der Schallquellen und Schallfelder erforderlich. Nur dann lassen sich die geeignete Messeinrichtung und -prozedur auswählen. Daraus resultieren Anwendungsvoraussetzungen und Randbedingungen sowie die Vorgehensweise und Messtechnik. In diesem Sinne wurden Vorbetrachtungen angestellt, um das Gesamtsystem der Sportböden (labor-) messtechnisch und modellhaft auch rechnerisch zu beschreiben. Dazu enthält Tab. 4.1 eine Auswahl der zu erfassenden akustischen Messgrößen, bewährter Messumgebungen sowie von Anregungsmöglichkeiten. Sicher ließen sich noch weitere Details und Varianten hinzufügen, aber diese Auswahl wurde unter verschiedenen Gesichtspunkten, wie z.B.

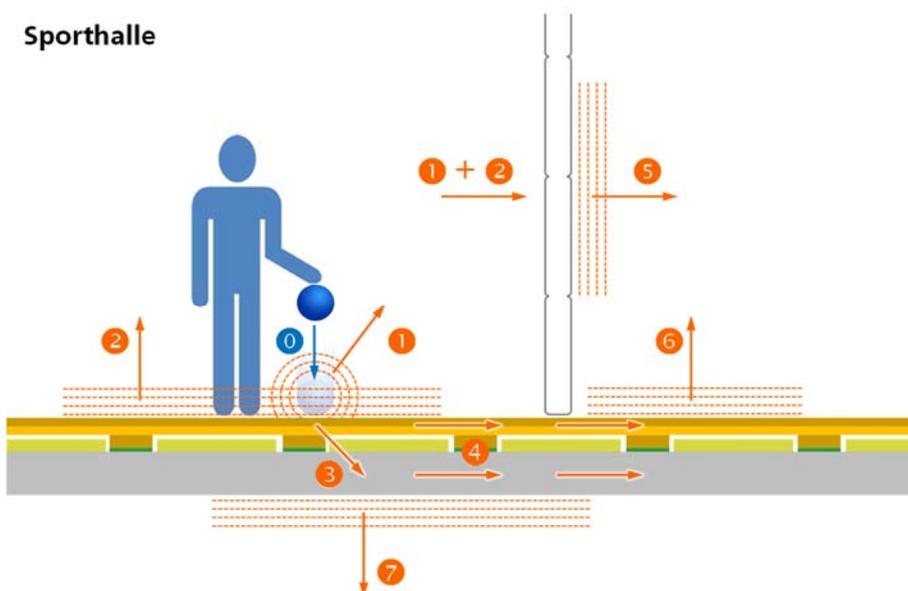
- Aufwand und Praktikabilität,
- Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit,
- Aussagekraft für akustische Bewertung, Planung und Beeinflussung

näher betrachtet und bewertet. In Voruntersuchungen stand die Kombination der Messgrößen und -räume sowie der Anregungssysteme im Vordergrund, um deren Spielräume und Grenzen zu bestimmen. Ein Beispiel dafür ist der Dynamikbereich der Messkette, also einerseits der Abstand zwischen (geringen) Nutz- und Störsignalen sowie andererseits die Unterscheidbarkeit ähnlicher frequenzabhängiger Nutzsignale.

**Tabelle 4.1** Typische und verfügbare Messgrößen und -räume sowie Systeme zur akustischen Anregung mit jeweiligen Angaben zu betreffenden Normen

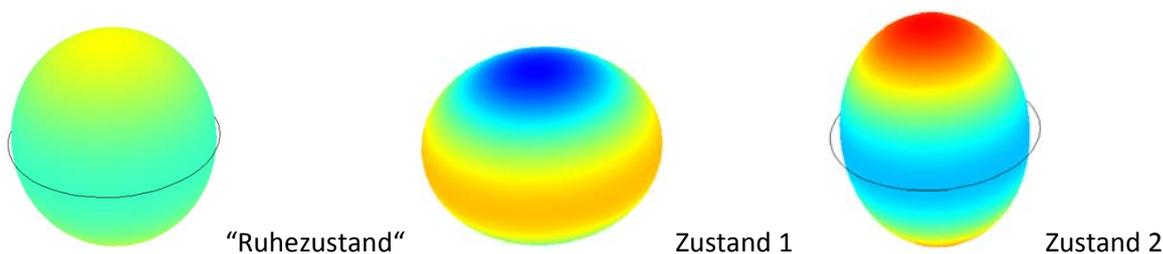
<b>Messgrößen</b>	Schalldruckpegel	DIN 45630 [3] u.a.
	Schallleistungspegel	DIN EN ISO 3740 [5] u.a.
	Körperschall, z.B. Schnellepegel	DIN 45661 [4] u.a.
	Schallabsorptionsgrad	DIN EN ISO 354 [10]
<b>Messräume</b>	Freifeldraum	DIN EN ISO 3745 [8]
	Halb-Freifeldraum	DIN EN ISO 3744 [7]
	Hallraum	DIN EN ISO 354 und 3741 [6]
	Sporthalle, sonstiger Raum	DIN 18032-1 [15]
<b>Akustische Anregung</b>	Shaker	VDI 3727 [11]
	Impulshammer	-
	„normaler“ Ball, z.B. Basketball	DIN V 18032-2 [2]
	„Japanischer Gummiball“	DIN EN ISO 10140-5 [9]

Bei der Bewertung der messtechnischen Vorgehensweise ist das zu erwartende Verhalten des gesamten Sportbodensystems - Sportboden und deren Unterkonstruktion - von größter Bedeutung. Die Schallentstehung bei Sportböden geht auf die impulsartige mechanische Belastung bzw. Wechselwirkung zwischen Ball und Boden zurück. Bild 4.1 illustriert die einzelnen Quellen und Pfade der Anregung und Ausbreitung von (Körper-) Schall. Zunächst werden Boden und Ball zu Schwingungen angeregt (0), die von deren Oberflächen als (Luft-) Schall (1 und 2) abgestrahlt werden.



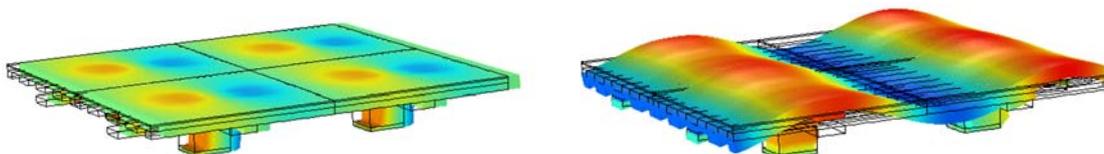
**Bild 4.1** Schallentstehung und Schallausbreitung in Sporthallen bei Anregung des Sportbodens z.B. mit einem Basketball

Der resultierende Schall (① + ②) breitet sich in der Halle aus, trifft auf reflektierende oder absorbierende Oberflächen und auch auf Trennvorhänge, die aufgrund ihrer limitierten, meist sehr geringen Schalldämmung einen Teil der Schallenergie (⑤) in den Hallenteil hinter dem Trennvorhang übertragen. Gleichzeitig breiten sich die Sportboden-Schwingungen in der Bodenkonstruktion als Körperschall weiter aus. Einerseits über die Geschossdecke (③) in einen Raum unter der Halle, wo er als so genannter Trittschall (⑦) abgestrahlt wird. Diese bauliche Konstellation ist jedoch nicht immer vorhanden und außerdem ist der Trittschall nur von Bedeutung, wenn der Raum unter der Sporthalle von Menschen genutzt wird. Andererseits breitet sich Körperschall (④) aber auch entlang des Sportbodens aus und erfasst so Bodenbereiche jenseits eines Trennvorhanges. Dort führt er zu Schallabstrahlung (⑥) in den Hallenteil hinter dem Trennvorhang. Diese grundsätzliche Auffassung der Schallentstehung und Schallausbreitung wurde durch rechnerische Modellbetrachtungen ergänzt, um die folgenden Messungen und Messergebnisse physikalisch möglichst eindeutig interpretieren zu können. So zum Beispiel erfolgte eine gesonderte Betrachtung der Schallabstrahlung von Ball (①) und Boden (②). Beide sind als eigenständige Schallquellen anzusehen, da ihre Oberflächen nach dem Aufprall des Balls auf dem Boden schwingen und Schall abstrahlen. Als theoretische Grenzfälle lassen sich folgende Fälle unterscheiden: 1. Der Ball ist elastisch, der Boden starr, so dass nur der Ball Schall abstrahlt. 2. Der Ball ist starr und der Boden elastisch, so dass nur der Boden Schall abstrahlt. Nach dieser nur im Modell möglichen Trennung folgt die rechnerische Überlagerung beider Quellen, wie sie letztlich im messtechnischen und auch praktischen Fall auftritt. Die dazu nötige Verfeinerung umfasst die Beschreibung von Ball und Boden mit elastischen Eigenschaften sowie die Erfassung der anregenden (Wechsel-) Kräfte, um die gegebenenfalls dominierende Quelle auch frequenzabhängig zu erkennen. Die Schallabstrahlung des Balls, als luftgefüllte isotrope Hohlkugel angenommen, beruht auf durch den Aufprall angeregten Eigenschwingungen. Bei senkrechtem Fall (Rotationssymmetrie) wird z.B. ein Basketball (Masse = 595 g, Radius = 12 cm, Schalendicke 3 mm, Überdruck 75 hPa, elastische Eigenschaften) u.a. zu den in Bild 4.2 illustrierten Eigenschwingungen angeregt. Sie zeigen den Ruhezustand und 2 Schwingungszustände, zwischen denen die Verformung des Balls wechselt.



**Bild 4.2** Illustrationen der Zustände bei einer Eigenschwingung eines (idealisierten) Basketballs

Diese Schwingbewegungen finden auch bei weiteren Frequenzen, besonders im Bereich zwischen 1 kHz und 3 kHz, statt und führen zu einer korrespondierenden Schallabstrahlung. Diese wird sich mit den Schwingungen und dem abgestrahlten Schall des Bodens überlagern. Die Modellierung des Schwingverhaltens der Böden ist aufgrund ihres Aufbaus deutlich komplexer, aber dennoch in gewissen Grenzen möglich [vgl. 12, 13]. Unter den Annahmen ausgedehnter Flächen, eines Aufbaus aus homogenen Schichten und einer punktförmigen Anregung (Aufpralldauer, Aufprallfläche, Energieverlust) lassen sich näherungsweise ebenfalls Eigenschwingungen prognostizieren. In Bild 4.3 sind Beispiele für stehende und sich ausbreitende Wellen für ein Bodensystem dargestellt. Der Frequenzbereich für diese Schwingungen bzw. Wellen und für die entsprechende Schallabstrahlung reicht von tiefen Frequenzen (100 Hz und darunter) bis ca. 500 Hz.



**Bild 4.3** Illustrationen der Eigenschwingungen bzw. Wellen eines (idealisierten) Bodens (siehe Tab. 5.1, Böden 1 und 3)

Aus den Voruntersuchungen und Modellbetrachtungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Die numerische Modellierung von Ball und Boden ist mit Vereinfachungen möglich. Sie lässt Eigenschwingungen bzw. Schallabstrahlung des (Basket-) Balls bei höheren Frequenzen und breitbandiges Resonanzverhalten sowie entsprechende Schallabstrahlung des Bodensystems erwarten. Je nach stofflicher und konstruktiver Gestaltung des Sportbodens dominiert die Schallabstrahlung der Böden bei tiefen Frequenzen. Die Entwicklung einer detaillierten Schall- und Schwingungssimulation ist aussichtsreich, auch für die Anwendung bei der akustischen und zugleich sportfunktionalen Optimierung.
2. Für die experimentelle Bestimmung der Schallabstrahlung von Sportböden eignet sich die Messung der Schalldruckpegel im Hallraum bei Anregung mit normativ definierten Bällen. In der Folge lassen sich daraus Schallleistungspegel berechnen, um die rechnerische Verknüpfung mit beliebigen Raumeigenschaften herzustellen. Trotz sicher weiterer Möglichkeiten und Konfigurationen bietet diese Vorgehensweise eine Reihe von wesentlichen Vorteilen, z.B. die Messung des Schallabsorptionsgrades des jeweils im Hallraum verlegten Bodenausschnittes. Die Messung der Körperschallübertragung entlang des Bodens lässt sich weitgehend raumunabhängig durchführen. Als breitbandig geeignete Anregungsquelle haben sich ebenfalls normativ definierte Bälle bewährt.

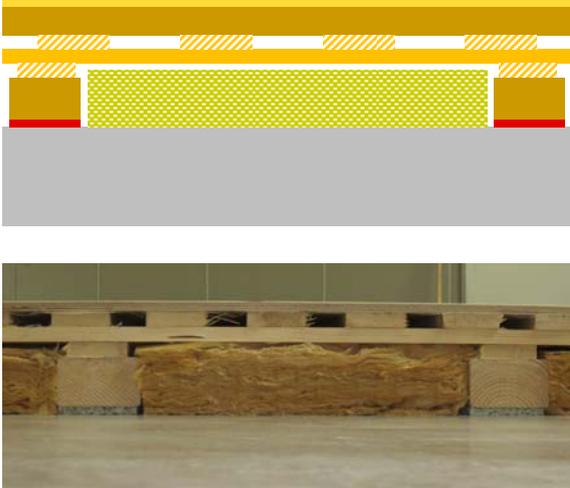
## 5 Messtechnische Untersuchungen

Ausgehend von den Vorbetrachtungen und Voruntersuchungen wurden die Messungen geplant und strukturiert. In diesem Kapitel werden die Sportböden, ihre Anregung und die Messräume sowie die ermittelten Messgrößen vorgestellt. Diese Darstellung dient der Einordnung und Nachvollziehbarkeit der Untersuchungen.

### 5.1 Sportböden

Die Auswahl der Böden und Bodenbeläge orientierte sich an der Aufgabenstellung sowie an der Abstimmung mit dem Auftraggeber. Die Beschreibung, skizzenhafte Darstellung und fotografische Aufnahmen während des Aufbaus enthält Tabelle 5.1. Die Böden wurden für die Versuche in den Messräumen durch eine Fachfirma montiert.

**Tabelle 5.1** Aufbau und Beschreibung der untersuchten Sportböden

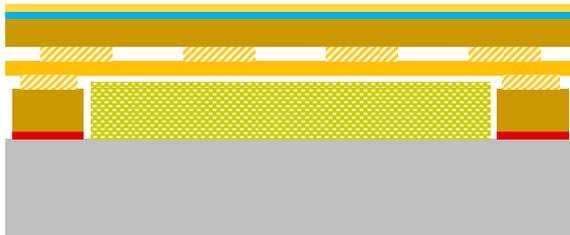
Nr.	Aufbau und Beschreibung
1	<p><b>Flächenelastischer Boden auf elastischer Konstruktion</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- ■ Oberbelag 4 mm Linoleum</li> <li>- ■ Lastverteilende Platte 12 mm Sperrholz</li> <li>- Folie (0,1 mm PE-Folie)</li> <li>- ■ Elastische Konstruktion aus 3 Federbrettlagen (je 18,5 mm dick und 70 mm breit), Abstand in Längsrichtung 50 mm und in Querrichtung ca. 430 mm</li> <li>- ■ Punktlager (L x B x H) 100 x 100 x 60 mm, Massivholz</li> <li>- ■ Elastische Unterlagen (L x B x H) 100 x 100 x 10 mm, Verbundschaum</li> <li>- ■ Die Hohlräume der Bodenkonstruktion sind mit Mineralwolle ausgefüllt</li> <li>- ■ Stahlbetonboden</li> </ul>

## 2 Flächenelastischer Boden auf elastischer Schicht



-  Oberbelag 4 mm Linoleum
-  Lastverteilende Platte 2 x 9 mm Sperrholz verklebt
- Folie (0,1 mm PE-Folie)
-  Elastische Schicht 20 mm PU-Verbundschaum (profiliert)
-  Wärmedämmung 2 Lagen expandierter Polystyrolschaum (EPS), verschiedene Dicken und Druckfestigkeiten
- Ausgleichsschüttung 10 - 20 mm (Hanfspäne, Schaumglasgranulat, bitumengebunden)
-  Stahlbetonboden

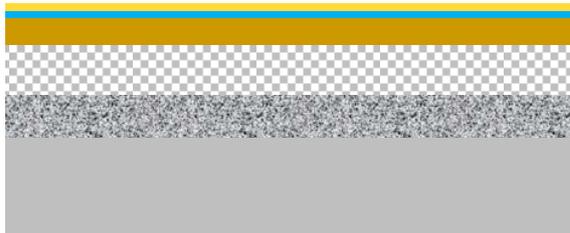
## 3 Kombielastischer Boden auf elastischer Konstruktion



- Oberbelag 2 mm PU-Beschichtung auf 3 mm Verbundschaum (elastische Schicht)

sonst wie **Boden 1**

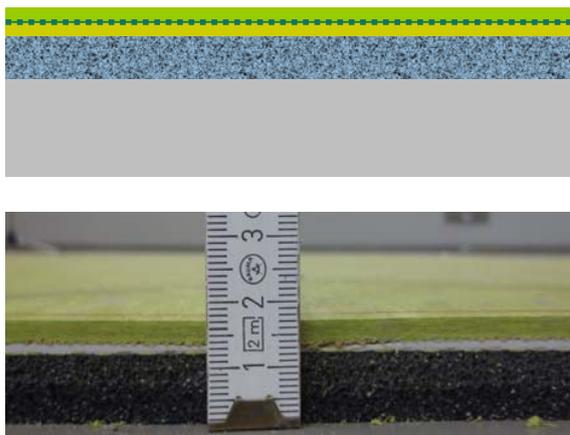
## 4 Kombielastischer Boden auf elastischer Schicht



- Oberbelag 2 mm PU-Beschichtung auf 3 mm Verbundschaum (elastische Schicht)

sonst wie **Boden 2**

## 5 Mischelastischer Boden



-  Oberbelag 4 mm Linoleum
-  PUR-Ausgleichsschicht 1 bis 2 mm
- Vlieskaschierung
-  (Gitter-) Schaumstoffschicht 12 mm
-  Stahlbetonboden

### 5.2 Anregung der Böden

Bei der Auswahl der Anregungsquellen wurden mehrere Aspekte sowohl messtechnischer als auch praktischer Natur berücksichtigt. So ist das Prellen von Basketbällen als eine in der Praxis recht lautstarke Geräuschquelle bekannt und nachvollziehbar. Der verwendete Basketball mit der Größe 7 entspricht den FIBA Richtlinien [17] und wird bei Sportböden zur Bestimmung der Ballreflexion nach DIN EN 12235 [16] ver-

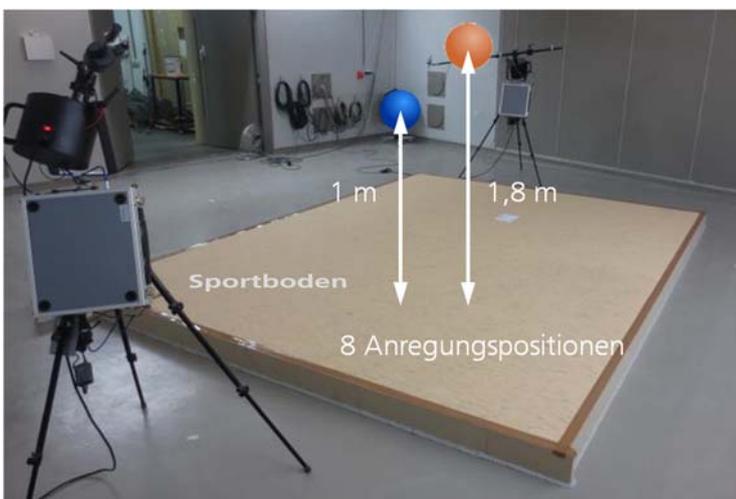
wendet. Seine Eigenschaften wurden während der Messungen regelmäßig überprüft. Eine genormte und daher in ihren Merkmalen sehr stabile Anregungsquelle ähnlicher Art ist der sogenannte „Japanische Gummiball“, der bei akustischen Untersuchungen zur Nachbildung einer Trittschallanregung von Decken genutzt wird. Zum Einsatz kam der „Impact ball Nor279“ gemäß DIN EN ISO 10140-5 (Anhang F.2) bzw. DIN EN ISO 16283-2 [18] (Anhang A.2). Er besteht aus einer Hohlkugel mit einem Durchmesser von 180 mm und einem Gewicht von 2,5 kg, hat also etwa den Umfang eines Handballs und ist noch deutlich schwerer als ein Basketball. Die Abmessungen und seine akustisch maßgebenden Eigenschaften, wie z.B. Material und Rückprallkoeffizient, sind in [9] vorgegeben. Beide Bälle sind in Bild 5.1 abgebildet.



**Bild 5.1** Zur Anregung verwendete Bälle: Basketball und „Japanischer Gummiball“

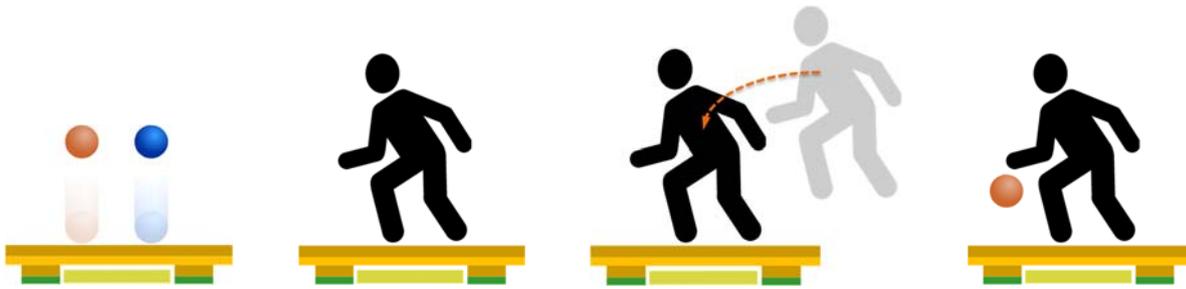
Für die Realisierung des Auftreffens und Zurückspringens der Bälle auf den und vom Sporthallenboden wurden sie aus einer bestimmten Höhe fallen gelassen und nach dem ersten Auftreffen auf dem Sportboden wieder aufgefangen. Es handelte sich also um Einzelereignisse, die jedoch mehrfach wiederholt wurden. Mit Blick auf die jeweiligen Normen betragen die Fallhöhen des Basketballs 1,8 m und die des „Japanischen Gummiballs“ 1,0 m.

Um mögliche Unterschiede zwischen Anregungspositionen zu erfassen aber auch um eine positionsgemittelte Aussage zu erreichen, erfolgte die Anregung im Hallraum (Schallabstrahlung) immer an mehreren Stellen auf dem Boden (siehe Bild 5.2). Bei den Böden 1 und 3 erfolgte die Anregung u.a. gezielt an „systemrelevanten“ Punkten der Konstruktion wie z.B. direkt über den Holzelementen oder den Hohlräumen. Zugleich wurde den Einfluss einer (quasi-) statischen Belastung auf das Abstrahlungsverhalten durch Messungen mit und ohne Person direkt neben der Aufprallstelle berücksichtigt.



**Bild 5.2** Messaufbau der Böden im Hallraum

Neben der Anregung durch fallende Bälle wurden vereinzelt und nur zu Vergleichszwecken weitere Anregungsarten untersucht. Wie in Bild 5.3 dargestellt handelte es sich um laufende und springende Personen sowie um eine Art Kombination aus Laufen und (Basket-) Ballprellen.

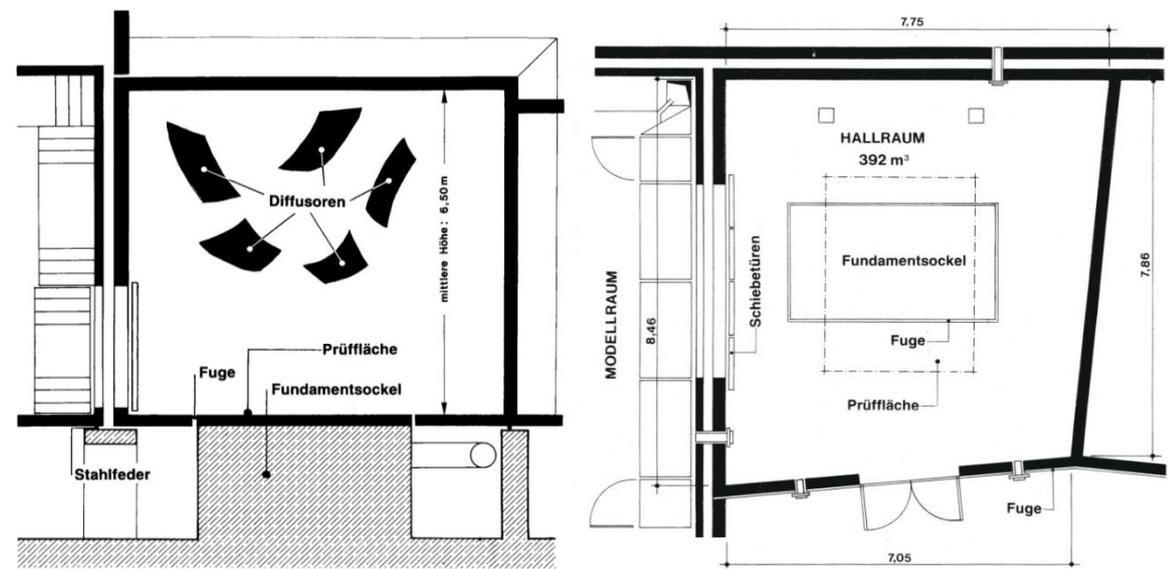


**Bild 5.3** Übersicht der Anregungsarten (Bälle, Personen, Kombination)

Darüber hinaus kamen noch weitere technische Anregungsquellen zum Einsatz. Dazu gehörten u.a. ein elektrodynamischer Schwingerreger „Shaker“ und ein Impulshammer mit Kraftsensor. Ihr Einsatz diente primär dem Zweck, die Wechselbeziehungen zwischen Ereignis und Reaktion (Auftreffen des Balls und daraus resultierende gemessene Schallpegel), sowie der dabei auftretenden Kräfte und deren Wechselbeziehung wissenschaftlich zu analysieren. Die Untersuchungen, sowie deren Ergebnisse und Interpretation sind in [14] ausführlich beschrieben.

### 5.3 Messräume und Lage der Böden

Die Messungen der Schallabstrahlung (mit den Bällen) und des Schallabsorptionsgrades der Böden wurden im Hallraum des Fraunhofer IBP durchgeführt, siehe Bild 5.4. Die besondere Eignung des Hallraumes für die Messung der Schallabstrahlung ergibt sich aus der Tatsache, dass nach DIN EN ISO 3741 die abgestrahlte Schallleistung einer Geräuschquelle aus Schalldruckpegelmessungen im diffusen Schallfeld mit Hilfe einer raumbezogenen Nachhallzeit nach Genauigkeitsklasse 1 bestimmt werden kann. Während bei Messungen im (Halb-) Freifeld, einer ebenfalls möglichen Messumgebung, zusätzlich eine Hüllfläche definiert werden muss, haben im Hallraum lediglich die Größe des untersuchten Bodens, die Nachhallzeit im Raum (auch für die Bestimmung der Schallabsorption zu messen) sowie die anregende Schallquelle einen Einfluss auf das Messergebnis.

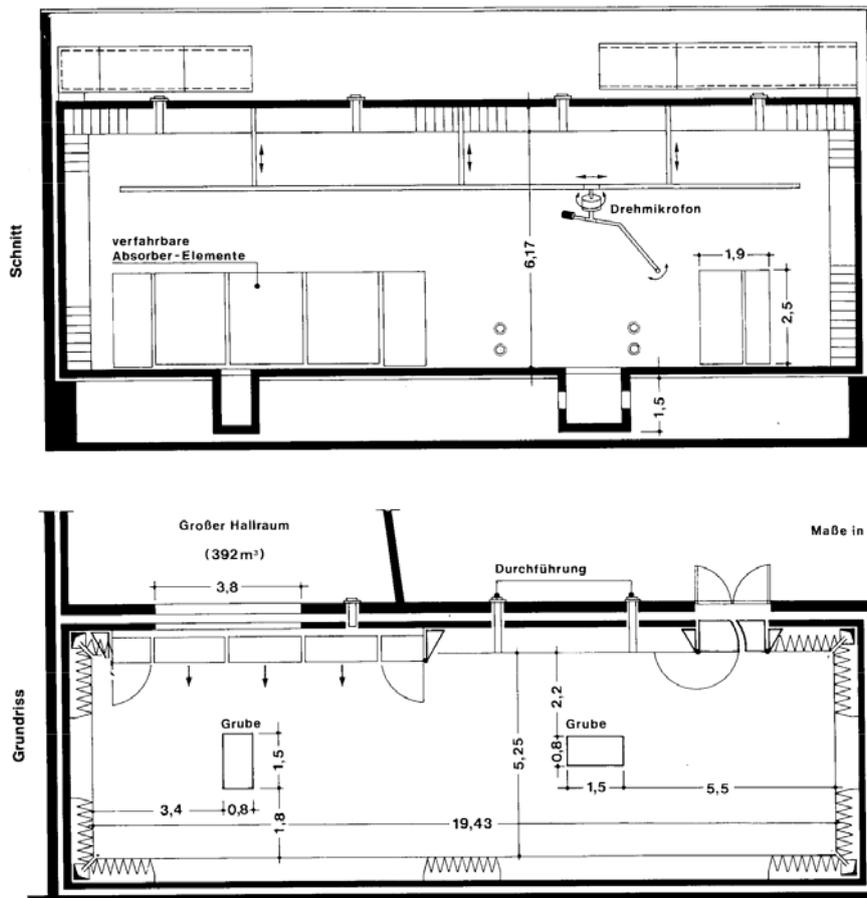


Länge: 7,86 bis 8,46 m  
 Breite: 7,05 bis 7,75 m  
 Höhe: 5,92 bis 7,08 m  
 Raumbofläche: 322 m<sup>2</sup>  
 Raumvolumen: 392 m<sup>3</sup>  
 Diffusoren (Verbundblech): 10 Stück á 1,60 m x 1,25 m, 5 Stück á 1,25 m x 1,25 m, Fläche: 27,8 m<sup>2</sup>

**Bild 5.4** Grundriss (rechts), Seitenschnitt (links) und Geometrie des Hallraums.

Für die Untersuchungen wurde jeweils ein 3 m x 4 m großer Bodenausschnitt zentral im Hallraum verlegt. Die Montage erfolgte durch einen Fachbetrieb, welcher auch das benötigte Material zur Verfügung stellte. So konnte sichergestellt werden, dass die „Musterböden“ so praxisgerecht wie möglich konstruiert waren. Da die Musterböden nicht den gesamten Hallraumboden bedeckten, waren sie am Rand mit einem schalldämmenden und reflektierenden Rahmen gleicher Höhe umrandet. Sämtliche dabei entstehenden Fugen wurden mit dauerplastischem Dichtstoff abgedichtet. Bild 5.2 zeigt einen Musterboden im Hallraum unmittelbar vor der Messung.

Die Messungen des Schwingungsverhaltens und die Messungen zum Vergleich verschiedener Anregungen der Böden wurden im Halb-Freifeldraum des Fraunhofer IBP (siehe Bild 5.5) durchgeführt.



Länge: 19,43 m  
 Breite: 5,25 m  
 Höhe: 6,17 m  
 Raumvolumen: 629 m<sup>3</sup>

**Bild 5.5** Seitenschnitt (oben), Grundriss (unten) und Geometrie des Halb-Freifeldraums

Dieser bietet den Vorteil, dass die Schwingungsmessungen nicht, wie es im Hallraum der Fall gewesen wäre, durch reflektierten (sekundären) Luftschall überlagert werden. Darüber hinaus lassen sich die aufgezeichneten Signale beim Vergleich verschiedener Anregungsquellen (Ball, Läufer, Springer,...) später zur Auralisation verwenden, da die Geräusche akustisch „trocken“ (ohne Nachhall) aufgezeichnet wurden. Zur Anpassung von Hörereignissen an die Hörsituation in einer realen Sporthalle werden die Aufnahmen mit einem künstlichen Nachhall versehen, der sich aus der Nachhallzeit, Größe usw. der Halle ergibt. So entsteht ein zwar virtueller aber realitätsnaher Höreindruck von Schallereignissen in der entsprechenden Sporthalle.

Für die Untersuchungen der Schwingungsausbreitung wurde jeweils ein 1 m x 10 m großer Bodenausschnitt (siehe Bild 5.6, links) zentral im Halb-Freifeldraum verlegt. Die Montage erfolgte wie im Hallraum durch einen Fachbetrieb. Die Messungen zum Vergleich verschiedener Anregungen wurden auf 2,5 m x 2,5 m großen, mit originalen Materialien nachgebauten Bodenausschnitten (siehe Bild 5.6, rechts) durchgeführt. Die Reduzierung der Bodenfläche erfolgte aus praktischen Gründen, da so mehrere Böden gleichzeitig im

Halb-Freifeldraum aufgebaut und ein direkter Vergleich z.B. mit immer demselben Läufer am selben Tag realisiert werden konnten. Auch hier wurde der Rand des Bodens jeweils mit einem schalldämmenden, reflektierenden Rahmen versehen und abgedichtet.



**Bild 5.6** Links: Bodenausschnitt mit 1 m x 10 m im Halb-Freifeldraum zur Messung der Schwingungsausbreitung entlang des Bodens  
Rechts: Bodenausschnitt mit 2,5 m x 2,5 m im Halb-Freifeldraum zum Vergleich der Anregungsarten

#### 5.4 Messgrößen

**SCHALLDRUCK-PEGEL:** Als Schalldruck bezeichnet man periodische Schwankungen (Schwingungen) des Luftdrucks um den Umgebungsdruck. Man kann diesen z.B. in Pa angeben, jedoch ist der Wertebereich in linearen Einheiten sehr groß. Aus diesem Grund und mit Bezug auf die menschliche Hörwahrnehmung wird der Schalldruckpegel in dB angegeben. Durch den logarithmischen Bezug, siehe Gl. (5.1) erhält man Wertebereiche von der Hörschwelle bei 0 dB ( $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ) bis zur Schmerzgrenze bei ca. 120 dB.

$$\text{Schalldruckpegel } L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \text{ dB} \quad (5.1)$$

**SUMMENPEGEL:** Der Schalldruck (-pegel) ist frequenzabhängig. Frequenzbereiche lassen sich messtechnisch sehr fein auflösen. Aus diesem Grund wird mit Bezug auf die allgemeine Lautstärke eines Geräusches der Summenpegel über einen gewissen Frequenzbereich z.B. von 100 bis 5000 Hz (bauakustischer Messbereich) angegeben. In ihm ist die Summe aller frequenzabhängigen Einzelwerte des Schalldrucks enthalten.

**FREQUENZDARSTELLUNG MIT OKTAV- UND TERZWERTEN:** Um von Geräuschen zusätzlich zum Summenpegel eine übersichtliche Frequenzbewertung zu erhalten, werden analog zur Musik auch in der Physik Terzen und Oktaven verwendet. Eine Terz bzw. Oktave ist ein zusammengefasster Frequenzbereich mit einer klar definierten unteren und oberen Grenze. Angegeben wird üblicherweise die Oktav- oder Terzmittenfrequenz. So kann ein Messergebnis von z.B. 100 bis 5000 Hz, das theoretisch bei Verwendung von 1 Hz Schritten aus 4900 Werten bestehen würde, alternativ mit nur ca. 7 Oktav- oder 21 Terzwerten dargestellt werden, ohne dabei die physikalisch interessanten Informationen zu verlieren. Eine Oktave umfasst denselben Frequenzbereich wie drei Terzen.

**A-BEWERTUNG:** Das menschliche Gehör nimmt die Lautstärke von Geräuschen frequenzabhängig unterschiedlich wahr. So wird z.B. ein Geräusch im Sprachbereich zwischen 500 und 2000 Hz bis zu 100 mal lauter wahrgenommen, als ein Geräusch mit gleicher Schallenergie bei 100 Hz. Aus diesem Grund werden Schalldruckpegel oft in dB(A) angegeben. Zusätzlich erhält das Formelzeichen den Index A und es ergibt sich der A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  [dB(A)]; oder der A-bewertete Schalleistungspegel  $L_{WA}$  [dB(A)].

**ZEITLICH GEMITTELTER SCHALLDRUCKPEGEL:** Bei vielen Norm-Messverfahren werden Schallpegel mit einer zeitlichen Bewertung (üblicherweise „Fast“-Bewertung mit einer Zeitkonstante von 125 ms) aufgezeichnet, da sie zeitlich nicht konstant sind. Am Ende einer Messung wird dann ein Mittelwert aus den Aufzeichnungen über den gesamten Messzeitraum gebildet. Dieser wird als energieäquivalenter mittlerer Schalldruckpegel bezeichnet und mit dem Formelzeichen  $L_{AFeq}$  gekennzeichnet.

**MAXIMALER SCHALLDRUCKPEGEL:** Der höchste (mit der Zeitbewertung „Fast“) gemessene Wert bei einer Aufzeichnung von Schallpegeln über einen Messzeitraum wird als maximaler Schallpegel  $L_{Fmax}$  oder  $L_{AFmax}$  bezeichnet.

**SCHALLEISTUNGSPEGEL:** Während der Schalldruckpegel ein Maß für die Lautstärke eines Geräusches ist, verwendet man den Schalleistungspegel zur Charakterisierung von Geräuschquellen. Er gibt an, welche Schallenergie pro Zeiteinheit von einer Geräuschquelle abgestrahlt wird und erhält die Bezeichnung  $L_w$  bzw.  $L_{wA}$ , ebenfalls in dB bzw. dB(A) angegeben. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Schalleistung einer Quelle und dem gemessenen Schalldruckpegel, siehe Gl. (6.2). Allerdings wird diese Relation u.a. auch von der Umgebung und der Entfernung zur Quelle beeinflusst.

**SCHWING-BESCHLEUNIGUNGSPEGEL:** Als Schwing-Beschleunigung wird die Beschleunigung bezeichnet, die vibrierende Strukturen, z.B. ein Sportboden nach dem Aufprall eines Balls, aufweisen. Sie kann direkt mit so genannten Beschleunigungsaufnehmern gemessen werden und wird in Pegelform mit  $L_a$  in dB angegeben.

**SCHWING- ODER SCHALLSCHNELLEPEGEL:** Der Schallschnellepegel gibt die Schwinggeschwindigkeit an, mit der eine vibrierende Struktur schwingt. Er kann aus dem Beschleunigungspegel durch Integration ermittelt werden und ist über den so genannten Abstrahlgrad direkt proportional zur abgestrahlten Schalleistung der schwingenden Struktur. Deshalb wird er in der Akustik bevorzugt angegeben, in Pegelschreibweise mit  $L_v$  bzw.  $L_{vA}$  und ebenfalls in dB bzw. dB(A).

**NACHHALLZEIT:** Als Nachhallzeit wird das Zeitintervall bezeichnet, innerhalb dessen der Schalldruckpegel in einem Raum nach dem Abschalten einer Schallquelle um 60 dB ( $T_{60}$ ) abfällt. Je nach Messverfahren wird sie als  $T_{20}$  bzw.  $T_{30}$  angegeben, bezieht sich aber immer auf den Abfall des Pegels um 60 dB. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig und wird, genau wie Schalldruckpegel, in Terzwerten gemessen. In der Planung wird bis heute häufig auch mit Oktaven oder Einzahlwerten gearbeitet.

## 5.5 Auralisation

Unter dem Stichwort Auralisation wird die (Wieder-) Hörbarmachung von akustischen Messdaten oder Signalen verstanden, die in der Regel mit Hilfe von Softwaretools aufbereitet und an eine reale Situation angepasst werden. Dies kann u.a. dem Zweck dienen, akustisch wirksame Maßnahmen vor deren baulicher Umsetzung am Gebäude nicht nur objektiv (durch Messwerte und Beurteilungsgrößen), sondern auch subjektiv (durch Hörbarmachung über Kopfhörer oder im Schallfeldsynthese-Labor) zu bewerten. In diesem Fall werden dazu Geräuschereignisse, wie z.B. das Aufprallen eines Balls auf einen Sportboden oder eine über den Sportboden laufende Person, im Labor ohne Nachhall aufgezeichnet. Diese sportbodenbezogenen Geräusche können später mit einer Software überlagert (mehrere Personen prellen Bälle und laufen durcheinander) sowie unter Berücksichtigung der Nachhallzeiten an reale Sporthallen angepasst und wieder abgespielt werden. Damit haben nicht nur Bauherren eine Entscheidungshilfe, mit den Hörproben können auch psychoakustische Analysen zur Wirkung akustischer Maßnahmen durchgeführt werden.

## 6 Messergebnisse

### 6.1 Materialeigenschaften

Die Darstellung der akustisch bzw. schwingungstechnisch relevanten Materialeigenschaften dient in erster Linie der Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Messergebnisse. Zu diesen Eigenschaften werden, neben den Abmessungen, folgende Größen gezählt:

- Flächenbezogene Masse, z.B. lastverteilende Platte, Oberbeläge
- Dynamische Steifigkeit, z.B. elastische Schichten und Unterlagen
- Strömungswiderstand, z.B. Hohlraumfüllung
- Mechanischer Verlustfaktor, z.B. elastische Schichten, Schwerfolien

In Tab. 6.1 sind insbesondere Werte zu den elastodynamischen Kenngrößen der (entkoppelnden) Materialien sowie zum Strömungswiderstand der Dämmstoffe enthalten. Sie werden nach einschlägigen Normen messtechnisch bestimmt, so dass zu vielen Materialien Daten vorliegen. Mit diesen Werten lassen sich auch akustische Funktionsmodelle anwenden, um den Materialeinfluss rechnerisch zu bewerten. Bei einer elastisch gelagerten biegeweichen Platte kann z.B. anhand der flächenbezogenen Masse der Platte und der dynamischen Steifigkeit der Lagerung (elastische Schicht) die Resonanzfrequenz des Systems berechnet werden. Dabei gilt, je geringer die Steifigkeit und/oder je höher die Masse desto niedriger die Resonanzfrequenz.

**Tabelle 6.1** Ausgewählte Eigenschaften der in den Sportböden verwendeten Materialien

PU Verbundschaum zur elastischen Lagerung	Dicke	11 mm	 <p>Entkopplung</p>
	Dichte	ca. 250 kg/m <sup>3</sup>	
	Abmessungen (Probe)	200 mm x 200 mm	
	Dynamische Steifigkeit	40 MN/m <sup>3</sup>	
	Verlustfaktor	0,145	
Elastifizierter Polystyrolschaum (EPS) als Dämmschicht	Dicke	29 mm	 <p>Dämmschicht</p>
	Dichte	ca. 25 kg/m <sup>3</sup>	
	Abmessungen (Probe)	200 mm x 200 mm	
	Dynamische Steifigkeit	54,6 MN/m <sup>3</sup>	
	Verlustfaktor	0,184	
Mineralwolle zur Hohlraumdämpfung	Dicke	80 mm	 <p>Hohlraumfüllung</p>
	Dichte	ca. 24,7 kg/m <sup>3</sup>	
	Abmessungen (Probe)	Ø 100 mm	
	Längenbezogener Strömungswiderstand	16,0 kPa s/m <sup>2</sup>	
PU Verbundschaum als Zwischenschicht	Dicke	20,7 mm	 <p>Zwischenschicht</p>
	Dichte	ca. 120 kg/m <sup>3</sup>	
	Abmessungen (Probe)	Ø 100 mm	
	Dynamische Steifigkeit	14,3 MN/m <sup>3</sup>	
	Längenbezogener Strömungswiderstand	30,5 kPa s/m <sup>2</sup>	

Im Vergleich dazu können die Werte für die flächenbezogene Masse ( $\text{kg/m}^2$ ) als weitgehend typisch und bekannt angesehen werden, wie z.B.

- Lastverteilende Platte, z.B. 15 mm Brettsperrholz (Dichte ca.  $500 \text{ kg/m}^3$ ):  $7,5 \text{ kg/m}^2$
- Massivparkett, z.B. 5 mm (Dichte ca.  $500 \text{ bis } 700 \text{ kg/m}^3$ ):  $2,5 \text{ bis } 3,5 \text{ kg/m}^2$
- Linoleum, z.B. 3 mm (Dichte ca.  $1100 \text{ kg/m}^3$ ):  $3,3 \text{ kg/m}^2$ .

Diese Dokumentation der Materialwerte richtet den Blick aber auch auf Anhaltspunkte für stoffliche Modifikationen zur Beeinflussung des akustischen Verhaltens, natürlich immer im Kontext sport- und sicherheits-funktionaler Merkmale. Sie ließe sich z.B. die Hohlraumfüllung bei den Böden 1 und 3 recht problemlos austauschen, wenn deren akustischer Einfluss von Bedeutung ist.

## 6.2 Schallabsorption

Der Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  der Sportböden liefert zwar keine Information zu deren Schallabstrahlung und es sind auch keine hohen Werte der Schallabsorption zu erwarten. Angesichts der Geräuschkulisse in Sporthallen und der Möglichkeit, mit schallabsorbierenden Flächen zu einer gewissen Verringerung der Geräuschausbreitung im Raum beizutragen, ist aber buchstäblich jeder Quadratmeter willkommen. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge lassen sich anhand von 3 einfachen Gleichungen erläutern.

Erstens ergibt sich die sogenannte äquivalente Schallabsorptionsfläche ( $A_{\text{eq}}$ ) eines Raumes aus der Summe seiner Teilflächen ( $S_i$ ) jeweils multipliziert mit dem zugehörigen Schallabsorptionsgrad ( $\alpha_i$ ) der Teilfläche, siehe Gleichung (6.1). Es gilt also z.B., dass einzelne, hochabsorbierende Flächen den gleichen Effekt haben können wie mehrere gering absorbierende Flächen.

$$\text{Äquivalente Schallabsorptionsfläche} = \sum \text{Teilfläche(n) des Raumes} \cdot \alpha \text{ der Teilfläche(n)} \quad \text{m}^2 \quad (6.1)$$

Zweitens kann die Wirkung schallabsorbierender Flächen in zweierlei Form quantifiziert werden. Der für hörbare Wirkung repräsentative Schalldruckpegel ergibt sich, im diffusen Schallfeld, aus dem die Schallquelle charakterisierenden Schallleistungspegel, abzüglich eines Wertes, der durch die äquivalente Schallabsorptionsfläche bestimmt wird, siehe Gleichung (6.2). D.h., bei unverändert lauter Schallquelle (z.B. Ballpressen) wird es spürbar leiser, wenn die äquivalente Schallabsorptionsfläche zunimmt.

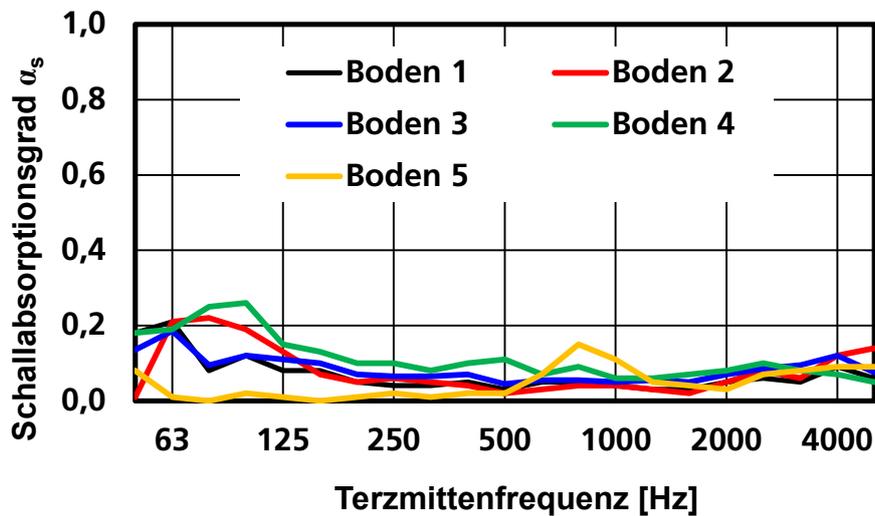
$$\text{Schalldruckpegel} = \text{Schallleistungspegel} - 10 \lg \frac{\text{Äquivalente Schallabsorptionsfläche}}{4} \quad \text{dB} \quad (6.2)$$

Auch die bekannteste und wichtigste raumakustische Größe, die Nachhallzeit, nimmt ab, wenn äquivalente Schallabsorptionsfläche vergrößert wird, siehe Gleichung (6.3). Zugleich steigt sie proportional mit dem Raumvolumen.

$$\text{Nachhallzeit} = 0,16 \frac{\text{Raumvolumen}}{\text{Äquivalente Schallabsorptionsfläche}} \quad \text{s} \quad (6.3)$$

Zusammen mit der beruhigenden Wirkung von Schallabsorbieren im Raum bedeutet eine kurze Nachhallzeit eine erhöhte Sprachverständlichkeit. D.h., Gespräche, Anweisungen usw. werden besser verstanden.

In typischen Dreifeld-Hallen hat der Boden mit ca.  $1.200 \text{ m}^2$  einen (beachtlichen) Flächenanteil von ca.  $1/3$  der Gesamtfläche (Wände, Decke, Boden). Selbst ein geringer Schallabsorptionsgrad von  $0,2$  würde eine äquivalente Schallabsorptionsfläche von  $240 \text{ m}^2$  bedeuten, die gerade bei tiefen Frequenzen mit dezidierten Schallabsorbieren durchaus schwer zu bekommen sind. Vor diesem Hintergrund sind die gemessenen Werte des Schallabsorptionsgrades in Bild 6.1 zu betrachten und zu bewerten.

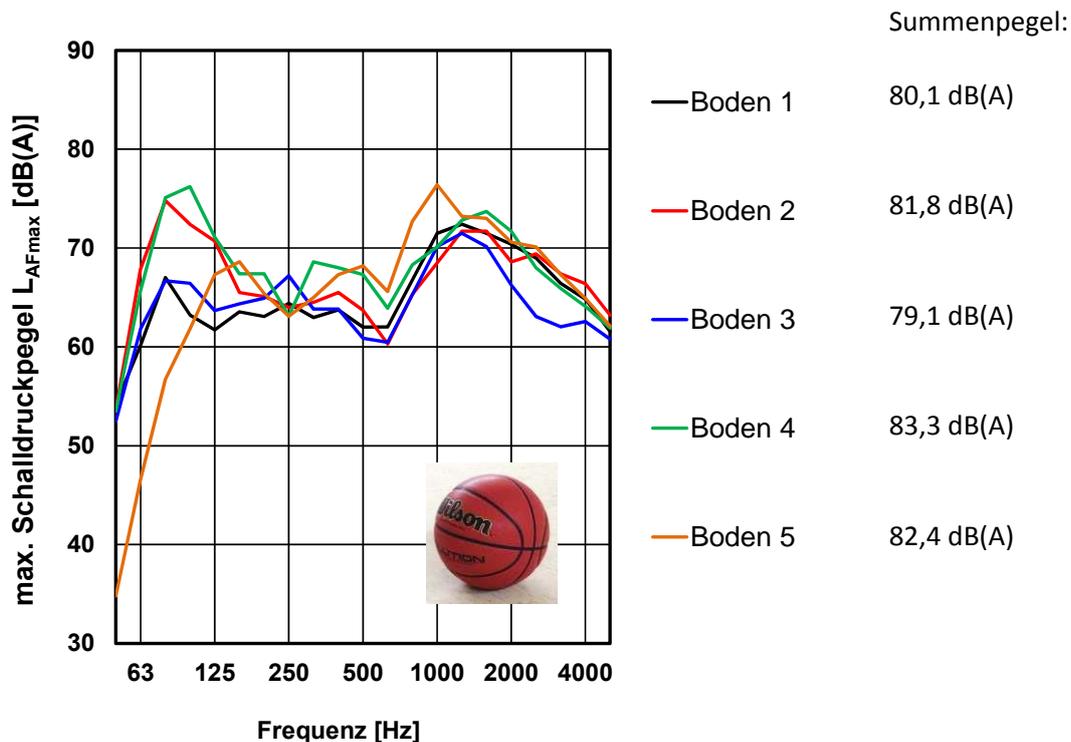


**Bild 6.1** Messergebnisse des Schallabsorptionsgrades bei diffusem Schalleinfall mit den Sportböden nach Tab. 5.1.

Die Böden 2 und 4 erreichen im Frequenzbereich zwischen 63 und 125 Hz Werte von ca. 0,2 und damit eine Größenordnung, die jedenfalls bei der raumakustischen Planung und Behandlung relevant sind. Andere Böden bleiben darunter und überschreiten bei höheren Frequenzen kaum Werte von 0,1. Auffällig ist Boden 5, der bei 800 und 1.000 Hz erhöhte Werte aufweist. Diese sind für die raumakustische Praxis sicher nicht gewinnbringend, deuten aber auf ein besonderes (Resonanz-) Verhalten der Konstruktion hin.

### 6.3 Schallabstrahlung

Die Vorstellung der Messergebnisse zur Schallabstrahlung der Böden im Hallraum beginnt mit einer Gesamtübersicht zum Vergleich der Böden bei den beiden Anregungsarten mit Basketball (Bild 6.2) und „Japanischem Gummiball“ (Bild 6.3) jeweils etwa mittig auf der Bodenfläche.

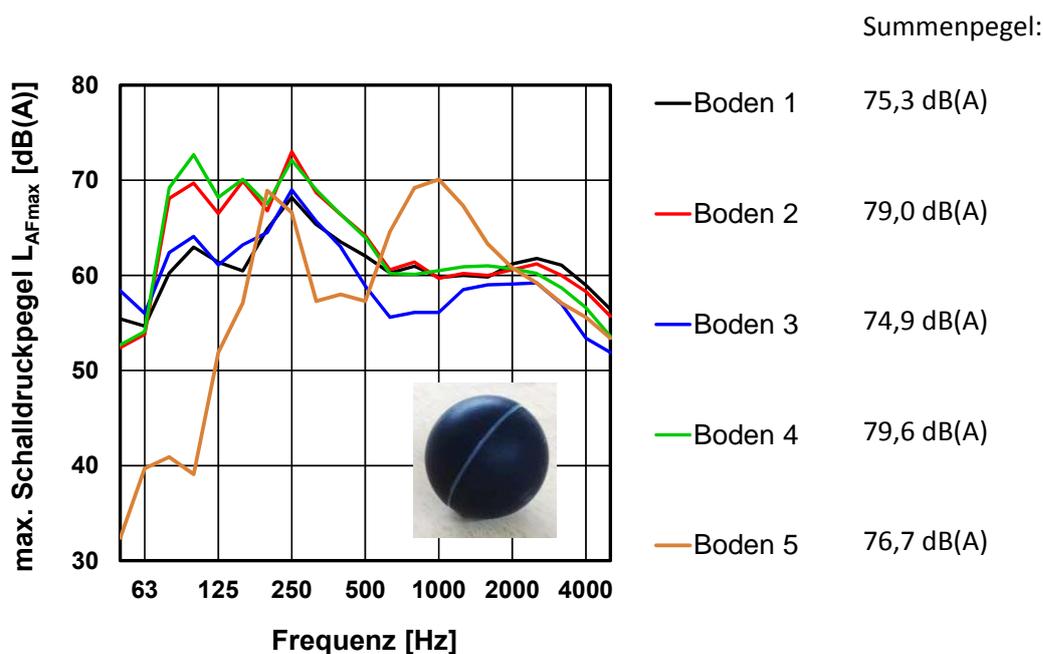


**Bild 6.2** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit den Sportböden nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Basketball

Zu den frequenzabhängigen, A-bewerteten Kurven im Diagramm werden jeweils die Summenpegel rechts neben der Legende angegeben. Bei der Interpretation fällt zunächst der vergleichbare Verlauf der Böden 1 und 3 sowie der Böden 2 und 4 auf. In gewissen Grenzen zeigt sich dies auch anhand der Summenpegel, die zwischen ca. 79 und 83 dB(A) liegen, sich also immerhin um 4 dB unterscheiden. Diese Unterschiede sind hörbar und im Allgemeinen unter dem Aspekt einer Geräuschminimierung als relevant einzustufen.

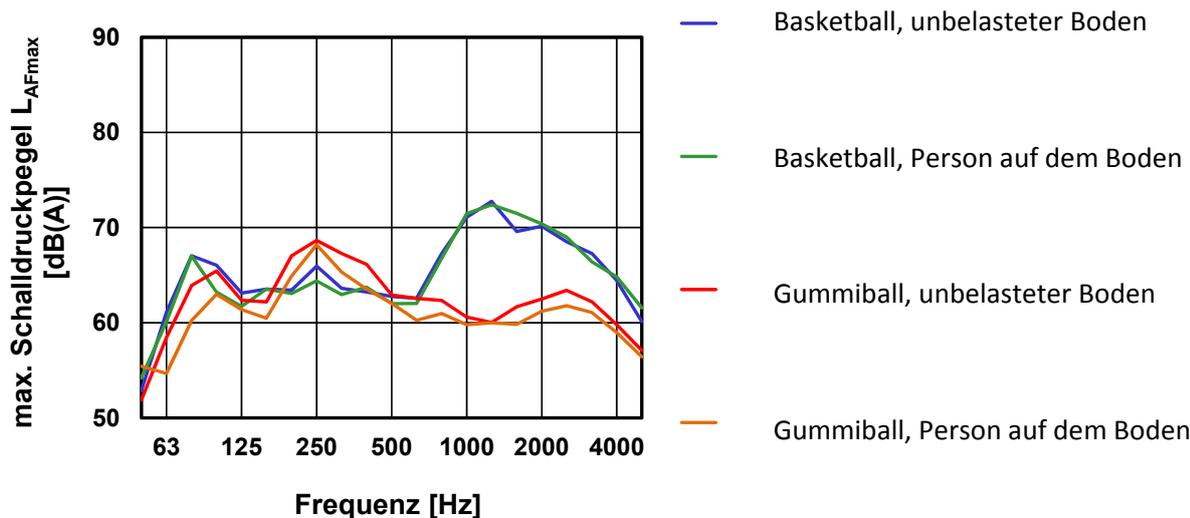
Trotz der im Detail unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit erzeugt der Basketball mit den Böden ein breitbandiges Geräusch mit erhöhten Pegelwerten oberhalb 800 Hz. Im Frequenzbereich zwischen 160 und 630 Hz sind die Unterschiede gering, bei tiefen Frequenzen zeigen sich die bereits genannten Ähnlichkeiten der Böden 1 und 3 sowie 2 und 4, wobei zwischen den Kurvenpaaren ca. 10 dB Differenz liegen. Boden 5 weicht insbesondere bei tiefen Frequenzen bis etwa 125 Hz deutlich von den übrigen Böden ab.

Ein etwas anderes akustisches Erscheinungsbild stellt sich mit dem „Japanischen Gummiball“ als Anregungsquelle ein, siehe Bild 6.3. Gegenüber dem Basketball werden bei ca. 250 Hz höhere Pegelwerte und oberhalb 630 Hz deutlich geringere Pegelwerte gemessen. Daraufhin sind auch die Summenpegel insgesamt geringer. Dies gilt wiederum für die ähnlichen Bodensysteme 1 und 3 sowie 2 und 4. Erneut weicht der Boden 5 ab, bei tiefen Frequenzen mit niedrigen, dafür zwischen 800 und 1.000 Hz mit bis zu 10 dB höheren Pegelwerten.



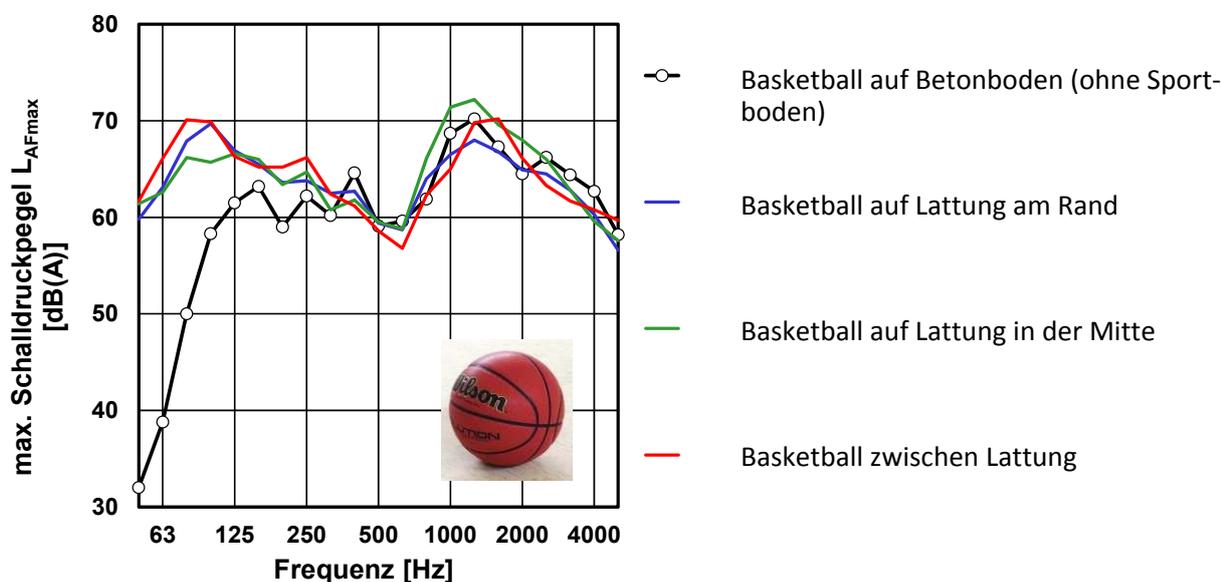
**Bild 6.3** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit den Sportböden nach Tab. 5.1, angeregt mit dem „Japanischen Gummiball“

Der Vergleich der beiden Anregungsquellen Basketball und japanischer Gummiball, sowie die Wirkung der Belastung des Bodens durch eine Person ist für Boden 1 in Bild 6.4 dargestellt.



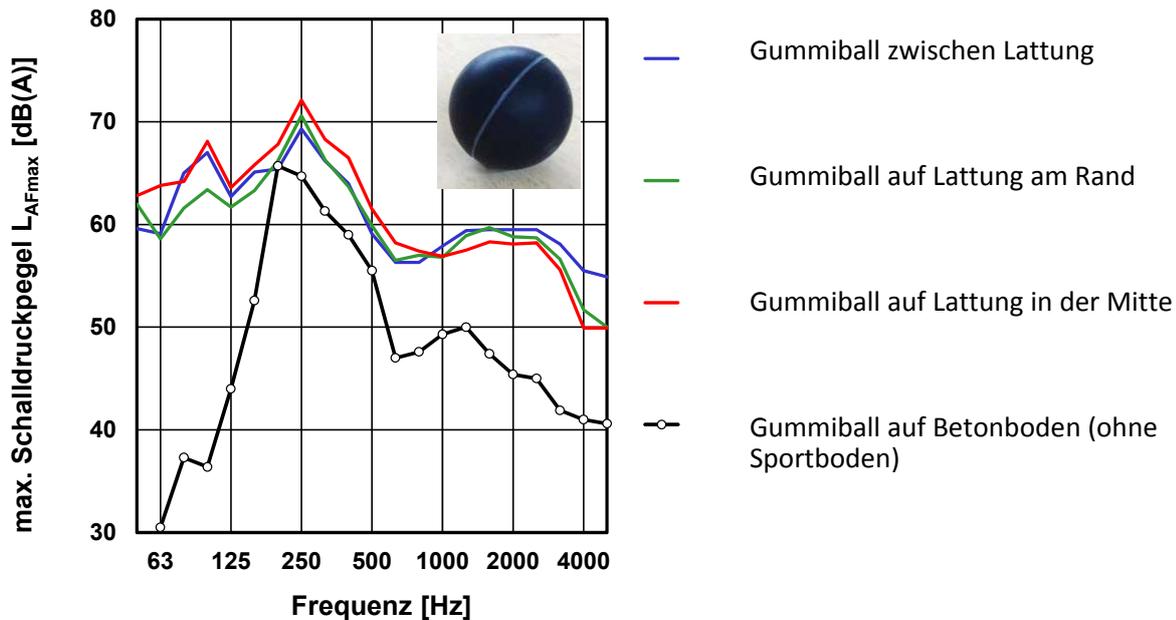
**Bild 6.4** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit Sportboden 1 nach Tab. 5.1, Vergleich der Anregung mit Basketball und Gummiball sowie ohne und mit einer Person im Bereich der Aufprallstelle

Weiterhin wurden einzelne Fragestellungen mit Messungen verfolgt, wie z.B. der Einfluss der Aufprallstelle, die speziell bei den Böden mit elastischer Konstruktion vermutet werden könnte. Bild 6.5 zeigt dazu Kurven für Boden 1 bei unterschiedlicher Aufprallposition bezüglich der Konstruktion aus 3 Federbrettlagen, also z.B. direkt über der Lattung (Federbrettlage) und mittig dazwischen.



**Bild 6.5** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit Sportboden 1 nach Tab. 5.1, Vergleich der Anregung mit Basketball an verschiedenen Positionen mit dem Aufprallgeräusch des auf einem Betonboden

Bei Verwendung des Basketballs bleiben die Unterschiede gering, die Summenpegel unterscheiden sich um weniger als 1 dB. Bei Verwendung des Gummiballs (siehe Bild 6.6) erhöht sich die Differenz auf mehr als 2 dB. Es sei jedoch hinzugefügt, dass diese „Positionsabhängigkeit“ auch bei den anderen Bodentypen festgestellt wurde. Eine Systematik ist schwer zu ermitteln. Angesichts der Wiederholgenauigkeit, der fraglichen Nutzung in der Praxis und des Untersuchungsaufwandes wurde diese Frage nicht weiter vertieft.



**Bild 6.6** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit Sportboden 1 nach Tab. 5.1, Vergleich der Anregung mit Gummiball an verschiedenen Positionen mit dem Aufprallgeräusch des auf einem Betonboden

Die Bilder 6.5 und 6.6 enthalten aber jeweils noch eine zusätzliche Kurve zur Geräuschabstrahlung im Hallraum, wenn Basketball (Bild 6.5) und Gummiball (Bild 6.6) direkt auf den Betonboden des Hallraums prallen. Auch wenn dieser Betonboden sicher noch Schall abstrahlt, unterscheidet er sich doch aufgrund seiner Masse (Massenträgheit) erheblich von den insgesamt elastischer konstruierten Sportböden. Der Vergleich dieser Messergebnisse mit dem bisher Gezeigten untermauert 2 Erkenntnisse: Die Bälle strahlen selbst frequenzspezifisch Schall ab (Gummiball bei ca. 250 Hz, Basketball breitbandig mit Schwerpunkt oberhalb 800 Hz) und die Böden 1 bis 4 steuern insbesondere tieffrequenten Schall bei.

Angesichts dieser Messresultate und der Schlussfolgerungen aus den Voruntersuchungen (Kap. 4) lassen sich bereits an dieser Stelle einige vorläufige Erkenntnisse resümieren.

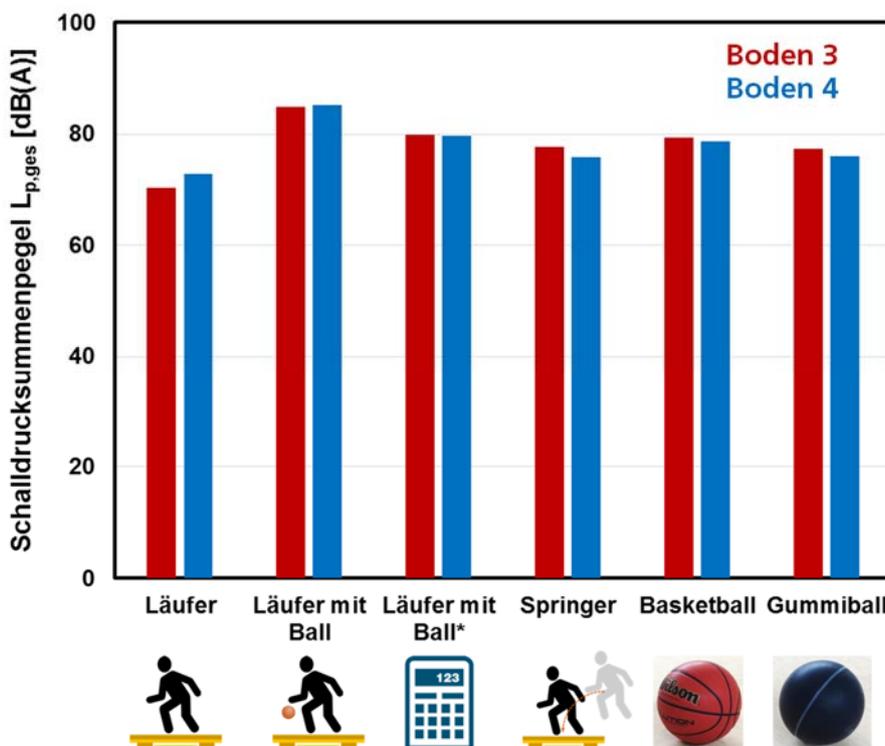
1. Das Gesamtgeräusch der mit den Bällen angeregten Böden ist breitbandig und mit maximalen Summenpegeln bis zu 83 dB(A) verbunden. Bei einem Versuch der Hochrechnung für reale Sporthallen müssen einerseits die Nachhallzeiten von Hallraum und Sporthalle angepasst werden. Dies führt zu geringeren Pegeln in der Sporthalle. Andererseits gelten die gemessenen Pegel für Einzelereignisse, also für das einzelne Aufprallen auf den Boden. In einer Sporthalle ist hingegen mit einer Überlagerung vieler solcher Ereignisse zu rechnen, was zu einer Erhöhung der resultierenden Pegel führt. Auch wenn sich eine generalisierte zahlenmäßige Aussage nicht treffen lässt, können die Prellgeräusche doch erhebliche Pegel jenseits der 80 dB(A) erreichen.
2. Die beiden Bälle bzw. Anregungsquellen tragen aufgrund ihres eigenen Schwingungsverhaltens mess- und auch hörbar zur Schallabstrahlung des Gesamtsystems „Boden + Ball“ bei. Der Gummiball bei ca. 250 Hz und etwas geringer als der Basketball, der oberhalb 800 Hz sogar das Gesamtgeräusch dominiert. Letzteres wird in den Bildern 6.5 und 6.6 beim herausgegriffenen Vergleich für Boden 1 deutlich. Zudem wird in Bild 6.4 eine mögliche Beeinflussung der Geräuschentstehung bzw. -abstrahlung durch eine Person im Bereich der Aufprallstelle thematisiert. Der Einfluss erweist sich jedoch als minimal.
3. Die Böden 1 und 3, d.h. die Böden auf elastischer Konstruktion, erzeugen systematisch geringere Pegel als die Böden 2 und 4 (elastische Schicht). Dies zeigt sich besonders bei tiefen Frequenzen (63 bis 125 Hz) und anhand der Summenpegel.
4. Die Unterschiede zwischen den Böden 1 und 3 sind gering. Boden 1 verursacht höhere Pegel bei mittleren und hohen Frequenzen. Dies könnte auf den Oberbelag (Linoleum) zurückgeführt werden. Allerdings lässt sich diese Ursache nicht auf die Unterschiede zwischen Boden 2 und 4 ausweiten. Bei diesen bei-

den Böden erzeugt der Boden 4 (Oberbelag aus PU-Beschichtung und Verbundsystem) die etwas höheren Pegel bei mittleren und hohen Frequenzen. Dies tritt aber nur bei Anregung mit dem Basketball zu-tage. Natürlich können hier spezifische Wechselwirkungen zwischen Oberbelag, Gesamtsystem und An-regungsart eine Rolle spielen. Um diese genauer zu erfassen, sind jedoch deutlich vertiefte Betrachtun-gen erforderlich, die kaum praktische Konsequenzen erwarten lassen.

- Boden 5 unterscheidet sich in mehrfacher Hinsicht von den übrigen Bodensystemen. Bei tiefen Frequen-zen strahlt er deutlich weniger Schall ab als die anderen Bodentypen. Bei Frequenzen im Bereich von 800 und 1.000 Hz strahlt er höhere Pegel ab, die aber bei der Anregung mit dem Basketball und dessen eigenem Abstrahlverhalten nicht allzu sehr hervortreten. Die Tatsache, dass der Summenpegel von Bo-den 5 trotz der fehlenden, störenden, tieffrequenten Geräuschanteile ein vergleichbares Niveau zu den anderen Böden hat, unterstreicht die Bedeutung einer frequenzabhängigen Bewertung der Schallab-strahlung von Sportböden.

Wie in Bild 5.3 dargestellt, wurden neben den Einzelereignissen mit Basketball und Japanischem Gummiball auch andere Anregungsarten vergleichend im Labor untersucht. Es steht außer Frage, dass laufende und springende Personen oder kombinierte Bewegungsabläufe mit und Ball (-prellen) kaum für ein valides Messverfahren eignen. Insofern hatten diese Vergleichsmessungen den Charakter von „Schnappschüssen“, die aber dennoch einen gewissen Eindruck geben und somit auch eine Einordnung der für aussagekräftige Messungen gewählten Anregungsarten ermöglichen.

In Bild 6.7 sind die Summenpegel der Schallabstrahlung für die Sportböden 3 und 4 nach Tab. 5.1 darge-stellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Messungen aus versuchspraktischen Gründen nicht im Hallraum, sondern im Halb-Freifeldraum durchgeführt wurden. Der Vergleich in Bild 6.7 ist also möglich, eine Gegen-überstellung mit den Werten im Hallraum (Bilder 6.2 bis 6.6) jedoch nur in eingeschränktem Maße. Aus den Werten geht hervor, dass eine laufende Person die geringste Schallabstrahlung verursacht und diese Person bei gleichzeitigem Ballprellen die höchsten Schallpegel erzeugt. Springende Personen wiederum führen offenbar zu ähnlichen Schallpegeln wie das Aufprallen mit dem Japanischen Gummiball.

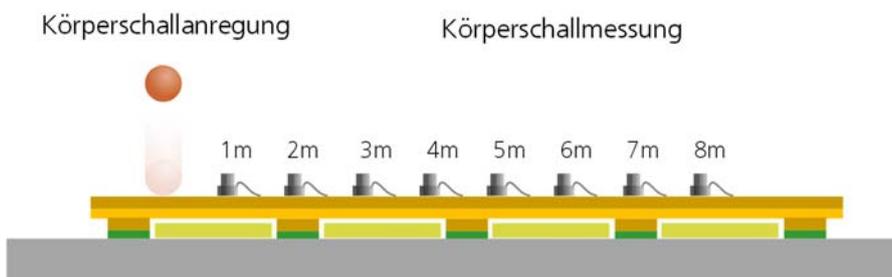


**Bild 6.7** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit Sportboden 1 nach Tab. 5.1, Ver-gleich der Anregung mit Gummiball an verschiedenen Positionen mit dem Aufprallgeräusch des auf einem Betonboden

Eine theoretische Überlegung ist, mit den Werten „Läufer“ und „Basketball“ rechnerisch den Wert der laufenden und zugleich den Basketball prellenden Person („Läufer mit Ball“) zu bestimmen. Der Vergleich dieser Variante, in Bild 6.7 mit „Läufer mit Ball\*“ gekennzeichnet, gelingt aber nur ansatzweise. Für die verbleibende Differenz von ca. 3 dB können mehrere Gründe verantwortlich sein, z.B. ein veränderter Bewegungsablauf der Versuchsperson durch das Prellen des Balls. Insgesamt ergeben sich Unterschiede zwischen den beiden Böden im Rahmen der bisherigen Größenordnungen, wobei die Frequenzabhängigkeit der Reaktion von Boden und Anregungsquelle zu berücksichtigen sind.

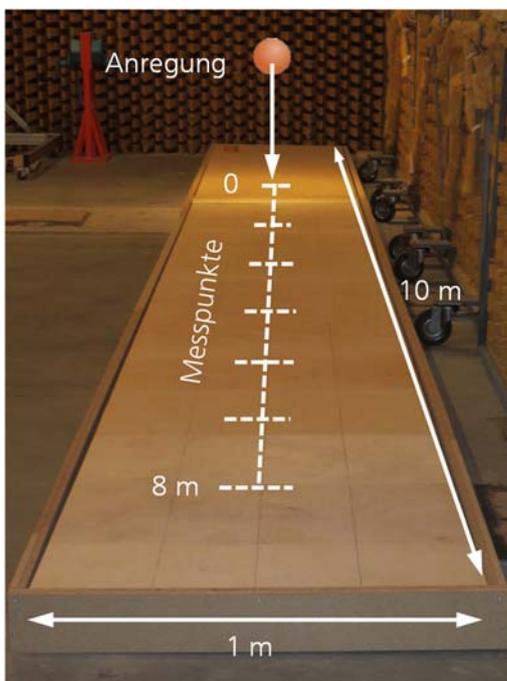
#### 6.4 Körperschallübertragung

Mit Blick auf Bild 4.1 geht es im Folgenden um die Übertragung von Körperschall im Sportboden, angeregt von einem aufprallenden Ball. Dazu wird die Schallschnelle der Oberfläche des Sportbodens erfasst. Sie zeigt, wie sich Schwingungen ausbreiten und an entfernteren Stellen wieder vom Boden als (Luft-) Schall abgestrahlt werden. Die Relation von Schallschnelle einer Oberfläche mit dem von ihr abgestrahlten Schalldruck stellt der so genannte Abstrahlgrad her. Er hängt – allgemein ausgedrückt – von der Beschaffenheit der Oberfläche bzw. der Struktur ab.



**Bild 6.8** Messaufbau (schematische Darstellung) zur Bestimmung der Körperschallausbreitung

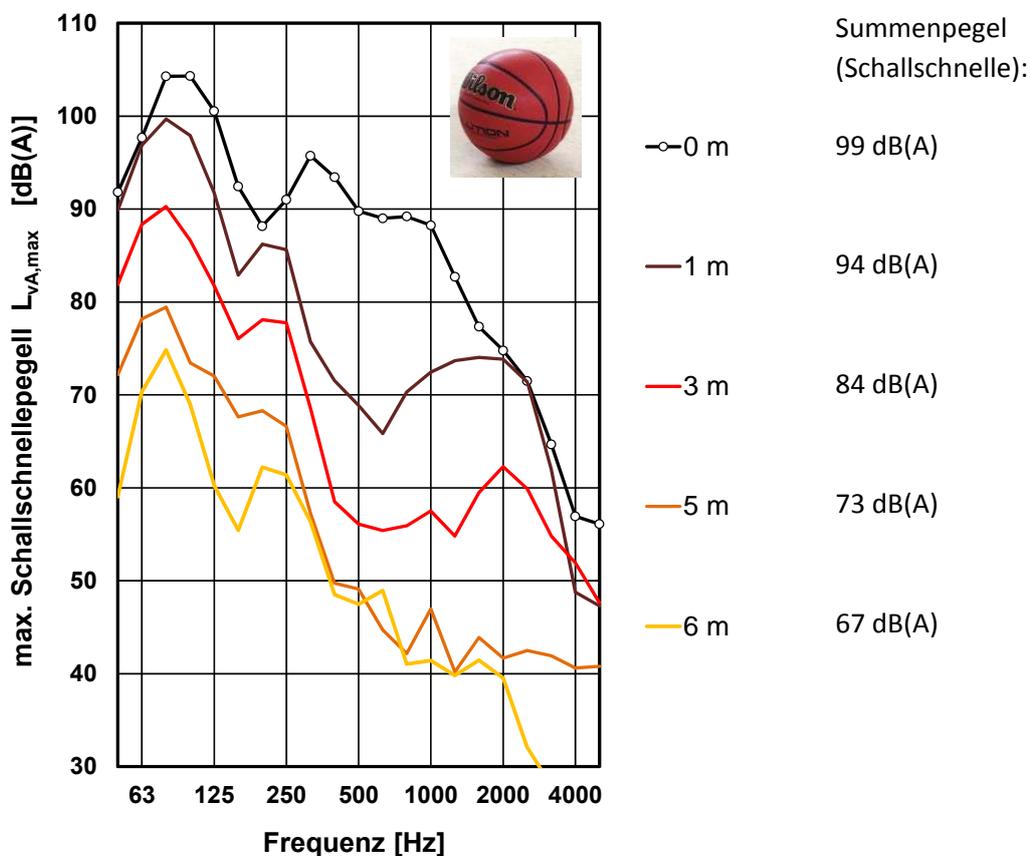
Bild 6.8 zeigt in schematischer Form den Messaufbau mit der Anregungsquelle und -position („0 m“) auf dem 10 m langen und 1 m breiten Sportbodenabschnitt. Zugleich sind die Messpositionen in 1-m-Schritten dargestellt, an denen die Körperschallaufnehmer platziert sind. Auch Bild 6.9 illustriert diesen Aufbau im Halb-Freifeldraum, der u.a. aus Gründen der erforderlichen Raumdimension verwendet wurde.



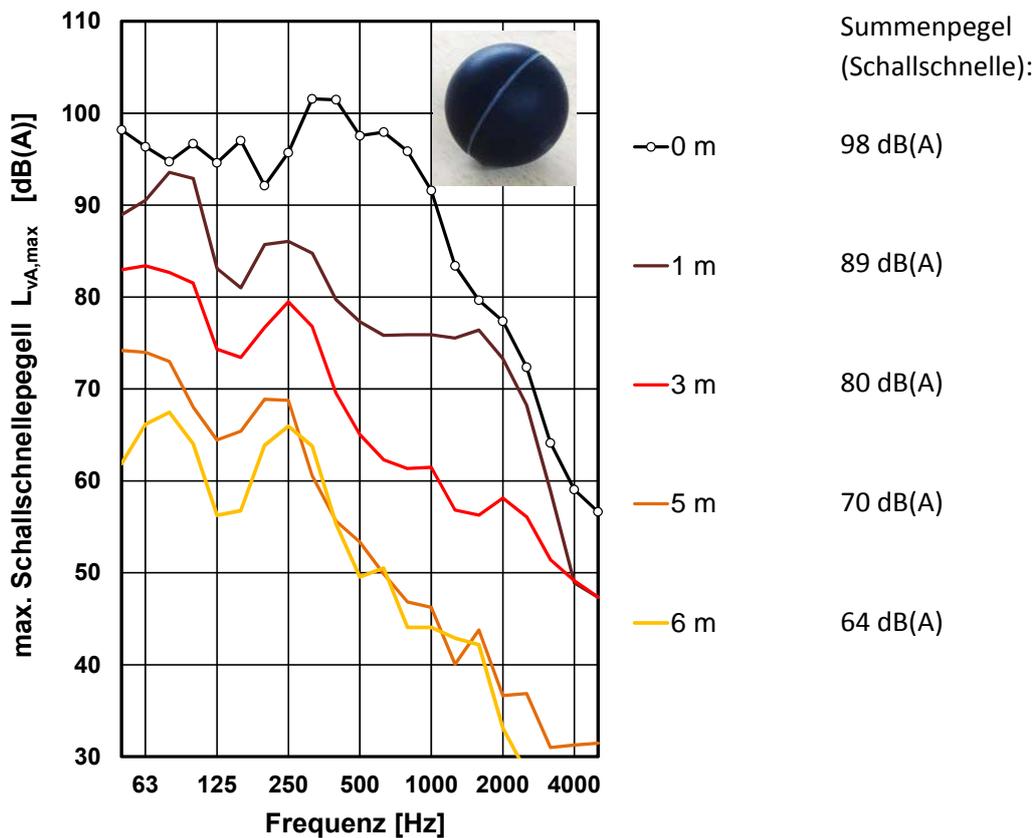
**Bild 6.9** Messaufbau zur Bestimmung der Körperschallausbreitung

Die Messergebnisse, beginnend mit Boden 2 und der Anregung mit dem Basketball, sind in Bild 6.10 enthalten. Sie zeigen die frequenzabhängigen Schallschnellepegel, deren Summenpegel für die Messpositionen „0 m“ (Anregungsstelle) sowie in 1 m, 3 m, 5 m und 6 m Entfernung. Es wird deutlich, dass bei diesem Boden und mit dieser Anregung die tiefen Frequenzen zwischen 80 und 100 Hz den Körperschall dominieren. Bei höheren Frequenzen treten zwar noch einzelne Pegelwerte hervor, aber allesamt mit deutlich geringerer Amplitude. Die Summenpegel geben daher insbesondere die Entfernungsabhängigkeit des tieffrequenten Körperschalls wieder. Ab 1 m Entfernung von der Anregungsstelle fallen diese Summenpegel mit ca. 5 dB/m ab. Ähnliches gilt bei Anregung mit dem Japanischen Gummiball (siehe Bild 6.11) für die Summenpegel und deren entfernungsbedingt Abnahme. Die Frequenzabhängigkeit stellt sich jedoch etwas anders dar, wobei der tieffrequente Körperschall unverändert dominiert.

In beiden Bildern wird erkennbar, dass zwar der Summenpegel mit der Entfernung weiter und sogar recht kontinuierlich abnimmt, aber bei mittleren und hohen Frequenzen die Unterschiede nicht so deutlich ausgeprägt sind bzw. mit zunehmender Entfernung verschwinden. Dies zeigt sich unabhängig von der Anregungsart beim Vergleich der Schnellepegel in 5 m und 6 m Entfernung. Oberhalb 250 Hz fallen die Pegelspektren nahezu zusammen. Die Interpretation dieser Entwicklung ist zweigeteilt. Einerseits sind die hochfrequenten Schnellepegel recht gering und erreichen die Größenordnung des „Hintergrundrauschens“, also eines von der Anregung unabhängigen Körperschallpegels im System. Andererseits stellt sich bei höheren Frequenzen auch auf plattenartigen Strukturen eine Art diffuses Körperschallfeld ein. Zum Vergleich: Im Hallraum ist diese Diffusität des (Luft-) Schallfeldes bewusst herbeigeführt, so dass sich durch vielfache Reflexion und Streuung eine nahezu ortsunabhängige Schallpegelverteilung im Raum einstellt. In ähnlicher Form gilt dies auch für den Körperschall im Sportboden, auch wenn sich hier die Reflexionen, z.B. am Rand, und die resultierende Diffusität nicht in gleicher Weise beschreiben und voraussetzen lassen. Die pegelbestimmenden tieffrequenten Anteile des Körperschallfeldes bleiben jedoch ausreichend hoch und die Abnahme des Summenpegels erkennbar.



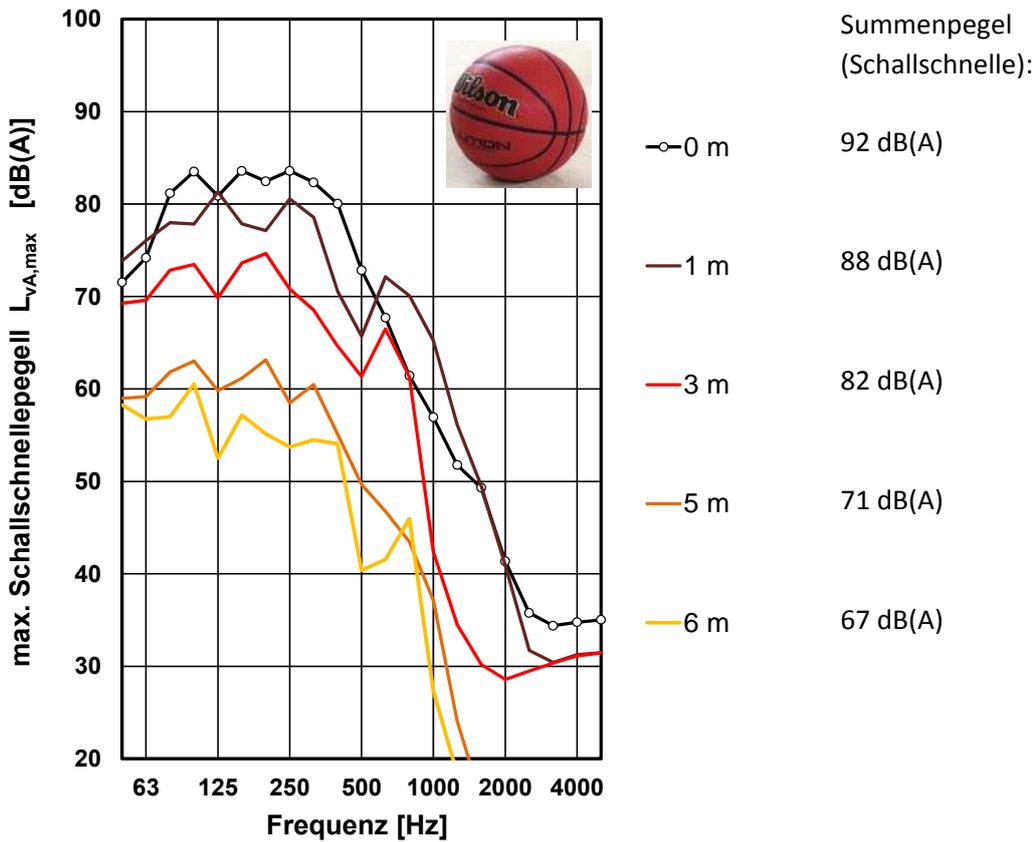
**Bild 6.10** Messergebnisse zur (Körper-) Schallausbreitung mit Boden 2 nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Basketball



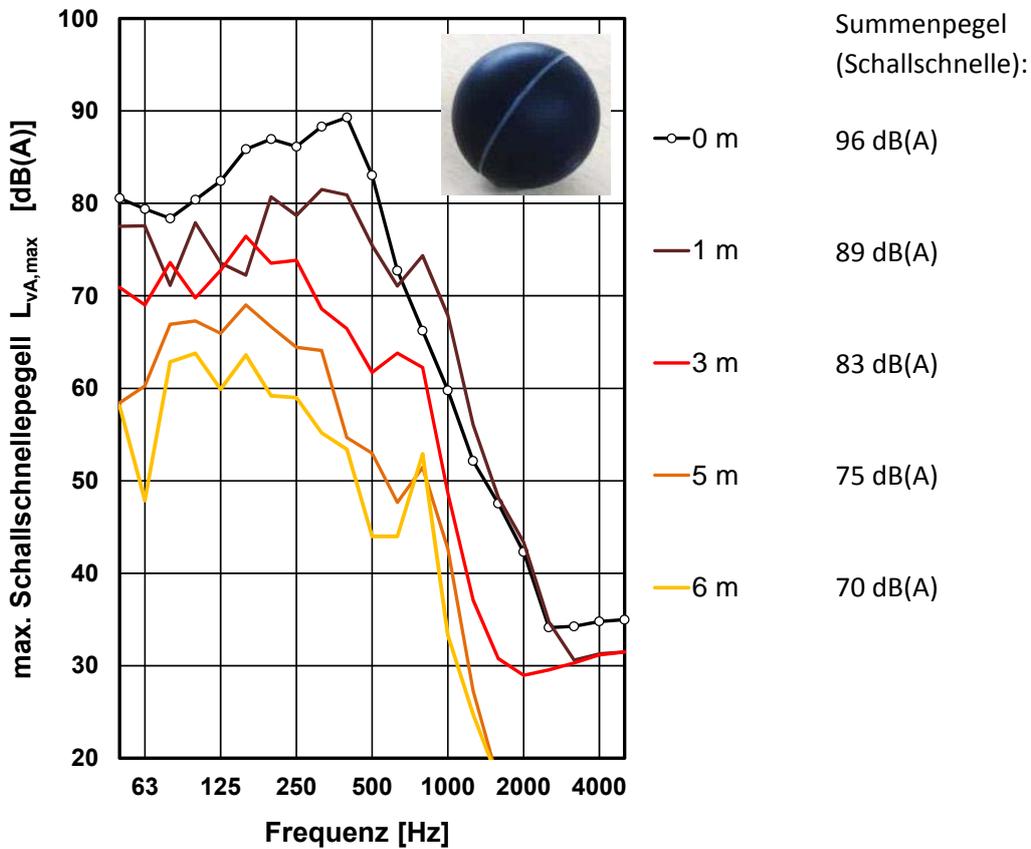
**Bild 6.11** Messergebnisse zur (Körper-) Schallausbreitung mit Boden 2 nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Japanischen Gummiball

Mit diesen Erläuterungen folgt der nächste Schritt, der Vergleich zwischen den Sportböden. Dazu sind in Bild 6.12 und Bild 6.13 für den Boden 3 die Schallschnellepegel-Spektren mit Basketball und Japanischem Gummiball dargestellt. Aus der zu Boden 2 vergleichenden Betrachtung geht hervor, dass zwar erneut die tiefen Frequenzen die Spektren bestimmen, aber deren Ausprägung breitbandiger ist. Die dominierenden Körperschallanteile liegen zwischen 63 und 250 Hz. Oberhalb 500 Hz fallen die Schallschnelle-Pegel bei beiden Anregungsarten deutlich schneller ab.

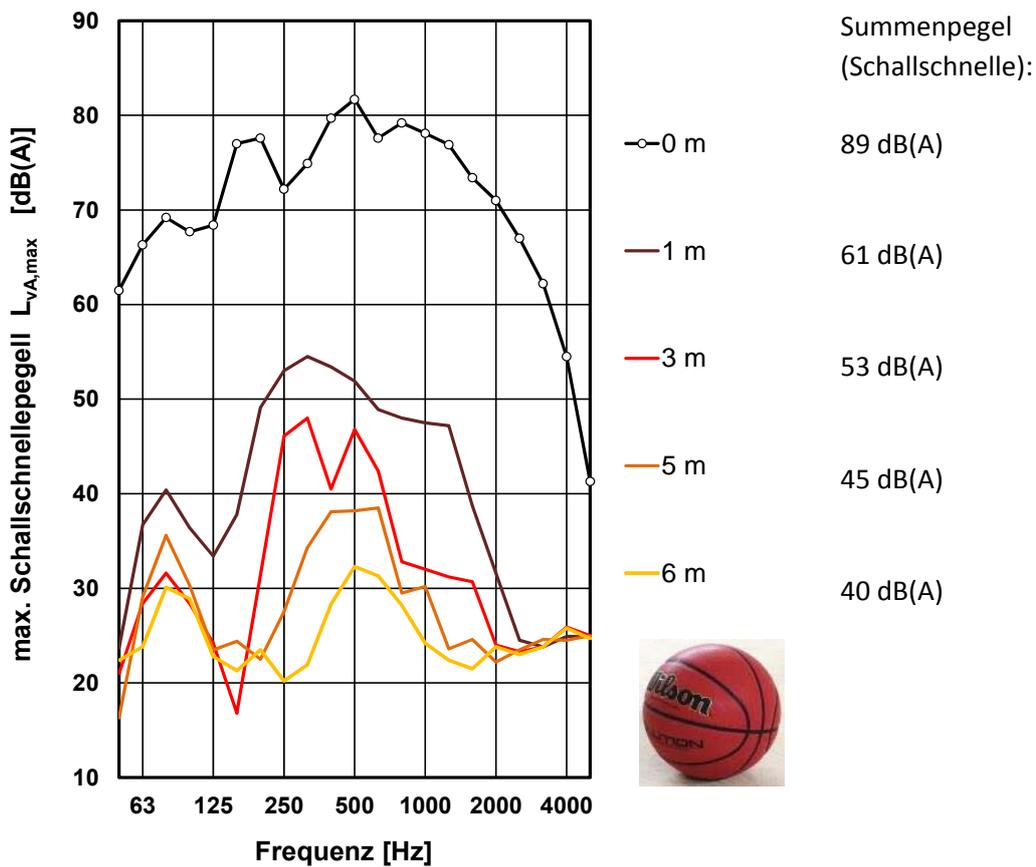
Weiterhin fällt auf, dass sowohl die tieffrequenten Spitzenwerte der Schallschnelle-Pegel als auch die Summenpegel mit Boden 2 die entsprechenden Werte mit Boden 3 überschreiten. An den Summenpegeln ist dies sicher besser abzulesen, als in den Diagrammen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Messergebnissen der abgestrahlten Luftschallpegel, wo ebenfalls die Werte der Böden 2 und 4 über denen der Böden 1 und 3 lagen. Für Boden 5 sind die Messergebnisse der Schallschnellepegel in Abhängigkeit vom Abstand von der Anregungsstelle für den Basketball und den Japanischen Gummiball in Bild 6.14 und 6.15 dargestellt.



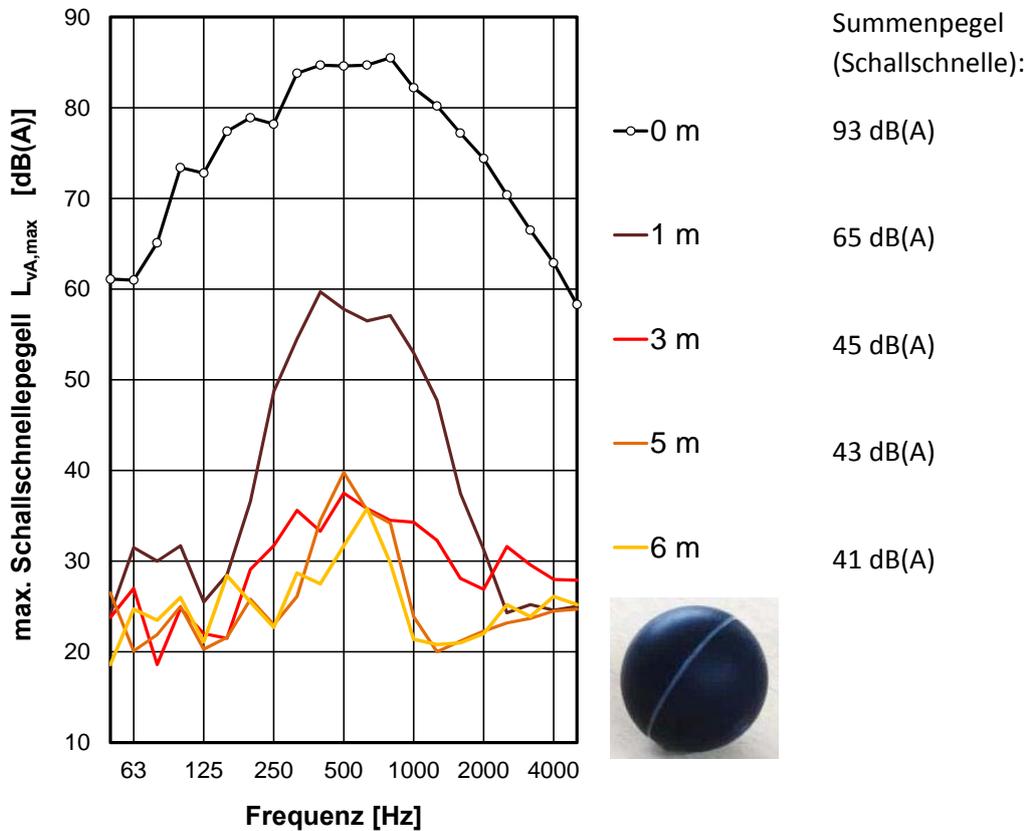
**Bild 6.12** Messergebnisse zur (Körper-) Schallausbreitung mit Boden 3 nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Basketball



**Bild 6.13** Messergebnisse zur (Körper-) Schallausbreitung mit Boden 3 nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Japanischen Gummiball

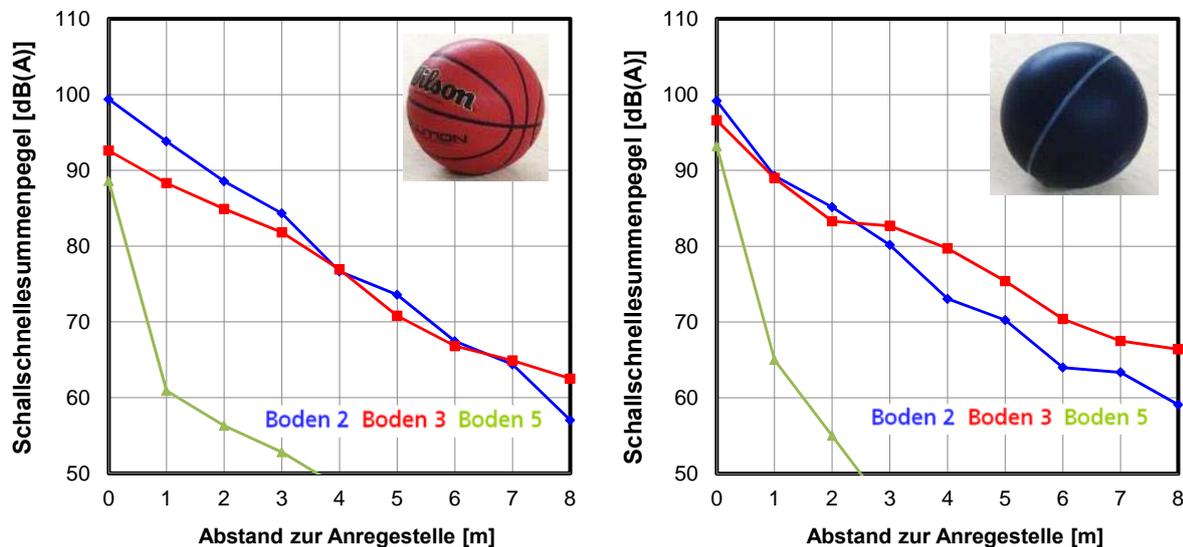


**Bild 6.14** Messergebnisse zur (Körper-) Schallausbreitung mit Boden 5 nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Basketball



**Bild 6.15** Messergebnisse zur (Körper-) Schallausbreitung mit Boden 5 nach Tab. 5.1, angeregt mit dem Gummiball

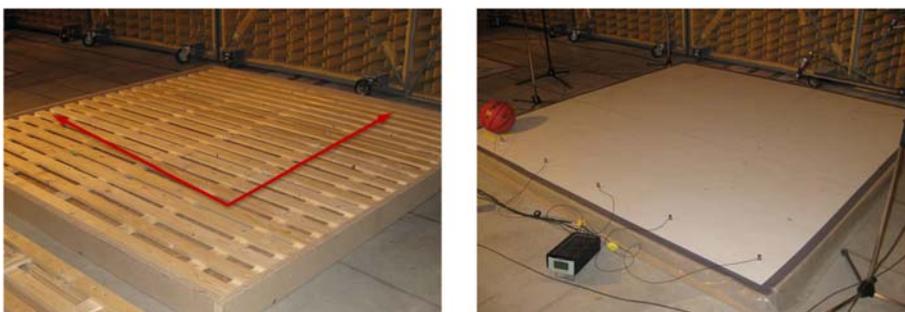
Während der Frequenzverlauf der Schallschnelle bei Boden 5 sowohl bei Anregung mit dem Basketball (Bild 6.14), als auch mit dem Gummiball (Bild 6.15) mit Frequenzanteilen von ca. 125 bis 2000 Hz wesentlich breitbandiger ist als bei den Böden 2 und 3, fällt in den Diagrammen sofort auf, dass das Niveau der Kurve bereits bei 1 m Abstand zur Anregung deutlich (über 20 dB) niedriger liegt und zwischen 3 und 6 m kaum noch Pegelabnahme über die Entfernung stattfindet. Zum besseren Vergleich der Böden untereinander sind in Bild 6.16 die jeweiligen Summenpegel der Schallschnelle für die Böden 2, 3 und 5 über der Entfernung zum Anregungspunkt aufgetragen.



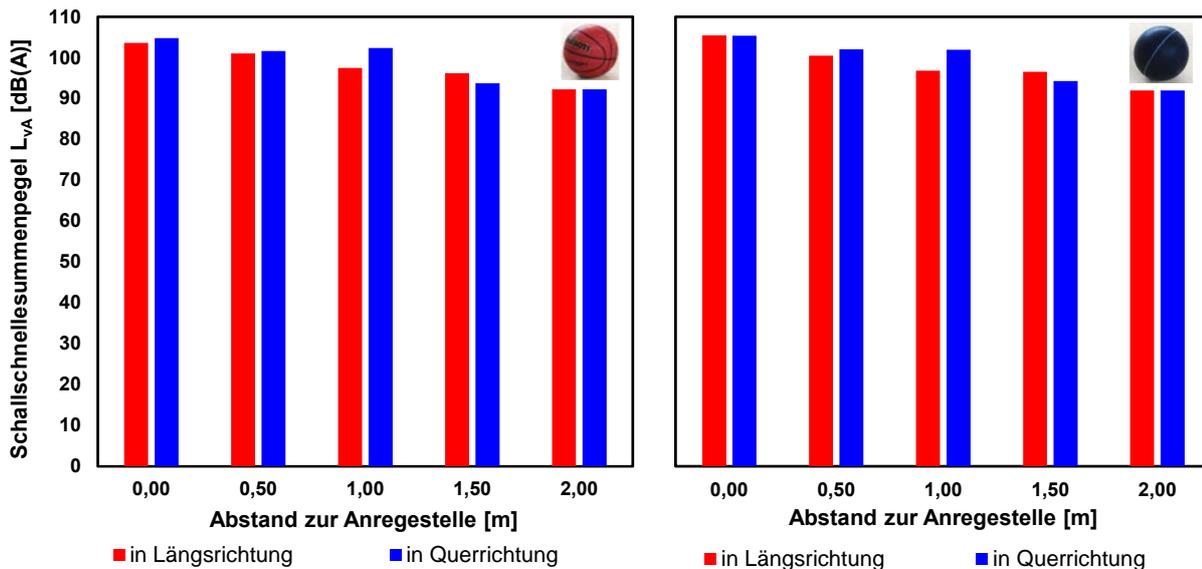
**Bild 6.16** Messergebnisse zur entfernungsabhängigen (Körperschall-) Summenpegel mit den Böden 2 und 3 nach Tab. 5.1, angeregt mit Basketball (links) und Japanischen Gummiball (rechts)

Boden 2 schwingt an der angeregten Stelle am stärksten, hat aber eine größere Pegelabnahme pro Meter als Boden 3, sodass die Unterschiede in einer Entfernung, ab ca. 3 bis 5 m relativieren. Grundsätzlich ergänzt sich das Ergebnis mit der Feststellung, dass von Boden 2 auch die größere Luftschallabstrahlung ausgeht. Boden 5 stellt nicht nur durch seine Bauart (ohne lastverteilende Platte) eine Besonderheit dar, er zeigt auch ein anderes Schwingverhalten. Während die gemessene Schallschnelle im Bereich der Anregung nur wenig niedriger ist, als bei Boden 3, fällt der Summenpegel bereits nach knapp einem Meter um über 30 dB ab. Die Bereiche außerhalb von einem Meter um die Anregeposition tragen damit höchstwahrscheinlich nicht mehr zum abgestrahlten Luftschallpegel bei.

Eine spezifische Fragestellung zur Körperschallausbreitung stellt sich bei den Böden (1 und 3) mit elastischer Konstruktion aufgrund der Ausrichtung der Federbrettlage direkt unter der lastverteilenden Platte. Daraus ergibt sich eine richtungsabhängige mechanische Aussteifung, die sich auch auf das Schwingungsverhalten auswirken kann. Die Untersuchung dieses Einflusses mit dem Versuchsaufbau nach Bild 6.17 führte zu den Ergebnissen in Bild 6.18.



**Bild 6.17** Messaufbau zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der Körperschallausbreitung in Böden mit elastischer Konstruktion (Böden 1 und 3)



**Bild 6.18** Messergebnisse zur Richtungsabhängigkeit der Körperschallausbreitung in Böden mit elastischer Konstruktion (Böden 1 und 3), angeregt mit Basketball (links) und Japanischen Gummiball (rechts)

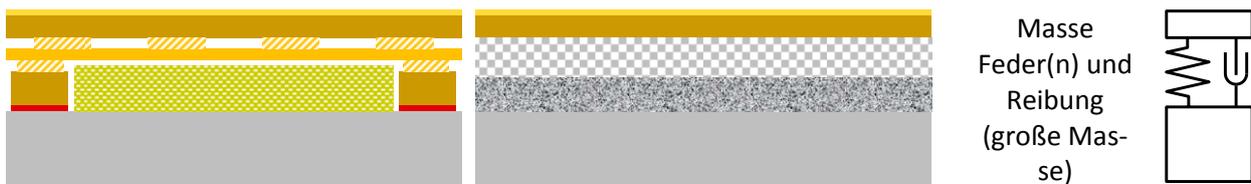
Zumindest anhand der (Körperschall-) Summenpegel und ihres entfernungsabhängigen Verlaufs lässt sich eine nennenswerte Richtungsabhängigkeit der Körperschallausbreitung nicht konstatieren. Je nach Messpunkt variieren zwar die Pegelwerte geringfügig, aber eine klare Tendenz ist nicht erkennbar.

## 7 Maßnahmen zur Beeinflussung der akustischen Eigenschaften

Grundsätzlich lässt sich eine ganze Reihe von (vibro-) akustisch beeinflussenden Parametern einbeziehen, sowohl in stofflicher als auch in konstruktiver Hinsicht. Dabei werden die spezifischen Eigenschaften der Bälle bzw. Anregungsquellen als praktisch nicht veränderbar angesehen. Die einfachste Näherung für die Sportböden als schwingungs- und abstrahlungsfähige Systeme veranschaulicht Bild 7.1 in Form eines Masseschwingers, bestehend aus

- Masse des Oberbelags und der lastverteilenden Platte(n),
- federnden bzw. elastischen Schichten bzw. Elementen,
- verlustbehafteter Reibung als inhärente Eigenschaft der elastischen Elemente und des Gesamtsystems.

Zahlenwerte zu den Eigenschaften dieses einfachen Systems sind in Kap. 6.1 genannt. Das Schwingungsverhalten der Konstruktion wirkt sich sowohl auf deren Schallabstrahlung als auch auf die Schallübertragung aus, wenn auch in jeweils spezifischer Weise.



**Bild 7.1** Konstruktiver Aufbau der Sportböden 1 und 2 nach Tab. 5.1 und schematische Darstellung eines einfachen, gedämpften Masseschwingers

Um die Schallabstrahlung zu reduzieren, müssen die Schwingungen an der Bodenoberfläche reduziert werden, wofür zwei prinzipielle Möglichkeiten bestehen. Erstens ist der Boden sehr steif bzw. starr und weist

eine hohe Trägheit auf, so dass z.B. der auftreffende Ball es (fast) nicht schafft, den Boden zu Schwingungen anzuregen. In diesem Fall wird sich natürlich der (elastische) Ball stark verformen, seine Oberfläche schwingen und ihrerseits Schall abstrahlen. Zweitens kann der Boden so weich bzw. nachgiebig gestaltet sein, dass der Ball zwar den Boden verformt, der Boden aber nicht abstrahlen kann. Der Fall eines Basketballs auf ein Kopfkissen lässt sich als Illustration für diesen Gedankengang heranziehen, bei dem weder Ball noch Boden hörbar Schall abstrahlen. In jedem Fall ist eine hohe innere Dämpfung des Bodens sehr hilfreich, da sie zur Umwandlung von Schwingungs- in Wärmeenergie führt.

In der (theoretischen) Akustik wird für derartige Konstellationen gefordert, einen möglichst großen Impedanz-Unterschied herbeizuführen, wobei die Impedanz als Ausdruck für den Widerstand eines Systems gegenüber mechanischer oder akustischer Wechselbeanspruchung verstanden wird. Natürlich werden die beiden Extremfälle (unendlich steif und träge bzw. unendlich weich und verformbar) praktisch nie erreicht, so dass Maßnahmen im weiten Bereich zwischen den Extremfällen betrachtet werden müssen. Beispielhafte Ansatzpunkte zur Beeinflussung, die immer die Amplitude und die Frequenzabhängigkeit gleichermaßen betrachten sollten, sind in Tab. 7.1 zusammengefasst.

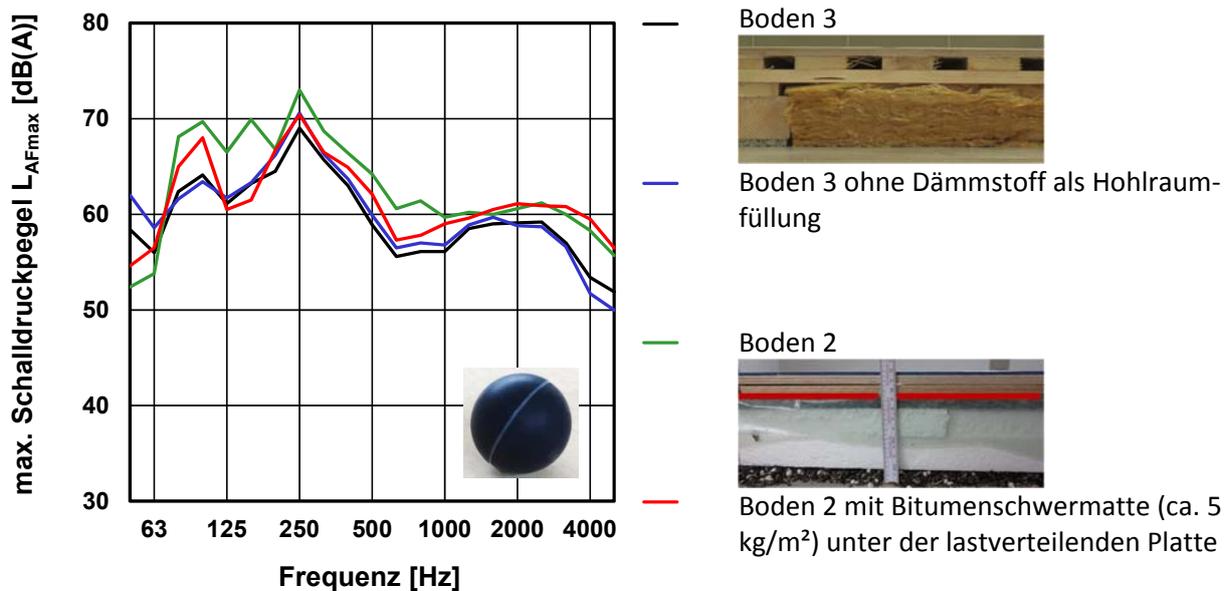
Die vibro-akustische Beeinflussung dieses Systems ist jedoch eingeschränkt, da nicht bei jeder möglichen Maßnahme die sport- und sicherheitsfunktionalen Konsequenzen quantifiziert werden können, ob rechnerisch oder experimentell. Zugleich sind manche Modifikationen mit durchaus beachtlichem Zusatzaufwand in konstruktiver und stofflicher Hinsicht verbunden.

**Tabelle 7.1** Mögliche Maßnahmen zur Schwingungsbeeinflussung, deren Wirkung und beispielhafte Umsetzung

<b>Maßnahme</b>	<b>Wirkung</b>	<b>mögliche Umsetzung (Beispiele)</b>
Veränderung der Masse	Erhöhung der Masse führt zu geringerer Schwingamplitude und zu niedrigerer Resonanzfrequenz (und umgekehrt).	dickere lastverteilende Platte(n), Platten mit höherer Dichte, zusätzliche Beschwerung der Platten
Veränderung der Feder(n)	Erhöhung der Steifigkeit führt zu geringerer Schwingamplitude und zu höherer Resonanzfrequenz (und umgekehrt).	steifere Dämmschichten u. dgl. steifere Lagerung, dickere, biege- steifere Platte(n), biegesteife Zusatzplatten
Veränderung der Reibung	Erhöhung der (inneren) Reibung führt frequenzunabhängig zu geringerer Schwingamplitude (und umgekehrt).	Dämpfungsschichten an Platten Dämmstoffe mit hoher Dämpfung Dämpfung von Hohlräumen gedämpfte Lagerung

Vor diesem Hintergrund wurden mit Blick auf die Schallabstrahlung Maßnahmen untersucht, zu denen Bild 7.2 Beschreibungen und Messergebnisse für 2 Beispiele bei Anregung mit dem Gummiball enthält. Bei den Böden 1 und 3 mit elastischer Konstruktion stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Dämmstoffelemente im Hohlraum. Die zu Schwingungen angeregte Platte strahlt auch in diesen Hohlraum Schall ab, der mit einer Dämmstofffüllung weniger stark reflektiert wird. Dieser denkbare Einfluss ist jedoch gering, wie der Vergleich der Kurven in Bild 7.2 mit und ohne Dämmstoff zeigt.

Eine für nahezu alle Böden denkbare Beeinflussung wurde exemplarisch am Boden 2 untersucht. Es handelt sich um die Anbringung von so genannten Schwermatten mit geringer Dicke aber hoher Dichte, die zugleich eine vergleichsweise hohe innere Dämpfung besitzen. Bei den Böden auf elastischer Schicht können diese Matten einfach zwischen dem Verbundschaum und der lastverteilenden Platte verlegt werden. Der Vergleich der Kurven in Bild 7.2 mit und ohne Schwermatten verdeutlicht die spürbare Reduzierung der Schallabstrahlung zumindest bei tiefen und mittleren Frequenzen.



**Bild 7.2** Messergebnisse der Schallabstrahlung im Hallraum mit den Sportböden 2 und 3 nach Tab. 5.1 bei Anregung mit dem „Japanischen Gummiball“, Vergleich von Maßnahmen zur Beeinflussung der Schallabstrahlung

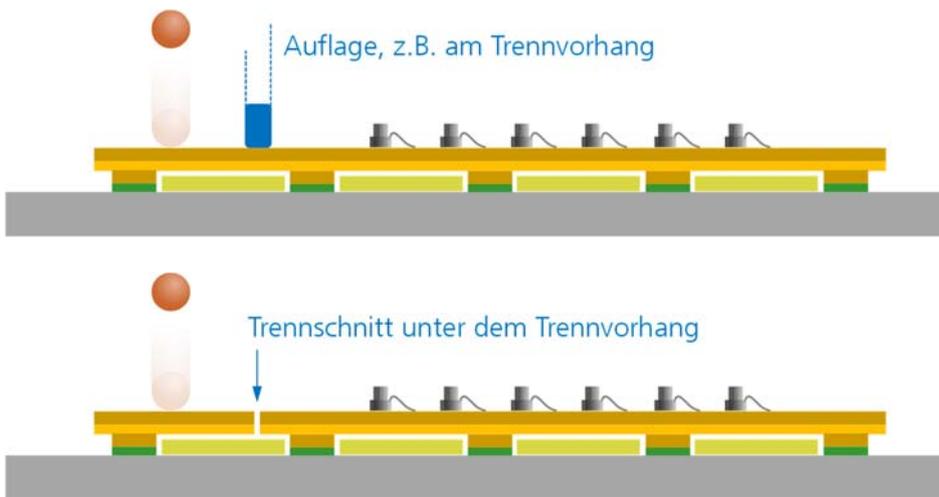
Die Erwartungen an die konstruktiven Einflüsse, ob bereits durch die Bodentypen gegeben oder darüber hinaus herbeigeführt, auf die Schallabstrahlung (Summenschallpegel) des Bodensystems lassen sich anhand der durchgeführten messtechnischen Untersuchungen zusammenfassen:

1. Die Position der Anregung geht nicht über 1 bis 1,5 dB als beeinflussbarer Wertebereich hinaus.
2. Der Bodenaufbau in der bisher praktizierten Form steht für Unterschiede von 3 bis 4 dB bei der Schallabstrahlung, davon trägt der Oberbelag eine Varianz von ca. 0,5 bis 1 dB bei. Es sei hier nochmals betont, dass allein die Summenpegel für eine Gesamtbewertung nicht ausreichen, wie die signifikant und damit spürbare geringere Schallabstrahlung von Boden 5 bei tiefen Frequenzen zeigte
3. Eine schalldämpfende Hohraumfüllung (Böden 1 und 3), z.B. aus Mineralwolle, bewirkt ca. 1 dB Pegelreduktion im Vergleich zum leeren Hohlraum.
4. Mit der Bedämpfung samt Masseerhöhung der lastverteilenden Platte lassen sich mindestens ca. 2 dB Schallpegelminderung erreichen.

Bei der Einordnung dieser Zusammenhänge ist zu berücksichtigen, dass der Einfluss der Anregung, also Basketball oder „Japanischer Gummiball“, auf die Schallabstrahlung zwischen 2 bis 4 dB liegt.

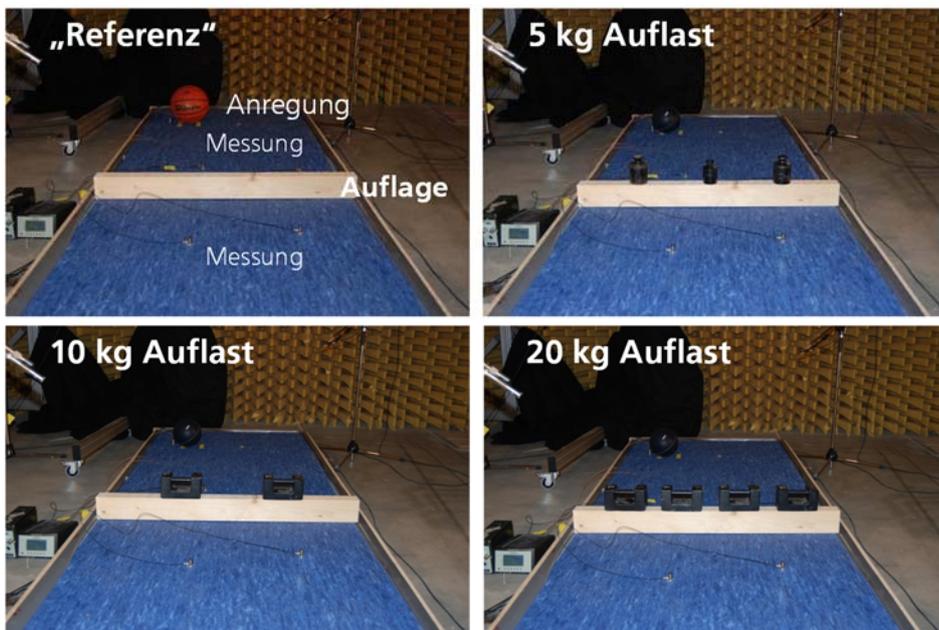
Für den zweiten Aspekt, d.h. die Untersuchung von beeinflussenden Maßnahmen auf die Körperschallübertragung, sind grundsätzlich auch die Maßnahmen zur Reduzierung der Schallabstrahlung relevant. Anregung, Ausbreitung und Abstrahlung von Schall sind letztlich ein zusammenhängender Wirkmechanismus, der sich theoretisch an jeder Stelle modifizieren lässt. Beispielhaft sei die mit einer selbstklebenden Oberseite der Schwermatten mögliche innige Verbindung mit der Platte genannt. Diese Verbindung verändert nicht nur die vertikale Schwingbewegung und Schallabstrahlung der Platte. Sie reduziert auch die horizontale Ausbreitung von BiegeWellen auf dem Boden.

Weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Körperschallausbreitung im Boden konzentrieren sich auf den Bereich unter den Trennvorhängen. Bild 7.3 zeigt zwei aus anderen Anwendungsfällen (z.B. Gehäusestrukturen, mobile Trennwände) naheliegende Varianten zur „Störung“ des Ausbreitungspfad für Schwingungen.



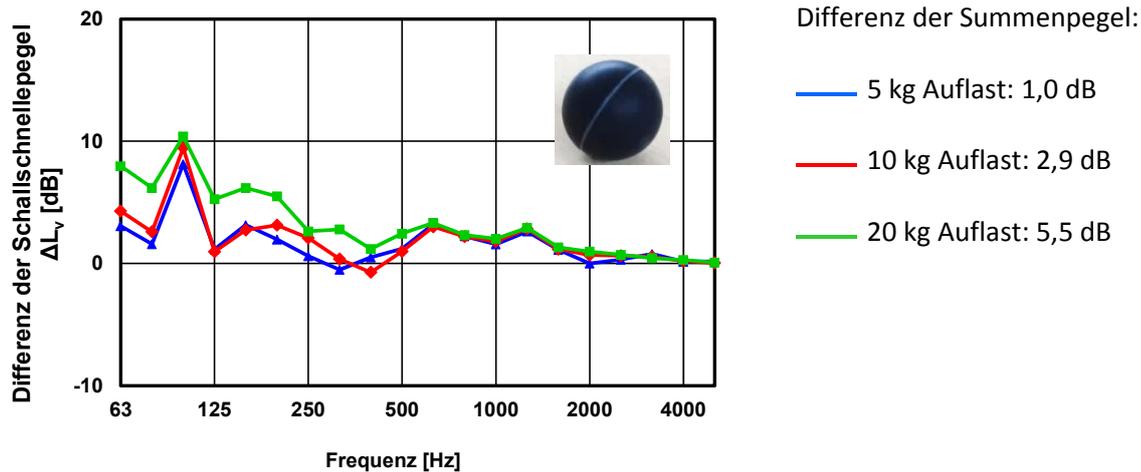
**Bild 7.3** Untersuchte Maßnahmen zur Reduzierung der Körperschallausbreitung im Boden im Bereich unter den Trennvorhängen. Oben: Ankopplung eines Massestreifens als Reflexionsstelle für Körperschall, Unten: Trennschnitt (teilweise, vollständig) in der lastverteilenden Platte bzw. Konstruktion

Die Ankopplung bzw. Auflage eines Massestreifens als Reflexionsstelle für Körperschall entspricht den so genannten „Blocking masses“ (Sperrmassen), wie sie u.a. bei den Spanten eines Schiffsrumpfes bekannt sind. Die abrupte, idealerweise möglichst große Änderung der Masse führt zur Reflexion von BiegeWellen, so dass die sich dennoch weiter ausbreitenden Wellen weniger Energie besitzen. An sich ähnliche Reaktionen bewirken Trennschnitte (teilweise, vollständig) in der lastverteilenden Platte bzw. Konstruktion. Bild 7.4 zeigt die beispielhafte Ausführung der Auflage (Bild 7.3 oben), wobei die Masse der Auflage sukzessive durch Auflasten (Gewichte) erhöht wurde.



**Bild 7.4** Versuchsaufbau mit Auflage eines Massestreifens als Reflexionsstelle für Körperschall auf einem Boden

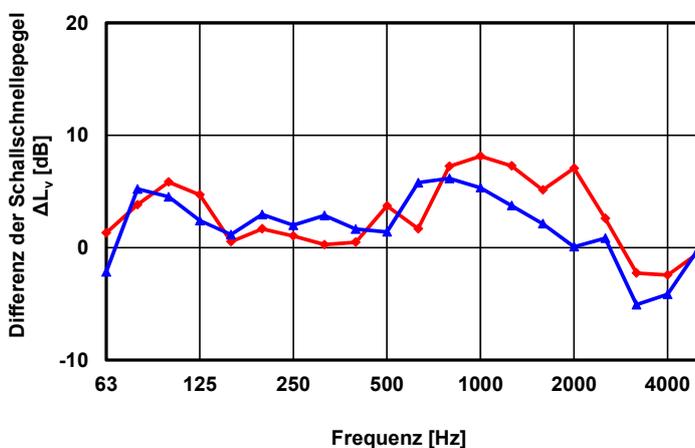
Die zugehörigen Messergebnisse mit Boden 2 und bei Anregung mit dem Gummiball sind in Bild 7.5 wiedergegeben. Der sich hinter der „Störung“ ausbreitende Körperschall mit der Holzauflage ohne Auflast wird als Referenz betrachtet, so dass die Kurven und Werte in Bild 7.4 die Zusatzdämpfung durch die Masseerhöhung (Auflast von 5, 10 und 20 kg) darstellen.



**Bild 7.5** Differenz der Schnellpegel hinter einer Auflage mit zunehmender Auflast an Boden 2 bei Anregung mit dem Gummiball

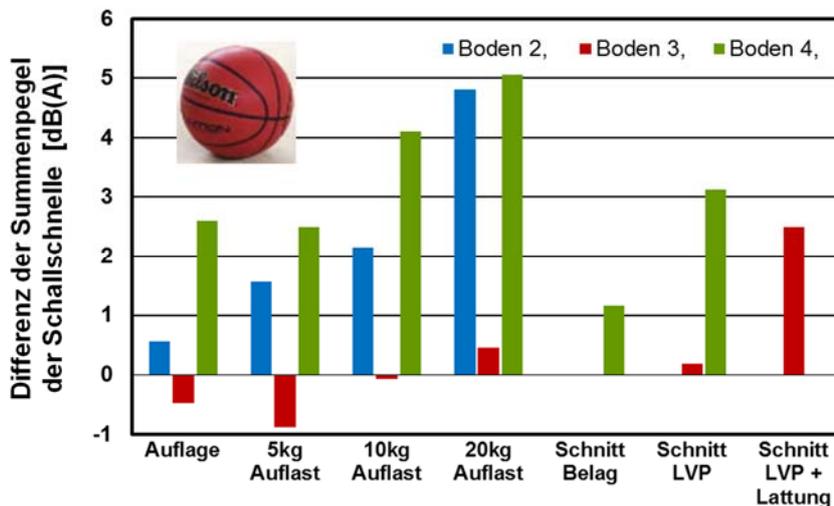
Sowohl am Frequenzverlauf als auch an der Differenz der Summenpegel ist die Wirkung der Auflage mit zunehmender Auflast gut erkennbar, wobei sich die massebedingte Zunahme der Ausbreitungsminderung auf die tiefen Frequenzen konzentriert. Örtlich und spektral gemittelt werden Verbesserungen von ca. 1 bis 2 pro Masseverdopplung erreicht. Ähnliche Ergebnisse stellen sich bei Messung mit dem Basketball ein. Eine theoretische Erklärung für diese Ausprägung ist schwierig, da die Körperschallübertragung im Gesamtsystem stattfindet, also nicht nur in der lastverteilenden Platte. Zudem ist mit einem beachtlichen Einfluss der Ankopplung der Zusatzmasse zu rechnen. Die lose Auflage hat sicher eine andere Wirkung als eine kraftschlüssige Anbringung, die jedoch praktisch mit einem beschwerten Trennvorhang nicht realisierbar ist. Allerdings kann statt der Auflage oben eine (dauerhafte und kraftschlüssige) Ankopplung auf der Unterseite der Platte erfolgen. Erneut wären dafür die sportfunktionalen Folgen genau zu bewerten.

Bei einem Trennschnitt im Boden unter der Berührungslinie des Trennvorhangs bestehen mehrere Gestaltungsmöglichkeiten, z.B. der Breite und Tiefe des Schnittes. Es ist zu erwarten, dass ein Schnitt nur im Oberbelag geringere Wirkung zeigt als eine komplette Trennung der lastverteilenden Platte(n). Bei Böden mit elastischer Konstruktion ist gegebenenfalls auch die Federbrettlage unter der Platte zu trennen. Bild 7.6 enthält die Ergebnisse mit Boden 3 für diesen Fall bei Anregung mit den beiden Bällen. Die Differenz bezieht sich in diesem Fall auf die Körperschallausbreitung ohne Trennschnitt. Unterschiede zwischen den Bällen sind gering, aber die Verbesserung (Summenpegel) beträgt ca. 2 bis 3 dB.



**Bild 7.6** Differenz der Schnellpegel hinter einer Auflage mit zunehmender Auflast an Boden 3 bei Anregung mit dem Basketball (—) und dem Gummiball (—) bei einem Trennschnitt des Oberbelags, der lastverteilenden Platte und der oberen Federbrettlage

Einen Vergleich der Wirkung verschiedener Maßnahmen zur Beeinflussung der Körperschallausbreitung je nach Boden und bei Anregung mit dem Basketball zeigt Bild 7.7 anhand der bestimmten Summenpegel der Schallschnelle. Aus zeitlichen und organisatorischen Gründen konnten nicht alle Modifikationen an allen Bodentypen vorgenommen und untersucht werden. Die Ergebnisse liefern aber dennoch wesentliche Erkenntnisse.



**Bild 7.7** Differenz der Summenpegel der Schnellepegel bei verschiedenen Maßnahmen zur Beeinflussung der Körperschallausbreitung, gemessen an verschiedenen Böden bei Anregung mit dem Basketball

Zur Interpretation sei zunächst auch die „negative Minderung“ einiger weniger Werte (z.B. Boden 3 bei 5 kg Auflast) eingegangen, die als eine „Verstärkung“ gewertet werden müssten. Allerdings sind diese Unterschreitungen der Nulllinie sehr gering und können als Messunsicherheit vernachlässigt werden.

Eine wesentliche Erkenntnis aus den Ergebnissen in Bild 7.7 gilt für die Unterscheidung der Böden. Offenbar bewirkt eine Auflage bzw. selbst eine zunehmende Auflast keine deutliche Minderung der Körperschallausbreitung bei Boden 3 (mit elastischer Konstruktion). Der Schluss liegt nahe, dass sich die im Frequenzbereich dominierenden Körperschallanteile über die gesamte Unterkonstruktion ausbreiten. Dies wird durch die Ergebnisse mit unterschiedlichen Trennschnitten untermauert. Wird bei Boden 3 „nur“ die lastverteilende Platte samt Oberbelag getrennt, bleibt der Effekt minimal, während bei zusätzlicher Trennung der Federbrettlage direkt unter Platte eine signifikante Wirkung eintritt.

Die Böden 2 und 4 (auf elastischer Schicht) hingegen reagieren sowohl auf eine Auflage als auch auf einen Trennschnitt. Die Wirkung steigt mit zunehmenden Auflast und mit der Einbeziehung zusätzlicher Schichten bei einem Trennschnitt. Der nur durch den Oberbelag definierte Unterschied zwischen Boden 2 und 4 besteht, ist aber sehr gering. Eine Interpretation dieses Unterschiedes fällt nach bisheriger Datenlage schwer. Es ist zwar vorstellbar, dass sich z.B. die Ankopplungsbedingungen der Auflage bzw. Auflast von Linoleum zu Verbundschaum als Oberbelag verändern. Allerdings müssen zur Quantifizierung deutlich detailliertere Untersuchungen der Materialien und ihres Wechselspiels durchgeführt werden. Schließlich ist auch die Relation zwischen der hier gemessenen und (theoretisch) maximal möglichen Minderung der Körperschallausbreitung nicht ohne weiteres zu beziffern. Zweifellos breitet sich auch bei den Böden 2 und 4 Körperschall über die elastische Schicht aus, so dass für höhere Minderungswerte auch sie getrennt werden müsste. Ebenso wird die Betondecke oder dergleichen unter dem Sportboden Körperschall übertragen. Bevor jedoch diese zweifellos aufwendigen Modifikationen in Erwägung gezogen werden, sollten zunächst der grundlegende Einfluss und die Akzeptanz aus sportfunktionaler Sicht bewertet werden können.

Trotz der unbedingt zu berücksichtigenden sport- und sicherheitsfunktionalen Vorbehalte der beeinflussenden Maßnahmen folgt zum Abschluss dieses Kapitels eine Art Übersicht zu möglichen Modifikationen

und Kombinationen mit vibro-akustischer Wirkung. Sie schließen zumindest teilweise an die Gedanken in Tab. 7.1 an und werden durch Stichworte zu beachtenswerten Ausgestaltungsdetails ergänzt.

1. Eine linienförmige Auflage/Auflast wirkt sich bei ansonsten unveränderten Böden auf elastischer Schicht aus. Mit zunehmender Masse steigt die Minderungswirkung, wobei eine in sich starre Auflast als vorteilhaft gegenüber einer verformbaren Ausführung anzusehen ist. Bei Gleichverteilung einer einzelnen schweren „Linienmasse“ auf mehrere leichte Auflagen mit einem Abstand untereinander ist kein Vorteil zu erwarten. Die Auflage/Auflast kann am bzw. im unteren Teil eines Trennvorhanges integriert werden. Die Materialauswahl ist an sich groß, allerdings hat die Masseerhöhung natürlich Folgen für den Umgang mit dem Trennvorhang. Dies ist nicht der Fall, wenn die (Linie-) Masse von unten an die lastverteilende Platte angekoppelt wird. Bei unverändert anzunehmender Wirkung bieten sich mehr Spielräume bei der Materialwahl, der maximalen Masse und auch bei der Art der Ankopplung (geklebt, geschraubt usw.).
2. Bei Böden mit elastischer Konstruktion und elastischer Schicht bewirkt ein Trennschnitt im Boden unter dem Trennvorhang eine Minderung der Körperschallausbreitung. Die Wirkung steigt, je mehr Teilschichten getrennt werden. Ein getrennter Oberbelag bleibt nahezu wirkungslos, die Trennung der lastverteilenden Platte(n) zeigt bei Böden auf elastischer Schicht Wirkung. Bei Böden mit elastischer Konstruktion sollten auch die Federbrettlagen in den Trennschnitt einbezogen werden. In all diesen Fällen lässt sich die durch den Trennschnitt verringerte Scherbeanspruchbarkeit durch besondere konstruktive Elemente (z.B. eine Art Armierung) kompensieren. Auch zur bündigen Füllung der oberseitigen Fuge des Trennschnittes sind dauerhafte Lösungen vorstellbar.
3. Unter Beachtung der jeweiligen Gestaltungshinweise bietet eine Kombination von Auflage und Trennschnitt weitere Optionen zur Reduzierung der Körperschallausbreitung.
4. Die bereits zur Minderung der Schallabstrahlung untersuchte Anbringung von Schwermatten an der Unterseite der lastverteilenden Platte(n) bietet sich ebenfalls als Maßnahme zur Beeinflussung der Körperschallausbreitung an. Die Schwermatten reduzieren durch ihre Masse, ihre im Vergleich zu Holzwerkstoffplatten hohe innere Dämpfung sowie durch die innige Verbindung mit der Platte die Auslenkungen der Platte infolge Biegewellen. Dies gilt nicht nur im Bereich der Anregung sondern auch darüber hinaus. Die möglichst vollflächige Verlegung ist bei Böden mit elastischer Schicht recht einfach machbar. Bei Böden mit elastischer Konstruktion ist eine dauerhafte Anbringung von unten an der lastverteilenden Platte sicherzustellen.
5. Eine in vielen Anwendungsbereichen vorteilhafte Ausführung von plattenförmigen Bauteilen sei hier noch erwähnt. Es geht um geschichtete oder Sandwich-Elemente, bei denen 2 biegesteife Platten durch eine elastische Zwischenschicht innig verbunden sind. Dieser so genannte „Constraint layer“ wird bei Verbundsicherheitsgläsern, bei entdröhnten Blechtafeln u.a. Bauteilen verwendet. Ihre Vorteile bestehen in hoher Schalldämmung und geringerer Geräuschentwicklung bei mechanischer Anregung. Auf Sportböden bezogen wären daher z.B. akustische Verbesserungen zu erwarten, wenn lastverteilende Platten aus 2 Holzwerkstoffplatten mit einer elastischen Zwischenschicht bestünden.
6. Nicht zuletzt sollte beachtet werden, dass die Gesamtkonstruktion einschließlich der einzelnen und kombinierten Materialparameter der Bestandteile ein derzeit nicht näher zu beschreibendes Verbesserungspotential aufweisen. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, ihre Überprüfung bedarf jedoch einer jeweils konkreten, produktspezifischen Betrachtung der akustischen und weiteren Ansprüche und Anforderungen, einschließlich der wirtschaftlichen Bilanz.

## 8 Messungen in Sporthallen und Vergleich mit Laborergebnissen

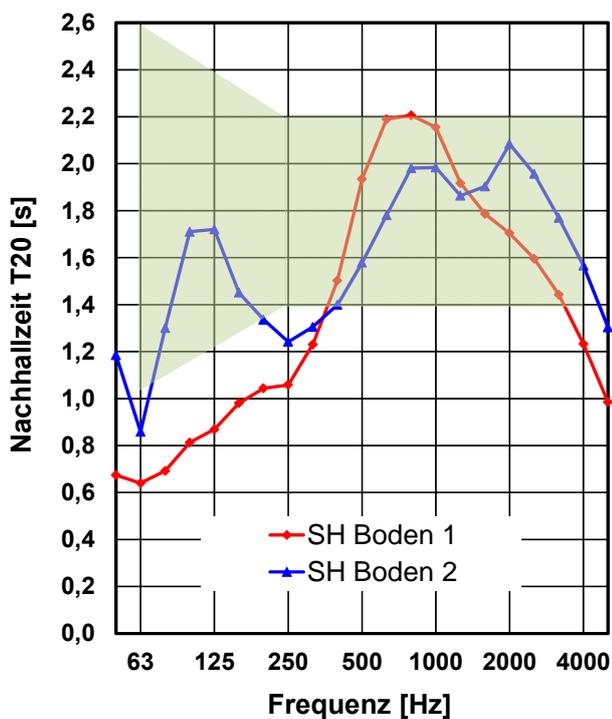
Messungen unter Laborbedingungen eignen sich hervorragend, um die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Bodensysteme zu analysieren und vergleich darzustellen. Diese Untersuchungen bilden die Grundvoraussetzung für mögliche Entwicklungs- und Optimierungsansätze sowie deren messtechnischen Nachweis. Für den Übertragungsschritt in die Praxis ist es jedoch wichtig, Laborergebnisse mit Messungen vor Ort an gleichen Sportbodenkonstruktionen zu validieren. Hierzu wurden beispielhaft Sporthallen aus-

gewählt, in denen genau die gleichen Bodensysteme aufgebaut wurden wie im Labor. Ferner sollten die Böden in den Sporthallen möglichst neu sein, um Einflüsse durch Alterungsprozesse weitgehend auszuschließen. Mit Blick auf das erforderliche Einverständnis der Sporthallenbetreiber und die mitunter schwierige Terminalsituation wurden zwei Sporthallen für die Messungen ausgewählt. Tab. 8.1 enthält die Übersicht zu den betrachteten Hallen bzw. Böden.

**Tabelle 8.1** Daten zu den Sporthallen und Böden

Sporthalle	Bodentyp	Baujahr	Bodenfläche	Raumvolumen	Oberbelag
1 (2-Felder)	2 (System: Last 38-N)	2012	1.023 m <sup>2</sup>	ca. 9212 m <sup>3</sup>	4 mm
2 (2-Felder)	1 (System: Swing 98-M/12)	2011	528 m <sup>2</sup>	ca. 3402 m <sup>3</sup>	Linoleum

In Bild 8.1 sind die gemessenen Nachhallzeiten über der Frequenz in den beiden Sporthallen aufgetragen. Der grün eingefärbte Bereich kennzeichnet die Vorgaben nach DIN 18041 für eine Sporthalle mit einem Raumvolumen, das mit ca. 6.000 m<sup>3</sup> zwischen den beiden untersuchten Sporthallen liegt. Obwohl die Messkurven beide vor allem im Sprachbereich innerhalb der Vorgaben liegen, lässt sich anhand der relativ starken Schwankungen über den Frequenzbereich interpretieren, dass deutliche Verbesserungspotentiale vorhanden sind.

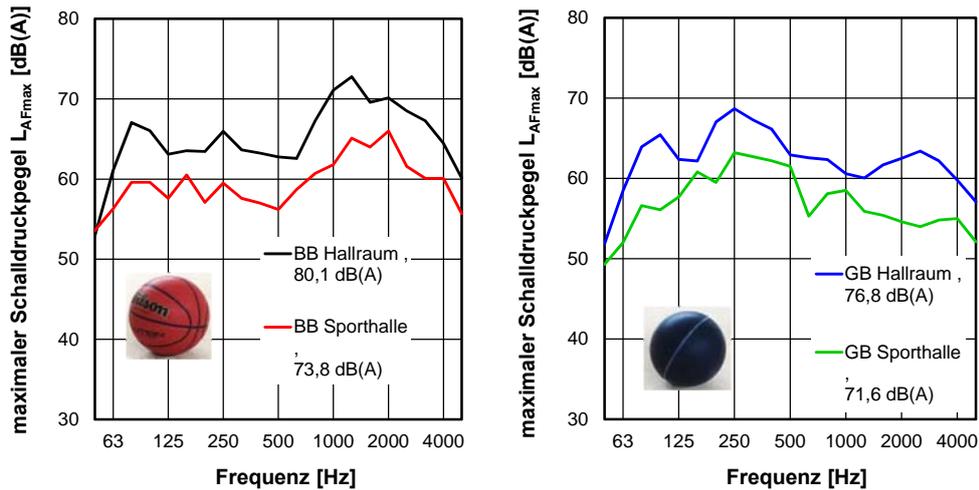


**Bild 8.1** Nachhallzeiten in den beiden Sporthallen (SH-Boden 1 und 2 siehe Tabelle 8.1)

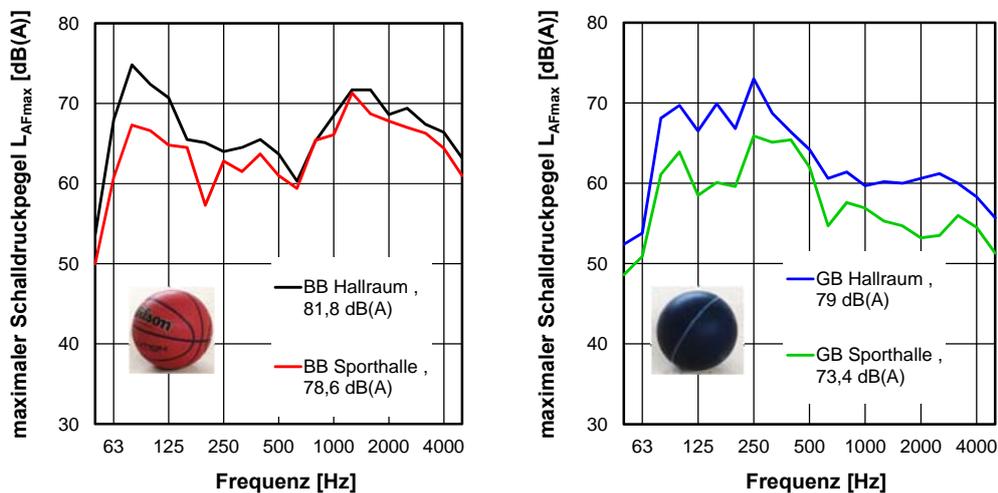
Die folgenden Bilder 8.2 und 8.3 zeigen die Messergebnisse zur Schallabstrahlung in den Sporthallen im Vergleich zum Hallraum. Es ist zu erkennen, dass trotz der unterschiedlichen Messbedingungen die Frequenzverläufe der Kurven bei gleicher Anregung vergleichbar sind. Abgesehen von zu erwartenden Abweichungen im Detail ist eine Art Parallelverschiebung der Kurven bzw. Werte hinsichtlich des Pegelniveaus zu erkennen, wobei im Mittel die im Hallraum gemessenen Werte ca. 5 dB höher sind. Einen Teil der Erklärung liefern die Gl. (6.1) bis (6.2), wonach eine Schallquelle mit gleicher Schallleistung in einem Raum mit längerer Nachhallzeit zu höheren Schalldruckpegeln führt. Die Nachhallzeiten in den Hallen sind kürzer als im Hallraum, so dass höhere Schallpegel im Hallraum zu erwarten sind. Darüber hinaus unterscheiden sich aber auch die abstrahlenden Bodenflächen. Im Hallraum können nur ca. 12 m<sup>2</sup> Sportboden verlegt werden, während in den Sporthallen der gesamte Boden angeregt wird und somit auch Schall abstrahlt. Beide Fak-

toren sind allerdings bekannte Größen und lassen sich mit abschätzbarer Toleranz auf vergleichbare Situationen umrechnen.

Es sind aber noch weitere Unterschiede zu beachten. Der Hallraum ist so gestaltet, dass sich ein breitbandig diffuses Schallfeld einstellt und der Schalldruckpegel nahezu unabhängig von der Messposition bestimmt werden kann. In der teilweise bedämpften Sporthalle ist das nicht der Fall und der gemessene Schalldruckpegel hängt auch von der gewählten Messposition ab. Bei den vorliegenden Messungen wurden mehrere Messpositionen mit jeweils dem gleichen Abstand vom Aufprallort von ca. 2 m gemittelt. Da die gemessenen Schallpegel in der Sporthalle von der Messposition abhängig sind, ist es nicht ohne weiteres möglich diese anhand von Laborwerten zu prognostizieren.



**Bild 8.2** (Luft-) Schallabstrahlung mit Boden 1 im Hallraum im Vergleich zu einer Sporthalle mit dem gleichen Bodenaufbau bei Anregung mit Basketball (links) und Gummiball (rechts)



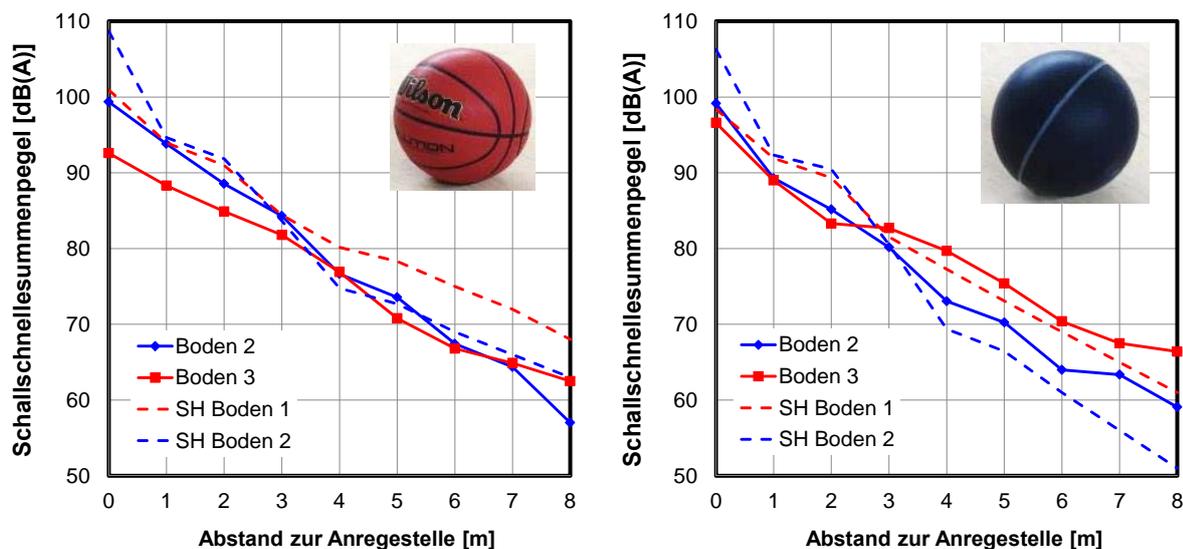
**Bild 8.3** (Luft-) Schallabstrahlung mit Boden 2 im Hallraum im Vergleich zu einer Sporthalle mit dem gleichen Bodenaufbau bei Anregung mit Basketball (links) und Gummiball (rechts)

Auch die Körperschallausbreitung wurde in den Sporthallen ermittelt und mit den Laborergebnissen verglichen (siehe Bild 8.4). Zum Verständnis der dargestellten Daten sei erwähnt, dass leider keine Halle mit dem Boden 3 (wie im Labor untersucht) verfügbar war, sondern „nur“ eine Halle mit Boden 1. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in diesem Fall die Unterschiede zwischen Boden 1 und 3 gering und die Ergebnisse vergleichbar sind. Bei der Interpretation ist ein systematischer Unterschied zwischen Laboraufbau und verlegtem Boden in der Halle von vornherein zu beachten. Beim 10 m langen Bodenstreifen im Labor kann sich die Schwingungsenergie im Wesentlichen nur in einer Richtung längs des Streifens ausbreiten. In der Sport-

halle hingegen wird die Ausbreitung, ausgehend vom Aufprallort, in alle 4 Richtungen erfolgen. Daraus resultiert eine stärkere Abnahme der Schwingungspegel mit der Entfernung in der Sporthalle. Dieser Unterschied lässt sich an den Kurven in Bild 8.4 zumindest für die Anregung mit dem Gummiball erkennen. Während die Summenpegel im Bereich der Anregung nahezu gleich mit den Werten im Labor sind, nimmt deren Pegel mit der Entfernung schneller ab.

Die Messungen zur Abnahme des Schallschnellepegels bei Anregung mit Bällen wurden im Labor nur mit den Böden 2, 3 und 4 durchgeführt. Der Grund hierfür ist, dass diese Messungen zunächst mit einem elektrodynamischen Schwingerreger erfolgten. Diese Art der Anregung hat sich allerdings als ungeeignet herausgestellt. Nach Festlegung der Anregung durch Bälle, war die entsprechende Probe von Boden 1 nicht mehr verfügbar. Da die Böden mit gleicher Unterkonstruktion (1 und 3 sowie 2 und 4) in Bezug auf ihr Schwingverhalten bei Ballanregung relativ gut vergleichbar sind, sollte das nur geringen Einfluss auf die qualitative Aussage der Messergebnisse haben.

Der Vergleich der Böden sowohl mit dem Basketball als auch mit dem Gummiball zeigt, dass Boden 2 in der Sporthalle wie im Labor im direkten Bereich der Krafteinleitung stärker schwingt als Boden 1 bzw. 3. Ebenso klingt die Amplitude der Schallschnelle von Boden 2 im Messraum und in der Halle mit der Entfernung stärker ab als bei Boden 1 bzw. 3. Wie bei der Schallabstrahlung zeigen sich also ähnliche bis gleiche Reaktionen der Böden im Labor und in der Sporthalle auch bei der (Körper-) Schallausbreitung. Mit Blick auf die gemessenen Schalldruckpegel, welche bei den Böden 2 und 4 grundsätzlich etwas höher waren als die der Böden 1 und 3, lässt sich schließen, dass die Boden-Schwingungen im Bereich der Anregungsstelle entscheidend für den abgestrahlten Luftschallpegel sind.



**Bild 8.4** Körperschallausbreitung auf den Böden 2 und 3 im Halb-Freifeldraum im Vergleich zu den Sporthallen mit den Böden 1 und 2 bei Anregung mit dem Basketball (links) und mit dem Gummiball (rechts)

Aus dem Vergleich lassen sich demnach folgende Schlüsse ziehen:

1. Das gewählte Messverfahren im Hallraum zur Ermittlung der Schallabstrahlung von Sportböden bei Ballanregung ist geeignet, um die akustischen Eigenschaften von Sportböden auch auf die Situation in Sporthallen zu übertragen. Die Messergebnisse sind vom Labor in die Praxis übertragbar und umgekehrt.
2. Daraus lässt sich auch schließen, dass die Entwicklung (vibro-) akustischer Optimierungsmaßnahmen an Sportböden im Labor erfolgen und deren akustische Wirkung für den praktischen Fall vorhergesagt werden kann. Dies gilt sowohl für den Schalldruck-Summenpegel, als auch für das dazugehörige Pegelspektrum.

3. Die Quantifizierung verbleibender systematischer und stochastischer Abweichungen zwischen Labor und Sporthalle wäre sicher lohnenswert, um Sicherheit und Genauigkeit der Übertragung zu verbessern. Ohne diese Präzisierung ist bei unbekannter Raumakustik einer Sporthalle davon auszugehen, dass die Geräusche durch Aufprall eines Balles abhängig von Raumvolumen und Nachhallzeit der Halle in ca. 2 m Abstand vom Aufprall ca. 5 ( $\pm 2$ ) dB leiser ist als im Hallraum. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Nachhallzeiten in Sporthallen kürzer sind als im Hallraum.
4. Mit Hilfe von Körperschallmessungen kann eine qualitative Aussage in Bezug auf die Schallabstrahlung der Böden insbesondere beim Vergleich zweier Böden getroffen werden. Eine geringere Schallschnelle im unmittelbaren Bereich einer Anregeposition wirkt sich direkt auf den abgestrahlten Luftschallpegel aus, während sich die Ausbreitung der Schwingungen entlang des Bodens in Mehrfeldhallen vielmehr auf die Schalldämmung zwischen zwei getrennten Hallenteilen auswirken.

## 9 Zusammenfassung und Wissenstransfer

Mit dem Forschungsvorhaben wurden erstmalig und in umfassender Form die akustische Charakterisierung und Gestaltung von Sporthallenböden behandelt. Im Zuge der zunächst durchgeführten Voruntersuchungen und Modellbetrachtungen erwies sich für die experimentelle Bestimmung der Schallabstrahlung von Sportböden die Messung der Schalldruckpegel im Hallraum bei Anregung mit normativ definierten Bällen als geeignete Prozedur. In der Folge lassen sich daraus Schalleistungspegel berechnen, um die rechnerische Verknüpfung mit beliebigen Raumeigenschaften herzustellen. Diese Vorgehensweise bietet auch den Vorteil der Messung des Schallabsorptionsgrades mit der gleichen Konfiguration. Die Messung der Körperschallübertragung entlang des Bodens lässt sich weitgehend raumunabhängig durchführen. Als breitbandige Anregungsquelle haben sich ebenfalls normativ definierte Bälle bewährt. Die vereinfachte numerische Modellierung von Ball und Boden zeigte auch, dass Eigenschwingungen bzw. Schallabstrahlung der Bälle auftreten. Sie überlagern die je nach stofflicher und konstruktiver Gestaltung vom Sportboden erzeugten Schallanteile. Die Entwicklung einer detaillierten Schall- und Schwingungssimulation ist aussichtsreich, auch für die Anwendung bei der akustischen und zugleich sportfunktionalen Optimierung.

Die Messergebnisse umfassen neben Materialeigenschaften der untersuchten 5 Bodensysteme Daten zur Schallabsorption, Schallabstrahlung und Körperschallübertragung. Das Schallabsorptionsvermögen einiger Böden erreicht bei tiefen Frequenzen Werte bis zu 0,2. Mit Blick auf den beachtlichen Flächenanteil der Böden ist selbst dieser geringe Schallabsorptionsgrad willkommen, zumal er gerade bei tiefen Frequenzen mit anderen Schallabsorbern durchaus schwer zu bekommen ist.

Das abgestrahlte Gesamtgeräusch der durch ein Einzelereignis mit Ball angeregten Böden ist breitbandig und mit maximalen Summenpegeln bis zu 83 dB(A) verbunden. Wie erwartet tragen die Bälle bzw. Anregungsquellen aufgrund ihres eigenen Schwingungsverhaltens mess- und hörbar zur Schallabstrahlung des Gesamtsystems aus Boden und Ball bei. Die Böden auf elastischer Konstruktion erzeugen systematisch geringere Pegel als die Böden auf elastischer Schicht. Dies zeigt sich besonders bei tiefen Frequenzen und anhand der Summenpegel. Unterschiede aufgrund der Oberbeläge sind kaum feststellbar. Der mischelastische Boden unterscheidet sich in mehrfacher Hinsicht von den übrigen Bodensystemen. Bei tiefen Frequenzen strahlt er deutlich weniger Schall ab als die anderen Bodentypen. Bei höheren Frequenzen strahlt er hingegen höhere Pegel ab. Diese Tatsache unterstreicht die Bedeutung einer frequenzabhängigen Bewertung der Schallabstrahlung von Sportböden. Neben den Einzelereignissen mit Bällen wurden auch andere Anregungsarten vergleichend im Labor untersucht. Auch wenn diese Vergleichsmessungen den Charakter von „Schnappschüssen“ haben, ermöglichen sie eine gewisse Einordnung der für aussagekräftige Messungen gewählten Anregungsarten.

Bei Maßnahmen zur Beeinflussung der akustischen Bodeneigenschaften ist zu beachten, dass sich die Bodensysteme in puncto Schallabstrahlung (Summenschallpegel) um 3 bis 4 dB unterscheiden. Davon trägt der Oberbelag eine Varianz von ca. 0,5 bis 1 dB bei. Eine schalldämpfende Hohlraumfüllung bewirkt ca. 1 dB Pegelreduktion und mit der Bedämpfung samt Masseerhöhung der lastverteilenden Platte lassen sich min-

destens ca. 2 dB Schallpegelminderung erreichen. Grundsätzlich sind Maßnahmen zur Reduzierung der Schallabstrahlung auch für die Beeinflussung der Körperschallausbreitung relevant. Anregung, Ausbreitung und Abstrahlung von Schall sind letztlich ein zusammenhängender Wirkmechanismus. Für die Reduzierung der Schallübertragung des Bodens im Bereich von Trennvorhängen wurden u.a. linienförmige Auflagen/Auflasten und Trennschnitte untersucht. Letztere bewirken bei Böden sowohl mit elastischer Konstruktion als auch mit elastischer Schicht eine Minderung der Körperschallausbreitung. Die Wirkung steigt, je mehr Teilschichten getrennt werden. Auflasten im Sinne von Sperrmassen bzw. Reflexionsstellen für Körperschall erzeugen vorzugweise bei Böden auf elastischer Schicht nennenswerte Effekte. Unter Beachtung der jeweiligen Gestaltungshinweise bietet eine Kombination von Auflage und Trennschnitt weitere Optionen zur Reduzierung der Körperschallausbreitung. Auch die bereits zur Minderung der Schallabstrahlung untersuchte Anbringung von Schwermatten an der Unterseite der lastverteilenden Platte(n) bietet sich ebenfalls als Maßnahme zur Beeinflussung der Körperschallausbreitung an. Für weiteres Verbesserungspotential besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, die jedoch einer jeweils konkreten, produktspezifischen Betrachtung aller Ansprüche und Anforderungen bedarf.

Der stichprobenartige Abgleich der Laborergebnisse mit jeweils vergleichbaren Böden in Sporthallen bestätigte die Tauglichkeit der gewählten Messverfahren auch für die Anwendung vor Ort. Die Messergebnisse sind vom Labor in die Praxis übertragbar und umgekehrt. Damit können auch Entwicklungen zu (vibro-)akustischen Optimierungsmaßnahmen an Sportböden im Labor erfolgen und deren akustische Wirkung für den praktischen Fall vorhergesagt werden. Die Quantifizierung verbleibender systematischer und stochastischer Abweichungen zwischen Labor und Sporthalle wäre sicher lohnenswert, um Sicherheit und Genauigkeit der Übertragung zu verbessern.

Es sei hier betont, dass mit den nun vorliegenden Ergebnissen keine akustisch begründete (Vor-) Auswahl oder gar Rangliste bestimmter Bodensysteme vorgenommen werden kann. Diese Auswahl bleibt nach wie vor den sport- und sicherheitsfunktionalen Zielvorgaben vorbehalten, d.h. die Priorität muss auf Nutzung und Nutzer, auf Betrieb und Betreiber zurückgehen. Die Akustik ist eine, wenn auch wesentliche Dimension der Nutzung und mit dem Forschungsvorhaben wurde versucht, akustische Verbesserungen an Sportböden im Kontext der ganzheitlichen Gestaltung anzubieten. Der ganzheitliche Blick sollte dabei auch die kombinierte Betrachtung mit der typischen Geräuschentwicklung und der Raumakustik in Sporthallen einschließen. Dafür bieten die vorgestellten Ergebnisse Anhaltspunkte. Im Rahmen der Messungen wurden aber auch Audioaufnahmen erstellt, mit denen eine so genannte Auralisation (Hörbarmachung, „virtuelle Realität“) der zu erwartenden Gesamtsituation aus Geräuschkulisse und Raumakustik sowie deren Bewertung Kraft eigenen Gehörs ermöglicht wird. Diese Hörproben sind verfügbar und können zur praxisnahen Plausibilisierung der akustischen Belastungen in Sporthallen und der wertvollen Wirkung akustischer Gestaltung herangezogen werden.

## 10 Quellenverzeichnis

- [1] Lauter Sport in leisen Hallen – Akustische Gestaltung von Sport- und Schwimmhallen; Fraunhofer-Institut für Bauphysik; Fraunhofer Verlag, 2. Auflage 3 / 2015
- [2] DIN V 18032-2:2001 Hallen für Turnen, Spiele und Mehrzwecknutzung - Teil 2 Sportböden, Anforderungen, Prüfungen (Vornorm)
- [3] DIN 45630-1:1971 Grundlagen der Schallmessung; Physikalische und subjektive Größen von Schall
- [4] DIN 45661:2016: Schwingungsmesseinrichtungen - Begriffe
- [5] DIN EN ISO 3740:2001 Akustik - Bestimmung des Schalleistungspegels von Geräuschquellen
- [6] DIN EN ISO 3741:2011 Akustik - Bestimmung des Schalleistungspegels von Geräuschquellen – Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1
- [7] DIN EN ISO 3744:2011 Akustik - Bestimmung des Schalleistungspegels von Geräuschquellen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene
- [8] DIN EN ISO 3745:2012 Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume
- [9] DIN EN ISO 10140-5:2010 Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen
- [10] DIN EN ISO 354:2003: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen
- [11] VDI 3727:1984: Schallschutz durch Körperschalldämpfung – Blatt 1 und 2
- [12] Scholl, W., Maysenhölder, W. (1999): Impact sound insulation of timber floors: interaction between source, floor coverings and load bearing floor. Building Acoustics 6, 43 - 61.
- [13] Maysenhölder, W., Scholl, W. (2000/2001): Untersuchung des Trittschallverhaltens von Deckenauflagen auf verschiedenen Decken für unterschiedliche Anregungen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Stuttgart (Berichte B-BA 1/2000 und 3/2001).
- [14] Schürmann, K. (2017): Experimentelle Untersuchung und Modellierung der akustischen Eigenschaften von Sporthallenböden. M.Sc. Thesis, Universität Stuttgart.
- [15] DIN 18032-1:2014: Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung - Teil 1: Grundsätze für die Planung
- [16] DIN EN 12235:2013: Sportböden - Bestimmung der Ballreflexion
- [17] FIBA Official Basketball Rules 2014 - Basketball Equipment
- [18] DIN EN ISO 16283-2:2016: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 2: Trittschalldämmung