

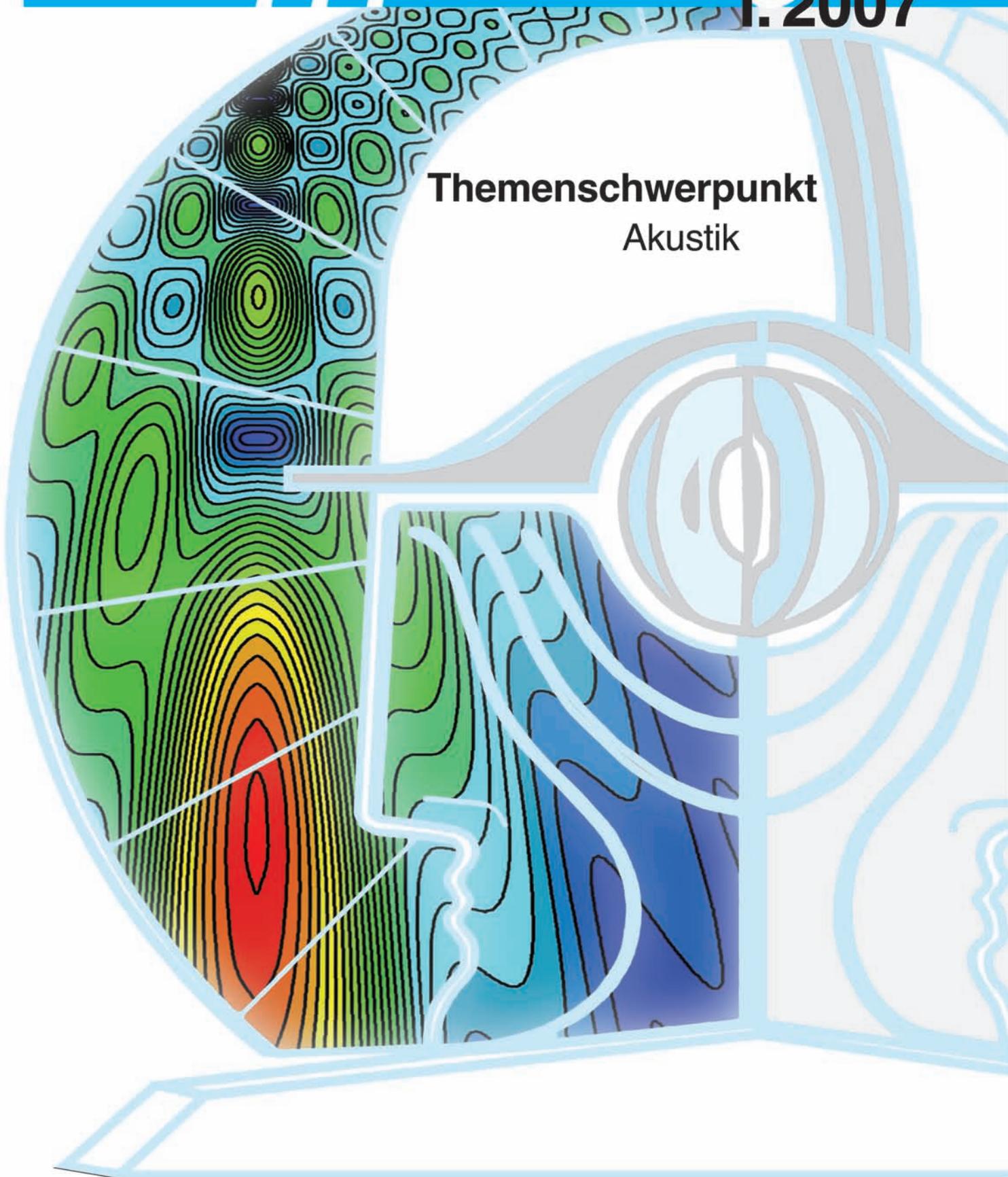
PTB

Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft

Mitteilungen

1. 2007

Themenschwerpunkt
Akustik



Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft
Amts- und Mitteilungsblatt der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

117. Jahrgang, Heft 1, Januar 2007

Inhalt

Informationen	Wichtigster deutscher Technikpreis: Professor Berthold Leibinger erhält den Werner-von-Siemens-Ring	3
---------------	---	---

Themenschwerpunkt	Schall und Akustik in der PTB	
	• <i>Werner Scholl, Christian Koch</i> : Schall und Akustik in der PTB	5
	• <i>Ingolf Bork, Thomas Fedtke, Dirk Ratschko</i> : Kalibrierungen von Messmikrofonen – die Basis der Bestimmung akustischer Größen	7
	• <i>Manfred Brandt und Dirk Ratschko</i> : Schallmessungen im gesetzlich geregelten Bereich	14
	• <i>Thomas Fedtke</i> : Kalibrierung und Prüfung von Ohrsimulatoren und Kupplern für die Audiometrie	19
	• <i>Klaus-Vitold Jenderka, Thomas Fedtke</i> : Hörschwellen für die objektive Audiometrie	23
	• <i>Klaus Beissner, Christian Koch</i> : Schallstrahlungskraft und Interferometrie: Die Primärnormale im Ultraschall	27
	• <i>Volker Wilkens</i> : Megapascal und Milliwatt – Ultraschall-exposimetrie im Dienste der Patientensicherheit	31
	• <i>Christian Koch, Klaus-Vitold Jenderka</i> : Was geschieht im Reinigungsbad? Quantifizierung von Schallfeldern mit Kavitation	35
	• <i>Volker Wittstock, Werner Scholl</i> : Bauakustik in der PTB und ihre Aufgaben im Rahmen der Bauaufsicht	37
	• <i>Volker Wittstock</i> : Unsicherheiten in der Bauakustik	40
	• <i>Christoph Kling, Martin Schmelzer</i> : Bauakustik in der Puppenstube	43
	• <i>Ingolf Bork</i> : Raumakustik und Auralisation	47
	• <i>Martin Schmelzer, Christoph Kling</i> : Elastodynamische Materialparameter	53

Amtliche Bekanntmachungen	(eigenes Inhaltsverzeichnis)	56
---------------------------	------------------------------	----

Zum Titelbild:

Ergebnisse von Simulationsrechnungen zur Struktur eines fokussierten Ultraschallfeldes bei nichtlinearer Schallausbreitung.

In Gedenken an Dr. Rainer Reibold, † Dez. 2005

Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „Amtliche Bekanntmachungen“ unter anderem die aktuellen Geräte-Prüfungen und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,
27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Internet: www.nw-verlag.de
E-Mail: info@nw-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig und Berlin
Postanschrift:
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Gisela Link
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: gisela.link@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens
Telefon: (04 71) 9 45 44-61
Telefax: (04 71) 9 45 44-88
E-Mail: vertrieb@nw-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon: (04 71) 9 45 44-21
Telefax: (04 71) 9 45 44-77
E-Mail: info@nw-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 50,50 Euro, das Einzelheft 15 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2007

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Wichtigster deutscher Technikpreis: Professor Berthold Leibinger erhält den Werner-von-Siemens-Ring



Werner-von-Siemens-Ring

Die Stiftung Werner-von-Siemens-Ring (WvS-R) hat am 13. Dezember 2006 Professor Dr.-Ing. E.h. Berthold Leibinger als neuen Ringträger ausgezeichnet. Der Erfinder und Visionär erhielt in Anwesenheit von Bundespräsident Horst Köhler die Ehrung für sein Engagement und seine Verdienste um die innovative Entwicklung und erfolgreiche unternehmerische Umsetzung der Technologien zur flexiblen Blechbearbeitung und der industriellen Lasertechnik. Ihm gelang es, die Blechbearbeitung mit zahlreichen herausragenden Erfindungen zu revolutionieren. Seine Erfindungen verhalfen der Firma Trumpf zum entscheidenden Erfolg. Er machte das Unternehmen, das er Schritt für Schritt erwarb, zu einem der weltweit führenden Werkzeugmaschinenhersteller sowie zum weltgrößten Laserspezialisten für die Materialbearbeitung.

„Neben dem Mut, neue Wege zu beschreiben, ist die Bereitschaft, viel Zeit zu investieren,

bei der Entwicklung und Umsetzung neuer Ideen eine unbedingte Voraussetzung für innovative Impulse“, sagte der Preisträger am Abend der Verleihung. Mit seinem Lebenswerk hat er nach Meinung der Stiftung nicht nur ein Beispiel geschaffen, wie das Engagement und die Zielstrebigkeit des Einzelnen zu Fortschritt werden kann, sondern auch, dass erst die Zusammenarbeit und Begeisterung der Mitarbeiter die Ideen letztlich vorantreiben und bis zur Umsetzung reifen lassen.

Leibinger erhielt den Werner-von-Siemens-Ring ein Jahr, nachdem der Stiftungsrat den „Pionier der Technik“ ausgewählt hatte. Im Rahmen einer Feierstunde im Leibniz-Saal der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften in Berlin übergab der Vorsitzende des Stiftungsrates, Professor Dr. Ernst O. Göbel, dem Preisträger den Ring in einer individuell gestalteten Kassette. Geladen waren über 200 Gäste aus Industrie, Politik und Forschung, um diese Auszeichnung gemeinsam mit Berthold Leibinger zu feiern.

„In der Sitzung des Stiftungsrates der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring am 13. Dezember 2005 im Hause der PTB, Braunschweig, hat der Stiftungsrat durch geheime Wahl beschlossen, Herrn Prof. Berthold Leibinger den Werner-von-Siemens-Ring – Ehrenring für Verdienste um Naturwissenschaft und Technik – zu verleihen.“

Der Stiftungsrat würdigt mit diesem Beschluss die Verdienste von Berthold Leibinger um die innovative Entwicklung und erfolgreiche unternehmerische Umsetzung der Technologie zur flexiblen Blechbearbeitung und der industriellen Lasertechnik.“



Der Preisträger Professor Dr.-Ing. E.h. Berthold Leibinger (Mitte) eingerahmt von Professor Dr. Ernst O. Göbel (links) und Bundespräsident Horst Köhler (rechts).

Einer der Gratulanten war der baden-württembergische Ministerpräsident Günther Oettinger. Er sagte in seinem Grußwort, es sei ihm eine besondere Freude, dass die Auszeichnung erneut an einen wichtigen Unternehmer und Förde-



Der baden-württembergische Ministerpräsident Günther Oettinger bei seiner Festansprache

rer der technischen Entwicklung aus Baden-Württemberg gehe. Er betonte, dass Leibinger mit seinem Tatendrang und seinem persönlichen Engagement einen Erfolg erreicht habe, der zeige, welche Möglichkeiten Deutschland biete.

Prof. Dr. Heinrich von Pierer, Aufsichtsratsvorsitzender von Siemens, drückte in seiner Laudatio seinen Respekt vor dem Lebenswerk Leibingers und seiner Arbeit als erfolgreicher Unternehmer aus. Neben den unternehmerischen Erfolgen würdigte er in seiner Rede auch das vielfältige soziale Engagement Berthold Leibingers. Pierer hob hervor, wie wichtig gerade in der heutigen Zeit unternehmerische Eigenschaften wie der Respekt vor den Mitarbeitern sind, wie sie bereits der Namenspatron der Stiftung zu seiner Zeit festlegte.

Professor Jörg Schlaich, Ringträger des Jahres 2003, hieß Leibinger im Kreis der Ringträger willkommen und zog in einer sehr persönlichen Ansprache Parallelen zwischen den Lebensläufen Leibingers und seiner selbst. Seine Rede machte deutlich, wie ein wenig Glück und Engagement sich fügen können, um zu herausragenden Leistungen zu führen.

Die Preisverleihung umrahmte die von Leibinger geschätzte und geförderte Bachakademie Stuttgart und die Gächingen Kantorei unter der Leitung von Professor Helmuth Rilling mit dem Weihnachtsoratorium von Johann Sebastian Bach.

Die Stiftung Werner-von-Siemens-Ring verleiht seit Ihrer Gründung anlässlich des 100. Geburtstages des Namensgebers am 13. Dezember 1916 alle drei Jahre den wichtigsten deutschen Technikpreis. Die Ehrung erhalten „lebende Personen ohne Ansehen des Amtes, der Stellung oder des Ranges“, wenn sie durch ihre Leistung die technischen Wissenschaften gefördert oder als Vertreter der Wissenschaft durch ihre Forschung der Technik neue Wege erschlossen haben.

Professor Dr.-Ing. E.h. Berthold Leibinger

Nach dem Maschinenbau-Studium an der Universität Stuttgart mit Diplomarbeit bei Trumpf startete Berthold Leibinger seine Karriere in den USA. Damals dominierte Amerika den Werkzeugmaschinenbau. Er kehrte aber schon nach zwei Jahren zu Trumpf im baden-württembergischen Ditzingen zurück. Als Entwicklungsleiter schuf Leibinger viele grundlegende Patente für die flexible Blechbearbeitung, gelangte durch den wirtschaftlichen Erfolg dieser Erfindungen schnell in den Gesellschafterkreis und schließlich an die Spitze des Unternehmens. Leibingers Erkenntnis, dass der Laser das ideale Werkzeug für die Blechbearbeitung sei, gab der Firma den entscheidenden Aufschwung. Trumpf stieg in die Entwicklung und Produktion von Lasern ein und wurde vom Werkzeugmaschinenhersteller zum heutigen Weltmarktführer für industrielle Laser und Lasersysteme mit rund 7 000 Mitarbeitern. Im vergangenen Jahr übergab der heute 76-jährige Leibinger die Führung der Unternehmensgruppe an seine Tochter und wechselte in den Aufsichtsrat.

Stiftung Werner-von-Siemens-Ring

Der „Werner-von-Siemens-Ring – Ehrenring für Verdienste um Naturwissenschaft und Technik“ gilt als eine der höchsten deutschen Auszeichnungen auf diesem Gebiet und wird an verdiente Naturforscher und Gestalter der Technik verliehen. Bisherige Ringträger sind beispielsweise Carl von Linde, Oskar von Miller, Fritz Leonhard, Konrad Zuse, Ludwig Bölkow, Eveline Gottzein und Wernher von Braun.

Den Ring verleiht der Stiftungsrat, dem neben den noch lebenden Ringträgern die Vorsitzenden oder Vertreter technisch-wissenschaftlicher Verbände sowie der Wirtschaft, die Vorsitzenden der großen Wissenschaftsorganisationen, zwei Professoren der Natur- oder Ingenieurwissenschaften und ein Mitglied der Familie von Siemens angehören. Den Vorsitz nimmt satzungsgemäß der Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wahr. Schirmherr der Stiftung ist der Bundespräsident.

Schall und Akustik in der PTB

Werner Scholl¹, Christian Koch²

Menschen sprechen miteinander ... die Durchsage am Bahnsteig ist kaum zu verstehen ... bei der Arbeit war es heute wieder unerträglich laut ... Karl wäre fast überfahren worden, weil er das Auto nicht gehört hat ... Heinz hat Nierensteine, die entfernt werden müssen ... Karin wurde mit einem neuen Skalpell operiert – es hat kaum geblutet ... Hannelore weiß jetzt, dass sie Zwillinge bekommt ... die Bewohner der beiden Reihenhäuser fühlen sich so gestört, dass sie prozessieren ... die Sanitärfirma kann sich nicht erklären, warum der Bauherr die Abwasseranlage nicht bezahlen will, obwohl sie nach bestem Wissen installiert wurde ...

Was haben diese Situationen gemeinsam? Es geht immer um Schall. Hiervon ist jeder von uns in irgendeiner Form betroffen. Schall kann erfreulich, schön, störend, schädlich, aber auch unhörbar sein (Ultraschall). Schall hat technische Aspekte (wie Tonhöhe, Pegel, Leistung), psychologische Aspekte (angenehm ... unangenehm), aber auch wirtschaftliche. So lassen sich für Deutschland jährliche Lärmfolgekosten in Milliardenhöhe abschätzen (Grünbuch der Europäischen Kommission: Künftige Lärmschutzpolitik).

Schallvorgänge zu verstehen, messbar zu machen und gezielt einzusetzen oder verhindern zu können, sind demnach wichtige Aufgaben. Dazu unterhält die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) zwei Fachbereiche mit zahlreichen Messeinrichtungen und breiter Kompetenz. Die Tätigkeiten umfassen dabei ganz grundlegende Dinge, wie die Darstellung der Einheit des Schalldrucks ($1 \text{ Pa} = \text{Pascal}$) und der Schalleistung ($1 \text{ W} = \text{Watt}$), die die PTB in gesetzlichem Auftrag durchführt. Weiterhin werden schalltechnische Geräte kalibriert oder zertifiziert (Hydrophone, Mikrophone, Ohrsimulatoren, Schallkalibratoren, Trittschall-Hammerwerke, Referenzschallquellen, Messlautsprecher) oder erhalten eine PTB-Bauartzulassung nach dem Eichgesetz (Schallpegelmessgerät und Schallkalibratoren). Die PTB ist übrigens eine

der wenigen Stellen weltweit, die Schallpegelmessgeräte vollständig entsprechend der international geltenden Norm prüfen kann. Die Akustiker der PTB werden auch eingeschaltet, wenn es neue Schallprüfstellen bauaufsichtlich anzuerkennen oder die mehr als 100 bestehenden regelmäßig zu überprüfen gilt – eine gesetzliche Aufgabe, deren technischer Teil der PTB von der Obersten Bauaufsichtsbehörde übertragen wurde.

Aber im Bereich Akustik wird nicht nur bewahrt und kontrolliert, sondern in großem Umfang Forschung an vorderster Front betrieben. Zuerst einmal für die genannten gesetzlichen Aufgaben. Ziel ist es, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Normale für Einheiten und Kalibrierungen zu erhöhen. Dabei reicht das Spektrum von Mikrofonnormalen bis hin zu Normalhörschwellen für die Audiometrie. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Entwicklung neuer oder verbesserter Messplätze für Bauartprüfungen. Aber auch anwendungsorientierte Themen nehmen einen weiten Raum ein. Die Verbesserung der Messmethoden zur Bestimmung der Schallfelder von Ultraschalldiagnosegeräten hilft deren Sicherheit bei der millionenfachen Anwendung zu erhöhen. Der Wandel in der Audiometrie von subjektiven zu objektiven Verfahren z. B. mit Hirnstrommessungen erfordert vollkommen neue Referenzverfahren, um überall äquivalente Resultate zu garantieren. Die Untersuchung der Kavitationswirkungen in Ultraschall-Reinigungsgeräten führt über das bessere Verständnis der komplizierten stochastischen Vorgänge zu effektiveren Geräten. In der Bauakustik wurde eine Modellmesstechnik geschaffen, die akustische Untersuchungen „in Gebäuden“ zu einem Bruchteil der bisherigen Kosten erlaubt. Für die oberste deutsche Bauaufsichtsbehörde wird zur Zeit ein weltweit einmaliger Fundus an Ringversuchen zur Schalldämmung ausgewertet, um der Problematik der Unsicherheit von Messungen und Prognosen in der Bauakustik näher zu kommen.

¹ Prof. Dr. Werner Scholl, Leiter des PTB-Fachbereichs „Angewandte Akustik“
E-Mail: werner.scholl@ptb.de

² Dr. Christian Koch, Leiter des PTB-Fachbereichs „Schall“
E-Mail: christian.koch@ptb.de

Und was wäre bauakustisches Messen ohne die quantitative Beschreibung der Schallfelder und ihre Auralisation durch die Raumakustik! Weitere aktuelle Forschungsthemen betreffen die Installationsgeräusche in Gebäuden – ein alltägliches und damit scheinbar triviales, in Wirklichkeit aber höchst komplexes Problem, an dem sich weltweit die Akustiker die Köpfe zerbrechen. Die heimische Fertighausindustrie hat der PTB hierfür ein ganzes Versuchshaus in Holzbauweise zur Verfügung gestellt. Zu erwähnen sind schließlich die Untersuchungen auf dem Gebiet der elastodynamischen Werkstoffparameter. Die Herausforderung besteht darin, Dämpfung, Schub- und Kompressionsmoduln komplex und frequenzabhängig zu ermitteln.

Die Akustiker der PTB sind national und international in allen wichtigen Gremien vertreten – oder leiten diese selbst –, wo es um die Ent-

wicklung neuer akustischer Messverfahren, um die Festlegung von Grenzwerten und um die Beratung von Industrie und Behörden bei der Umsetzung geht.

Und wohin geht's in Zukunft? Einerseits zu noch höherer Genauigkeit, besserer Messtechnik, verlässlicheren Kalibrierverfahren und noch schnelleren Zulassungsprozeduren. Andererseits wird die Unsicherheit in der Akustik ein großes Thema bleiben. Gerade beim Zukunftsgebiet Körperschall in Gebäuden erfordert die Komplexität der Fragestellung neue Kompromisse zwischen Genauigkeit und Aufwand der Methoden. Nicht zuletzt will die Akustik in Zukunft dort noch wahrnehmungsgerechter messen und bewerten, wo der Mensch vom Schall betroffen ist.

Lesen Sie in diesem Heft, was es mit alledem auf sich hat!

Kalibrierungen von Messmikrofonen – die Basis der Bestimmung akustischer Größen

Ingolf Bork¹, Thomas Fedtke², Dirk Ratschko³

1 Einleitung

Nach dem Gesetz über Einheiten im Messwesen [1] ist es Aufgabe der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, die gesetzlichen Einheiten darzustellen. In der Akustik ist das der Schalldruck in der SI-Einheit Pascal (Pa). Realisiert wird die Darstellung durch die Primär-Kalibrierung von genormten Messmikrofonen, sog. Labor-Normalmikrofonen.

Darüber hinaus ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt nach dem Gesetz über das Mess- und Eichwesen [2] für Prüfungen von Normalgeräten und Prüfungshilfsmitteln der Eichbehörden und anerkannten Prüfstellen zuständig. Kalibrierte Messmikrofone werden aber auch für die Bauartprüfung von Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren nach der Eichordnung [3] benötigt. Die Weitergabe der Schalldruckeinheit als Dienstleistung für die deutsche Industrie wird maßgeblich durch den Deutschen Kalibrierdienst (DKD) durchgeführt. Dessen Kalibrierlaboratorien führen ihre Bezugsnormale durch die PTB auf nationale Normale zurück.

Zur Definition der akustischen Messgrößen sei auf die DEGA-Empfehlung 101 [4] verwiesen.

2 Schallfeldformen

Bei der Kalibrierung von Messmikrofonen für die verschiedenen Anwendungsfälle muss die akustische Situation, in der sich das zu kalibrierende Mikrofon befindet, berücksichtigt werden. Allgemein unterscheidet man zwischen Druck-, Freifeld- und Diffusfeld-Bedingungen.

Das Druck-Feld ist dadurch gekennzeichnet, dass der Schalldruck an jeder Stelle des Schallfeldes denselben Betrag und dieselbe Phase hat. Es bildet sich in – im Vergleich zur Wellenlänge – kleinen umschlossenen Räumen aus, wie z. B. in akustischen Kupplern zur Kopfhörmessung oder Ohrsimulatoren in Kunstköpfen. Auch in Schallkalibratoren herrschen Druckkammerbedingungen.

Die Druck-Übertragungsfunktion ist als das frequenzabhängige Verhältnis von Schalldruck am Ort der Mikrofonmembran und seiner Ausgangsspannung definiert. Bei der Druck-Über-

tragungsfunktion wird die Schallfeldveränderung durch das Mikrofon als Abschluss des Hohlraumes mit in die Kalibrierung einbezogen.

Im freien Schallfeld breitet sich der Schall vollständig ungestört durch Reflexionen aus. Solche Bedingungen finden sich in der Messtechnik in guter Näherung in reflexionsarmen Messräumen.

Die Freifeld-Übertragungsfunktion ist der frequenzabhängige Quotient aus der Ausgangsspannung und dem Schalldruck in einer ebenen fortschreitenden Schallwelle (Freifeldbedingungen) der in Abwesenheit des Mikrofons an der Stelle des Mikrofons vorhanden sein würde. Anders als bei der Druck-Übertragungsfunktion wird die Schallfeldbeeinflussung durch das Mikrofon hier nicht in die Kalibrierung einbezogen. Die Freifeld-Übertragungsfunktion wird zur Messung des Schalldruckes in einer ungestörten Schallwelle in einer bestimmten Ausbreitungsrichtung benötigt, z. B. bei der Überprüfung von Schallpegelmessern.

Die Diffusfeld-Übertragungsfunktion ist als der frequenzabhängige Quotient aus der Mikrofon-Ausgangsspannung und dem Schalldruck in einem diffusen Schallfeld in Abwesenheit des Mikrofons definiert. Dort treffen Schallwellen aus allen Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit und gleichem Pegel, aber unterschiedlichen Phasen ein. Sie wird für Schalldruckmessungen in einem ungestörten diffusen Schallfeld, wie es näherungsweise bei vielen raum- und bauakustischen Messungen vorkommt, benötigt.

3 Leerlauf-Übertragungsfunktion und Ersatzspannungsverfahren

Bei der Kalibrierung der Normalmikrofone zur Darstellung der Schalldruckeinheit wird die Leerlauf-Übertragungsfunktion bestimmt, um die kalibrierte Mikrofonkapsel unabhängig vom verwendeten Mikrofonvorverstärker als Bezugsnormale einsetzen zu können. Da aber die für Präzisions-Messzwecke verwendeten Kondensatormikrofone außerordentlich hochohmige Spannungsquellen sind, ist ihre Ausgangsspannung einer direkten genauen Messung nicht zugänglich. Für die Bestimmung der Leerlauf-Übertragungsfunktion bedient man sich ei-

1 Dr. Ingolf Bork, PTB-Arbeitsgruppe „Geräuschemess-technik“, E-Mail: ingolf.bork@ptb.de

2 Dr. Thomas Fedtke, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Hörschall“ E-Mail: thomas.fedtke@ptb.de

3 Dr. Dirk Ratschko, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Geräuschemess-technik“, E-Mail: dirk.ratschko@ptb.de

nes Kunstgriffes der Elektrotechnik, der sog. Ersatzspannungsmethode. Mit ihr wird die Leerlaufspannung des realen, mit der Eingangsimpedanz des Vorverstärkers belasteten Mikrofons dadurch ermittelt, dass eine bekannte Ersatzspannung sehr niedriger Quellimpedanz anstelle der vom Mikrophon erzeugten Ursprungsspannung eingespeist wird, während der auf das Mikrophon auftreffende Schall abgeschaltet wird. Das Ersatzspannungsverfahren wird in vielen Bereichen der Mikrophonkalibrierung verwendet, die Beschreibung einer praktischen Realisierung ist in Abschnitt 5.1 zu finden.

4 Primärkalibrierung nach dem Reziprozitätsverfahren – Darstellung der Schalldruckeinheit

4.1 Grundlagen

Um das Schallnormal mit höchstmöglicher Genauigkeit zu realisieren, bedient man sich des Reziprozitätsverfahrens zur Kalibrierung von hochstabilen genormten Kondensator-Mikrofonen, den sog. Labor-Normalmikrofonen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen großen Frequenz- und Dynamikbereich, sowie einen relativ geringen Einfluss der Umgebungsbedingungen (statischer Druck, Temperatur und Luftfeuchte) auf ihren Übertragungsfaktor mit einer großen zeitlichen Stabilität desselben verbinden.

Es wird hierbei der Umstand ausgenutzt, dass Kondensatormikrofone umkehrbare reziproke Vierpole sind und damit nicht nur, wie im ‚normalen‘ Betrieb, bei Anliegen eines bestimmten Schalldruckes eine bestimmte Ausgangsspannung generieren, sondern auch beim Einspeisen eines Wechselstromes einen Schallfluss erzeugen.

Zur Reziprozitäts-Kalibrierung werden drei Mikrofone M_1 , M_2 und M_3 mit den Übertragungsfaktoren M_1 , M_2 und M_3 verwendet, von denen jeweils ein Paar auf genau definierte Art und Weise akustisch miteinander verbunden wird:

- M_1 (Sender) – M_2 (Empfänger),
- M_2 (Sender) – M_3 (Empfänger) und
- M_3 (Sender) – M_1 (Empfänger).

Die Mikrofone werden so gepaart, dass jedes der drei Mikrofone einmal als Sender und einmal als Empfänger fungiert. Dabei werden der durch das Sendemikrophon fließende Strom und die Leerlauf-Empfangsspannung des Empfangsmikrofons gemessen. Der Quotient aus Leerlauf-Empfangsspannung und Sendestrom wird als elektrische Transferimpedanz bezeichnet. Sie beschreibt jeweils das Eingangs-Ausgangsverhalten des Systems aus den beiden Mikrofonen und der akustischen Koppelstrecke.

Die Beschreibung der akustischen Kopplung der Wandler erfolgt durch so genannte akustische Transferimpedanzen, welche für die drei relevanten Idealfälle von Schallfeldern (Druckkammer, Freifeld und Diffusfeld) zu ermitteln sind. Bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Kalibrierung müssen die physikalischen Eigenschaften des Koppelmediums, die wiederum von der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und dem statischen Druck abhängen, genau bestimmt und berücksichtigt werden.

4.2 Reziprozitätskalibrierung von Labor-Normalmikrofonen im Freifeld

Die Freifeld-Reziprozitätskalibrierung [5, 6, 7] wird mit drei reziproken Labor-Normalmikrofonen M_1 , M_2 und M_3 durchgeführt. Bei der Freifeld-Reziprozitätskalibrierung werden drei Mikrofonpaarungen gemessen, wobei, wie zuvor beschrieben, jeweils ein Mikrophon als Sendemikrophon und das andere als Empfangsmikrophon verwendet wird.

Die Mikrofonkalibrierungen für $\frac{1}{2}$ -Zoll und 1-Zoll Labor-Normalmikrofone werden in einem speziellen reflexionsarmen Messraum mit einem Innenvolumen von etwa 15 m^3 durchgeführt. Im Innern ist der Messraum mit einer Kupferfolie beschichtet, die der elektromagnetischen Abschirmung dient. Auf die Kupferfolie sind 35 cm lange Absorberkeile aufgeklebt, die dafür sorgen, dass oberhalb von 500 Hz Freifeld-Bedingungen in diesem reflexionsarmen Messraum herrschen. Bild 1 zeigt ein Mikrofonpaar in der reflexionsarmen Umgebung.

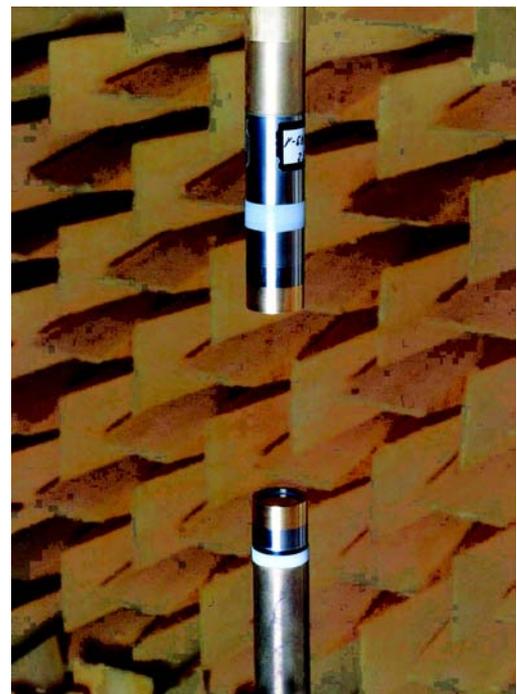


Bild 1:
Sende- und Empfangsmikrofon bei der Freifeld-Reziprozitätskalibrierung

Die Messung für ein Mikrofonpaar wird, je nach Mikrofontyp, für Frequenzen zwischen 500 Hz und 25 kHz durchgeführt. Der Abstand zwischen den Mikrofonen beträgt zwischen 200 mm und 470 mm und wird mit einer frequenzabhängigen Schrittweite von $\lambda/10 - \lambda/5$, wobei λ die Wellenlänge des vom Sendemikrofon abgestrahlten Sinustons ist, durchlaufen. Die Messungen bei verschiedenen Abständen sind deswegen notwendig, um mit Hilfe des $1/r$ -Abstandgesetzes den akustisch wirksamen Mikrofonabstand zwischen den beiden akustischen Zentren beider Mikrofone zu bestimmen.

Je Frequenz wird eine Messreihe mit verschiedenen Mikrofonabständen durchlaufen, und für alle Abstände werden der Sendestrom, die Leerlauf-Empfangsspannung, die Temperatur, die relative Luftfeuchte und der statische Druck gemessen. Die Sendespannung, die am Sendemikrofon anliegt, beträgt 3 V.

Sendestrom und Leerlauf-Empfangsspannung dienen der Bestimmung der elektrischen Transferimpedanz. Die akustische Transferimpedanz wird aus den restlichen Messergebnissen berechnet. Um Störeinflüsse, wie z. B. stehende Wellen zwischen den Mikrofonmembranen, Übersprechen und Reflexionen zu minimieren, wird ein Approximationsverfahren eingesetzt, um aus den Messergebnissen als Funktion des Abstandes die Freifeld-Leerlaufübertragungsfunktion der drei Mikrofone zu bestimmen.

Abschließend werden die ermittelten Werte dieser Funktion bei den Messfrequenzen auf die Bezugs-Umgebungsbedingungen (Temperatur 23,0°C, Statischer Luftdruck 101,3 kPa und relative Feuchte 50 %) umgerechnet und als Freifeld-Leerlauf-Übertragungsmaß in dB (re 1 V/Pa) angegeben. Die Freifeld-Reziprozitäts-Kalibrier-einrichtung wird für hausinterne Mikrofonrückführungen verwendet.

4.3 Primärkalibrierung in der Druckkammer

Die Primärkalibrierung in der Druckkammer [8] liefert das zurzeit präziseste Verfahren zur Darstellung der Schalldruckeinheit. Bei mittleren Frequenzen (100 Hz bis 2000 Hz) werden Messunsicherheiten von wenigen Hundertstel dB erreicht.

Es werden die drei zu messenden Mikrofone M_1 , M_2 und M_3 mittels zylindrischer Kuppler in drei Paarungen (siehe 4.1) verbunden. Um eine möglichst geringe Messunsicherheit zu erzielen, werden mehrere Kuppler verschiedener Abmessungen eingesetzt. Von diesen Mikrofon-Kuppler-Mikrofon-Systemen wird, auch hier über die Messung des Sendestromes und der Leerlauf-Empfangsspannung, die elektrische Transferimpedanz ermittelt. Die während der Messung herrschenden Umgebungsbedingungen (statischer Druck, Temperatur und Feuchte) werden

bestimmt, da sie zum einen für die genaue Berechnung der Eigenschaften der im Kuppler eingeschlossenen Luft benötigt werden und zum anderen dazu, die Druck-Leerlauf-Übertragungsfunktionen auf Bezugsbedingungen umzurechnen.

Die akustische Transferimpedanz wird bestimmt, indem die Eigenschaft ausgenutzt wird, dass sich im Kuppler eine ebene Schallwelle ausbreitet, solange der Kupplerdurchmesser, welcher dem Membrandurchmesser der Mikrofone entspricht, klein gegen die Schallwellenlänge ist. Die akustische Transferimpedanz des Mikrofon-Kuppler-Mikrofon-Systems lässt sich dann als eine homogene Übertragungsleitung darstellen, die von den akustischen Impedanzen der beiden Mikrofone abgeschlossen wird. Deren Parameter sind die Abmessungen des Kupplers und der Mikrofone, die von den Umgebungsbedingungen abhängigen Eigenschaften der umschlossenen Luft und die bereits erwähnten akustischen Impedanzen der Mikrofone. Zur genauen Bestimmung letzterer wird ein Fit-Verfahren angewendet, bei welchem die Unterschiede in den Ergebnissen der Messungen in den verschiedenen Kupplern als Grundlage dienen. Um die im folgenden angegebenen Messunsicherheiten zu gewährleisten, müssen noch zahlreiche Effekte, wie z. B. die Wärmeleitung an den Wänden der Kupplerhohlräume oder die Ausbildung radialer Moden im Kuppler quantifiziert und korrigiert werden. Die ermittelten Werte der Druck-Leerlauf-Übertragungsfunktion bei den Messfrequenzen werden auf die Bezugs-Umgebungsbedingungen (siehe 4.1) umgerechnet und als Druck-Leerlauf-Übertragungsmaß in dB (re 1 V/Pa) angegeben.

Die Messunsicherheiten für die angebotenen Kalibrierungen hängen von Mikrofontyp und Frequenz ab und sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben:

Frequenzbereich Hz		Messunsicherheit LS1P dB ($k = 2$)	Messunsicherheit LS2P dB ($k = 2$)
$\geq 10,0$	bis $< 31,5$	0,10	0,10
$\geq 31,5$	bis $\leq 4\,000$	0,03	0,04
$> 4\,000$	bis $\leq 8\,000$	0,05	0,04
$> 8\,000$	bis $\leq 10\,000$	0,08	0,06
$> 10\,000$	bis $\leq 12\,500$	0,15	0,08
$> 12\,500$	bis $\leq 20\,000$	–	0,12

5 Sekundärkalibrierung – Weitergabe der Schalldruckeinheit

Durch die Sekundärkalibrierung wird die mit dem Primärverfahren dargestellte Einheit weitergegeben, indem Messmikrofone an die mit der Reziprozitätsmethode kalibrierten Bezugs-

normale „angeschlossen“ werden. Prinzipiell kann man zwei verschiedene Verfahren unterscheiden:

Bei der **Komparationsmethode** werden Referenzmikrofon und zu messendes Mikrofon gleichzeitig beschallt. Ziel dabei ist es, beide Mikrofone möglichst vollständig auf gleiche Weise anzuregen, d. h. die Bewegungsmuster ihrer Membranen sollten möglichst identisch sein. Im Gegensatz zur Komparationsmethode erfolgt bei der **Substitutionsmethode** die Messung der Übertragungsfunktionen der beiden Wandler nicht gleichzeitig, sondern das Referenzmikrofon wird nach der Messung der Übertragungsfunktion durch das zu untersuchende Mikrofon ersetzt (substituiert). Dadurch werden bei dieser Methode annähernd gleiche Schallfeldverhältnisse für die beiden Wandler erzielt.

5.1 Sekundärkalibrierung von Messmikrofonen im Freifeld

Bei der Sekundärkalibrierung von Messmikrofonen im Freifeld wird mit Hilfe der Substitutionsmethode die Schalldruckeinheit von einem primärkalibrierten Normalmikrofon auf ein zu kalibrierendes Mikrofon übertragen. Als Bezugsmikrofone werden zwei 1/2-Zoll Mikrofone vom Typ Brüel & Kjær 4180 (LS2P) und zwei 1-Zoll Mikrofone vom Typ Brüel & Kjær 4160 (LS1P) verwendet. Für die Kalibrierungen wird ein Messplatz verwendet, mit dem zunächst mit Hilfe der für das betreffende Normalmikrofon bekannten Freifeld-Leerlauf-Übertragungsmaße ein Schallfeld mit einem Schalldruckpegel von 84 dB (re 20 µPa) eingestellt wird. Das erfolgt mit Sinussignalen der Terzmittenfrequenzen im Frequenzbereich von 25 Hz bis 20 kHz im angenähert freien Schallfeld des großen reflexionsarmen Messraumes der PTB. Das Normalmikrofon ist an einem speziellen Vorverstärker installiert, der es ermöglicht, eine Ersatzspannung hinter der Mikrofonkapsel in den Vorverstärkereingang einzuspeisen. So wird zunächst die Spannung, die das Normalmikrofon für ein Schallsignal mit einer bestimmten Frequenz und für einen Schalldruckpegel von 84 dB am Mikrofonausgang erzeugt und die aus einer Primärkalibrierung bekannt ist, als Ersatzspannung in den Vorverstärker eingespeist. Am Ende des Signalweges der eingespeisten Ersatzspannung wird mit Hilfe eines Multimeters ein Spannungswert bestimmt. In einem zweiten Schritt wird nun mit einem Lautsprecher für die gleiche Frequenz ein Schallfeld so eingeregelt, dass genau der zuvor gemessene

Spannungswert angezeigt wird. Dieser Vorgang wird für alle relevanten Frequenzen wiederholt, und es werden so die Verstärkereinstellungen bestimmt, die notwendig sind, um mit dem Lautsprecher das geforderte Schallfeld zu erzeugen. Im Folgenden wird das Normalmikrofon durch das zu prüfende Mikrofon ersetzt. Jetzt wird mit Hilfe der zuvor bestimmten Werte das Schallfeld erzeugt. Für ein Schallfeld mit einer bestimmten Frequenz und einem Schalldruckpegel von 84 dB (re 20 µPa) wird wieder am Ende des Signalweges ein Spannungswert gemessen. Anschließend wird eine Ersatzspannung erzeugt, so dass genau der vorher gemessene Spannungswert angezeigt wird. Auf diese Weise wird bestimmt, welche Leerlaufspannungen am Ausgang des zu kalibrierenden Mikrofons für die betreffende Terzmittenfrequenz im Frequenzbereich zwischen 25 Hz und 20 kHz für einen Schalldruckpegel von 84 dB anliegen.

Die Signalform wird hinsichtlich des Rauschabstandes und der Verzerrungsfreiheit mit einem FFT-Analysator überwacht. Der für die Freifeld-Kalibrierung genutzte reflexionsarme Raum ist bzgl. der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf die Bezugs-Umgebungsbedingungen (siehe 4.2) stabilisiert. Die maximal zulässige Änderung der Umgebungsbedingungen während einer Kalibrierung beträgt für die Temperatur 1 °C, die relative Feuchte 5 % und den Luftdruck 5 kPa.

Für die Sekundärkalibrierungen im Freifeld gelten für die Terzmittenfrequenzen im Frequenzbereich von 25 Hz bis 20 kHz die folgenden Messunsicherheiten ($k = 2$):

Frequenzbereich Hz			Messunsicherheit LS1P dB ($k = 2$)	Messunsicherheit LS2P dB ($k = 2$)
25 Hz	bis	80 Hz	0,4	0,4
100 Hz	bis	5 kHz	0,2	0,2
6,3 kHz	bis	10 kHz	0,3	0,3
12,5 kHz	bis	20 kHz	0,4	0,4

Zur Bestimmung des Freifeld-Leerlauf-Übertragungsmaßes des Prüflings werden vier Messungen mit einem Normalmikrofon in der beschriebenen Weise durchgeführt, gemittelt und das Ergebnis auf 0,05 dB gerundet.

5.2 Sekundärkalibrierung von Druckmikrofonen

Das Leistungsangebot der PTB zur Sekundärkalibrierung von Druckmikrofonen [9] richtet sich vor allem an die Anwender von Mikrofonen für die audiologische Messtechnik. Die verwendeten Mikrofone in den Ohrsimulatoren und akustischen Kupplern entsprechen den Festlegungen

für Gebrauchsnorm-Druckmikrofone (WS1P und WS2P nach IEC 61094-4).

Hierfür werden folgende Kalibriermöglichkeiten angeboten:

- Kalibrierung von 1-Zoll-Messmikrofonen (WS1P) nach einem Substitutionsverfahren in einem akustischen Kuppler mit geregelter Schallfeld im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8000 Hz. Die Messunsicherheit hängt von Mikrofontyp und Frequenz ab und liegt zwischen 0,1 dB und 0,2 dB ($k = 2$). Der verwendete Kuppler ist in Bild 2 gezeigt.
- Kalibrierung von 1/2-Zoll-Mikrofonen (WS2P) nach einem Komparationsverfahren in einem aktiven akustischen Kuppler (siehe Bild 3) im Frequenzbereich von 125 Hz bis 16 000 Hz. Auch hier hängt die Messunsicherheit von Mikrofontyp, -konfiguration und Frequenz ab und liegt zwischen 0,1 dB und 0,2 dB ($k = 2$).

Für andere Mikrofontypen und spezielle Konfigurationen kann eine Kalibrierung mit elektrostatischen Anrege-Elektroden in Verbindung mit Schallkalibratoren erfolgen, falls Korrekturwerte für die Bestimmung des Druck-Übertragungsmaßes aus der Kombination dieser beiden Messungen vorhanden sind.



Bild 2:

Akustischer Kuppler mit per Sondenmikrofon geregelter Schallfeld für die Substitutionskalibrierung von 1-Zoll-Gebrauchsmikrofonen.



Bild 3:

Aktiver akustischer Kuppler für die Komparationskalibrierung von 1/2-Zoll-Gebrauchsmikrofonen.

6 Zusammenhang zwischen Freifeld- und Druckkalibrierung

Primärkalibrierungen von Labor-Normalmikrofonen im Freifeld sind mit einer reinen Messzeit von bis zu 10 Tagen im Gegensatz zu Primärkalibrierungen in einer Druckkammer sehr zeitaufwändig. Durch die Bestimmung von Korrekturwerten für den Unterschied zwischen Freifeld- und Druck-Mikrofonübertragungsmaß für ein Labor-Normalmikrofon kann der Zeitaufwand für zukünftige Kalibrierungen dieses Mikrofons deutlich reduziert werden. Dazu wird einmalig eine Primärkalibrierung im Freifeld und in einer Druckkammer durchgeführt und es werden die entsprechenden Korrekturwerte für das Labor-Normalmikrofon bestimmt. Zukünftig (alle zwei Jahre) wird dann für dieses Mikrofon nur noch eine Primärkalibrierung in einer Druckkammer durchgeführt und es werden die ermittelten Korrekturwerte für den Unterschied zwischen Freifeld- und Druck-Mikrofonübertragungsmaß verwendet. Messergebnisse dieser Korrekturwerte für ein 1-Zoll Mikrofon vom Typ Brüel & Kjær 4160 (LS1P) sind in Bild 6 dargestellt. Darüber hinaus gibt es Bestrebungen, Korrekturwerte zwischen Freifeld- und Druck-Mikrofonübertragungsmaß für bestimmte Mikrofontypen in einer Norm festzulegen. Ergebnisse der Korrekturwerte aus der Vornorm IEC TS 61094-7:2006-05 für ein 1-Zoll Mikrofon vom Typ Brüel & Kjær 4160 (LS1P) sind ebenfalls in Bild 6 dargestellt.

Die akustischen Vorgänge bei der Reziprozitätskalibrierung zweier Mikrofone im Freifeld und die zuvor genannten Korrekturwerte sind mit Hilfe eines Simulationsprogramms auf der Basis finiter Elemente bestimmt worden. Ausgehend von der Schallabstrahlung des als Sender geschalteten Mikrofons lässt sich die frequenzabhängige Veränderung des Schalldrucks durch das Empfangsmikrofon durch Anwendung der Gesetze der Schallausbreitung berechnen. Hierzu werden die geometrischen Verhältnisse der beiden einander gegenüberstehenden zylindrischen Mikrofonkörper in einem Computermodell realisiert. Die Schallabstrahlung wird dadurch simuliert, dass der schwingungsfähige Teil der kreisförmigen Stirnfläche des Mikrofons mit für alle Frequenzen konstanter Schwingungsgeschwindigkeit (Schnelle) senkrecht zur Membranebene schwingt. Die räumliche Amplitudenverteilung wurde entsprechend den Untersuchungen von Behler und Vorländer [10] als rotationssymmetrisch angenommen. Die radiale Abhängigkeit der Amplitude, die theoretisch einer Bessel-Funktion entspricht, wurde durch eine Cosinus-Funktion angenähert.

Der Rechenaufwand für die dreidimensionale Schallfeldberechnung konnte erheblich reduziert werden, da das Modell zylindersymmetrisch ist, wobei die Symmetrieachse durch die Zentren der beiden Mikrofonzylinder gelegt wird. Die mathematische Beschreibung beschränkt sich daher auf eine Halbebene, die nur von der Symmetrieachse und den Mikrofonkörpern begrenzt wird. Da die FEM-Berechnungen nur in begrenzten Räumen möglich sind, müssen alle anderen Grenzbedingungen so definiert werden, dass alle vom Sendemikrofon ausgehenden Schallwellen am Rand des Berechnungsvolumens mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen werden.

Für die Bestimmung der Freifeldkorrekturwerte wird zunächst an der Stelle, wo sich später das Empfangsmikrofon befindet, für alle Frequenzen der Schalldruck bestimmt. Anschließend wird die gleiche Rechnung mit dem Empfangsmikrofon durchgeführt. Die Differenzen der Schalldruckpegel der beiden Situationen ergeben die gesuchte Frequenzgangkorrektur. Das heißt, wenn das Empfangsmikrofon für alle Frequenzen einen bekannten Übertragungsfaktor zwischen dem Schalldruck vor der Membran und der elektrischen Ausgangsspannung hat (bestimmt unter Druckkammerbedingungen), ist der gemessene Schalldruckpegelanstieg aufgrund der Störwirkung des zylindrischen Mikrofonkörpers für Messungen unter Freifeldbedingungen mit diesen Werten zu korrigieren.

Bild 4 zeigt für die Frequenz 10 kHz die berechnete Schalldruckpegelverteilung in einer Schnittebene durch die beiden Mikrofonkörper. Deutlich ist die Konzentration der höchsten Pegelwerte vor dem Sendemikrofon zu erkennen. Im Gegensatz zu tiefen Frequenzen, die nahezu

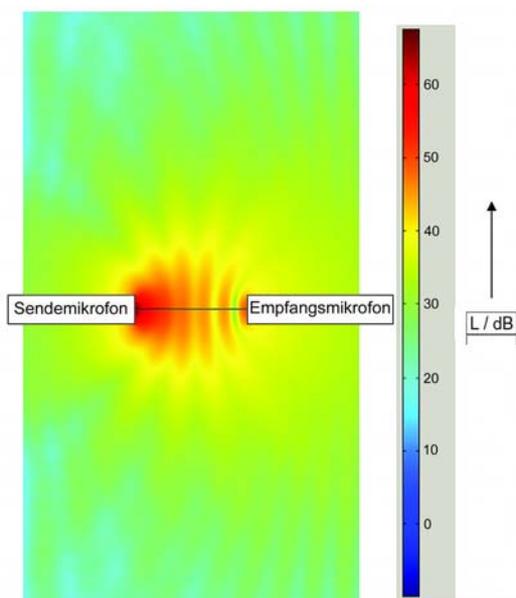


Bild 4:
Berechnete Schalldruckpegelverteilung (FEM-Simulationen) in einer Schnittebene durch die beiden Mikrofonkörper. Die Farben entsprechen den lokalen Schalldruckpegelwerten L in dB.

kugelförmig abgestrahlt werden, stellt sich hier eine starke Richtwirkung senkrecht zur Mikrofonmembran ein. Von besonderem Interesse ist der räumliche Schalldruckverlauf zwischen den beiden Mikrofonen auf der eingezeichneten mittleren Verbindungslinie. Am Beispiel ausgewählter Frequenzen lässt sich in Bild 5 die mit der Frequenz zunehmende Störwirkung des Empfangsmikrofons erkennen. Während bei 100 Hz der Schalldruckabfall umgekehrt proportional zum Abstand r ist, und der Pegel kontinuierlich mit 6 dB pro Abstandsverdoppelung abnimmt, bilden sich bei hohen Frequenzen Interferenzen aus, da sich die abgestrahlte Schalldruckwelle mit einer am Empfangsmikrofon reflektierenden Welle überlagert. Da die reflektierte Welle schnell im Pegel abnimmt, tritt der Effekt am deutlichsten in unmittelbarer Nähe des Empfangsmikrofons auf.

Die Ergebnisse der Berechnungen der Korrekturwerte für den Freifeldfrequenzgang sind in der Bild 6 zusammen mit den Empfehlungen der Vornorm IEC TS 61094-7 [11] und aktuellen Messergebnissen, die aus Primärkalibrierungsdaten der PTB stammen, dargestellt. Die Abweichungen der Rechenwerte von den gemessenen Werten lassen sich auf drei Ursachen zurückführen:

1. Die tatsächliche Form der Mikrofongehäuse weicht von der für die Berechnung angenommenen idealen Zylinderform ab. So zeigen beispielsweise Vergleiche von Messwerten typischer Messmikrofone mit und ohne Schutzgitter erheblich höhere Differenzen bis zu einer Größenordnung von einigen dB.
2. Bei höheren Frequenzen ist durch höhere Schwingungsmoden die Auslenkung der Mikrofonmembran nicht mehr cosinusförmig [10], was zu einer verminderten Schallabstrahlung bei gleicher Schnelle im Membranzentrum führt.
3. Die Nachgiebigkeit der Mikrofonmembran wird bei der FEM-Simulation vernachlässigt. Durch die Annahme einer unendlich harten Oberfläche mit einem Reflexionsgrad von 100% ergibt die Rechnung eine stärkere rücklaufende Welle und damit stärkere Interferenzerscheinungen als in der Realität.

Dennoch lassen sich mit Hilfe der FEM-Schallfeldmodellierung die akustischen Verhältnisse bei der Reziprozitätskalibrierung im Freifeld sehr gut beschreiben. Mit dem Modell lassen sich ferner Zusammenhänge zwischen Freifeldfrequenzgang und der räumlichen Schalldruckverteilung darstellen. Derartige Schallfeldabstastungen sind im realen Schallfeld kaum realisierbar, da durch die erforderlichen Mikrofonsonden und die zugehörigen Verfahrenrichtungen eine Störung des Schallfeldes nicht vermieden werden kann.

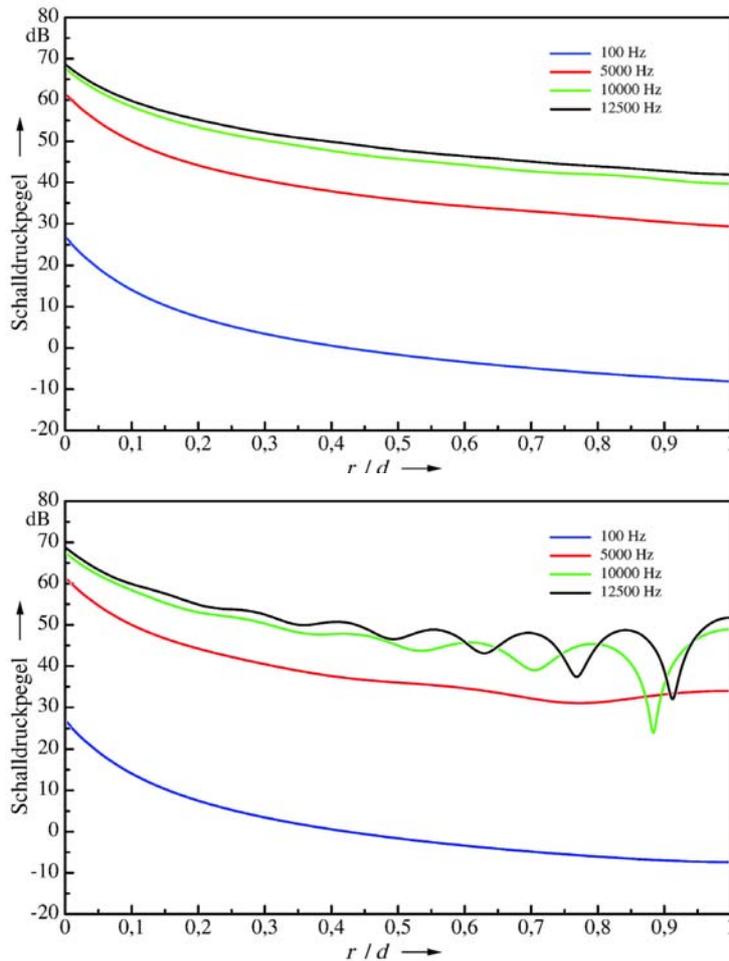


Bild 5: Verlauf des Schalldruckpegels (FEM-Simulationen) zwischen den beiden 1-Zoll-Mikrofonen im Abstand d bei vier verschiedenen Frequenzen, oben: ohne Anwesenheit des Empfangsmikrofons, unten: Interferenzerscheinungen durch Reflexionen am Empfangsmikrofon.

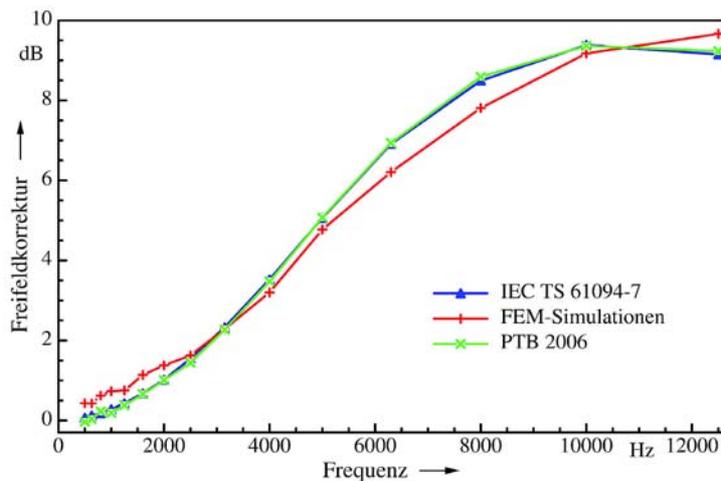


Bild 6: Freifeldkorrekturwerte: aktuelle Messwerte der PTB (Brüel & Kjær 4160 (LS1P)), Empfehlung in Vornorm IEC TS 61094-7 Brüel & Kjær 4160 (LS1P) und berechnete Werte der FEM-Simulationen.

7 Ausblick

Die Kalibrierung von Messmikrofonen bildet die Basis der Bestimmung akustischer Messgrößen. Zurzeit werden neue Messplätze entwickelt, mit denen es möglich ist, den Frequenzbereich für Primär- und Sekundärkalibrierungen zu erweitern.

Ziel ist es, Messmikrofone bis zu einer unteren Frequenz von 2 Hz und einer oberen Frequenz von zunächst 40 kHz und in einem weiteren Schritt, durch die Einbeziehung von 1/4-Zoll-Mikrofonen, bis über 100 kHz zurückzuführen. Darüber hinaus werden auch Untersuchungen durchgeführt, Mikrofone mit breitbandigen Signalen hinreichend genau zu kalibrieren.

Literatur

- [1] Gesetz über Einheiten im Messwesen, zuletzt geändert am 25.11.2003
- [2] Gesetz über das Mess- und Eichwesen, zuletzt geändert am 25.11.2003
- [3] Eichordnung – Allgemeine Vorschriften, zuletzt geändert am 25.11.2003
- [4] DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder, März 2006
- [5] Diestel, H. G., Mrass, H.: Bestimmung des Freifeld-Übertragungsfaktors von Mikrofonen, Arch. Techn. Messen V53-7 (1963), S. 277–280
- [6] DIN EN 61094-3:1996-05 Messmikrofone – Teil 3: Primärverfahren zur Freifeld-Kalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen nach der Reziprozitätsmethode
- [7] Obermayr, K., Odin, A.: Darstellung der Einheit des Schalldrucks im freien Schallfeld unter Anwendung des Reziprozitätsverfahrens, PTB-Mitteilungen 102 (1992), S. 189–197
- [8] DIN EN 61094-2, Ausgabe: 1994-02 Messmikrofone – Teil 2: Primärverfahren zur Druckkammer-Kalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen nach der Reziprozitätsmethode
- [9] DIN EN 61094-5, Ausgabe: 2003-02 Messmikrofone – Teil 5: Verfahren zur Druckkammer-Kalibrierung von Gebrauchs-Normalmikrofonen nach der Vergleichsmethode
- [10] Behler, G.; Vorländer, M.: Reciprocal Measurements on Condenser Microphones for Quality Control and Absolute Calibration. Acta acustica united with acustica Vol. 90 (2004), S. 152–60
- [11] IEC TS 61094-7:2006-05: Measurement microphones – Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones

Schallmessungen im gesetzlich geregelten Bereich

Manfred Brandt¹ und Dirk Ratschko²

Lärm beeinflusst die Lebensqualität vieler Menschen, kann gesundheitliche Beeinträchtigungen hervorrufen und führt zu erheblichen Kosten. Rund 50 % der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland fühlt sich häufig oder andauernd durch Lärm belastigt [1]. Das Grünbuch der Europäischen Kommission, *Künftige Lärmschutzpolitik* [2], beziffert die Folgekosten von Lärm auf 0,2 bis 2 Prozent des Bruttoinlandsproduktes. Auf Deutschland angewandt sind das zwischen 4 und 40 Milliarden Euro pro Jahr. Lärmschwerhörigkeit ist eine der am häufigsten anerkannten Berufskrankheiten mit über 40 000 laufenden Rentenfällen bei den gewerblichen Berufsgenossenschaften.

Schallpegelmessgeräte, die wichtigsten Messgeräte zur Messung von Lärm, unterliegen in Deutschland der Eichpflicht. Vor jeder eichpflichtigen Messung ist ein Schallpegelmessgerät mit einem geeichten Schallkalibrator zu überprüfen. Die Eichfähigkeit von Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren wird im Rahmen einer Bauartprüfung durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt festgestellt. Dabei werden nationale Anforderungen zugrunde gelegt, die unter anderem aus den Normen DIN EN 61672-1 [3], DIN EN 61672-2 [4], DIN 45657 [5] und DIN EN 60942 [6] übernommen wurden. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt gehört zu den wenigen Institutionen weltweit, die Schallpegelmessgeräte entsprechend der Norm DIN EN 61672, die aus der internationalen Norm IEC 61672 hervorgegangen ist, vollständig prüfen kann.

1 Allgemeines

Ein Schallpegelmessgerät kann durch eine Zusammenschaltung aus Mikrofon, Vorverstärker mit Frequenzbewertung, Gleichrichtung, Zeitbewertung und Anzeige schematisch beschrieben werden. Mit Hilfe des Mikrofons, in der Regel ein Kondensatormikrofon, werden akustische in elektrische Signale umgewandelt. Die hohe Ausgangsimpedanz des Mikrofons wird mit Hilfe eines Vorverstärkers reduziert. Das ist für die Weiterverarbeitung des Messsignals notwendig. Im Grundgerät wird dann aus dem elektrischen Signal ein Schalldruckpegel be-

stimmt und angezeigt. Lineare Arbeitsbereiche des Schalldruckpegels von Schallpegelmessgeräten reichen von etwa 20 dB bis 140 dB, was einem Schalldruck von $2 \cdot 10^{-4}$ Pa bis 200 Pa entspricht. Schallpegelmessgeräte können also Schalldrücke über einen Messbereich von bis zu sechs Zehnerpotenzen messen.

Die Eichordnung [7] fordert, dass Schallpegelmessgeräte geeicht sein müssen, wenn sie im Bereich des Arbeits- oder Umweltschutzes zum Zwecke der Durchführung öffentlicher Überwachungsaufgaben, der Erstattung von Gutachten für staatsanwaltschaftliche oder gerichtliche Verfahren, Schiedsverfahren oder für andere amtliche Zwecke oder der Erstattung von Schiedsgutachten verwendet werden. Unabhängig davon fordert die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm [8]) die Verwendung von geeichten Schallpegelmessern der Genauigkeitsklasse 1.

Die Eichfähigkeit von Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren wird durch eine Bauartprüfung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig festgestellt. Wenn die Bauartprüfung erfolgreich durchgeführt werden konnte, wird eine Zulassung erteilt, in der auch festgelegt wird, wie die eichtechnische Prüfung, die bei Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren alle zwei Jahre stattfindet, durchzuführen ist.

Allgemeine Forderungen, die an Schallpegelmessgeräte und Schallkalibratoren, die im gesetzlich geregelten Bereich verwendet werden, gestellt werden, regelt die Anlage 21 zur Eichordnung. In der Anlage 21 wird auch auf die anerkannten Regeln der Technik verwiesen, die die Normen und OIML-Empfehlungen festlegt, deren Anforderungen Schallpegelmessgeräte und Schallkalibratoren erfüllen müssen, um im gesetzlich geregelten Bereich verwendet zu werden.

2 Bauartprüfung von Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren

2.1 Schallpegelmessgeräte

Im Rahmen einer Bauartzulassung werden drei Schallpegelmessgeräte einer Bauart geprüft. Zunächst wird festgestellt, ob die Bauart über

¹ Manfred Brandt,
PTB-Arbeitsgruppe
„Hörschall“
E-Mail:
manfred.brandt@ptb.de

² Dr. Dirk Ratschko,
Leiter der PTB-
Arbeitsgruppe
„Geräuschemess-
technik“,
E-Mail:
dirk.ratschko@ptb.de

die geforderten Leistungsmerkmale verfügt. Ein Schallpegelmessgerät muss je nach Bauart unter anderem die folgenden Leistungsmerkmale besitzen:

- Gewöhnlicher Schallpegelmessgerät:
Messgrößen L_{AF} und L_{CF}
- Integrierender mittelwertbildender Schallpegelmessgerät: Messgröße L_{AEQT}
- Integrierender Schallpegelmessgerät:
Messgröße L_{AE}
- Bereichsüberschreitungsanzeige
- Auflösung der Anzeige von mindestens 0,1 dB
- Prüfmöglichkeit mit elektrischen Signalen
- Linearer Arbeitsbereich von mindestens 60 dB bei 1 kHz
- Anzeige über ausreichende Stromversorgung
- Digitale Schnittstelle für die Bauartprüfung
- Bedienungsanleitung.

Die Frequenzbewertungen A und C berücksichtigen, dass Schalldrücke vom menschlichen Ohr frequenzabhängig wahrgenommen werden. Zu tiefen und hohen Frequenzen hin werden gleiche Schalldruckpegel als leiser empfunden. Die Zeitbewertungen F (fast) und S (slow) sind zeitliche Exponentialfunktionen mit einer festgelegten Zeitkonstanten, mit der das Quadrat des Momentanwertes des frequenzbewerteten Schalldruckpegels gewichtet wird. L_{AF} ist ein Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung F, L_{CF} ist ein Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung C und der Zeitbewertung F, L_{AEQT} ist ein A-bewerteter Mittelungspegel und L_{AE} ist ein A-bewerteter Schallexpositionspiegel [3].

Bei der Bauartprüfung von Schallpegelmessgeräten werden verschiedene Prüfungen durchgeführt. Dazu gehören eine akustische und eine elektrische Prüfung. Außerdem wird der Einfluss von Temperatur, relativer Feuchte, statischem Druck, mechanischen Schwingungen sowie von elektromagnetischen Feldern auf ein Schallpegelmessgerät überprüft. Im Folgenden wird der Ablauf der Prüfungen kurz erläutert.

2.1.1 Akustische Prüfung

Bei der akustischen Prüfung eines Schallpegelmessers werden der Frequenzgang und die Richtcharakteristik überprüft. Bei der Frequenzgangprüfung wird zunächst mit Hilfe eines Referenzmikrofons, das im Abstand von einem Meter vor einem Lautsprecher installiert wird, ein akustisches Feld mit Sinustönen mit Frequenzen im Bereich zwischen 25 Hz und 20 kHz sowie einem Schalldruckpegel von 84 dB eingemessen. Im Anschluss daran wird das Referenzmikrofon durch den zu prüfenden Schallpegelmessgerät ersetzt und es wird überprüft, ob dieser für die Frequenzbewertungen A, C und Z (unbewerteter Schalldruckpegel), soweit vorhan-

den, entsprechend den Anforderungen der Norm DIN EN 61672-1 richtig misst.

Die Richtcharakteristik eines Schallpegelmessgerätes wird für zwei Installationsebenen des Schallpegelmessers überprüft – horizontal und vertikal. Dazu hat die Arbeitsgruppe Geräuschesmesstechnik einen automatisierten Messplatz für die Richtcharakteristikprüfung entwickelt. Die Messung beginnt bei der Null Grad Position, das heißt, das Mikrofon des Schallpegelmessers zeigt direkt auf den Lautsprecher. Bei der Prüfung werden Sinustöne im Frequenzbereich von 250 Hz bis 12500 Hz in 100 Hz Schritten generiert und es wird der Messwert vom Schallpegelmessgerät über eine digitale Schnittstelle abgefragt. Danach wird die Messung für die nächste Winkeleinstellung wiederholt. Es wird ein Winkelbereich von $\pm 150^\circ$ überprüft. Dabei wird der Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ in 5° Schritten und im weiteren Verlauf in 10° Schritten überprüft. Für die drei Winkelbereiche $\pm 30^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 150^\circ$ wird überprüft, ob zulässige Grenzabweichungen der Differenzbeträge zwischen angezeigten Schalldruckpegeln zweier beliebiger Schalleinfallswinkel nicht überschritten werden. Insgesamt werden bei der Überprüfung einer Richtcharakteristik über 5000 Schalldruckpegelwerte bestimmt.

2.1.2 Elektrische Prüfung

Die elektrische Prüfung eines Schallpegelmessgerätes kann aus bis zu 10 000 Einzelmessungen bestehen und wird mit einem weiteren von der Arbeitsgruppe Geräuschesmesstechnik entwickelten automatisierten Messplatz durchgeführt. Dabei wird der Frequenzgang, die Pegellinearität, die Reaktion auf Tonimpulse und Tonimpulsfolgen, die C-Peak Funktion, die Taktmaximalpegel sowie die Bildung einer Pegelhäufigkeitsverteilung bei einem Schallpegelmessgerät automatisch überprüft. Bei der elektrischen Prüfung wird das Mikrofon vom Schallpegelmessgerät entfernt und elektrische Signale, die den Mikrofonensignalen entsprechen, werden über einen Adapter mit einer Ersatzkapazität in das Schallpegelmessgerät eingespeist.

Bei der Frequenzgangprüfung werden die Frequenzbewertungen A, C und Z, soweit vorhanden, mit Frequenzen zwischen 10 Hz und 20 kHz gemäß DIN EN 61672-1 überprüft.

Die Pegellinearität wird bei Schallpegelmessgeräten der Genauigkeitsklasse 1 für die Schalldruckpegel L_{AF} , L_{CF} , L_{ZE} , L_{AEQT} und L_{AE} bei den Frequenzen 31,5 Hz, 1 kHz und 12 kHz überprüft. Die Prüfung beginnt beim Referenzschalldruckpegel (häufig 94 dB), der in 1-dB Schritten bis zur oberen Grenze des linearen Arbeitsbereiches erhöht wird, danach in 1-dB Schritten bis zur unteren Grenze des linearen Arbeitsbereiches reduziert wird und dann ab-

schließend in 1-dB Schritten wieder bis zum Referenzschalldruckpegel erhöht wird.

Die Tonimpulsantwort bei Schallpegelmessgeräten wird mit Hilfe sinusförmiger elektrischer Signale mit einer Frequenz von 4 kHz überprüft. Zu Beginn der Prüfungen wird in den Schallpegelmessgeräten ein gleichförmiges Dauersignal eingespeist. Der Schallpegelmessgeräten wird dabei auf die Frequenzbewertung A eingestellt. Das Eingangssignal wird so eingeppegelt, dass ein Schalldruckpegel angezeigt wird, der um 3 dB unter der festgelegten oberen Grenze des linearen Arbeitsbereichs liegt. Im Anschluss daran werden Tonimpulse gleicher Amplitude (Ausschnitte aus dem Dauerton) mit einer Dauer zwischen 0,25 ms und 1000 ms für die Zeitbewertung F und zwischen 2 ms und 1000 ms für die Zeitbewertung S in das Schallpegelmessgeräten eingespeist und es wird überprüft ob die Norm-Anforderungen erfüllt sind.

Des Weiteren wird im Rahmen der elektrischen Prüfung die C-Peak Funktion, die Bereichsunterschreitungs- und Bereichsüberschreitungsanzeige, die Zeitkonstanten F und S sowie die Taktmaximalpegel und die Bestimmung der Pegelhäufigkeitsverteilung überprüft.

2.1.3 Prüfung des Einflusses von Temperatur, relativer Feuchte, statischem Druck sowie elektromagnetischen Feldern

Für Schallpegelmessgeräten der Genauigkeitsklasse 1 ist der Einfluss von Änderungen der Lufttemperatur auf den gemessenen Schalldruckpegel für den Temperaturbereich von -10 °C bis $+50\text{ °C}$ in der Norm DIN EN 61672-1 festgelegt. Die Festlegung für die relative Luftfeuchte gilt für Werte zwischen 25 % und 90 %. Die Prüfung des Einflusses von Temperatur und relativer Luftfeuchte wird in einer Klimakammer durchgeführt. Dabei wird eine mögliche Änderung der Anzeige eines Schallpegelmessgeräten für kombinierte Werte von Temperatur und Feuchte von $+23\text{ °C}$ und 50 %, -10 °C und 65 %, $+5\text{ °C}$ und 25 %, $+40\text{ °C}$ und 90 % sowie $+50\text{ °C}$ und 50 % überprüft. Die Überprüfung eines Prüfpunktes dauert in der Klimakammer etwa 15 Stunden.

Die Überprüfung des Einflusses des statischen Druckes auf die Anzeige eines Schallpegelmessgeräten wird im Druckbereich von 85 kPa bis 108 kPa durchgeführt. Dazu wird das zu prüfende Schallpegelmessgeräten mit einem aufgesetzten Kalibrator in eine Druckkammer gebracht. Die Prüfungen werden bei einer Frequenz von 1 kHz und einem Schalldruckpegel von 94 dB und 114 dB durchgeführt.

Im Rahmen der Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit wird die Störfestigkeit gegenüber Netzfrequenzfeldern überprüft. Dazu wird ein Schallpegelmessgeräten mit

allen in der Bedienungsanleitung ausgewiesenen relevanten Komponenten in ein Magnetfeld mit einem Effektivwert der Feldstärke von 80 A/m gebracht, wobei die Frequenz des Wechselfeldes 50 Hz beträgt.

Des Weiteren wird die Störfestigkeit gegenüber Hochfrequenzfeldern im Frequenzbereich von 26 MHz bis 1 GHz überprüft. Der Effektivwert der elektrischen Feldstärke beträgt dabei 10 V/m.

2.1.4 Mechanische Prüfung

Für die Überprüfung des Einflusses von mechanischen Schwingungen auf ein Schallpegelmessgeräten ist von der Arbeitsgruppe Geräuschmesstechnik ein neuer Messplatz eingerichtet worden, bei dem gleichzeitig zwei Schallpegelmessgeräten der gleichen Bauart einem Schallfeld ausgesetzt sind. Mechanische Schwingungen, die auf eines der beiden Schallpegelmessgeräten einwirken, können den angezeigten Messwert beeinflussen. Dabei wirken die mechanischen Schwingungen mit einer Beschleunigung von 1 m/s^2 in einer ersten Messung senkrecht zur Membranebene des Mikrofons und in einer zweiten Messung parallel zur Membranebene des Mikrofons auf das Schallpegelmessgerätengehäuse. Bei der Prüfung werden Frequenzen von 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz und 1000 Hz berücksichtigt. Die Mikrofone beider Schallpegelmessgeräten sind in einem Abstand von etwa 1 cm aufeinander ausgerichtet. Der Schalldruckpegel des angelegten Schallfeldes wird solange erhöht, bis beide Schallpegelmessgeräten bis auf 0,7 dB den gleichen Schalldruckpegel anzeigen. Mit Hilfe dieser Prüfung kann bestimmt werden, inwieweit sich die untere Grenze des linearen Arbeitsbereiches zu höheren Werten verschiebt, wenn bestimmte mechanische Schwingungen auf ein Schallpegelmessgeräten einwirken.

2.2 Schallkalibratoren

Um Schallpegelmessgeräten überprüfen zu können, benötigt man eine Bezugsschallquelle, die Signale mit hoher Genauigkeit produziert. Da akustische Messungen an unterschiedlichsten Orten durchgeführt werden, sollte diese Referenzquelle einfach transferiert werden können.

Schallkalibratoren sind kleine batteriebetriebene Geräte, die diese Aufgabe übernehmen. Sie erzeugen bei bestimmten Frequenzen (i. d. R. 250 Hz oder 1 kHz) akustische Signale mit einer Pegelgenauigkeit von bis zu 0,05 dB. Die Nennwerte der abgegebenen Schalldruckpegel liegen im Bereich von 74 dB bis 124 dB. Multifunktionskalibratoren können darüber hinaus auch Signale im Frequenzbereich von 16 Hz bis 16 kHz generieren.

Zur Überprüfung einer Messeinrichtung wird der Schallkalibrator auf das Messmikrofon

gesteckt, um dort sein akustisches Signal abzugeben. Da der Pegel dieses Signals genau bekannt ist, kann anschließend die Messvorrichtung auf diesen Wert abgeglichen werden

Es gibt drei Prinzipien, nach denen Schallkalibratoren ihr Signal erzeugen:

1. mit Hilfe eines Lautsprechers,
2. über einen Piezokristall, der in Schwingungen versetzt wird, oder
3. durch die Bewegung von Kolben in einem Zylinder.

Der Pegel des erzeugten Signals hängt in der Regel von dem angekoppelten Mikrofontyp, dem Umgebungsdruck und der Umgebungstemperatur ab. Bei geregelten Kalibratoren wird dieser Einfluss dadurch ausgeglichen, dass das abgegebene Signal ständig von einem internen Referenzmikrofon überwacht und über eine Elektronik nachgeregelt wird. Bei ungeregelten Kalibratoren gibt der Hersteller entsprechende Korrekturwerte für die unterschiedlichen Mikrofontypen und die Umgebungsbedingungen an, die zu berücksichtigen sind.

Grundlage der Baumusterprüfung für die Zulassung von Schallkalibratoren ist die Norm DIN EN 60942. In ihr sind Fehlergrenzen und Prüfverfahren hinsichtlich des Pegels, der Frequenz und des Klirrfaktors des erzeugten Signals festgelegt. Dadurch soll sichergestellt sein, dass die Gerätespezifikationen auch unter verschiedenen äußeren Bedingungen eingehalten werden.

Je nach der Genauigkeit des abgegebenen Signals werden Schallkalibratoren in verschiedene Klassen mit unterschiedlichen Fehlergrenzen eingeteilt. Aufgabe der PTB im Rahmen einer Bauartzulassung ist es zu überprüfen, ob ein Prüfmuster eichfähig ist. Dazu wird untersucht, wie gut das abgegebene Signal reproduzierbar ist, und wie es auf verschiedene äußere Einflüsse reagiert.

Zur Bestimmung des Schalldruckpegels wird das sog. Ersatzspannungsverfahren genutzt: Dabei wird ein Mikrofon mit bekannten Übertragungseigenschaften von dem Kalibrator beschallt und wandelt das akustische Signal in eine elektrische Spannung um. Um die Größe dieser Spannung bestimmen zu können, wird diese anschließend über einen sehr genauen Sinstongenerator nachgebildet. Aus dem so ermittelten Spannungswert und den bekannten Übertragungseigenschaften des Mikrofons lässt sich dann der Schalldruckpegel berechnen. Die Frequenz und auch der Klirrfaktor des erzeugten Signals werden unmittelbar mit geeigneten Messgeräten gemessen.

Im Rahmen der Bauartprüfung wird geprüft, ob die Position des Kalibrators in Bezug zum Mikrofon einen Einfluss auf dessen Pegel hat. Es wird außerdem untersucht, wie sich das

Signal verhält, wenn die Versorgungsspannung verändert wird. Eine weitere Prüfung besteht darin, die Messung mit verschiedenen Mikrofontypen zu wiederholen, um so zu überprüfen, ob die vom Hersteller angegebenen Korrekturwerte richtig sind, bzw. ob bei geregelten Kalibratoren dieser Einfluss kompensiert wird.

Ein wichtiger Bestandteil der Baumusterprüfung ist die Klimaprüfung, d. h. die Untersuchung der Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen für Druck, Feuchte und Temperatur auf das abgegebene Kalibratorsignal. Zur Überprüfung der Druckabhängigkeit wird der Kalibrator in einer speziellen von der Arbeitsgruppe Hörschall entwickelten Apparatur statischen Drücken von 65 kPa bis 108 kPa ausgesetzt. Dabei wird beobachtet, wie sich das Signal ändert, und ob diese Änderungen innerhalb der erlaubten Toleranz liegen. Ähnlich wird bei der Untersuchung der Temperatur- und der Feuchteabhängigkeit auf das Signal verfahren. In einem geregelten Klimaschrank wird der Kalibrator entsprechend seiner Genauigkeitsklasse entsprechend den Prüfvorschriften der Norm Temperaturen von -10 °C bis $+50\text{ °C}$ und Feuchtwerten von 25 % bis 90 % ausgesetzt. Auch bei diesen Tests dürfen die Änderungen des vom Kalibrator abgegebenen Signals nicht außerhalb der Fehlergrenzen der jeweiligen Klasse liegen, für die das Gerät geprüft werden soll. In der Praxis werden die Klimaprüfungen mit drei Prüfmustern desselben Typs durchgeführt.

Eine weitere Untersuchung besteht darin, den Kalibrator elektromagnetischen Feldern auszusetzen. Bei der Prüfung im elektromagnetischen Feld wird er bei einer Feldstärke von 10 V/m im Frequenzbereich von 26 MHz bis 1 GHz betrieben, bei der Prüfung im magnetischen Feld bei einer Feldstärke von 80 A/m. Bei beiden Prüfungen darf die Pegeländerung zwischen ein- und ausgeschaltetem Kraftfeld bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten.

Am Ende wird der Schallkalibrator äußeren elektrostatischen Entladungen von bis zu 8 kV ausgesetzt. Hierbei darf es zu keinen irreversiblen Veränderungen der Kalibratoreigenschaften kommen.

Zu jedem Schallkalibrator gehört eine Bedienungsanleitung, die entsprechend der Norm bestimmte Informationen enthalten muss. Auch dieses wird im Rahmen der Zulassung geprüft.

4 Ausblick

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen stellt in seinem Umweltgutachten [9] fest, dass Lärm als Risikofaktor anzusehen ist, der gesundheitliche Beeinträchtigungen beim Menschen hervorrufen kann. Das unterstreicht die besondere Bedeutung von Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren beim Lärmschutz. In

Zukunft wird über alternative Bewertungskurven zu diskutieren sein, die möglicherweise die zurzeit verwendeten A und C-Bewertungskuren ergänzen oder ersetzen. Mit Blick auf die Bauartzulassung von Schallpegelmessgeräten werden weitere akustische Messgrößen, wie beispielsweise raumakustische Parameter Bestandteil der Zulassungsprüfung werden, mit dem Ziel, akustische Ereignisse richtig zu messen und mögliche Belästigungen für den Menschen weiter zu reduzieren.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt, Jahresbericht 2000
- [2] Künftige Lärmschutzpolitik, Grünbuch der Europäischen Kommission, Brüssel 1996
- [3] DIN EN 61672-1, Ausgabe: 2003-10 Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2002); Deutsche Fassung EN 61672-1:2003
- [4] DIN EN 61672-2, Ausgabe: 2004-08 Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 2: Baumusterprüfungen (IEC 61672-2:2003); Deutsche Fassung EN 61672-2:2003
- [5] DIN 45657, Ausgabe: 2005-03 Schallpegelmesser – Zusatzanforderungen für besondere Messaufgaben
- [6] DIN EN 60942, Ausgabe: 2004-05 Elektroakustik - Schallkalibratoren (IEC 60942:2003); Deutsche Fassung EN 60942:2003
- [7] Eichordnung – Allgemeine Vorschriften vom 12. August 1988; Vollständige Fassung, Stand: 25.11.2003
- [8] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) Vom 26. August 1998
- [9] Umweltgutachten 2004 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen vom 2. Juli 2004

Kalibrierung und Prüfung von Ohrsimulatoren und Kupplern für die Audiometrie

Thomas Fedtke*

1 Einleitung

Die Messung des menschlichen Hörvermögens (Audiometrie) besitzt große Bedeutung im Rahmen der Gesundheitsvorsorge zum Schutz des Gehörs. Weiterhin ist die Audiometrie ein unverzichtbares diagnostisches Werkzeug für die HNO-Heilkunde und die Grundlage für eine erfolgreiche Anpassung von Hörhilfen.

In der PTB werden zum einen die Kenndaten des Gehörs an Versuchspersonen ermittelt und zum anderen wird die Messkette für ihre Übertragung bis zum Audiometer im praktischen Einsatz sichergestellt. Letzteres erfolgt über die regelmäßige Wartung der Audiometer und die Überprüfung der für die Audiometerwartung verwendeten Ausrüstung. Gesetzliche Grundlagen dafür sind das Medizinproduktegesetz [1] und die Medizinprodukte-Betreiberverordnung [2]. Im „Leitfaden zu messtechnischen Kontrollen von Medizinprodukten mit Messfunktion“ [3] werden genaue Anforderungen an die Wartung von Audiometern und Maßnahmen zur messtechnischen Kontrolle definiert.

Wichtige Bestandteile dieser Messkette sind die Ohrsimulatoren, akustischen Kuppler und künstlichen Mastoide (mechanische Kuppler für die Knochenleitungshörer), an denen die Bezugswerte für die „Normalhörigkeit“ festgelegt werden, welche aber auch vor Ort bei der Kalibrierung der Audiometer zum Einsatz kommen.

2 Schwellenpegel und Kuppler

Bezugshörschwellen für die Audiometrie werden an otologisch normalen Versuchspersonen durch subjektive Schwellenmessungen mit dem jeweiligen audiometrischen Wandler ermittelt. Diese Wandler können Audiometrikopfhörer oder Knochenleitungshörer sein. Ihre Weitergabe erfolgt in der Form von so genannten äquivalenten Bezugs-Schwellenschalldruckpegeln bzw. von äquivalenten Bezugs-Schwellenkraftpegeln. Diese Schwellenwerte sind die vom Kopfhörer oder Knochenleitungshörer im Ohrsimulator erzeugten Schalldruckpegel oder am künstlichen Mastoid erzeugten Wechselkraftpegel, wenn der Wandler jeweils mit genau der Ansteuerung be-

trieben wird, die im Mittel zur Hörschwelle bei den Versuchspersonen geführt hatte.

Der derzeit am meisten verwendete Ohrsimulator entspricht der Norm DIN EN 60318-1:1999 [4] und wird häufig auch als „künstliches Ohr“ bezeichnet. Es handelt sich um einen Ohrsimulator zur Kalibrierung supra-auraler Kopfhörer für den Frequenzbereich von 20 Hz bis 10 000 Hz. Akustisch wirksam sind im wesentlichen drei gekoppelte Hohlräume (siehe Bild 1). Die Festlegung der Eigenschaften erfolgt über die mechanische Konstruktion an Hand der Abmessungen der Hohlräume und über die Beschreibung der Impedanz der Koppelemente. Im Teil 2 der Normenreihe [5] sind Adapter beschrieben, die in Verbindung mit dem Ohrsimulator nach Teil 1 Messungen an circumauralen Kopfhörern auch im erweiterten Hochtonbereich bis 16 kHz ermöglichen.



Bild 1:
Ohrsimulator nach DIN EN 60318-1 zur Messung audiometrischer Kopfhörer.

Ein weiteres sehr verbreitetes Gerät ist der akustische Kuppler nach DIN EN 60318-3: 1999 [6]. Er ist wesentlich einfacher aufgebaut als der Ohrsimulator und belastet supra-aurale Audiometrikopfhörer mit einer festgelegten akustischen Impedanz (siehe Bild 2). Er ist für den Frequenzbereich von 125 Hz bis 8000 Hz geeignet.

Zur Kalibrierung von Knochenleitungshörern wird ein künstliches Mastoid nach DIN EN 60373 [7] eingesetzt (siehe Bild 3). Es simuliert die mechanische Impedanz des menschlichen Mastoids im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8000 Hz und ermöglicht damit eine definierte

* Dr. Thomas Fedtke,
Leiter der PTB-
Arbeitsgruppe
„Hörschall“
E-Mail:
thomas.fedtke@ptb.de



Bild 2:
Akustischer Kuppler nach DIN EN 60318-3 zur
Messung audiometrischer Kopfhörer



Bild 3:
Künstliches Mastoid (mechanischer Kuppler) nach
DIN EN 60373 zur Messung von Knochenleitungshören.



Bild 4:
Messanordnung für die Vergleichsmessung von
Ohrsimulatoren

Messung der vom Knochenleitungshörer abgegebenen mechanischen Wechselkraft.

3 Prüfung von Ohrsimulatoren und akustischen Kupplern

3.1 Prüfung mittels Vergleichsverfahren

Da die Festlegungen in DIN EN 60318-1:1999 [4] eine akustische Über-alles-Messung der Eigenschaften der Ohrsimulatoren nicht zulassen, wird die Prüfung derzeit nach einem Vergleichsverfahren durchgeführt. Dazu wird ein supra-auraler Audiometrikopfhörer vom Typ Beyer DT48 verwendet, welcher ohne Kissen mit einem speziellen Adapterring angekoppelt wird (siehe Bild 4). In dieser Konfiguration wird mit einem Referenz-Ohrsimulator die Übertragungsfunktion von der Speisespannung des Kopfhörers bis zur Ausgangsspannung des Vorverstärkers gemessen. Auf Grund der Ankopplungsart des Kopfhörers und der Stabilität der Geräte kann diese Messung im gesamten Frequenzbereich mit einer Unsicherheit von 0,1 dB durchgeführt werden. Zur Prüfung wird, unter Beibehaltung der gesamten Konfiguration einschließlich des Mikrofons, der Referenz-Ohrsimulator durch den zu prüfenden Ohrsimulator ersetzt und die Abweichung im Übertragungsverhalten als Prüfkriterium bestimmt. Als Grenzabweichung wurde, resultierend aus der Erfahrung und den Erfordernissen der Audiometrie, $\pm 0,35$ dB festgelegt. Für die einfacheren akustischen Kuppler nach DIN EN 60318-3 wird das oben beschriebene Verfahren ebenfalls eingesetzt, wobei der Referenz-Ohrsimulator durch einen Referenz-Kuppler ersetzt wird. Die Grenzabweichung beträgt hier $\pm 0,25$ dB.

Die Festlegung und Prüfung der Referenzkuppler und -Ohrsimulatoren erfolgt in der PTB durch Überprüfung der Abmessungen, visuelle Tests und durch ständigen Vergleich mit einer „Population“ erfolgreich geprüfter Kuppler bzw. Ohrsimulatoren.

Die in den Ohrsimulatoren und Kupplern eingebauten Mikrofone werden in diese Prüfung nicht mit einbezogen, sondern werden mittels Sekundärkalibrierverfahren in der Druckkammer an das nationale Schallnormal angeschlossen.

3.2 Entwicklung eines neuen Messverfahrens für Ohrsimulatoren

In der Arbeitsgruppe 21 „Head and ear simulators“ des Technischen Komitees 29 „Electroacoustics“ der IEC wird die Norm IEC 60318-1 gegenwärtig überarbeitet. Die neue Ausgabe soll die beiden bisherigen Teile 1 und 2 zusammenfassen und einen Ohrsimulator zur Kalibrierung von supra- und circumauralen Kopfhörern definieren [8]. Zusätzlich zu den Festlegun-

gen hinsichtlich der Dimensionierung der Hohlräume und Koppellemente soll als maßgebliche Eigenschaft des Ohrsimulators die akustische Transferimpedanz angegeben werden, mit der er den Kopfhörer an das eingebaute Mikrofon ankoppelt. Diese Transferimpedanz ist einer direkten akustischen Messung zugänglich und daher gut für eine Über-alles-Prüfung der Ohrsimulatoren geeignet. In der neuen Fassung der Norm soll auch ein Messverfahren in informativer Form dargestellt werden. Es stellen sich demzufolge die Aufgaben, Bezugswerte für die Transferimpedanz und Grenzabweichungen für ihre Festlegung zu bestimmen, ein Messverfahren zu entwickeln, zu erproben und seine Messunsicherheit zu ermitteln. Das Prinzip des Verfahrens ist aus der Reziprozitätskalibrierung von Mikrofonen abgeleitet. Dort werden zwei zu kalibrierende Mikrofone mittels eines bekannten zylindrischen Kupplers mit berechenbarer akustischer Transferimpedanz verbunden. Zur Ermittlung der Transferimpedanz eines Ohrsimulators wird hingegen auf kalibrierte Mikrofone mit bekannten Übertragungskoeffizienten zurückgegriffen und über die Messung eines Spannungsverhältnisses die akustische Transferimpedanz bestimmt.

Das Messverfahren wird zur Zeit im Rahmen der metrologischen Zusammenarbeit zwischen verschiedenen metrologischen Staatsinstituten für den praktischen Einsatz vorbereitet.

4 Mechanische Kuppler – Künstliche Mastoide

Zur Überprüfung und Kalibrierung der künstlichen Mastoide müssen zwei Kenngrößen gemessen werden: die mechanische Impedanz und das Kraft-Übertragungsmaß.

4.1 Mechanische Impedanz

Die von einem Knochenleitungshörer abgegebene mechanische Wechselkraft hängt von seiner Belastung durch die mechanische Impedanz ab: im praktischen Betrieb durch das Mastoid der Versuchsperson, bei der Kalibrierung eines Audiometers oder der Festlegung der Bezugsschwellen durch das künstliche Mastoid. Diese Abhängigkeit ist eine Funktion der Frequenz und des Typs des Knochenleitungshörers und im allgemeinen sehr komplex. Aus diesen Gründen muss die mechanische Impedanz der künstlichen Mastoide regelmäßig überwacht und auf die Einhaltung der in der Norm DIN EN 60373 [7] angegebenen Normwerte und Grenzabweichungen überprüft werden. Die Messung der mechanischen Impedanz erfolgt mit einem massenkompensierten Impedanzmesskopf mit einer planen Auflagefläche von $1,75 \text{ cm}^2$ unter Einhaltung einer Andrückkraft von $5,4 \text{ N}$ (siehe Bild 5) und mit einer Messunsicherheit von $0,4 \text{ dB}$ ($k = 2$). Da die mechanische Impedanz stark von der Temperatur des künstlichen Mastoids abhängt, müssen die Messungen bei $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ erfolgen. Dazu ist es erforderlich, das Mastoid mindestens 12 Stunden in einer temperaturstabilisierten Umgebung zu konditionieren.



Bild 5:
Messung der mechanischen Impedanz und des Kraft-Übertragungsmaßes von künstlichen Mastoiden

cherheit von $0,4 \text{ dB}$ ($k = 2$). Da die mechanische Impedanz stark von der Temperatur des künstlichen Mastoids abhängt, müssen die Messungen bei $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ erfolgen. Dazu ist es erforderlich, das Mastoid mindestens 12 Stunden in einer temperaturstabilisierten Umgebung zu konditionieren.

4.2 Kraft-Übertragungsmaß

Unter den bereits im Abschnitt 4.1. beschriebenen Messbedingungen wird die Ankoppelstelle des künstlichen Mastoids über den Impedanzmesskopf mit einer konstanten Wechselkraft angeregt und das Übertragungsmaß des Mastoids in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Auch hier beträgt die Messunsicherheit $0,4 \text{ dB}$ ($k = 2$). Das derart bestimmte Kraft-Übertragungsmaß wird für alle Audiometerfrequenzen im Bereich von 125 Hz bis 8000 Hz in $\text{dB re } 1/\text{N}$ angegeben. Mit dieser Angabe und einer normgerechten mechanischen Impedanz (siehe Abschnitt 4.1) kann das künstliche Mastoid zur Kalibrierung von Audiometern oder zur Festlegung von Bezugsschwellenkraftpegeln verwendet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kalibrierung und Prüfung von Ohrsimulatoren und Kupplern für die Audiometrie liefert, zusammen mit der Bereitstellung von Bezugsschwellen und der regelmäßigen Wartung der im Einsatz befindlichen Audiometer, einen wesentlichen Beitrag für die Sicherstellung der Messrichtigkeit in der Audiometrie.

Gegenwärtig gibt es aber auch eine Reihe neuer Aufgaben und Tendenzen, für die Konzepte und Messverfahren zu entwickeln sind.

Stellvertretend sollen hier genannt sein:

- Entwicklung von Ohrsimulatoren für die Kalibrierung von Stimuli für Neugeborene
- Neue Konzepte für eine vereinfachte Kalibrierung von Knochenleitungshörern
- Einsatz von Kunstköpfen für audiologische Kalibrierverfahren
- Spezielle Kalibrierverfahren für Geräte der Objektiven Audiometrie (Otoakustische Emissionen und Evozierte Potentiale)

Die PTB sieht es als wichtig an, im Rahmen der angewandten metrologischen Forschung und Entwicklung an diesen Aufgaben mitzuarbeiten.

Literatur

- [1] Gesetz über Medizinprodukte (Medizinproduktegesetz – MPG), Neufassung vom 07.08.2002 (BGBl I S. 3146) zuletzt geändert durch Verordnung vom 25.11.2003 (BGBl I S. 2304)
- [2] Verordnung über das Errichten, Betreiben und Anwenden von Medizinprodukten (Medizinprodukte-Betreiberverordnung- MPBetreibV), Neufassung vom 21.08.2002 (BGBl I S. 3396) zuletzt geändert durch Verordnung vom 25.11.2003 (BGBl I S. 2304)
- [3] Leitfaden zu messtechnischen Kontrollen von Medizinprodukten mit Messfunktion. <http://www.ptb.de/de/publikationen/download/lmkm/LMKM-Teil1-V2-1.pdf>
- [4] DIN EN 60318-1:1999, Elektroakustik – Simulatoren des menschlichen Kopfes und Ohres – Teil 1: Ohrsimulator zur Kalibrierung von supra-auralen Kopfhörern
- [5] DIN EN 60318-2:1999, Elektroakustik – Simulatoren des menschlichen Kopfes und Ohres – Teil 2: Ein vorläufiger akustischer Kuppler zur Kalibrierung von Audiometrie-Kopfhörern im erweiterten Hochtongbereich
- [6] DIN EN 60318-3:1999, Elektroakustik – Simulatoren des menschlichen Kopfes und Ohres – Teil 3: Akustischer Kuppler zur Kalibrierung von supra-auralen Audiometrie-Kopfhörern
- [7] DIN EN 60373:1992, Mechanische Kuppler für Messungen an Knochenleitungshörern
- [8] IEC CD 60318-1:2006, Electroacoustics – Simulators of human head and ear – Part 1: Ear simulator for the calibration of supra-aural and circumaural earphones

Hörschwellen für die objektive Audiometrie

Klaus-Vitold Jenderka¹, Thomas Fedtke²

1 Einleitung

Die Audiometrie dient allgemein zur messtechnischen Bestimmung des menschlichen Hörvermögens. Zu den Basisverfahren zählen die Reinton- und die Sprachaudiometrie. Diese Verfahren nutzen zum einen Sinus-Töne zur Prüfung des Gehörs an der Hörschwelle und zum anderen in Listen erfasste Zahlwörter, Einsilber, Reime oder Sätze zur Messung der Verständlichkeit von Sprache. Bei der Durchführung der Messung ist die aktive Mitarbeit der zu untersuchenden Person unbedingt erforderlich. Der Patient wird dazu in einen ruhigen Raum gesetzt und bekommt Töne oder Sprache, z. B. über einen Kopfhörer, vorgespielt. Er muss angeben, ob er die Töne gehört bzw. was er von der Sprache verstanden hat. Durch Variation der Lautstärke wird die Schwelle des Reintonhörens bzw. die Verständlichkeitsgrenze der Sprache ermittelt. Auf Grund der direkten Mitarbeit des Patienten und den damit verbundenen Fehlerquellen zählen diese Techniken zu den subjektiven audiometrischen Verfahren.

Die Audiometrie und Diagnostik von Erkrankungen der Hörorgane bei Kleinkindern und nicht zur Mitarbeit fähigen Erwachsenen bzw. nichtkooperativen Patienten erfolgt mit objektiven audiometrischen Verfahren. Hier werden die Hörnerven mit Kurzzeitsignalen stimuliert und die Antworten auf die akustischen Reize registriert. Je nach Art der Reizantwort wird zwischen zwei Methoden unterschieden: Registrierung der otoakustischen Emissionen (OAE) und Messung der akustisch evozierten Potentiale (AEP).

2 Methoden der objektiven Audiometrie

Bei den otoakustischen Emissionen handelt es sich um im Gehörgang messbare akustische Signale, die durch die motorischen Eigenschaften der Hörsinneszellen (der so genannten Haarzellen) hervorgerufen werden. Angeordnet in einer Reihe innerer und drei Reihen äußerer Haarzellen (insgesamt ca. 17 000) befinden sich diese auf der Basilarmembran in der Cochlea innerhalb des Innenohres. Ihre Funktion besteht darin, die

vom Ohr aufgenommenen und über Außen- und Mittelohr zum Innenohr geleiteten Schallwellen durch aktive Motorik zu verstärken.

Die durch akustische Reize hervorgerufenen elektrischen Potenzialschwankungen, die mit Hilfe von Kopfelektroden und hochohmiger Verstärkertechnik messbar sind, werden als akustisch evozierte Potentiale bezeichnet. Sie entstehen durch akustische Stimuli, die im Innenohr Nervenimpulse hervorrufen, welche über den Hörnerv zum Stammhirn geleitet werden und dort zu elektrischen Potenzialänderungen führen. Entsprechend der Abfolge in der Reizverarbeitungskette können bei Stimulierung mit Kurzzeitsignalen zeitversetzt charakteristische Signalmuster gemessen werden. Der geringe Störsignalabstand bei diesem Verfahren erfordert die Mittelung über eine Vielzahl von Reizantworten, die technisch durch eine reizgetriggerte Digitalisierung der gemessenen Potenzialschwankungen mit anschließender rechnergestützter Analyse realisiert wird.

Dieses audiologische Untersuchungsverfahren, die Hirnstammaudiometrie (engl. Brainstem Electric Response Audiometry – BERA), erlaubt sowohl die neurologische Diagnostik des Hörnerven und des Hirnstamms als auch die Beurteilung des Reifungszustandes der Hörbahn bei Neugeborenen und Kleinstkindern.

Trotz der Objektivität der Hirnstammaudiometrie gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Frequenzspezifität und der nur weitgehend visuell möglichen – und damit wieder subjektiven – Auswertung. Die neuen und derzeit in klinischer Erprobung befindlichen Verfahren unter Ausnutzung stationärer auditorisch evozierter Potentiale (Auditory Steady-State Responses – ASSR) können diese Nachteile vermeiden. Die stationären Potentiale sind während der gesamten Reizdauer messbar und tragen Merkmale der zeitlichen Struktur des Reizes, das kann z. B. die Modulationsfrequenz eines Reintones von 1 kHz sein. Auf diese Weise lassen sich die stationären Potentiale sehr gut von transienten Potenzialen trennen und automatisch registrieren [1].

Unabhängig davon, welche der oben genannten Methoden zur Bestimmung des Hörverlustes eingesetzt werden, benötigt der Unter-

¹ Dr. Klaus-Vitold Jenderka, PTB-Arbeitsgruppe „Medizinische Akustik“, E-Mail: klaus-vitold.jenderka@ptb.de

² Dr. Thomas Fedtke, Leiter der PTB-Arbeitsgruppe „Hörschall“, E-Mail: thomas.fedtke@ptb.de

sucher zur Beurteilung der Ergebnisse sowohl der subjektiven als auch der objektiven audiometrischen Verfahren Bezugs-Kenndaten, also mittlere Hörschwellenkurven, die eine Aussage darüber erlauben, ob bzw. wie weit die Audiogramme eines Patienten von denen eines mittleren normal hörenden Menschen abweichen. Für jeden Schallwandler (Kopfhörer oder Knochenleitungshörer) müssen diese Daten vorgehalten werden. Das gilt genauso für die unterschiedlichen Reizsignale - für reine Töne, Schmalbandrauschen und Klicks oder Kurztöne mit jeweils verschiedenen Wiederholfrequenzen. Für jeden neuen bzw. technisch verbesserten Schallwandler oder neu entwickelte Testsignale müssen diese Bezugs-Kenndaten an normal hörenden Versuchspersonen unter Referenzbedingungen mittels einer rückgeführten Messkette ermittelt werden. Diese Bezugswerte werden für Kopfhörer durch die äquivalenten Bezugs-Schwellenschalldruckpegel (Reference equivalent threshold sound pressure level – RETSPL) und für Knochenleitungshörer durch die äquivalenten Bezugs-Schwellenwechselkraftpegel (Reference equivalent threshold vibratory force level – RETVFL) dargestellt und sind für die bisher gebräuchlichen Signale bereits international genormt.

3 Kurzzeit-Signale

Für die Verfahren der evozierten Potenziale sind zur synchronisierten Auslösung der Reizantworten sehr kurze akustische Reize (Dauer weniger als 200 ms) notwendig. Diese Reize zeichnen sich durch charakteristische Signalformen und damit auch charakteristische Signalspektren aus. Zu den häufig verwendeten Kurzeitsignale zählen Klicks, Pips und Ton-Bursts in verschiedenen Variationen, wobei ständig neue Testsignale entwickelt werden, die sich z. B. besonders für den Einsatz beim Hörscreening von Neugeborenen eignen und dort bei gleichbleibender Sensitivität und Spezifität der Tests zu einer Verkürzung der Untersuchungszeit führen. Der Aufwand für die Entwicklung und die klinischen Tests neuer Kurztöne ist so hoch, dass die Entwickler den patentrechtlichen Schutz der Signale anstreben.

4 Messung von Bezugs-Schwellen

Die Messung der RETSPL (entsprechend RETVFL für Knochenleitungshörer) erfolgt in zwei Schritten (Bild 1). Zunächst wird die mittlere Reizamplitude an der Hörschwelle für die jeweilige Kombination aus Testsignal und Schallwandler mit Hilfe einer Gruppe otologisch normaler Versuchspersonen ermittelt. Danach erfolgt die Messung der Schalldruckpegel an einem zum ausgewählten Schallwandler passenden Ohrsimulator, Kuppler oder künstlichen

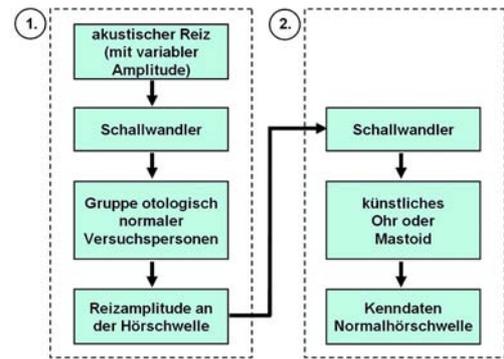


Bild 1:

Schema zur Bestimmung des äquivalenten Bezugs-Schwellen-Schalldruck- oder Wechselkraft-Pegel (RETSPL/RETVFL). (1.) Ermittlung der Reizamplituden an der Hörschwelle für otologisch normale Versuchspersonen. (2.) Messung der Schalldruckpegel am Ohrsimulator bzw. künstlichen Mastoiden.

Mastoid. Erst dann kann der Hörverlust einer Person als Differenz zwischen dem RETSPL und der individuellen, gemessenen Hörschwelle für die eingesetzte Messkette einschließlich des Testsignals angegeben werden.

4.1 Messung der Reizamplitude an der Hörschwelle

Die Bestimmung der mittleren Reizamplituden wird mit Hilfe von Gruppen von normal hörenden Erwachsenen im Alter zwischen 18 und 25 Jahren (so genannte otologisch normale Personen) vorgenommen. Die Auswahl der Versuchspersonen erfolgt entsprechend den in ISO/CD 389-9 [3] aufgeführten Bedingungen und schließt die otoskopische Inspektion der Gehörgänge, eine Impedanzaudiometrie und ein Interview sowie die Auswertung des ausgefüllten Fragebogens (nach ISO/CD 389-3) ein. Es werden Gruppen von 25 oder mehr Personen vermessen und die individuellen Kenndaten dann gemittelt.

Die Messungen werden in einem reflexionsarmen Raum, wie er in der PTB im Helmholtz-Bau I zur Verfügung steht, durchgeführt. Dieser, bisweilen auch als „schalltot“ bezeichnete Raum hat ein Volumen von 203 m³ und ist frei von Störlärm (entsprechend ISO 8253-1 [4]).

Die Reizerzeugung und Durchführung der Messung wird nach Auswahl der Testparameter vollständig vom Rechner übernommen. Neben reinen Tönen können damit nahezu beliebige Folgen von Kurzzeit-Signalen bereitgestellt werden, die in ihrer Signalform, Folgefrequenz und Dauer variabel sind.

Der Ablauf des Tests gestaltet sich so, dass nach erfolgter Einweisung der Versuchsperson und Einrichtung des Hörers zunächst eine Orientierungsmessung zur Abschätzung der Hörschwelle der jeweiligen Versuchsperson durchge-

führt wird. Die eigentliche Messung der Schwelle erfolgt sofort im Anschluss mit der Eingabelungsmethode („bracketing method“) nach ISO 8253-1 [4] bei einer Schrittweite von 2 dB.

Im Verlauf der Messung wird der Versuchsperson, beginnend mit einem Pegel unterhalb der Hörschwelle, eine Serie im Pegel schrittweise ansteigender Testsignale präsentiert und festgehalten, bei welchem Pegel das Testsignal sicher erkannt wurde. Danach wird der Pegel nochmals um einen Schritt erhöht und eine Serie im Pegel schrittweise abfallender Testsignale dargeboten. Hier wird der Pegelwert gespeichert, bei dem das Testsignal zuletzt noch erkannt wurde und danach der Pegel nochmals um einen Schritt abgesenkt. Nach Aufnahme von jeweils zwei weiteren auf- und absteigenden Serien ergibt der Mittelwert aus den niedrigsten Pegelwerten jeder Serie, bei der das Testsignal erkannt wurde, die gesuchte Reizamplitude an der Hörschwelle.

4.2 Messung der äquivalenten Bezugsschwellen

Um die an den Versuchspersonen bestimmten Reizamplituden als Bezugs-Schwellenwert weitergeben zu können, müssen die RETSPL bzw. RETVFL an geeigneten, genormten und auf dem jeweiligen Markt verfügbaren Ohrsimulatoren (für die Kopfhörer) bzw. künstlichen Mastoiden (für die Knochenleitungshörer) dargestellt werden. Dabei handelt es sich um technische Nachbildungen des Ohres bzw. des Knochens hinter der Ohrmuschel. Die Auswahl des geeigneten Ohrsimulators hängt wesentlich von der Ankopplungsmöglichkeit des jeweiligen Schallwandlers ab und der Art des Kurzzeit-Signales ab, hier muss zusätzlich auf Konsistenz mit den existierenden genormten Reintonschwellen geachtet werden.

Die Ohrsimulatoren sind somit bei der Messung des menschlichen Hörvermögens in zweifacher Hinsicht von Bedeutung. Sie werden nicht nur für die routinemäßige Kalibrierung von Audiometern eingesetzt, sondern spielen auch bei der anfänglichen Bereitstellung der äquivalenten Bezugs-Schwellenschalldruckpegel eine große Rolle.

5 Besonderheiten bei der Bestimmung von Hörschwellen mit Kurzzeit-Signalen

Da sich die Kurzzeit-Signale in ihrem zeitlichen Verlauf und spektralen Inhalt deutlich von der Signalform eines reinen Tones unterscheiden und sich somit auch kein Effektivwert (rms value) wie für ein lang andauerndes sinusförmiges Signal direkt angeben lässt, müssen entsprechende Konventionen und Vorgaben für die Bestimmung der Pegel vereinbart werden.

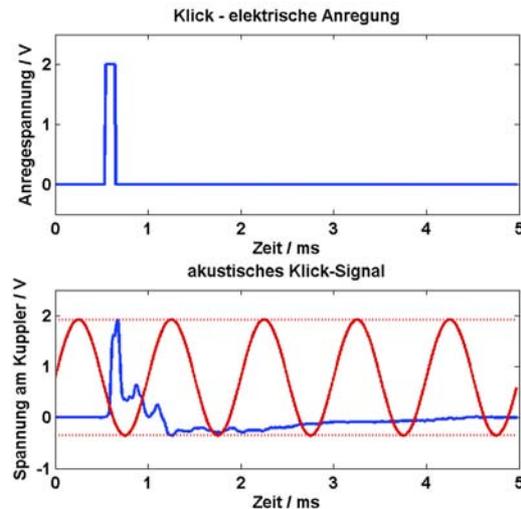


Bild 2:

Elektrisches Klick-Signal ($t = 100 \mu\text{s}$, oben) und korrespondierendes akustisches Signal, gemessen an einem Kopfhörer HDA 200 mit sinusförmigem Langzeit-Signal ($f = 1 \text{ kHz}$) zur Bestimmung der äquivalenten Spitze-Tal-Amplitude des Hörsignals (unten).

In Bild 2 wird am Beispiel eines Referenz-Impulses (Klick) gezeigt, wie das elektrische Anregesignal durch den Schallwandler verändert wird. Für ein in der täglichen Messpraxis geeignetes Kalibrierverfahren wird der äquivalente Spitze-Tal-Schalldruckpegel (peak-to-peak equivalent sound pressure level – peSPL) eingeführt. Auf diese Weise kann mit kostengünstigen Messmitteln (z. B. einem Oszilloskop und einem einfachen Schallpegelmesser) kalibriert werden. Verwendet wird ein sinusförmiges Signal mit der gleichen Differenz zwischen dem positiven und negativen Extremwert wie sie bei dem am Kuppler gemessenen Kurzzeit-Signal vorliegt (Bild 2 unten). Für Klicks sollte dieses Signal eine Frequenz von 1 kHz haben. Bei der Messung an Kurztönen (Ton-Bursts) sollte die Frequenz mit der Grundfrequenz des Kurztones übereinstimmen.

In Vorbereitung der internationalen Normung der Bezugs-Schwellen von Kurzzeit-Signalen wurden an Referenz-Klicks entsprechend IEC 60645-3 [2] die Reproduzierbarkeit der Messungen sowie die Abhängigkeit der Bezugs-Schwellen von der Polarität, der Dauer und der Wiederholfrequenz der Klicks untersucht [6].

Mit einer Standardabweichung von 0,9 dB liegt die Reproduzierbarkeit im gleichen Bereich wie für die rechnergesteuerte Schwellenmessung von reinen Tönen der Frequenz von 1000 Hz. Es konnten auch keine relevanten Unterschiede in den gemessenen Schwellen hinsichtlich der Dauer und der Polarität des elektrischen Anregesignals und damit der Ausbildung der Anfangsdruckwelle als Druck- oder Sog-Signal festgestellt werden.

Von großer Bedeutung, vor allem in Hinblick auf die Untersuchung stationärer auditorisch evozierter Potenziale (ASSR), ist die Abhängigkeit der gemessenen Bezugs-Schwellen von der Wiederholfrequenz der Klicks. In einer an der PTB durchgeführten Studie wurden die

subjektiven Hörschwellen für Klicks mit zwei Audiometrikopfhörern bei Wiederholraten von 10 Hz bis 100 Hz gemessen. Es zeigte sich für beide Hörer ein nahezu linearer Abfall der Bezugs-Schwelle mit steigender Wiederholfrequenz in der Größenordnung von $-0,7$ dB pro 10 Hz. Für vergleichende Messungen ist damit die Einhaltung einer vorgegebenen Wiederholrate unbedingt erforderlich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bestimmung von Bezugsschwellen für bereits im Einsatz befindliche und zukünftige Kombinationen aus Schwallwandlern und Kurzzeit-Signalformen unter Einbeziehung der gesamten Mess- und Kalibrierkette ermöglicht eine metrologisch abgesicherte Kalibrierung von bestehenden und neuartigen Geräten für die objektive Audiometrie. Der Einsatz von neuen Testsignalen verspricht in der Zukunft eine erhebliche Kosteneinsparung bei gleichem Untersuchungsumfang und begünstigt damit z. B. die flächendeckende Durchführung des Neugeborenen-Hörscreenings in Deutschland. Gleichzeitig ist eine Erweiterung der Diagnosemöglichkeiten in der praktischen Anwendung zu erwarten.

Die Ergebnisse der in der PTB durchgeführten Untersuchungen zu den Bezugsschwellen von bereits bestehenden Kurzzeit-Signalformen [7] sind bereits in die internationale Normung eingeflossen und werden zukünftig für neue Audiometriesignale von den Normungsgremien (z. B. ISO TC 43 / WG 1) zum Anschluss an die subjektive Audiometrie gefordert.

Literatur

- [1] R. Mühler, M. Ziese, H. von Specht: Registrierung von Auditory Steady-State Responses (ASSR) mit Laborsystemen. *Z Audiol* 2005; 44 (1): 20–30
- [2] IEC 60645-3, Audiometers – Part 3: Auditory test signals of short duration for audiometric and neuro-otological purposes.
- [3] ISO 389-3, Reference zero for the calibration of audiometric equipment: Part 3: Reference equivalent threshold force levels for pure tones and bone vibrators.
- [4] ISO 8253-1, Acoustics – Audiometric test methods – Part 1: Basic pure tone air and bone conduction threshold audiometry.
- [5] DIN EN 60645-1 Akustik – Audiometer – Teil 1: Reinton-Audiometer.
- [6] U. Richter, T. Fedtke: Reference Zero for the Calibration of Audiometric Equipment using “Clicks” as Test Signals. *Int Journ of Audiol* 2005; 44: 478–87.
- [7] ISO/FDIS 389-6:2006, Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 6: Reference hearing threshold levels for test signals of short duration.

Schallstrahlungskraft und Interferometrie: Die Primärnormale im Ultraschall

Klaus Beissner¹, Christian Koch²

1 Einleitung

Ultraschall wird in sehr vielen Bereichen in Medizin, Technik und Alltag eingesetzt. Am meisten bekannt ist natürlich die millionenfache Anwendung zur medizinischen Diagnose in allen Fachrichtungen, aber auch Ultraschallmethoden wie Reinigen, Sonochemie oder Werkstoffinspektion haben eine weite Verbreitung gefunden. Eine quantitative Analyse des Schallfeldes ist in allen Bereichen ein wesentlicher Schlüssel zur Beurteilung der Prozesse. Während bei medizinischen Anwendungen Fragen der Patienten- und Diagnosesicherheit oder der Abbildungsqualität im Vordergrund stehen, spielen bei technischen Anwendungen vor allem Prozessbeschreibung und -optimierung eine wesentliche Rolle. Eine solche quantitative Beurteilung ist ohne Messungen nicht möglich, die wiederum das Vorhandensein eines Normals für eine Einheit der Messgröße voraussetzen. Im Ultraschall sind die beiden wesentlichen Messgrößen die Ultraschallleistung (Einheit Watt) und der Schallwechseldruck (Einheit Pascal), für die beide ein primäres Darstellungsverfahren, jeweils in Wasser, an der PTB realisiert wird. Diese beiden Normale sollen in diesem Beitrag näher vorgestellt werden.

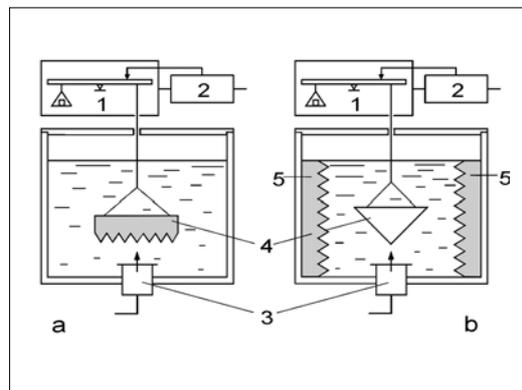
2 Ultraschallleistung

Die Ultraschallleistung ist die insgesamt vom Sendewandler je Zeiteinheit abgegebene Schallenergie. Es interessiert im allgemeinen der Zeitmittelwert. Die Ultraschallleistung ist im Gegensatz zu dem mit einem Hydrophon gemessenen Schalldruck (siehe unten) ein Integralwert, der über örtliche und zeitliche Strukturen hinwegmittelt.

Um diese Größe auf höchstem metrologischem Niveau zu messen, bedient man sich eines speziellen physikalischen Effektes, der so genannten Schallstrahlungskraft oder Schallfeldkraft. Die Ultraschallwelle übt, wie auch andere Wellenarten in der Physik, auf ein Hindernis eine im Zeitmittel vorhandene Kraft aus. Diese wird gemessen und mit Hilfe von theoretisch abgeleiteten Formeln in die Ultraschallleistung

umgerechnet. Diese Formeln folgen den üblichen Energie-Impuls-Beziehungen der Physik, unterliegen aber der Einschränkung, dass die lokale Richtung der Kraftwirkung auf das Hindernis von der lokalen Feldstruktur abhängt und mehr oder weniger stark von der Richtung der Kraftmesseinrichtung abweichen kann. Deshalb ist das Verfahren nur bei hinreichend gut gebündelten Feldern anwendbar, wie sie im Falle der Felder von medizinischen Ultraschallgeräten ab etwa 1 MHz im allgemeinen vorliegen.

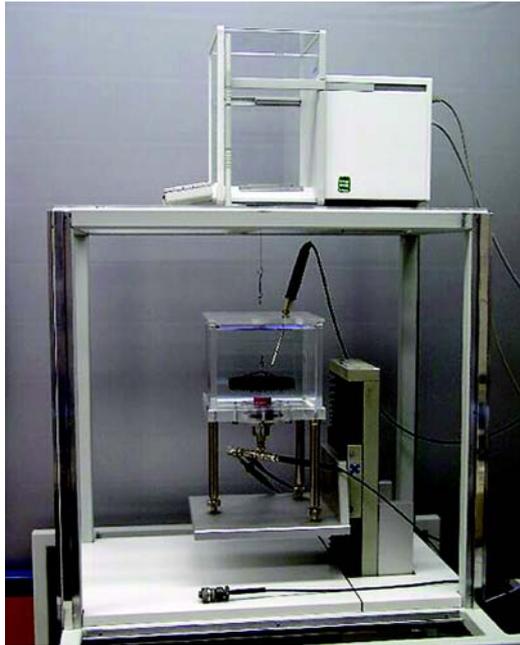
Entsprechend ihrer Größenordnung werden Schallstrahlungskräfte meistens mit einer elektronischen Mikro- oder Halbmikrowaage gemessen. Die Rückführung auf die mechanischen Grundeinheiten erfolgt über kalibrierte Gewichtstücke und den bekannten Wert der Fallbeschleunigung g . Das künstlich eingebrachte Hindernis, an dem die Kraft angreifen soll, wird als Target bezeichnet. Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen experimentellen Anordnungen von Ultraschallwandler, Target und Waage. Bild 1 ist eine schematische Darstellung der in der Literatur so genannten Anordnung A, die in der PTB als primäres Normal verwendet wird. Hierbei wird der Ultraschall senkrecht von unten nach oben emittiert, und das Target hängt im Sinne einer Unterflurwägung mit einem dünnen Draht an der Waage. Die Schallstrahlungskraft ergibt sich aus der Differenz der Waagenanzeige mit und ohne Ultraschall. Als Target finden möglichst ideale Absorber oder Reflektoren Verwendung, beide Fälle sind in Bild 1 alternativ dargestellt. Tatsächlich vor-



- ¹ Dr. Klaus Beissner,
Senior Scientist 1.60
E-Mail:
klaus.beissner@ptb.de
- ² Dr. Christian Koch,
Leiter des PTB-
Fachbereichs
„Schall“
E-Mail:
christian.koch@ptb.de

Bild 1:
Schematische Darstellung der primären PTB-Schallstrahlungskraftwaage mit absorbierendem (a) bzw. reflektierendem (b) Target.
1: Waage
2: Waagenelektronik
3: Ultraschallwandler
4: Target
5: seitliche Absorber.

Bild 2:
Primäre PTB-Schallstrahlungskraftwaage zur Messung der Ultraschalleistung.

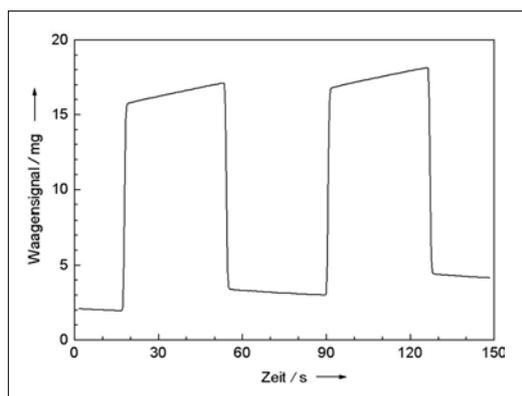


kommende Abweichungen vom ideal absorbierenden oder reflektierenden Targetverhalten müssen bekannt sein und gehen in Korrekturen bzw. in die Unsicherheitsermittlung ein.

Bild 2 zeigt die praktische Realisierung der PTB-Schallstrahlungskraftwaage, hier mit absorbierendem Target. Das wassergefüllte Messgefäß, in das auch ein Temperaturfühler eintaucht, steht auf einer Plattform, die mit Spindel und Schrittmotor vertikal verschiebbar ist. Dadurch lässt sich der Abstand zwischen Wandler und Target kontrolliert verändern. Der zu messende Ultraschallwandler ist in den Boden des Gefäßes eingebaut. Die HF-Anregungsspannung wird über ein Kabel herangeführt und muss auch gemessen werden; dazu gibt es mindestens zwei weitere Anschlüsse. Gegen störende Umwelteinflüsse schützen eine äußere Windabschirmung und der Aufbau auf einem schwingungsgedämpften optischen Tisch (hier nicht sichtbar). Die Apparatur ist computergesteuert.

Bild 3 zeigt ein Beispiel einer Schallstrahlungskraft-Messung, nämlich das Waagensignal

Bild 3:
Beispiel einer Schallstrahlungskraft-Messung mit absorbierendem Target: Waagensignal, d. h. von der Waage an den Computer gemeldetes Wäageergebnis, als Funktion der Zeit. Das Waagensignal ist invertiert und auf einen willkürlich gewählten Tarawert bezogen.



als Funktion der Zeit bei zweimaligem Ein- und Ausschalten des Wandlers mit einem Zeitabstand von jeweils etwa 36 Sekunden. Das Waagensignal ist zwischen den Schaltvorgängen nicht konstant, dies liegt an der Erwärmung des absorbierenden Targets bei Beschallung und der Abkühlung danach. Deshalb wird das Waagensignal vom Computer jeweils auf den Schaltzeitpunkt vor- bzw. zurückextrapoliert, und die Schallstrahlungskraft wird aus der Sprunghöhe berechnet. Die Ultraschalleistung ergibt sich in diesem Beispiel zu etwa 200 mW. Bei wesentlich kleineren Leistungen spielen die endliche Waageauflösung und der unvermeidliche Streuuntergrund des Waagensignals eine Rolle, deshalb werden bei der Computerauswertung Ausgleichsalgorithmen angewandt.

Die erreichbare Messgenauigkeit hängt von den Messparametern ab, insbesondere von der Frequenz. Die erweiterte Messunsicherheit (Erweiterungsfaktor $k = 2$) der Ultraschalleistung in der PTB beträgt bei Frequenzen von 1 MHz bis 5 MHz etwa 3 % und steigt z. B. bis 11 MHz auf etwa 5 %. Damit ist dieses Messverfahren, zumindest im genannten Frequenzbereich, das genaueste der Ultraschall-exposimetrie (siehe Beitrag zu diesem Thema in diesem Heft). Die weltweite Übereinstimmung von Ultraschallleistungsmessungen wurde in einem CIPM-Key-Comparison unter PTB-Führung erfolgreich nachgewiesen [1].

3 Hydrophonkalibrierung

Im Gegensatz zur Schallstrahlungskraft wird der Schalldruck lokal an einem möglichst kleinen Messort bestimmt. Damit ist es möglich, ein Schallfeld in seiner räumlichen Ausdehnung zu beschreiben und zum Beispiel lokale Maxima oder Minima zu ermitteln. Dies ist vor allem bei der Untersuchung medizinischer Ultraschallfelder wichtig, da lokale starke Maxima z. B. lokale Wirkungen bzw. Schädigungen hervorrufen können. Gemessen wird der Schalldruck dabei mit einem – möglichst kleinen – Hydrophon, das den Schalldruck in ein elektrisch messbares Signal umsetzt. Die meisten Hydrophone beruhen auf dem piezoelektrischen Effekt, bei dem ein piezoelektrischer Probekörper dem Schallfeld ausgesetzt wird und die induzierte Ladung bzw. Spannung gemessen wird. Darüberhinaus werden aber auch optische Methoden eingesetzt, z. B. bei faseroptischen Sensoren.

Eine primäre Kalibrieranordnung für Hydrophone muss einen Anschluss der Einheit 1 Pa Schallwechseldruck an das SI-System ermöglichen. An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, die nach dem Einheitengesetz für die Darstellung der physikalischen Einheiten zuständig ist, wird dieser Zusammenhang mit Hilfe eines Interferometers hergestellt [2]. Da ein

Interferometer eine Auslenkung bestimmt, bezieht es sich auf die Grundeinheit 1 m. Da gleichzeitig die Ultraschallfrequenz gemessen und verarbeitet wird, ist auch der Bezug zur Sekunde vorhanden. Die Bilder 4 und 5 zeigen den Aufbau des PTB-Interferometers. Ein Wandler beschallt eine auf der Wasseroberfläche eines gefüllten Tanks montierte dünne Folie (Dicke $2\ \mu\text{m}$), die zur Erhöhung des optischen Reflexionsfaktors mit Aluminium beschichtet ist. Diese Folie folgt der Auslenkung des Schallfeldes, die von einem Michelsoninterferometer gemessen wird. Dabei stellt ein Regelkreis am Spiegel die Quadraturposition immer wieder ein. Das Messsignal wird in einem Computer gespeichert und bearbeitet, da insbesondere Korrekturen für die räumliche Mittelung des Schallfeldes, akustische Vielfachreflexionen in der Folie und die Übertragungsfunktion der Photodiode berechnet werden müssen. Für die Ermittlung des Schallwechseldrucks wird angenommen, dass am Messort eine ebene Schallwelle vorliegt. Dann lässt sich der Schalldruck aus der zeitlichen Ableitung der ermittelten Auslenkung multipliziert mit der Impedanz ρc , wobei ρ die Dichte und c die Schallgeschwindigkeit des Tankmediums sind, bestimmen. Die Näherung der ebenen Welle ist stets gut erfüllt, da fokussierende Wandler im Fokusbereich oder ebene Wandler im Fernfeld genutzt werden.

Nach der interferometrischen Messung wird der optische Aufbau entfernt, Wasser aufgefüllt und die Messung unter vollkommen gleichen Bedingungen mit einem Hydrophon wiederholt. Nach Korrektur der elektrischen Last, die durch den Verstärker erzeugt wird, erhält man durch Vergleich den Übertragungsfaktor M des Hydrophons in V/Pa .

Dieses Verfahren wird in der PTB im Frequenzbereich von 200 kHz bis ca. 75 MHz angewandt. In Bild 6 ist ein Beispiel für eine Messung bis 40 MHz dargestellt. Kalibriert wurde ein coplanares Membranhydrophon mit einer Foliendicke von $25\ \mu\text{m}$. Man erkennt den Anstieg der Empfindlichkeit bis etwa 38 MHz um ca. 6 dB auf Grund der Dickenresonanz der Folie, die bei ca. 40 MHz auftritt. Durchgeführt wurden drei unabhängige Messungen, die gemittelt wurden, um statistische Fluktuationen zu verringern.

Die Messunsicherheiten sind in Bild 6 als Unsicherheitsbalken mit Erweiterungsfaktor $k = 2$ angegeben. Sie betragen allgemein für das interferometrische Verfahren - je nach Frequenz und Hydrophon - zwischen 7 % und 15 % (entspricht ca. 0,6 und 1,3 dB). Hauptbeiträge sind hierbei das begrenzte Signal-Rausch-Verhältnis der einzelnen Messungen, Unsicherheiten bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren und die begrenzte Wiederholgenauigkeit der Hydro-

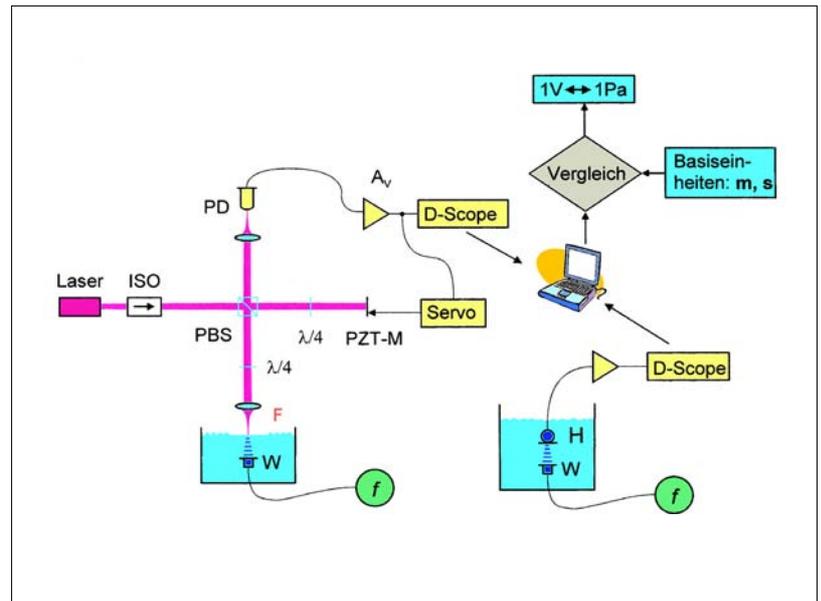


Bild 4:

Aufbau primäre Hydrophonkalibrierung: W: Wandler, H: Hydrophon, ISO: optischer Isolator, PBS: Polarisierender Strahlteiler, PD: Photodiode, A_V : Verstärker, PZT-M: Regelungsspiegel, $\lambda/4$: Polarisationsplatte, f : Generator.

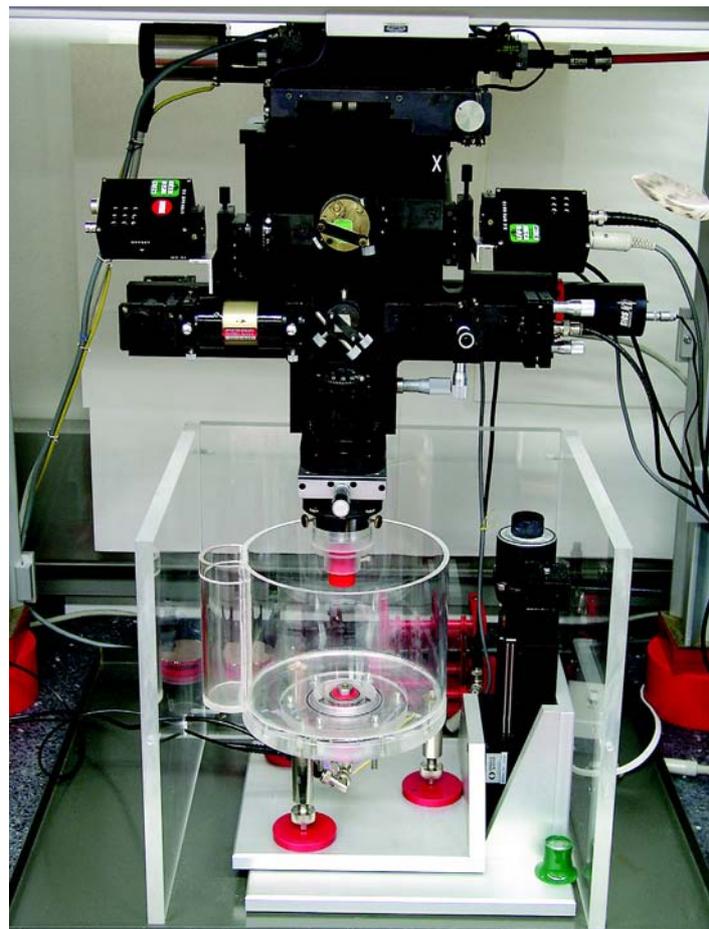


Bild 5:

Fotografie des Interferometers, der Laser befindet sich auf der Rückseite, die Folie an der Unterseite des roten Tubus im unteren Drittel des Bildes.

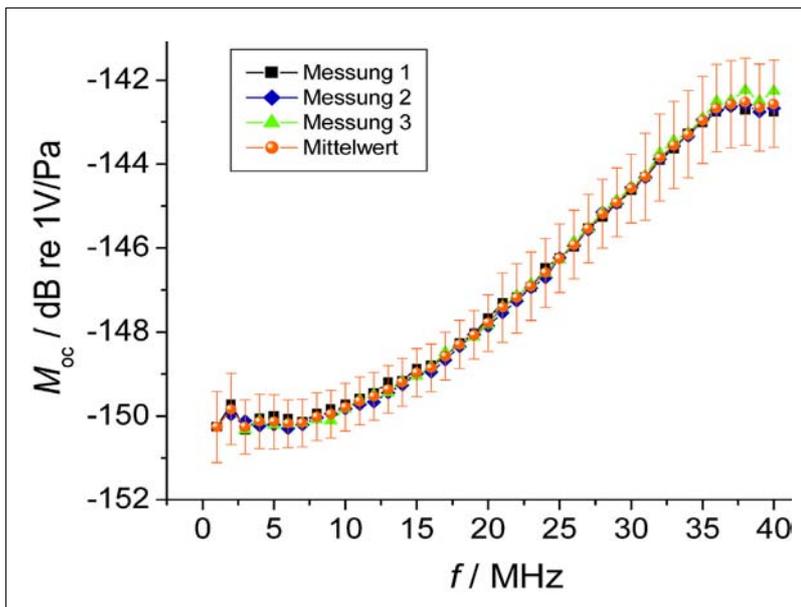


Bild 6:
Beispiel für ein Kalibrierergebnis der interferometrischen Kalibrierung: coplanares Membranhydrophon mit 25 µm Foliendicke.

phonmessung, da das Schallfeld nach Möglichkeit exakt gleich zur Interferometermessung eingestellt werden muss. Den größten Beitrag liefert jedoch die Kalibrierung der Photodioden, die extrem breitbandig sein muss und für die bisher kein wirklich befriedigendes Verfahren gefunden wurde. Auch deshalb sind die Unsicherheitsbeiträge bei der Hydrophonkalibrierung deutlich höher als bei der Bestimmung der Ultraschalleistung oder gar der – verwandten – Mikrofonkalibrierung. Hier besteht in der Zukunft Forschungsbedarf, insbesondere auch

deshalb, weil eine Erweiterung der Kalibrierverfahren bis über 100 MHz hinaus notwendig ist [3]. Treibende Kraft sind hier die Tendenzen zu höheren Anwendungsfrequenzen und nicht-linearen Verfahren vor allem im diagnostischen Ultraschall.

Das interferometrische Verfahren ist zwar in einem sehr breiten Frequenzbereich einsetzbar dabei aber so aufwändig, dass Kalibrierungen für externe Kunden nicht wirtschaftlich durchgeführt werden können. Deshalb wird die Weitergabe der Einheit 1 Pa nur mit Hilfe von Substitutionsverfahren realisiert (siehe Beitrag zur Exposimetrie in diesem Heft). Dabei wird ein zu testendes Hydrophon mit einem zuvor am Interferometer primär kalibrierten Normalhydrophon verglichen. Diese Messung lässt sich sehr viel schneller durchführen und auf deren Basis kann in der PTB ein effektiver Kalibrierservice für alle Anwender von Hydrophonen zur Verfügung gestellt werden.

Literatur

- [1] K. Beissner: Report on key comparison CCAUV.U-K1 (ultrasonic power), *Metrologia* **39** (2002), Tech. Suppl. 09001, www.iop.org/EJ/toc/0026-1394/39/1A.
- [2] Ch. Koch, W. Molkenstruck: Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 - 70 MHz using optical interferometry, *IEEE Trans. UFFC*, **46** (1999), 1303–1314.
- [3] V. Wilkens, C. Koch: Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone, *J. Acoust. Soc. Am* **115** (2004), 2892–2903.

Megapascal und Milliwatt – Ultraschalllexposimetrie im Dienste der Patientensicherheit

Volker Wilkens*

1 Einleitung

Ultraschall hat sich zu einem der wichtigsten bildgebenden Verfahren in der medizinischen Diagnostik entwickelt. Durch die stetige Verbesserung und Erweiterung der Ultraschalltechnik, der Bildgebungsverfahren, der Bildauswertung und der Bilddarstellung kommen die kompakten und vielseitigen Geräte heute in fast allen medizinischen Fachdisziplinen effizient zum Einsatz.

Die Vermessung der Schallabgabe von medizinischen Ultraschallgeräten ist wichtig im Hinblick auf die Wahrung der Patientensicherheit. So kann zwar die Sonographie im allgemeinen als besonders schonendes Bildgebungsverfahren angesehen werden, aber es gibt dennoch Gefährdungspotentiale aufgrund der thermischen und mechanischen Wirkungen des Ultraschalls im menschlichen Körper, wenn die natürlichen Toleranzbereiche überschritten werden. Desweiteren entstehen in Verbindung mit dem Einsatz von Ultraschallkontrastmitteln Bildgebungstechniken, die eine ganz bestimmte Dosierung des Ultraschalls erfordern, um die gewünschte diagnostische Information zu liefern. Die für Sicherheit und Qualitätssicherung relevanten akustischen Parameter hängen dabei von einer Vielzahl von möglichen Betriebsarten und Einstellungen am Sonographiegerät ab. Die Deklaration und Anzeige der Schallfeldparameter für diagnostische Ultraschallgeräte ist in IEC Normen (IEC 61157, IEC 60601-2-37) [1, 2], dem sogenannten Output Display Standard [3] und den US-amerikanischen FDA Kriterien [4] geregelt. Auch für therapeutische Anwendungen von Ultraschall gibt es international verwendete Regeln zum Schutze der Patienten, wie z. B. die Prüfung von Physiotherapie-Geräten nach IEC 61689 [5], die die Applikation zu starker und zu inhomogener Schallfelder verhindern soll.

2 Messgrößen und Messverfahren

Die wichtigsten Schallfeldparameter im Bereich des medizinischen Ultraschalls sind:

1. die insgesamt im Zeitmittel emittierte akustische Leistung,
2. der zeitliche Verlauf des Schallwechseldrucks mit maximalem Über- und Unterdruck und Arbeitsfrequenz,
3. die lokale zeitlich gemittelte Ultraschallintensität und
4. die geometrischen Schallbündelabmessungen.

Die von einem Ultraschallwandler im Zeitmittel insgesamt emittierte akustische Leistung (1.) ist eine sicherheitsrelevante Kenngröße vor allem bezüglich der thermischen Wirkung des Ultraschalls. Die Messmethode der Wahl ist die Schallstrahlungskraftmethode. Zur Messung wird das Ultraschallbündel in Wasser auf einen geeigneten gewählten Absorber gerichtet und die wirkende Kraft mit einer Waage gemessen (s. a. Beitrag über die Primärnormale im Ultraschall in dieser Ausgabe). Mit Hilfe theoretischer Ausdrücke wird daraus die Ultraschalleistung berechnet. In der PTB werden auf diese Weise Messungen durchgeführt, sowohl unmittelbar an medizinischen Ultraschallgeräten als auch an Referenzwandlern, die an Interessenten ausgeliehen werden und so der Weitergabe der Einheit der Ultraschalleistung dienen. Weiterhin können kommerzielle Ultraschallwattmeter kalibriert werden.

Für die weiteren Messgrößen im Rahmen der Ultraschalllexposimetrie (2. bis 4.) sind Messungen mit lokaler Auflösung notwendig. Mithilfe von piezoelektrischen Hydrophonen wird dazu das in Wasser emittierte Schallfeld abgerastert (Bild 1). Dabei werden zunächst die zeit-

* Dr. Volker Wilkens,
Leiter der PTB-
Arbeitsgruppe „Ultra-
schall“, E-Mail:
volker.wilkens@ptb.de



Bild 1:
Messplatz zur Bestimmung der Schallabgabe von medizinischen Ultraschallgeräten mithilfe von Hydrophonen.

lichen Schallwechseldruckverläufe gemessen, die vor allem bezüglich der mechanischen Wirkung des Ultraschalls sicherheitsrelevant sind. Weiterhin werden aber auch lokale Intensitätswerte und Schallbündelabmessungen aus den Hydrophonmessungen abgeleitet, die wiederum zur Beurteilung des thermischen Gefährdungspotentials herangezogen werden.

3 Hydrophonkalibrierung

Für quantitative Messungen ist eine individuelle Kalibrierung des verwendeten Hydrophons notwendig. Die primäre Hydrophonkalibrierung erfolgt in der PTB in einer laseroptischen, interferometrischen Anordnung (s. a. Beitrag über die Primärnormale im Ultraschall in dieser Ausgabe).

Zur Kalibrierung von Gebrauchshydrophonen und zur Weitergabe der Schallwechseldruckeinheit werden sekundäre Hydrophonkalibrierverfahren eingesetzt. Bei der Time-Delay-Spektrometrie wird eine Ultraschallwelle mit zeitlich durchgestimmter Frequenz nacheinander zunächst mit einem primär kalibrierten Normalhydrophon und dann mit dem zu kalibrierenden Hydrophon vermessen. Durch diesen Vergleich erhält man eine quasi-frequenzkontinuierliche Übertragungsfunktion, wobei in der PTB zurzeit Kalibrierungen im Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 40 MHz auf diese Weise für Kunden durchgeführt werden können.

Ein weiteres sekundäres Hydrophonkalibrierverfahren verwendet als Referenz ein optisches Interferenzschichthydrophon, das eine extrem große Bandbreite mit konstantem Übertragungsfaktor aufweist (0,5 MHz bis mind. 75 MHz) [6]. Bei diesem Verfahren werden kurze, durch nichtlineare Schallausbreitung stark aufgestellte Impulse gemessen. Durch numerische Fouriertransformation wird die Information im Frequenzbereich erhalten und mit verhältnismäßig einfachen Mitteln kann die Übertragungsfunktion eines zu kalibrierenden Hydrophons in Betrag und Phase bestimmt werden [7]. Diese Daten können anschließend zur zukünftig auch normativ so beschriebenen korrekten Messung breitbandiger Ultraschallimpulse bzw. deren nachträglicher numerischer Entfaltung verwendet werden. Der Einfluß des nicht idealen Messinstrumentes auf die erhaltenen Impulsparameter wie maximaler Über- und Unterdruck kann auf diese Weise minimiert und die Qualität von Deklarationen verbessert werden (Bild 2).

4 Sensorentwicklung

Neben der Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens durch den Betrieb der Normalmess-einrichtungen und die Weitergabe der dargestellten Einheiten durch Kalibrierungen und ne-

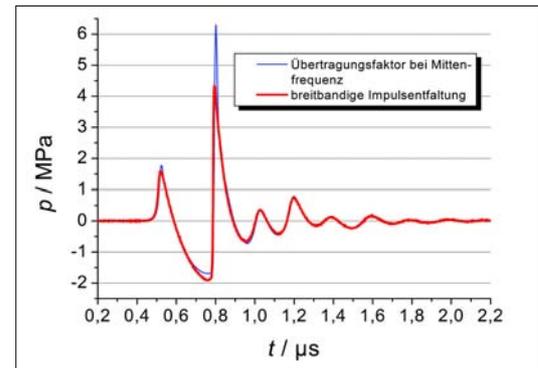


Bild 2:

Beispiel für einen Impuls eines Sonographiegerätes. Auswertung des Spannungssignals eines breitbandigen Nadelhydrophons nach konventionellem Verfahren (blau) und mit breitbandiger Entfaltung (rot).

ben der Durchführung von Prüfmessungen ist auch die Entwicklung von Sensoren und Messverfahren eine grundlegende metrologische Aufgabe der PTB. Zum einen ist dies notwendig, um die Kalibrierverfahren den steigenden Anforderungen entsprechend weiter zu entwickeln und die Qualität der erzielbaren Messergebnisse zu erhöhen. Zum anderen wird aber durch die Entwicklung alternativer Methoden auch versucht, den notwendigen Prüfaufwand zum Zwecke der Kostenreduktion zu vermindern. Im folgenden werden beispielhaft zwei verschiedene Sensorentwicklungen beschrieben.

4.1 Breitbandige Referenzhydrophone

Obwohl zunehmend optische Techniken als Referenzmessverfahren für die Ultraschallkalibrierung eingesetzt werden, sind Membranhydrophone dennoch als Sekundärnormale unverzichtbar. Die weltweit in mehreren Laboratorien seit Anfang der 1980er Jahre eingesetzten Hydrophone müssen jedoch nach und nach ersetzt werden. Um die verschiedenen Hydrophonkalibrierverfahren in der PTB insbesondere im Hinblick auf die Ausweitung der Frequenzbereiche und die Erweiterung auf komplexwertige Kalibrierdaten untereinander und auch international mit Verfahren anderer Metrologieinstitute vergleichen zu können, werden außerdem besonders breitbandige Hydrophone mit geringem Empfängerdurchmesser benötigt. Die zurzeit kommerziell erhältlichen Membranhydrophone sind aber kaum als Sekundärnormal für Frequenzen oberhalb von 40 MHz geeignet.

Vor diesem Hintergrund wurden spezielle Referenz-Membranhydrophone konstruiert und hergestellt (Bild 3). Das Ziel der Entwicklung war dabei, das anerkannte Sensordesign unter Verwendung hochwertiger elektronischer Bauteile in möglichst einfacher Form umzusetzen. Durch die Verwendung einer sehr dünnen piezoelektrischen Folie (Dicke: 9 µm) ohne zusätzliche Schutzschichten zusammen mit einer

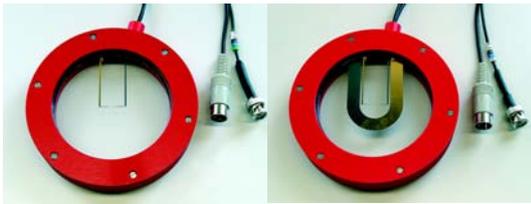


Bild 3:
PTB-Breitband-Membranhydrophone mit 9 µm Folie und 200 µm Empfängerdurchmesser.

besonders breitbandigen Differenzverstärker-elektronik konnte ein deutlich größerer nutzbarer Frequenzbereich als bei kommerziell erhältlichen Hydrophonen realisiert werden [8]. So ist der Frequenzgang bis 40 MHz extrem glatt, die Dickenresonanz liegt bei etwa 105 MHz, und es deutet sich eine nutzbare Bandbreite bis über 140 MHz an (Bild 4). Allerdings sind bislang Kalibrierdaten oberhalb von 70 MHz noch nicht primär rückführbar. Gerade für die Erweiterung und Verifikation der Kalibrierverfahren steht aber nun ein wichtiges Hilfsmittel bereit.

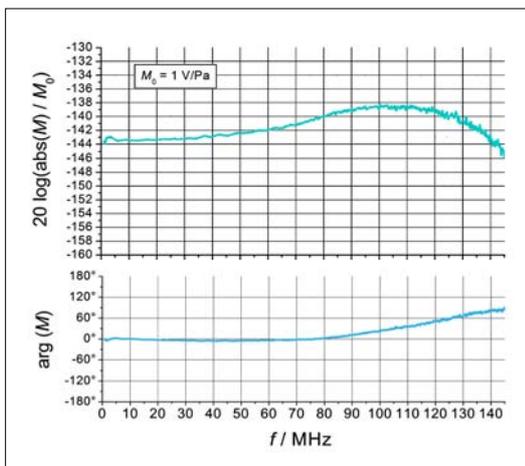


Bild 4:
Komplexwertiger Frequenzgang eines PTB-Breitband-Membranhydrophons.

4.2 Thermoakustische Sensoren

Räumlich maximale zeitlich gemittelte Schallintensitäten von diagnostischen Ultraschallgeräten werden wie bereits beschrieben bislang aus Hydrophonmessungen abgeleitet. Im Falle moderner Sonographiegeräte mit ihren vielfachen Bildgebungsmodi sind die notwendigen Messungen sehr schwierig, zeitintensiv und teuer. Ein großer Aufwand ist erforderlich, um die notwendige Synchronisation des Messsystems mit allen am Messort auftretenden Ultraschallimpulsen zu realisieren und um dann die Betriebszustände mit den höchsten Intensitäten zu ermitteln. In der PTB neu entwickelte thermoakustischen Sensoren stellen hier eine sehr einfache und kostengünstige Alternative dar. Die Einbeziehung aller zur Gesamtintensität

beitragenden Schallereignisse und die zeitliche Mittelung werden hier inhärent vom Sensor geleistet. Die komplizierte Synchronisation und Informationen über zeitliche Impulsfolgemuster sind nicht mehr notwendig. Die Messtechnik basiert auf der Umwandlung der einfallenden Schallenergie in Wärme im Innern eines kleinen zylindrischen Absorbers (Bild 5). Aus der mittels eines kleinen Thermofühlers auf der Rückseite des Absorbers gemessenen Temperaturerhöhung kann die über dem Absorberquerschnitt gemittelte Ultraschallintensität bestimmt werden, wenn der Temperatur-Intensitätsübertragungsfaktor in Abhängigkeit von der Ultraschallfrequenz aus vorangegangenen Kalibriermessungen bekannt ist [9].

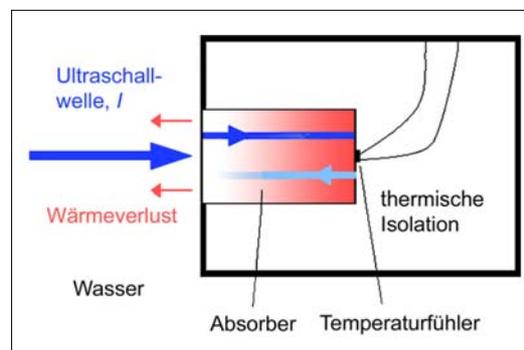


Bild 5:
Prinzip des thermoakustischen Ultraschallsensors zur Bestimmung lokaler zeitlich gemittelter Intensitäten.

Der kalibrierte Sensor kann anschließend zur Bestimmung von Ausgangsintensitäten an Sonographiegeräten eingesetzt werden. In Bild 6 sind Ergebnisse von Messungen im Pulsdoppler-Betrieb dargestellt, bei dem erfahrungsgemäß die stärksten zeitlich gemittelten Intensitäten entstehen. Dargestellt sind die Temperaturmesskurven eines Sensors mit 1 mm Durchmesser im Fokus des Schallfeldes eines konvexen 3,5 MHz Arrayschallkopfes für unterschiedliche Einstellungen der Ausgangsleistung (– 0 dB, – 3 dB, – 6 dB und – 9 dB) und variiertes Impulswiederholrate PRF. Solche Messungen können auf schnelle Weise zeigen, bei welchen Einstellungen des Sonographiegerätes die zu deklarieren-

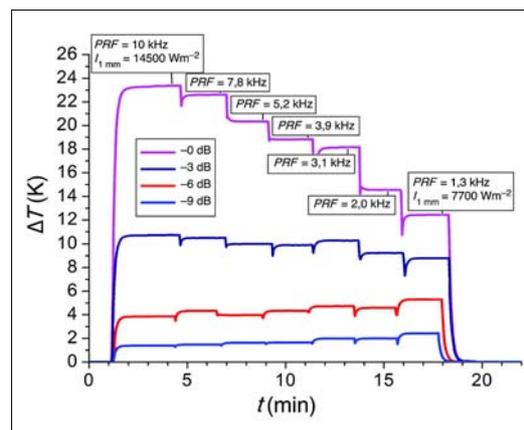


Bild 6:
Variation der zur Intensität proportionalen Temperaturerhöhung im Sensor bei verschiedenen Einstellungen der Impulswiederholrate PRF und vier unterschiedlichen Sendeleistungseinstellungen am Diagnostikgerät.

den maximalen zeitlich gemittelten Intensitäten entstehen. In diesem Beispiel ist dies für -0 dB und $PRF = 10$ kHz der Fall. Auch kann man hier beobachten, dass die Intensität nicht in dem aufgrund der Verminderung der Impulswiederholrate erwarteten Maße abnimmt. (Die Intensität bei $PRF = 1,3$ kHz beträgt etwa die Hälfte des Wertes bei 10 kHz anstelle des $0,13$ -fachen.) Dieser Effekt entsteht durch eine automatische Amplitudenerhöhung des Diagnosegerätes bei Reduktion der PRF . Bei der Ausgangsleistung -3 dB führt diese Regelung zu einer nahezu gleichbleibenden Intensität bei reduzierter PRF und bei den Einstellungen -6 dB und -9 dB sogar zu einer Überkompensation, so dass der größte Intensitätswert bei der niedrigsten PRF entsteht.

5 Zusammenfassung

Medizinischer Ultraschall ist zur Diagnose und Therapie heute weit verbreitet. Die Vermessung der Schallabgabe von Ultraschallgeräten ist wichtig für die Wahrung der Patientensicherheit und für die Qualitätssicherung.

Im vorliegenden Beitrag wurden die wesentlichen Schallfeldparameter im Bereich der Ultraschall-exposimetrie und die zugehörige Messtechnik beschrieben. Zur Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens betreibt die PTB Normalmesseinrichtungen und führt Kalibrierungen durch. Im Kundenauftrag erfolgen auch Prüfmessungen direkt an medizinischen Geräten. Die Weiterentwicklung von Messverfahren und die Entwicklung von Sensoren dient schließlich dazu, die Kalibrierverfahren zu erweitern, die Qualität der Messungen zu verbessern und, wenn möglich und sinnvoll, den Aufwand für Prüfungen zu vermindern.

Neben den hier genannten grundlegenden Schallfeldparametern werden noch zahlreiche davon abgeleitete Kenngrößen verwendet. Verbreitet sind vor allem Größen mit modellhaft eingerechneter Schallschwächung entlang des Ausbreitungsweges und nicht unumstrittene einheitenlose Indexwerte. Grundsätzlich problematisch ist auch die Tatsache, dass die akustischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums Wasser, in dem alle Messungen aus praktischen Gründen durchgeführt werden, sich deutlich von den komplexen Verhältnissen im menschlichen Gewebe unterscheiden können. Die Diskussion um für die Patientensicherheit möglichst aussagekräftige, aber dennoch hinreichend universelle und praxisgerechte Parameter und Messverfahren ist daher international keineswegs abgeschlossen.

Literatur

- [1] IEC 61157 (1992); Requirements for the declaration of the acoustic output of medical diagnostic ultrasonic equipment.
- [2] IEC 60601-2-37 Amd 2 (2005); Medical electrical equipment – Part 2-37: Particular requirements for the safety of ultrasonic medical diagnostic and monitoring equipment.
- [3] AIUM/NEMA UD-3 (1996); Standard for real-time display of thermal and mechanical acoustic output indices on diagnostic ultrasound equipment.
- [4] Reference to the U.S. Food and Drug Administration homepage URL: <http://www.fda.gov/cdrh/ode/ulstran.pdf>
- [5] IEC 61689 (1996); Ultrasonics – Physiotherapy systems - Performance requirements and methods of measurement in the frequency range $0,5$ MHz to 5 MHz.
- [6] Wilkens, V.: Characterization of an optical multilayer hydrophone with constant frequency response in the range from 1 to 75 MHz, J. Acoust. Soc. Am. **113**, (2003), 3, S. 1431–1438.
- [7] Wilkens, V.; Koch, C.: Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone, J. Acoust. Soc. Am. **115**, (2004), 6, S. 2892–2903.
- [8] Wilkens, V.; Molkenstruck, W.: Broadband Reference PVDF Membrane Hydrophone for Comparisons of Hydrophone Calibration Methods up to 140 MHz, submitted to IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.
- [9] Wilkens, V.: Measurement of output intensities of multiple-mode diagnostic ultrasound systems using thermoacoustic sensors, Proc. 2005 IEEE Ultrason. Symp., Rotterdam, The Netherlands, (2005), S. 1722–1725.

Was geschieht im Reinigungsbad? Quantifizierung von Schallfeldern mit Kavitation

Christian Koch¹, Klaus-Vitold Jenderka²

Einleitung

Der Leistungsschall ist heute aus den vielfältigen Anwendungen zur Reinigung der unterschiedlichsten Bauteile nicht mehr wegzudenken. Trotz des ständig wachsenden Einsatzes ist der Nutzer auf eine empirische Einstellung und Optimierung der Betriebsparameter angewiesen, da keine allgemeingültigen Kriterien zur Beschreibung der Prozesse existieren. Die messtechnische Erfassung des Schallfeldes als Ursache der Kavitationsvorgänge und damit der gewünschten Wirkung bietet die Möglichkeit zur Beschreibung der ablaufenden Prozesse. Die Problematik besteht dabei in der Wahl geeigneter Sensoren, die einerseits den Kavitationsvorgängen widerstehen können und andererseits klein genug sind, um das Schallfeld nicht zu stören. Eine weitere Schwierigkeit ist die Auswertung der stark stochastischen Zeitverläufe durch das Finden geeigneter Parameter zur Beschreibung des Kavitationsfeldes und ihrer Relation zur Reinigungswirkung. Eine Untersuchung, wie Korrelationsrechnungen hierfür eingesetzt werden können, soll im Beitrag vorgestellt werden.

Messaufbau

Die Schallfelduntersuchungen wurden mit einem computergesteuerten Messplatz mit 3-Achsen-Scanner zur Positionierung der Sensoren und digitalem Speicheroszilloskop (TDS 3032B) zur Signalaufzeichnung durchgeführt. Als Sensoren dienten piezoelektrische Hydrophone mit zylindrischem aktivem Element (Reson TC 4038 – Ø 4,2 mm, B&K 8103 – Ø 9,5 mm) und optische Faser-Sensoren (verspiegelte Faserspitzen, eingegossen in Polyurethan-Gummi – Ø 4,0 mm bzw. eingebettet in eine Edelstahlkanüle – Ø 1,0 mm), die mit Hilfe eines Heterodyne-Interferometers ausgelesen wurden [1]. Zur Aufrechterhaltung konstanter Bedingungen während der je nach abgetasteter Fläche und Schrittweite unterschiedlich lang andauernden Messungen wurden spezielle Maßnahmen getroffen um Temperaturschwankungen zu minimieren, die Frequenz zu stabilisieren, den Wasserstand konstant zu halten und die Wasseroberfläche zu beruhigen. Die eingesetzten Sen-

soren zeigten sich über eine Vielzahl von Messungen ausreichend stabil und widerstandsfähig gegenüber den Bedingungen im Ultraschallreinigungsbad.

Die Auswertung der für jede Messposition aufgezeichneten Transienten erfolgte mittels MATLAB. Neben der Amplitude bei der Grundfrequenz wurden die Spitze-Spitze-Amplitude und die Amplitude der ersten Harmonischen, der Sub- und Ultraharmonischen bestimmt. Als weiterer Parameter zur Beschreibung der Kavitation bzw. als Kavitationsanzeiger wurde das über einen festgelegten Frequenzbereich des Spektrums integrierte Amplitudenquadrat des Sensorsignals („Noise power“ – NP [2]) genutzt. Die Berechnung dieses Parameters erfolgte jeweils in einem niedrigen („low“, 100 kHz bis 200 kHz) und einem hohen („high“, 1 MHz bis 1,25 MHz) Frequenzband.

Um den Zusammenhang zwischen spektralen Schallfeldparametern und der erzielten Reinigungswirkung zu beurteilen, müssen diese in Relation zur Kavitationswirkung gesetzt werden. Für eine quantitative Analyse von Prozessen (z. B. Reinigung, Sonochemie) werden in der Praxis viele verschiedene Methoden verwendet, wobei kein Verfahren standardisiert ist [3]. Bei den vorgestellten Untersuchungen kam die Methode der Perforation von Aluminiumfolie zur Anwendung und wurde hinsichtlich der Quantifizierung wesentlich erweitert [4, 5]. Mit Hilfe von Bildverarbeitungstechniken wurden Perforationen und Einbuchtungen detektiert, gewichtet und als räumliche Dichterverteilung der Erosionswirkung quantifiziert. Damit ist es möglich, spektrale Feldparameter mit der Kavitationswirkung in korrespondierenden Ebenen zu korrelieren.

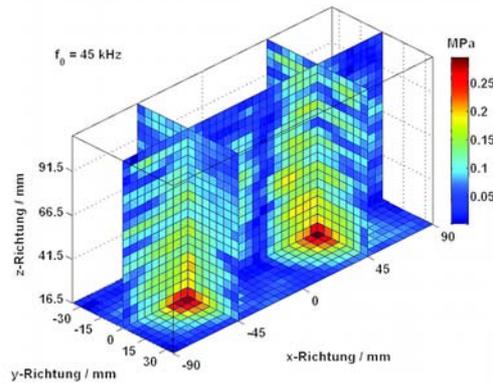
Ergebnisse

In Bild 1 ist ein Beispiel für eine Schallfeldmessung in verschiedenen Ebenen einer Reinigungswanne gezeigt. Die Ebenen wurden dabei so gelegt, dass sie in Quer- und Längsrichtung jeweils durch die Zentren der beiden am Boden der Wanne befindlichen Wandler gehen. Dargestellt ist die Amplitude bei der Grundfrequenz und man erkennt eine charakteristische Stehwellenstruktur.

¹ Dr. Christian Koch,
Leiter des PTB-
Fachbereichs
„Schall“
E-Mail:
christian.koch@ptb.de

² Dr. Klaus-Vitold
Jenderka, PTB-Ar-
beitsgruppe „Medizi-
nische Akustik“,
E-Mail:
klaus-
vitold.jenderka@ptb.de

Bild 1:
Beispiel für eine Schallfeldmessung in einem Reinigungsbad (TI-H-5, Fa. Elma GmbH).



Aus Messungen dieser Art können nun Schallfeldparameter bestimmt werden. In Bild 2 sind für eine waagerechte Ebene im Reinigungsbad die Amplituden bei der Grundfrequenz (Avg f) und die der 2. Harmonischen (Harm), der Sub- und Ultraharmonischen (Subh, Ultrah) dargestellt. Um sie für eine Prozessbeschreibung nutzen zu können, muss ihre Relevanz für eine Einschätzung der Wirkungen der Kavitation untersucht werden. Deshalb wurde mit Hilfe einer Aluminiumfolie die Kavitationswirkung bestimmt [4, 5] und als quantitative zweidimensionale Verteilung ebenfalls in Bild 2 dargestellt. Zunächst erkennt man, dass alle Parameter ähnliche Strukturen aufweisen mit Ausnahme der 2. Harmonischen, die keine sinnvolle Aussage macht. Zur weiteren Analyse wurde eine Korrelationsrechnung durchgeführt (Tabelle 1), die

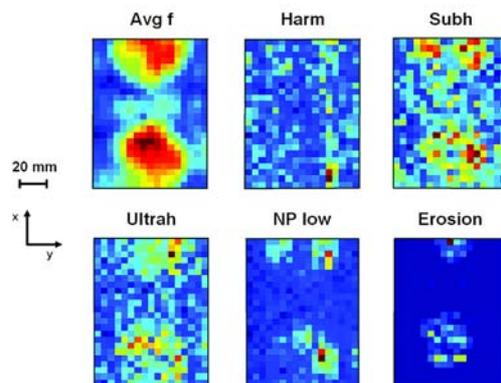


Bild 2:
Schallfeldparameter und Erosionswirkung in einer waagerechten Ebene in einem Reinigungsbad (TI-H-5, Fa. Elma GmbH), Erläuterung Einzelbilder siehe Text.

Tabelle 1:
Korrelationskoeffizienten für Messung in Bild 2, Erläuterung siehe Text.

	Avg f	Harm	Subh	Ultrah	NP high	NP low	Erosion
Avg f	1,0	0,081	0,572	0,695	0,552	0,619	0,472
Harm		1,0	0,172	0,211	0,241	0,238	-0,092
Subh			1,0	0,389	0,643	0,647	0,158
Ultrah				1,0	0,376	0,442	0,207
NP high					1,0	0,953	0,11
NP low						1,0	0,154
Erosion							1,0

Korrelationskoeffizienten liefert, die einen Vergleich aller Parameter untereinander und mit der Erosionswirkung ermöglichen. Es zeigte sich, dass der Zusammenhang zwischen Erosionswirkung und Grundwelle am engsten ist. Die Korrelationskoeffizienten für die Sub- und Ultraharmonischen und das Kavitationsrauschen lagen dagegen deutlich niedriger, betonten aber die Erosionsstruktur mit hohem Kontrast.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Das Schallfeld in kavitierenden Medien kann sinnvoll gemessen werden und stellt wichtige Informationen für eine Beurteilung praktischer Prozesse zur Verfügung. Sowohl piezoelektrische Hydrophone als auch faseroptische Sensoren können eingesetzt werden, wobei ein Zerstörungsschutz notwendig ist.

Die Grundwelle ist die wichtigste Größe einer Schallfeldmessung und stellt allgemein die wichtigste messtechnische Maßnahme dar. Die räumliche Korrelation zu den Kavitationswirkungen war stets hoch. Es wurde kein Schwellenverhalten festgestellt. Von hoher Bedeutung sind außerdem die Subharmonische und die das Kavitationsrauschen beschreibenden Parameter. Sie zeigen ein typisches Schwellenverhalten und konnten als typische Kavitationsanzeiger identifiziert werden. Ihre räumliche Korrelation zu Kavitationswirkungen war ebenfalls hoch. Zwischen den Rauschparametern für das niedrige und hohe Frequenzband wurde nur in wenigen Fällen ein signifikanter Unterschied gefunden. Für den praktischen Einsatz sind demnach extrem breitbandige Sensoren nicht notwendig.

Das Verfahren der Wirkungsdetektion mit Aluminiumfolie lässt eine räumlich aufgelöste und quantitative Beschreibung zu. Offen ist noch, für welche Prozessanwendungen solche erosiven Methoden sinnvolle Ergebnisse liefern.

Mit den vorgestellten Methoden kann eine räumliche Lokalisierung der Wirkungszonen und damit das Auffinden optimaler Positionen im Reinigungsbad durchgeführt werden. Damit steht ein wichtiges Hilfsmittel zur Optimierung der Schallfeldgeometrie zur Verfügung.

Literatur

[1] Ch. Koch: Appl. Opt. **38** (1999), 2812-2819.
 [2] B. Zeqiri, P. N. Gélat, M. Hodnett, N. D. Lee: IEEE UFFC **50** (2003), 1342-1350.
 [3] IEC:886 Report 886, IEC, 1987.
 [4] K. V. Jenderka, Ch. Koch: Fortschritte der Akustik: Plenarvorträge und Fachbeiträge der 31. Jahrestagung für Akustik DAGA05 (2005), 579-580
 [5] K. V. Jenderka, Ch. Koch: Ultrasonics **44** (2006), e401-e406

Bauakustik in der PTB und ihre Aufgaben im Rahmen der Bauaufsicht

Volker Wittstock¹, Werner Scholl²

Zusammenfassung

Die Bauproduktenrichtlinie bildet die Grundlage für die bauakustischen Aktivitäten der PTB. Die daraus abgeleiteten Aufgaben der Mitwirkung bei der Anerkennung von Prüfstellen, der aktiven Teilnahme an der internationalen und nationalen Normung sowie der Durchführung von bauakustischer Forschung werden hier zusammenfassend dargestellt.

1 Einleitung

Die Regelung des bauakustischen Messwesens in Deutschland geht auf die Bauproduktenrichtlinie zurück [1]. Gemäß Anhang I dieser Bauproduktenrichtlinie gehört zu den sechs wesentlichen Anforderungen, die ein Bauwerk erfüllen muss, auch der Schallschutz.

Als zuständige Stelle für die Umsetzung der Bauproduktenrichtlinie wurde in Deutschland das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) benannt. Nach dem Gesetz und dem Abkommen über das DIBt, das zwischen Bund und Ländern vereinbart wurde, handelt es sich beim DIBt um eine gemeinsame Einrichtung des Bundes und der Länder zur einheitlichen Erfüllung bautechnischer Aufgaben auf dem Gebiet des öffentlichen Rechts. Diese Aufgaben sind insbesondere die Anregung, Vergabe, Betreuung und Auswertung von Bauforschungsanträgen, die Anerkennung der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen nach Bauproduktenrichtlinie und Landesbauordnungen und die Mitwirkung im ständigen Ausschuss für das Bauwesen. Zur kompetenten Wahrnehmung dieser Aufgaben wird das DIBt durch Sachverständigenausschüsse beraten, in denen Fachleute aus den Behörden der Länder und des Bundes sowie Vertreter aus Wirtschaft und Wissenschaft mitarbeiten.

Da das DIBt selbst nicht über die erforderlichen Prüf- und Messeinrichtungen verfügt, wurde vom zuständigen Ausschuss SVA B2 entschieden, dass die Beurteilung der fachlichen Eignung der bauakustischen Prüfstellen unter Beteiligung der PTB durchzuführen ist. Die PTB besitzt somit eine Schlüsselposition in Bezug auf die fachlichen Aspekte der Zulassung von Prüfstellen zur Erteilung allgemeiner bauauf-

sichtlicher Prüfzeugnisse. Darüber hinaus begründete die Entscheidung zur Beteiligung der PTB eine langjährige fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem DIBt und der PTB auf dem Gebiet der Bauakustik, die sich u. a. in der Mitarbeit von PTB-Angehörigen im zuständigen Sachverständigenausschuss sowie in einer Vielzahl gemeinsamer Forschungsaktivitäten niederschlug.

2 Anerkennung und regelmäßige Überprüfung bauakustischer Prüfstellen

Die Anerkennung von Prüfstellen zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse umfasst drei wesentliche Punkte. Der erste ist die Überprüfung der Struktur der Stelle sowie ihres Qualitätsmanagement-Systems. Hierbei muss insbesondere eine Unabhängigkeit von Herstellern von Bauprodukten vorliegen. Für die Verlässlichkeit der Prüfergebnisse ist außerdem eine ausreichende Qualifikation des Personals erforderlich, die im Anerkennungsverfahren nachgewiesen werden muss. Die technische Überprüfung der Laboratorien ist dann der letzte wesentliche Punkt, der auch für den Neubau von Laboratorien in bereits anerkannten Prüfstellen Anwendung findet. Die Details der technischen Überprüfung hängen von der Art des Prüfstands ab. So ist z.B. bei Fenster- und Wandprüfständen der Einbau von Referenzobjekten vorgeschrieben, deren Schalldämmung aus Ringversuchen sehr genau bekannt ist. Die Messergebnisse aus dem neuen Prüfstand dürfen dann nicht im Widerspruch zu den vorliegenden Werten stehen. In allen Fällen führt die PTB in den neuen Prüfständen eine komplette Messung durch, deren Ergebnis mit dem Ergebnis der Prüfstelle im Rahmen der auftretenden Unsicherheiten übereinstimmen muss. Bei Vorliegen von Diskrepanzen müssen die Ursachen ermittelt und beseitigt werden.

Die Anerkennung als Prüfstelle zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse erfolgt vorbehaltlich der regelmäßigen Teilnahme an Vergleichsmessungen in der PTB. Diese finden alle drei Jahre statt und dienen vor allem auch dem Erfahrungsaustausch mit den Prüfstellen und der Aktualisierung der Kennt-

1 Dr. Volker Wittstock,
Leiter der PTB-
Arbeitsgruppe
„Bauakustik“
E-Mail:
volker.wittstock
@ptb.de

2 Prof. Dr. Werner
Scholl, Leiter des
PTB-Fachbereichs
„Angewandte Akustik“
E-Mail:
werner.scholl@ptb.de

nisse der Prüfstellen hinsichtlich neuer Regelwerke. Außer üblichen Luft- und Trittschallmessungen werden bei den Vergleichsmessungen auch neue Messverfahren erprobt, mit denen sich die Prüfstellen bei dieser Gelegenheit vertraut machen können. Des Weiteren werden die Messlautsprecher und die Normhammerwerke der Prüfstellen durch die PTB überprüft.

Neben den oben genannten Prüfstellen zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse gibt es noch ca. 120 Schallschutzprüfstellen, die im Verband der Materialprüfungsanstalten e.V. (VMPA) organisiert sind. Sie müssen nicht über eigene Bauakustik-Prüfstände verfügen, sondern sind hauptsächlich für die messtechnische Erfassung des Schallschutzes in Gebäuden und die Beurteilung nach der bauaufsichtlich eingeführten Anforderungsnorm DIN 4109 [2] zuständig. Ihre Anerkennung und regelmäßige Überprüfung wird durch den VMPA geregelt. Die Anwesenheit der PTB im zuständigen VMPA-Gremium stellt hierbei sicher, dass die aus bauaufsichtlicher und technischer Sicht wesentlichen Aspekte der Qualitätssicherung Berücksichtigung finden. Das technische Instrumentarium zur Kontrolle der Schallschutzprüfstellen wird regelmäßig in der PTB überprüft.

3 Mitwirkung bei der Normung

Die Bauproduktenrichtlinie zeichnet sich dadurch aus, dass die wesentlichen Anforderungen nicht in Bezug auf das Bauprodukt, sondern in Bezug auf das Bauwerk formuliert werden. Die konkret einzuhaltenden Werte werden hierbei national vorgegeben, in Deutschland durch die DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“. Um nun von den schalltechnischen Eigenschaften der Bauprodukte auf den Schallschutz des Bauwerks schließen zu können, bedarf es sowohl bauakustischer Messverfahren zur Erfassung der Produkteigenschaften als auch zuverlässiger Prognoseverfahren. Beides wird durch internationale oder europäische Normen bereitgestellt, denen teilweise nationale Anwendungsbestimmungen hinzugefügt werden, wenn sie in DIN-Normen überführt werden. Die aktive Mitarbeit in den für diese Normen zuständigen Gremien bei ISO, CEN und DIN ist somit eine Aufgabe, die sich aus der Umsetzung der BPR in Deutschland ergibt und die u.a. von der PTB wahrgenommen wird.

4 Bauakustische Forschung an der PTB

Die kompetente Bearbeitung der beschriebenen Aufgaben durch die PTB ist an verschiedene Voraussetzungen geknüpft. Eine ganz wesentliche ist eine hervorragende Ausstattung mit Messgeräten und Prüfständen. So verfügt die Arbeitsgruppe „Bauakustik“ über einen Wand-

prüfstand, zwei Deckenprüfstände, einen Fensterprüfstand sowie zwei Installationsprüfstände. Einer von ihnen entspricht der derzeit genormten Messanordnung, der zweite besteht aus einer Vier-Raum-Anordnung in Holztafelbauweise. Des Weiteren gibt es einen Halbfreifeldraum und zwei Hallräume.

Für die Anerkennung von Prüfstellen ist es darüber hinaus erforderlich, geeignete Referenzobjekte und zugehörige Referenzwerte vorzuhalten. In diesem Zusammenhang wird von der PTB ein über viele Jahre laufender Ringversuch mit einer schweren Kalksandsteinwand organisiert. Doch auch die aktive Teilnahme an weiteren bauakustischen Ringversuchen ist für die PTB unabdingbar.

Die wichtigste Voraussetzung für die Bearbeitung der bauakustischen Aufgaben an der PTB ist jedoch eine intensive Forschungstätigkeit, die entweder durch PTB-Eigenmittel oder durch externe Mittel getragen wird. Externe Geldgeber oder Kooperationspartner waren in den letzten Jahren öffentliche Stellen, wie etwa die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) oder aber privatrechtliche Organisationen wie die Vereinigung der europäischen Dämmstoffhersteller (EURIMA), die Robert Bosch GmbH, der Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V. (BDF), die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) oder das Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen (FILK). Einige aktuelle Forschungsschwerpunkte seien im Folgenden kurz dargestellt.

Ein zentrales Aufgabengebiet umfasst die Unsicherheiten in der Bauakustik, die bei der Zulassung von Prüfstellen, aber auch bei den regelmäßigen Vergleichsmessungen berücksichtigt werden müssen. In einem durch das DIBt geförderten Projekt wurden die wichtigsten Unsicherheitsbeiträge bei der Luftschalldämmung zusammengetragen, und eine Vielzahl von ihnen konnte auch quantitativ erfasst werden [3]. Es zeigte sich, dass zu den eigentlichen Messunsicherheiten, die vor allem durch die Laboratorien, Messverfahren und -geräte verursacht werden, in der Bauakustik noch weitere Effekte hinzukommen, wie z. B. die Produktstreuung und die Prognoseunsicherheit. Da derzeit nicht alle Unsicherheitsbeiträge in ihrer Größe berechnet werden können, ergibt sich auch in Zukunft die Notwendigkeit, Standardabweichungen aus Ringversuchen als Schätzwerte für die Unsicherheit zu verwenden. Diese Ergebnisse werden derzeit unter Federführung der PTB in die internationale Normung eingebracht.

Bei den Arbeiten zur Unsicherheit stellte sich heraus, dass die meisten bauakustischen Größen keine allgemein gültige Definition besit-

zen. Vielmehr werden in unterschiedlichen Zusammenhängen unterschiedliche Definitionen verwendet, was beim Vergleich von Ergebnissen häufig zu erheblichen Irritationen führt. Dieser Themenkomplex wird aktuell durch eine DIBt-Förderung an der PTB bearbeitet.

Unmittelbar aus der Zulassungstätigkeit folgte ein weiteres, vom DIBt finanziertes Forschungsprojekt. Das Problem bestand darin, dass in einem neu errichteten Prüfstand, der formal allen Anforderungen genügt, Messergebnisse erzielt wurden, die weit außerhalb des zulässigen Toleranzbereichs lagen. Nachmessungen der PTB vor Ort bestätigten dies. Durch detaillierte Untersuchungen der Luft- und Körperschallfelder konnte als Ursache für die Abweichungen eine ungünstige modale Struktur ermittelt werden. Zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Effekte wurden zusätzliche Empfehlungen für bauakustische Prüfstände erarbeitet [4].

Ein Projekt zur Überarbeitung der DIN 4109 wurde außer vom DIBt auch durch Mittel der Holzwirtschaft gefördert [5]. Hierbei wurde von einer Gruppe von Forschungsstellen unter Federführung der PTB ein Entwurf für den Bauteilkatalog für den Holz- und Skelettbau erarbeitet. Ein solcher Bauteilkatalog bildet den Ausgangspunkt für Prognoserechnungen. Die hierfür erforderlichen Rechenverfahren wurden ebenfalls im Rahmen des Projekts verifiziert.

Weitere Forschungsprojekte befassten sich mit speziellen Fragen zur Messung der Längsdämmung von Wänden [6] und Decken [7] sowie mit den Möglichkeiten zur Etablierung eines Kurzprüfverfahrens für das Trittschallverbesserungsmaß.

Neben den bislang erwähnten Forschungsprojekten mit direktem Bezug zu bauaufsichtlichen Regelungen, Normungsvorhaben oder speziellen Messverfahren werden an der PTB auch Forschungen mit Grundlagencharakter durchgeführt. Hierzu zählen vor allem die Aktivitäten auf dem Gebiet des Körperschalls in Gebäuden, für den es bisher kaum zuverlässige Beschreibungen der Schallquellen oder Prognosemöglichkeiten gibt. Aktuell liegt das Augen-

merk hierbei auf Installationsgeräuschen, die im Rahmen einer Kooperation mit dem BDF wie auch innerhalb eines vom BBR finanzierten Projekts untersucht werden. Auch in dem von der DFG finanzierten Projekt zur Dämpfung im Hochbau geht es um die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen, hier jedoch zur theoretischen Modellierung, messtechnischen Erfassung und zu prinzipiellen technischen Anwendungen von Dämpfungsmechanismen in der Bauakustik.

Literatur

- [1] Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG)
- [2] DIN 4109; Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise. November 1989
- [3] *Volker Wittstock*: Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen Messnormen. PTB-Bericht zu den DIBt-Projekten P 32-5-5.61-1010/02 und P 32-5-5.61.1-1043/03, Dezember 2004
- [4] *Wieland Weise*: Untersuchung der Ursachen signifikanter Abweichungen von Messergebnissen aus unterschiedlichen, nach der europäischen Norm DIN EN ISO 140 normgerechten Prüfständen für die Schalldämmung. PTB-Bericht zum DIBt-Projekt P 32-5-5.71-1033/02, Braunschweig, Juni 2003
- [5] *Werner Scholl, Heinrich Bietz*: Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109. PTB-Bericht zum DIBt-Projekt P 52-5-5.68-1044/03, Braunschweig, Juli 2004
- [6] *Martin Schmelzer*: Längsdämmungsmessung in normalen Schalldämm-Prüfständen. PTB-Bericht, Braunschweig, August 2005
- [7] *Martin Schmelzer, Christian Bethke*: Investigation into the influence of cavity damping on the sound reduction in the case of suspended ceilings. PTB-Bericht, Braunschweig, April 2006

Unsicherheiten in der Bauakustik

Volker Wittstock*

Zusammenfassung

Der aktuelle Stand zur Ermittlung und Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Bauakustik wird am Beispiel der Luftschalldämmung aufgezeigt.

1 Einleitung

Die Errichtung von Gebäuden erfordert das Zusammenspiel einer Vielzahl von Akteuren. Welcher der Beteiligten welchen Anteil am Gesamtergebnis hat, ist jedoch am ausgeführten Bau nur schwer zu beurteilen, was insbesondere bei Beanstandungen häufig zu langwierigen z.T. auch juristischen Auseinandersetzungen führt. Dies trifft ganz besonders auch auf die akustischen Eigenschaften von Gebäuden zu, da die Schallausbreitung in Gebäuden auf sehr unterschiedlichen Wegen erfolgen kann.

Ob die Vorgabewerte im fertigen Gebäude eingehalten werden, kann jedoch nur unter Berücksichtigung der auftretenden Unsicherheiten beurteilt werden, so dass ihnen in der Bauakustik eine große Bedeutung zukommt. Allerdings werden die Unsicherheiten derzeit entweder völlig außer Acht gelassen oder nur sehr pauschal berücksichtigt. Es gibt auch keinerlei Transparenz, welcher Effekt bzw. welcher Akteur welchen Unsicherheitsbeitrag liefert. Im nachstehenden Beitrag werden die verschiedenen Quellen für die Unsicherheiten aufgeführt, und es werden Schätzwerte für die praktisch auftretenden Unsicherheiten angegeben. Darüber hinaus werden Vorschläge unterbreitet, wie die Unsicherheiten in der Bauakustik berücksichtigt werden können.

2 Bestimmung der Luftschall-Dämmung in Prüfständen

Labormessungen der Luftschall-Dämmung werden gemäß ISO 140-3 [1] ausgeführt. Dabei wird das zu prüfende Bauteil zwischen zwei mindestens 50 m³ große Räume eingebaut und vom Senderaum aus breitbandig beschallt. Das Verhältnis von auftretender zu transmittierter Schallleistung – ausgedrückt in dB – wird dann als Schalldämm-Maß R bezeichnet. Es wird aus der Differenz der mittleren Schalldruckpegel im Sende- und Empfangsraum $L_{p,1}$ und $L_{p,2}$ sowie

der Nachhallzeit T im Empfangsraum, der Bauteilfläche S , dem Empfangsraumvolumen V und der Konstanten a ($a = 0,16$ s/m) ermittelt.

$$R = L_{p,1} - L_{p,2} + 10 \log \left(\frac{S T}{a V} \right) \text{dB} - \sum_i K_i \quad (1)$$

Bei dieser Messung ist eine Vielzahl weiterer Effekte zu berücksichtigen, die in Gl. (1) durch eine Summe von Korrekturen K_i abgebildet ist. Die zugehörigen Erwartungswerte werden mit 0 dB angesetzt, die Unsicherheiten jedoch können von erheblicher Größenordnung sein.

3 Unsicherheiten der Schalldämmung bei einem Ringversuch mit einer schweren Wand

Betrachtet sei hier die Schalldämmung einer Kalksandsteinwand, die in insgesamt 20 verschiedenen Prüfständen ermittelt wurde [2]. Eher kleine Unsicherheitsbeiträge liefern hierbei die Toleranzen der verwendeten Messgeräte, Luftdruck- und Temperatureinflüsse sowie die Algorithmen zur Bestimmung der Nachhallzeit. Wichtiger sind dagegen die unvollkommene Volumen- und Zeitmittelung, das Auftreten von Schallnebenwegen und Auswirkungen der Schallquellposition. Darüber hinaus führt eine unzureichende Diffusität der beteiligten Luft- und Körperschallfelder vor allem bei tiefen Frequenzen zu einer modalen Schallübertragung, wodurch die nach [1] zulässigen Unterschiede in den Abmessungen von Prüfständen und Prüflingen zu Unsicherheiten der Schalldämmung führen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich die genauen Randbedingungen (z. B. feste Einspannung des Prüflings) wie auch die äußere Bedämpfung des Prüflings in den Prüfständen unterscheiden, wodurch wiederum Unsicherheiten entstehen. Ganz zum Schluss sei hier noch angeführt, dass sich auch die Streuungen im Aufbau der Wand in der Unsicherheit der Schalldämmung widerspiegeln. Die Summe all dieser Effekte führt zu recht großen Unsicherheiten, die von ca. 5 dB bei tiefen Frequenzen auf ca. 2 dB bei hohen Frequenzen (Bild 1) abfallen. Wie üblich wurde hier die Vergleichsstandardabweichung nach ISO 5725-2 [3] als Schätzwert für die Unsicherheit verwendet.

* Dr. Volker Wittstock,
Leiter der PTB-
Arbeitsgruppe
„Bauakustik“
E-Mail:
volker.wittstock
@ptb.de

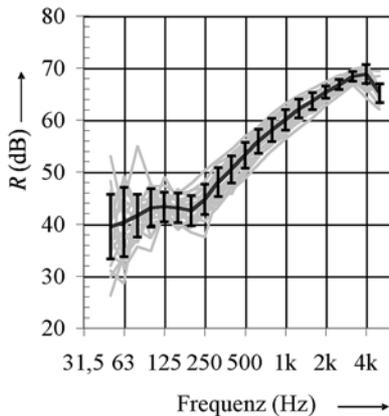


Bild 1:

Schalldämmung der Kalksandsteinwand, schwarz: Mittelwert und Standardabweichung, grau: Messergebnisse aus 20 verschiedenen Prüfständen.

Es sei hier angemerkt, dass alle in Bild 1 dargestellten Messergebnisse gültige Realisierungen der Messgröße sind, da es außer den Messvorschriften keine allgemein anerkannte Definition des Schalldämm-Maßes gibt. Die Definition erfolgt somit implizit über die Messnorm. Zu den Fragen, die sich aus der unscharfen Definition des Schalldämm-Maßes ergeben, wird derzeit an der PTB ein vom Deutschen Institut für Bautechnik gefördertes Projekt bearbeitet, dessen Ergebnisse jedoch noch ausstehen.

4 Handhabung der Unsicherheiten in der Bauakustik

Wegen der Vielzahl der beteiligten Effekte, die sich auch gegenseitig beeinflussen und für die kaum mathematische Modelle aufgestellt werden können, ist es beim derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, eine detaillierte Unsicherheitsbetrachtung anzustellen. Daher werden verschiedene Messbedingungen definiert, unter denen dann Ringversuche durchgeführt werden. Die dabei ermittelten Standardabweichungen werden als Schätzwerte für die Unsicherheit verwendet. Die wichtigsten Bedingungen sind hierbei:

- Vergleichsbedingungen (Messung des selben Messobjekts in verschiedenen Prüfständen durch verschiedene Teams mit verschiedenen Messgeräten),
- In-situ Bedingungen (Messung des selben Messobjekts im selben Prüfstand durch verschiedene Teams mit verschiedenen Messgeräten),
- Wiederholbedingungen (Messung des selben Messobjekts im selben Prüfstand durch das selbe Team mit den selben Messgeräten).

An der PTB wurde in den letzten Jahren eine umfangreiche Datenbank mit Ringversuchsergebnissen zur Luftschalldämmung aufgebaut,

in der zur Zeit 1869 Schalldämmungen enthalten sind. Die Mittelwerte der Unsicherheiten können als typische Werte angesehen werden (Bild 2). Wie aufgrund der verschiedenen Messbedingungen zu erwarten, sind die Unsicherheiten unter Vergleichsbedingungen am größten und unter Wiederholbedingungen am kleinsten. Die Unsicherheit für in-situ Bedingungen liegt dazwischen.

Zusätzlich aufgeführt sind in Bild 2 auch die Standardabweichungen von Messungen an verschiedenen Realisierungen des nominell gleichen Produkts unter Wiederholbedingungen, die hier Produktstreuungen genannt werden. Die derzeit vorliegenden Unsicherheiten dieser Kategorie sind jedoch als unrealistisch klein anzusehen, da die zugrunde liegenden Daten überwiegend aus Ringversuchs-Vormessungen stammen, bei denen die Bauteile eben wegen ihrer geringen Produktstreuung ausgewählt wurden.

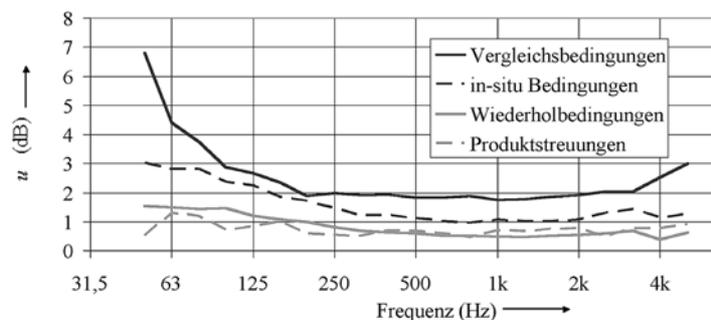


Bild 2:

Typische Unsicherheiten in der Bauakustik

5 Unsicherheit bauakustischer Einzahlwerte

Die bislang betrachteten frequenzabhängigen Schalldämmungen werden nur in seltenen Fällen zur Beschreibung der schalltechnischen Eigenschaften von Gebäuden und Bauprodukten verwendet. Vielmehr werden aus den Schalldämm-Spektren nach festgelegten Algorithmen Einzahlwerte bestimmt [4], die als Entscheidungsgrundlage für Bauherren, Architekten, Planer und die Bauaufsicht dienen. In Deutschland wird als Einzahlwert das bewertete Schalldämm-Maß R_w verwendet, zu dessen Unsicherheit an der PTB umfangreiche Untersuchungen angestellt wurden. Hierbei stellte sich heraus, dass die Unsicherheit von R_w derzeit nicht aus den spektralen Werten der Schalldämmung und den zugehörigen Unsicherheiten berechnet werden kann, da Korrelationen zwischen den spektralen Schalldämmungen in einem nicht vorher-sagbaren Maß auftreten [5]. Es wird daher empfohlen, die aus Ringversuchen bestimmten Mittelwerte zu verwenden, auch wenn diese im Einzelfall stark von den tatsächlich beobachte-

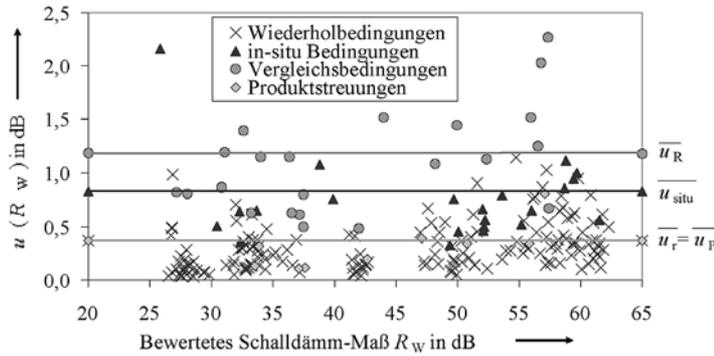


Bild 3:
Aus Ringversuchen ermittelte Unsicherheiten des bewerteten Schalldämm-Maßes als Funktion des bewerteten Schalldämm-Maßes sowie zugehörige Mittelwerte (waagerechte Linien) für verschiedene Messbedingungen.

ten Unsicherheiten abweichen (Bild 3). Die mittleren Unsicherheiten des bewerteten Schalldämm-Maßes sind

- unter Vergleichsbedingungen $\overline{u_R} = 1,18 \text{ dB}$,
- unter in-situ Bedingungen $\overline{u_{\text{situ}}} = 0,83 \text{ dB}$,
- unter Wiederholbedingungen $\overline{u_r} = 0,37 \text{ dB}$,
- für die Produktstreuungen $\overline{u_p} = 0,37 \text{ dB}$.

6 Konsequenzen aus den Unsicherheiten

Die Konsequenzen aus den Unsicherheiten seien am Beispiel der Errichtung eines Gebäudes demonstriert. Ausgangspunkt für eine bauakustische Planung sind bewertete Schalldämm-Maße, die von Herstellern für ihre Produkte angegeben werden. Zur Berechnung der zugehörigen Unsicherheit sind nun drei verschiedene Fälle zu unterscheiden. Werden in n unterschiedlichen Prüfstellen Messungen an je einer Realisierung des Prüfobjekts durchgeführt, so ergibt sich die Unsicherheit des Mittelwerts des bewerteten Schalldämm-Maßes zu

$$u(\overline{R_w}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{u_R^2 + u_p^2} \quad (2)$$

Werden hingegen lediglich n Wiederholungsmessungen im selben Prüfstand am selben Prüfobjekt durchgeführt, so ergibt sich

$$u(\overline{R_w}) = \sqrt{u_R^2 - u_r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) + u_p^2} \quad (3)$$

Werden schließlich n Messungen an je einer Realisierung des Prüfobjekts im gleichen Prüfstand ausgeführt, so beträgt die Unsicherheit

$$u(\overline{R_w}) = \sqrt{u_R^2 - u_r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{u_p^2}{n}} \quad (4)$$

Mit den erforderlichen Eingangswerten z. B. aus Kapitel 5 lässt sich die Unsicherheit der für das Bauwerk verwendeten Bauprodukte nach Gln. (2) bis (4) leicht berechnen.

Der nächste Schritt ist nun die Prognoserechnung, bei der die akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Eigenschaften der beteiligten Bauteile berechnet werden. Dies erfolgt nach verbindlichen expliziten Rechenvorschriften, so dass die Unsicherheit des Prognoseergebnisses ohne Schwierigkeiten als Funktion der Schalldämm-Maße und der zugehörigen Unsicherheiten ermittelt werden kann.

Um die Einhaltung bauaufsichtlicher Anforderungen oder zivilrechtlicher Vereinbarungen mit einer bestimmten statistischen Sicherheit zu gewährleisten, wird ein Vielfaches der Unsicherheit vom Prognosewert subtrahiert. In der Bauakustik erscheint in diesem Zusammenhang eine 84%-ige Sicherheit als ausreichend, d.h. es wird die einfache Unsicherheit vom Prognoseergebnis subtrahiert.

Nach Errichtung des Gebäudes kann es nun zu Nachmessungen kommen, um den tatsächlich erreichten Schallschutz nachzuweisen. Die Unsicherheit dieser Messungen ist die Unsicherheit unter in-situ Bedingungen nach Abschnitt 4 und 5. Damit kann entschieden werden, ob der geschuldete Schallschutz auch tatsächlich erreicht wurde.

7 Schlussbemerkungen

Die angegebenen Vorschläge für die Unsicherheiten wie auch für den Umgang mit ihnen spiegeln den aktuellen Kenntnisstand wider. Es gibt derzeit jedoch eine Vielzahl von Aktivitäten auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene, die neue Erkenntnisse auf diesem Gebiet in absehbarer Zeit erwarten lassen. Der größte Handlungsbedarf besteht sicherlich in einer realistischen Abschätzung der Produktstreuungen, da erwartet werden kann, dass sie für viele Bauweisen einen nennenswerten oder sogar einen dominierenden Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefern.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 140-3: Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements- Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. 1995
- [2] W. Weise, V. Wittstock: Using round robin test results for the accreditation of laboratories in the field of building acoustics in Germany. Building Acoustics 12 (3), pp. 189 – 206, 2005
- [3] ISO 5725-2: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. 1994
- [4] ISO 717-1: Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. 1996
- [5] V. Wittstock: On the uncertainty of single number quantities describing airborne sound insulation. Eingereicht bei Acustica united with Acta Acustica, Oktober, 2006

Bauakustik in der Puppenstube

Christoph Kling¹, Martin Schmelzer²

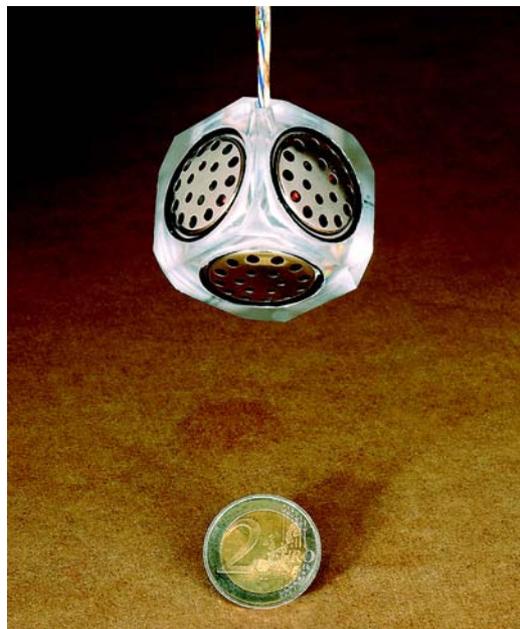
Die Bauakustik beschäftigt sich mit der Schallübertragung zwischen verschiedenen Räumen. Vorherrschende Messgröße ist das Schalldämmmaß, ein Maß für die Transmission des Schalls. Die auf ihre akustischen Eigenschaften zu prüfenden Objekte sind recht groß: eine Wand, eine Decke, ein Abflussrohr oder eine abgehängte Decke in einem Großraumbüro. Bauakustische Prüfstände fallen dementsprechend groß aus, da sie das zu prüfende Objekt umgeben und statisch tragen müssen. Zur Bestimmung des Schalldämmmaßes werden nach Norm ISO 140 [1] Prüfstände benötigt, die zwischen zwei geschlossenen Räumen das jeweilige Prüfobjekt einschließen. Solch ein Prüfstand erfordert ausreichend Bauplatz, Lagerfläche sowie Personal und Material für den Auf- bzw. Einbau der Prüflinge. Nach der Messung muss der Prüfling abgerissen und entsorgt werden, um einem neuen Prüfobjekt Platz zu machen. Dies alles macht eine Schalldämmungsmessung zeit- und aufwändig und teuer.

Für viele bauakustische Grundlagenuntersuchungen eignen sich auch miniaturisierte Prüfstände. Im Maßstab 1:10 zum Beispiel benötigen sie nur einen Bruchteil an Platz und Material. Der Aufbau geht schnell, kostet nur einen Bruchteil und findet bequem auf einem Labortisch Platz. Nach Abschluss einer Messreihe kann das Modell für eventuelle Nachmessungen verwahrt werden.

Bei der Arbeit mit Miniaturmodellen sind jedoch einige Punkte zu beachten, damit die Messergebnisse auf den realen Maßstab übertragen werden können. Insbesondere bei der Untersuchung von Körperschallproblemen ist auf die richtige Materialwahl zu achten. Sind nur Luftschallfelder für die Messung von Interesse, wie z. B. beim Modellhallraum in Bild 5, so genügt in aller Regel eine Verkleinerung aller Längen und eine Erhöhung der Messfrequenzen. In der Bauakustik liegen jedoch grundsätzlich neben Luftschall- auch Körperschallfelder vor, die an ein Material, wie z. B. Beton, und dessen Eigenschaften gebunden sind. Eine Untersuchung grundlegender Gesetzmäßigkeiten nach Ähnlichkeitstheoretischen Gesichtspunkten führt zu einigen Grundregeln, die beim Modellbau zu

berücksichtigen sind. So sind Dichte ρ , Elastizitätsmodul E und Materialdämpfung η aus dem Originalfrequenzbereich in den Modellfrequenzbereich zu übertragen. Für spezielle Messaufgaben können sich weitere Skalierungsregeln ergeben.

Da die Frequenz im Modellmaßstab nach oben skaliert wird, muss teilweise schon im unteren Ultraschallbereich gemessen werden. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die Messtechnik, die in der Bauakustik meist nur bis 5 kHz ausgelegt ist. So sind zum Beispiel kleine $\frac{1}{4}$ -Zoll-Mikrophone zu benutzen, da die Empfindlichkeit der üblichen $\frac{1}{2}$ -Zoll-Mikrophone über 20 kHz allgemein stark abnimmt. Zur Luftschallerzeugung wurden an der PTB kleine Lautsprecherwürfel (Bild 1) entwickelt, die nach dem Vorbild der großen Dodekaeder-Lautsprecher der Bauakustik eine Punktschallquelle simulieren. Für die Signalaufzeichnung und -analyse ist eine hohe Abtastrate vom Messgerät gefordert, denn diese bestimmt die obere Frequenzgrenze des Messbereichs. Die erforderliche Messtechnik, wie kleine aber empfindliche Körperschallaufnehmer oder mehrkanalige Messsysteme mit hoher Abtastrate und Dynamik, ist zum Teil erst seit wenigen Jahren verfügbar.



- ¹ Christoph Kling, PTB-Arbeitsgruppe „Bauakustik“
E-Mail: christoph.kling@ptb.de
- ² Dr. Martin Schmelzer, PTB-Arbeitsgruppe „Bauakustik“
E-Mail: martin.schmelzer@ptb.de

Bild 1:
Hexaeder-Lautsprecher zur Simulation einer Punktschallquelle im Modellmaßstab.

Bild 2:
Modellprüfstand zur Untersuchung des Einflusses der Modendichte auf die Schalldämmung.



Trotz der erhöhten Anforderungen ergeben sich für Modellmessungen interessante Aufgaben und Einsatzbereiche. Im Folgenden werden einige Beispiele für Modelluntersuchungen vorgestellt, die im Rahmen von Projekten und Diplomarbeiten in der Arbeitsgruppe „Bauakustik“ durchgeführt wurden.

Bild 2 zeigt ein Modell eines Wandprüfstandes im Maßstab 1:8, mit dem untersucht wurde, wie sich die Schalldämmung von Wänden bei einer Variation der Modendichte (= Anzahl Resonanzen pro Frequenzband) ändert. Die Modendichte einer Wand wächst mit ihrer geometrischen Ausdehnung. Unter Ausnutzung dieses Effekts wurden Platten verschiedener Größen zwischen zwei Halbräumen eingeklemmt und die Schalldämmung bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass die Schalldämmung bei geringer Modendichte besonders von der Geometrie der Räume abhängt. Bei höheren Modendichten dagegen verschwindet dieser Effekt [2].

Eine Aufgabe, die im Original nur höchst umständlich zu lösen wäre, ist die Untersuchung zur Abhängigkeit der Schalldämmung vom statischen Luftdruck bei Messung nach ISO 140 [1]. Aus theoretischen Überlegungen folgt, dass die in einem Prüfstand bestimmte Schalldämmung merklich schwanken kann, abhängig von der Höhenlage des Prüfstandes und den Wetterbedingungen. Für eine direkte exper-

imentelle Überprüfung in einem Prüfstand ist der Effekt zu klein und würde zum Teil von der typischen Messunsicherheit der Schalldämmungsmessung verdeckt. Abgesehen davon wäre der organisatorische und finanzielle Aufwand für eine solche Messreihe enorm. Die Umsetzung im Modell ist dagegen relativ simpel. In Anlehnung an den Wandprüfstand der PTB wurde ein Modell im Maßstab 1:12 gebaut und in eine Unterdruckkammer gestellt (Bild 3). In mehreren Schalldämmungsmessungen wurde der statische Luftdruck variiert. Da hier nur die Modellergebnisse relativ zueinander bei Variation eines einzigen Parameters verglichen wurden, war ein grobes Abbild des Originals ausreichend. Die Messergebnisse folgen sehr gut dem theoretischen Modell [3](Bild 4).

Modelluntersuchungen können neben relativen Vergleichen wie im letzten Beispiel auch absolute Aussagen liefern. Bild 5 zeigt das Modell

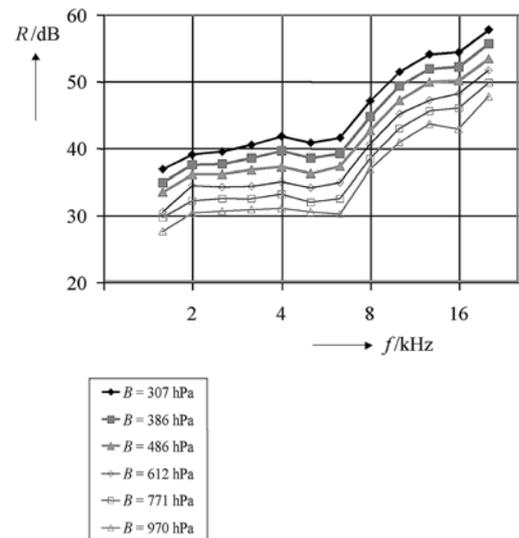


Bild 4:

In der Unterdruckkammer gemessene Schalldämmung R einer 6 mm starken Acrylglasplatte bei verschiedenen statischen Drücken B , aufgetragen über der Frequenz f .

Bild 3:
Modellprüfstand in der Unterdruckkammer.

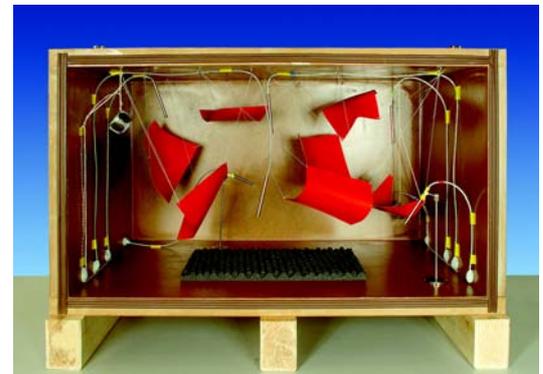


Bild 5:

Miniaturhallraum für Diffusfeldmessungen bei hohen Frequenzen.

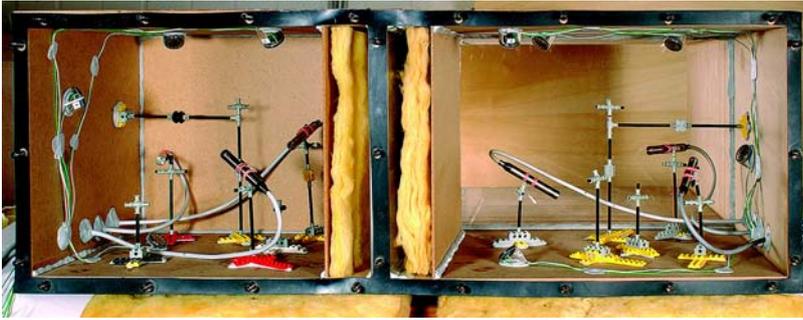


Bild 6:

Seitenansicht des Modells zur Untersuchung der Schallausbreitung bei Messung der Schall-Längsdämmung im umgebauten Wandprüfstand.

eines Hallraums im Maßstab 1:10. Vorbild war der große rechtwinklige Hallraum der PTB. In einem Hallraum herrscht annähernd der Idealfall eines diffusen Luftschallfeldes. Hier können z. B. Mikrophone kalibriert, Schalleistungsmessungen durchgeführt oder der Absorptionsgrad verschiedener Oberflächen bestimmt werden. Oberhalb von etwa 10 kHz stört jedoch die zunehmende Luftabsorption das diffuse Schallfeld. Im Modell wird durch die Verkleinerung des Raumvolumens um den Faktor $(1/n)^3$ die Luftabsorption soweit kompensiert, dass bei hohen Frequenzen ein Diffusfeld herrscht. Ein Difusitätstest nach EN ISO 354 [4] bestätigte die Funktionsfähigkeit des Modellhallraumes. Es wurden bereits verschiedene Materialien auf ihre Absorptionseigenschaften bei hohen Frequenzen untersucht. Weiterhin wurden verschiedene Miniaturdämpfer entwickelt, die in den anderen hier genannten Modellen zur Einstellung der Nachhallzeit benötigt werden[5].

Bild 6 zeigt einen Modellprüfstand zur Untersuchung eines verbreiteten Verfahrens zur Bestimmung der Schall-Längsdämmung. Ein üblicher Wandprüfstand wird dabei so umgebaut, dass der Prüfling zwangsläufig ein Nebenvolumen abteilt, das eigene Luftschallmoden besitzt. Obwohl dieses Verfahren die Schalldäm-

mung des Prüflings verfälscht, wird es dennoch aus Kostengründen gerne eingesetzt. In einem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geförderten Forschungsvorhaben konnte durch schrittweise bauliche Veränderungen am Modellprüfstand die vom Schall genutzten Ausbreitungswege eingehend untersucht werden [6 bis 8]. Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren für bestimmte Prüfelemente falsche Ergebnisse liefert und zumindest ergänzt werden muss.

Für die Prüfung der Schalldämmung von abgehängten Decken, wie sie zum Beispiel in Großraumbüros üblich sind, schreibt die Norm ISO 140-9 [9] eine Messanordnung vor, die das Problem der Schallübertragung der Unterdecke auf zwei Räume beschränkt. Dadurch kann die Schalldämmung eines Unterdeckenelements auch in einem üblichen Wandprüfstand gemessen werden. In einem von der European Insulation Manufacturers Association (EURIMA) finanzierten Projekt wurde an einem Modell im Maßstab 1:10 (Bild 7) diese Messvorschrift und die vorgeschriebene Anordnung der Absorber genauer untersucht. Die Modellmessungen konnten dabei nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ die Messungen in realen Prüfständen mit Unsicherheiten wiedergeben, die den normativen Forderungen entsprechen.

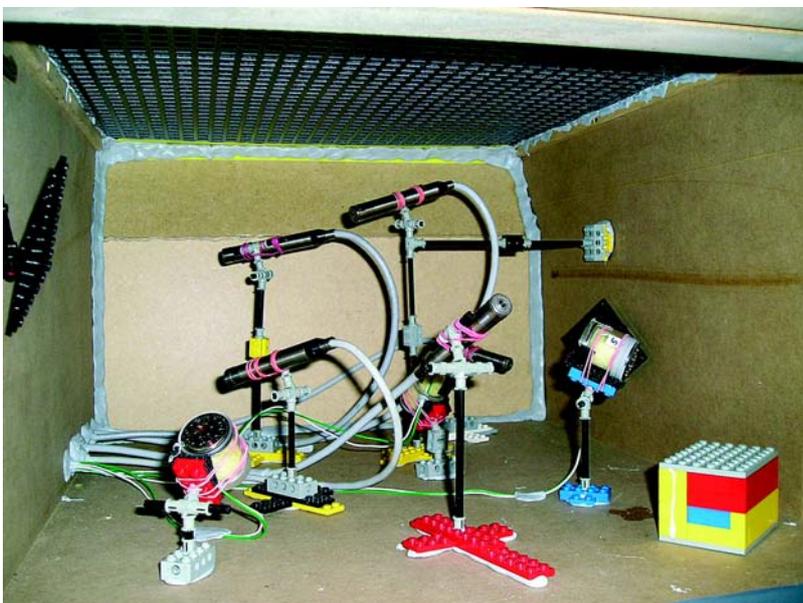


Bild 7:

Blick in einen Raum des Prüfstands zur Untersuchung des Messverfahrens nach ISO 140-9.

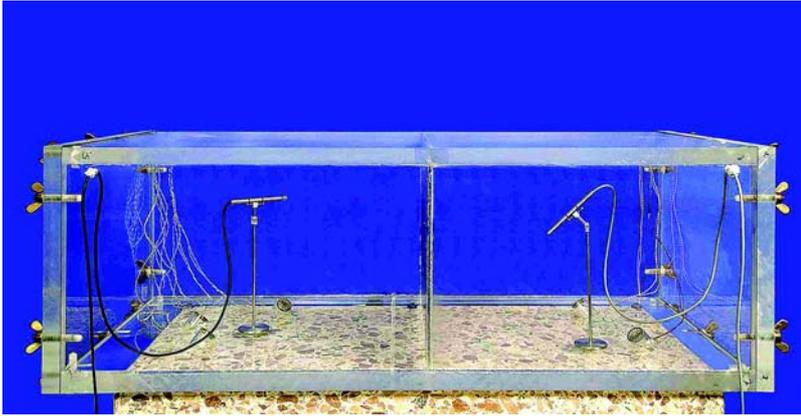


Bild 8:
Modell aus Acrylglas zur Untersuchung der Dämpfungseffekte in einem Wandprüfstand.

Durch einfache Umbauten am Modell konnten verschiedene Segmente aus dem Großraumbüro simuliert werden. Es wurden verschiedene Parameter, wie die Positionierung von Absorptionsmaterial, verschiedene Deckentypen und die Abhängigkeit der Decke, gezielt verändert. Es konnte gezeigt werden, dass die Messanordnung nach Norm nur solche Segmente repräsentiert, die nahe der Außenwand des Großraumes liegen. Weiterhin wurden verschiedene Vorschläge zur Verbesserung der Messvorschrift ausgearbeitet.

Bild 8 schließlich zeigt ein Modell eines Wandprüfstandes aus Acrylglas im Maßstab 1:10. In einem Projekt, das unter anderem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde, werden die Einflüsse verschiedener Dämpfungsmechanismen auf die Schalldämmung im Hochbau untersucht. Da hier die Körperschallfelder eine ebenso wichtige Rolle wie die Luftschallfelder spielen, musste besonders darauf geachtet werden,

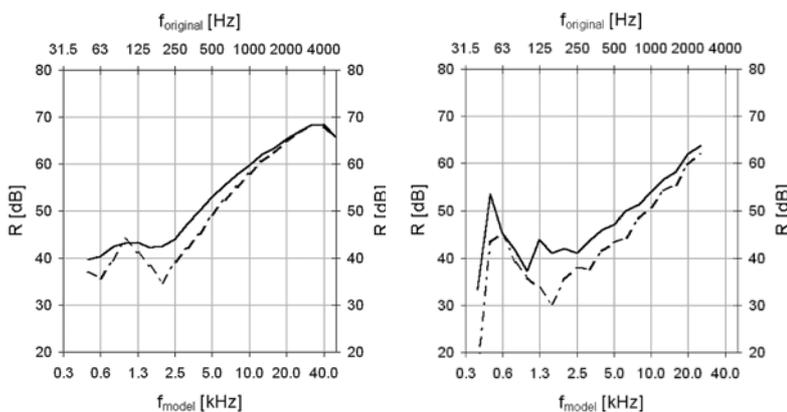


Bild 9:
Links: Schalldämmungen einer 26 cm starken Kalksandsteinwand nach Messungen aus einem Ringversuch. Rechts: Schalldämmungen einer vergleichbaren 25 mm starken Acrylglaswand nach Messungen im Modell. Beide Messungen jeweils mit fest angebundener Wand (durchgezogene Linie) und mit elastisch eingebauter Wand (gestrichelte Linie).

auch die Materialeigenschaften aus dem Original möglichst getreu abzubilden. Da im Bau viele verschiedene Materialien, wie Beton, Kalksandstein o. Ä. eingesetzt werden, wurde mit Acrylglas ein Material gewählt, das im Modellfrequenzbereich ein typisches Baumaterial gut abbildet. Der Vergleich der Schalldämmungskurven einer Prüfwand in zwei verschiedenen Einbauvarianten (Bild 9) zeigt trotz der Vereinfachungen am Modell gute Übereinstimmung mit der Schalldämmung einer vergleichbaren Kalksandsteinwand in einem realen Wandprüfstand. (Siehe [10])

Danksagung

Die Autoren möchten Marcel Jüttner, Dr.-Ing. Volker Wittstock und Hendrik Jachmann danken, die mit ihrer Arbeit wesentlich zur Entwicklung der Modellmesstechnik an der PTB beitrugen.

Literatur

- [1] ISO 140: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen (1997).
- [2] M. Jüttner: Untersuchung der Schalldämmung von Wänden bei tiefen Frequenzen anhand von Modellmessungen. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida (FH), 2005.
- [3] V. Wittstock, C. Bethke: The Role of Static Pressure and Temperature in Building Acoustics. *Journal of Building Acoustics*, Volume 10, Number 2, 2003.
- [4] EN ISO 354: Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Anhang A (2003).
- [5] H. Jachmann: Entwurf und Erprobung eines Modell-Hallraums im Maßstab 1:10. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida (FH), 2006.
- [6] M. Schmelzer: Längsdämmungsmessung in normalen Schalldämm-Prüfständen. Tagungsband DAGA'05, München, S. 451–452.
- [7] M. Schmelzer: Untersuchung der Verwendbarkeit normaler Wand- und Deckenprüfstände für die Bestimmung der Flankenübertragung von Wand- und Deckenkombinationen entsprechend den neuen europäischen Schallschutznormen. PTB-Bericht, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 2005.
- [8] M. Schmelzer, W. Scholl: Längsdämmungsmessung in normalen Schalldämm-Prüfständen. *Bauphysik* 28 (2006), Heft 4, S. 253–256.
- [9] ISO 140-9: Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 9: Laboratory measurement of room-to-room airborne sound insulation of a suspended ceiling with a plenum above it. (1985)
- [10] C. Kling: Dämpfungseffekte in bauakustischen Modellprüfständen. Tagungsband DAGA'05, München, S. 453–454.

Raumakustik und Auralisation

Ingolf Bork*

Einleitung

Die Raumakustik befasst sich mit der Optimierung von Schallausbreitungsbedingungen in geschlossenen Räumen. Die Zielsetzung kann dabei je nach Anforderung sehr unterschiedlich sein. Während in Räumen zur Sprachübertragung wie z. B. in Hörsälen, Schulklassenräumen und Theatern höchste Maßstäbe an die Sprachverständlichkeit gestellt werden, sind für musikalische Aufführungsstätten andere Kriterien maßgeblich, die durch die subjektive Empfindung der Hörer geprägt sind, wie beispielsweise Klangfarbe, Nachhall und Räumlichkeitsgefühl. Darüber hinaus ist auch die Vermeidung unerwünschter Schallausbreitung von Störschall ein wichtiger Anwendungsbereich der Raumakustik. Hierzu gehören der von Maschinen abgestrahlte Schall in Werkstätten und Fabrikhallen ebenso wie der von den Wänden im Wohnbereich abgestrahlte Schall aus benachbarten Wohnungen oder der über geschlossene Fenster eindringende Lärm von Flugzeugen und Kraftfahrzeugen.

Zur quantitativen Beschreibung der raumakustischen Eigenschaften werden heute so genannte raumakustische Parameter verwendet, mit denen es möglich ist, in öffentlichen Ausschreibungen für neu auszustattende Räume entsprechende Grenzwerte festzulegen.

1 Schallausbreitung

Maßgeblich für raumakustische Betrachtungen ist die Schallausbreitung zwischen der Schallquelle und dem Schallempfänger. Das Verhalten des Schalls auf dieser Übertragungsstrecke lässt sich am besten untersuchen, wenn man als Quellsignal einen möglichst kurzen aber genügend lauten Schallimpuls verwendet, wie er beispielsweise durch einen Schuss oder beim Platzen eines Ballons erzeugt werden kann. Der Schall wird von der Quelle in alle Richtungen abgestrahlt und gelangt auf unterschiedlichen Wegen mit zahlreichen Reflexionen zum Empfänger. Bedingt durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit von $c = 344 \text{ m/s}$ führen die unterschiedlich langen Wege im Raum dazu, dass das empfangene Schalldrucksignal, die so ge-

nannte Raumimpulsantwort (vgl. Bild 1), sehr viel länger dauert als der erzeugte Impuls. So kann der ausklingende Schall z. B. in großen Kirchen länger als 10 s wahrgenommen werden. Verantwortlich für die Dauer sind in erster Linie das Absorptionsverhalten der Wände sowie das Volumen des Raumes.

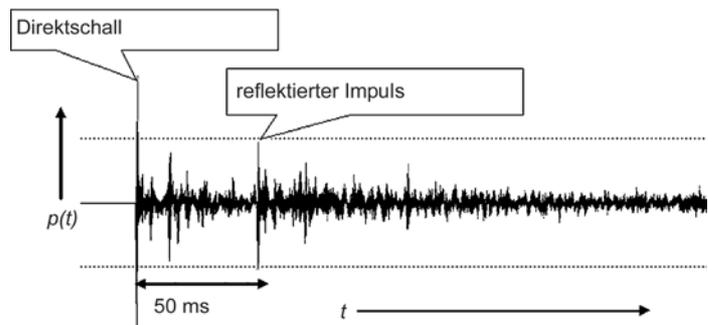


Bild 1:

Zeitlicher Verlauf einer gemessenen Impulsantwort. Dargestellt sind die ersten 180 ms des mit einem Mikrofon aufgenommenen Schalldrucksignals $p(t)$, die Spitzen entsprechen dem Direktschall und den verzögert eintreffenden Reflexionen (Messpunkt R4 in Bild 2)

Die Feinstruktur der Raumimpulsantwort wird zunächst geprägt durch einzeln eintreffende Impulse, wobei als erstes der Direktschall gemessen wird, vorausgesetzt, dass eine direkte Sichtverbindung zwischen Schallquelle und Empfänger gegeben ist. Als nächstes folgen frühe Rückwürfe des Impulses von reflektierenden Flächen, die jeweils durch drei Eigenschaften geprägt sind:

1. die *Intensität*, die durch das Absorptionsverhalten der reflektierenden Flächen bestimmt wird,
2. den *Zeitpunkt* des Eintreffens, der von der Laufzeit, bzw. der Länge des Reflexionspfades abhängig ist, und
3. die *Richtung*, aus der jeder einzelne Rückwurf beim Empfänger eintrifft.

Die Zahl der eintreffenden Rückwürfe nimmt schnell zu, und ihre Dichte wird so hoch, dass sie nicht mehr einzeln wahrgenommen werden können, sondern nur noch mit statistischen Grö-

* Dr. Ingolf Bork, PTB-Arbeitsgruppe „Geräuschemess-technik“, E-Mail: ingolf.bork@ptb.de

ßen zu beschreiben sind. So gibt beispielsweise die Nachhallzeit T an, wie lange es dauert, bis nach Eintreffen des Direktschalls die Schallenergie im Raum auf den 10^{-6} -fachen Wert abgeklungen ist, das heißt, dass der Schalldruckpegel um 60 dB abgenommen hat.

Auf dem Übertragungsweg von der Quelle zum Empfänger ergeben sich im Hörfrequenzbereich sehr unterschiedliche Reflexionsbedingungen, je nachdem ob die Schallwellenlänge größer oder kleiner als die Abmessungen der den Raum begrenzenden Oberflächenelemente ist. Die Schallwellenlänge im Hörbereich reicht von 17 m bei 20 Hz bis zu 0,017 m bei 20 kHz. Nur bei relativ hohen Frequenzen wird der Schall an glatten Oberflächen spiegelnd reflektiert. Im Allgemeinen sind bei jedem Auftreffen des Schalls frequenzabhängige Reflexions-, Streu- und Beugungseigenschaften der Oberflächen zu berücksichtigen, die in ihrer Gesamtheit die Raumimpulsantwort und damit auch den subjektiven Eindruck eines Raumes prägen. Die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen diesen Oberflächeneigenschaften, der Raumgeometrie und der subjektiven Qualitätsbewertung ist Inhalt der Raumakustik.

1.1 Spezielle Räume zur Schallmessung

In der akustischen Messtechnik werden besonders ausgestattete Räume eingesetzt, die bezüglich ihrer Reflexionseigenschaften Extreme darstellen.

Im *reflexionsarmen Raum* werden alle Reflexionen an den Wänden auf ein Minimum reduziert, um den mit Mikrofonen gemessenen Schalldruck nur dem Direktschall von der Quelle zuordnen zu können. Nur so sind saubere Kalibrierbedingungen für Mikrofone und Schallquellen nach Betrag und Phase realisierbar.

Im *Hallraum* wird durch stark reflektierende Wände ein diffuses Schallfeld erzeugt, bei dem die an jedem beliebigen Raumpunkt eintreffende Schallenergie aus allen Richtungen gleich wahrscheinlich ist. Dies ist beispielsweise für die Messung von Absorptionsgraden von Oberflächenmaterialien eine wichtige Voraussetzung. Auch die Bestimmung der Schallübertragungseigenschaften von Wänden und Fenstern findet unter Prüfbedingungen in möglichst diffusen Schallfeldern statt, um die Abhängigkeit der Messergebnisse vom Messort gering zu halten.

1.2 Allgemeine Räume

In der Raumakustik normaler Räume sind die Verhältnisse wesentlich komplexer, da im Prinzip alle möglichen Zustände zwischen Totalreflexion und Absorption vorkommen, wobei zusätzlich das Streuverhalten unebener Oberflächen und die Schallwellenbrechung an Kanten

die exakte Berechnung der Schallausbreitung erheblich erschweren. Diese Eigenschaften der Oberflächen sind in starkem Maße frequenzabhängig.

Die raumakustische Qualität eines Raumes hängt in erster Linie vom Verwendungszweck ab. Für Konzertsäle ist die Nachhallzeit eines der wichtigsten Kriterien. In der Literatur findet man Tabellen, bei denen die Messwerte jeweils nach Filterung in Oktavfrequenzbändern angegeben werden [1]. Es gibt neben der Nachhallzeit noch weitere raumakustische Parameter, die zur Bewertung der Raumakustik eingesetzt werden. Die wichtigsten davon sind in der Norm ISO 3382 [2] beschrieben. Sie beziehen sich auf subjektive Empfindungen des Raumes und der Wahrnehmung von Schallquellen im Raum. Die Bestimmung dieser Parameter beruht auf der Messung von Impulsantworten, die die akustische Übertragungstrecke Sender-Empfänger beschreiben (vgl. Bild 1). Im einfachsten Fall werden solche Impulsantworten dadurch gemessen, dass ein kurzer Impuls in einigen Metern Abstand mit einem Mikrofon aufgezeichnet wird. Ähnlich wie in der Systemtheorie beinhaltet die so gewonnene Impulsantwort das lineare Übertragungsverhalten des Systems und kann verwendet werden, um die Wirkung eines beliebigen Quellsignals am Empfangsort zu berechnen. Mit Hilfe eines Faltungsprozesses wird die Impulsantwort mit dem Quellsignal verknüpft. Die raumakustischen Parameter werden aus den Impulsantworten abgeleitet, bei denen zunächst durch Quadrierung das Schalldrucksignal in ein Leistungssignal mit stets positiven Werten umgewandelt wird. Einzelne Zeitabschnitte entsprechen dann Energien, die zur Berechnung der Parameter miteinander verglichen werden. Beispielsweise wird beim so genannten Deutlichkeitsmaß D_{50} die Energie in den ersten 50 Millisekunden (nach Eintreffen des Direktschalls, vgl. Bild 1) zur Gesamtenergie der Impulsantwort ins Verhältnis gesetzt: So ist diese Größe ein Maß für die relative Stärke des Direktschalls und der ersten Reflexionen, die in diesem Zeitbereich vom Gehör nicht getrennt empfunden werden. Ein großer D_{50} -Wert entspricht somit einem starken frühen Schallanteil, bzw. einem relativ schwachen Nachhall. D_{50} -Werte über 50 % sind Voraussetzung für eine gute Sprachverständlichkeit.

Für genauere Untersuchungen werden die raumakustischen Parameter in Frequenzbändern angegeben, wobei meist Filter mit Oktavbandbreite verwendet werden, bei denen die obere Grenzfrequenz doppelt so hoch ist wie die untere Grenzfrequenz. Aus diesen frequenzabhängigen Werten werden heute teilweise Einzahlwerte zur Kennzeichnung von Räumen abgeleitet. So stellt beispielsweise die von L. Bera-

nek eingeführte Größe Bassratio (BR) das Verhältnis der Summe der Nachhallzeiten in der 125 Hz- und 250 Hz-Oktave zur Summe der Nachhallzeiten in der 500 Hz- und 1000 Hz-Oktave dar. Räume mit starker Bassübertragung zeichnen sich durch einen hohen BR -Wert aus [1].

1.3 Beispiel zur Deutlichkeit D_{50}

An einem Beispiel soll die Ortsabhängigkeit der Deutlichkeit in einem Auditorium gezeigt werden. Die Messungen wurden im Städtischen Museum Braunschweig durchgeführt, dessen akustische Eigenschaften besonders geschätzt werden. Als Schallquelle wurde ein Lautsprecher mit kugelförmiger Richtcharakteristik an einer typischen Sprecherposition im Zentrum des Podiums aufgestellt (Höhe: 1,5 m über dem Boden). Der in Bild 2 dargestellte Raumausschnitt stellt nur den Teil des Hauptraumes des Museums dar, der für Sprach- und Musikdarbietungen verwendet wird. Durch diese räumliche Trennung und die Ausgestaltung einiger Oberflächen mit Absorbieren bzw. Teppichboden wird der durch den großen Hauptraum verursachte lange Nachhall im Pegel so reduziert, dass er den Klang für Zuhörer angenehm unterstützt, ohne die Präzision des Klangeinsatzes hörbar zu stören.

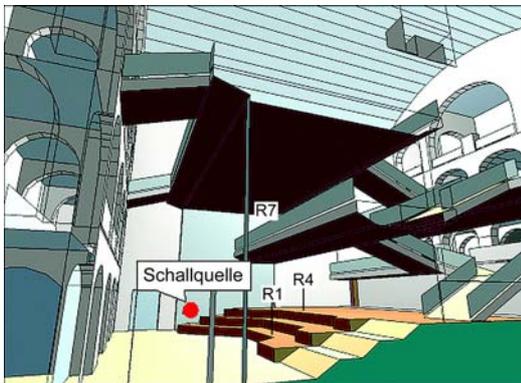


Bild 2: Positionen der Messpunkte R1, R4 und R7 in einem Auditorium (Städtisches Museum, Braunschweig) im Computermodell.

Die in Bild 2 verwendete schematische Darstellung des Auditoriums wurde mit Hilfe einer Raumsimulationssoftware im Computer erstellt. Diese dreidimensionale Modellierung des Raumes bildet die Basis für raumakustische Berechnungen.

Die Messergebnisse an drei ausgewählten Zuhörerplätzen R1, R4 und R7 sollen bezüglich ihrer Sprachverständlichkeit verglichen werden. Die zugehörigen Abstände von der Schallquelle sind 4,4 m (R1), 9,6 m (R4) und 6,9 m (R7). Die wahrgenommene Sprachverständlichkeit ist wegen der größeren Entfernung am Platz R4 am

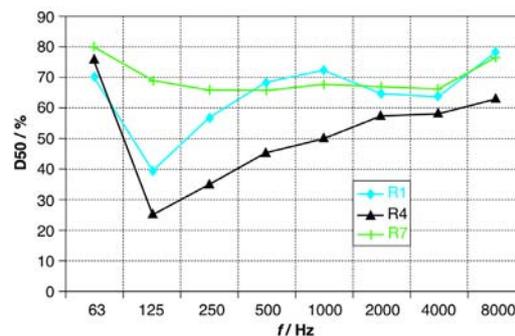


Bild 3: Frequenzabhängigkeit der Deutlichkeit D_{50} gemessen an drei verschiedenen Zuhörerplätzen. Die niedrigen Werte in den Oktavbändern 125 Hz und 250 Hz sind durch den langen Nachhall in diesem Frequenzbereich bedingt (vgl. Bild 4).

geringsten. Bild 3 zeigt die gemessene Frequenzabhängigkeit der Deutlichkeit an den drei Positionen. Erwartungsgemäß ist die Deutlichkeit bei R4 gegenüber den näher gelegenen Plätzen R1 und R7 für fast alle Frequenzen geringer. Bemerkenswert sind die deutlich niedrigeren Werte in der 125 Hz und 250 Hz-Oktave, während sich bei R7 nur eine geringe Frequenzabhängigkeit zeigt. Die Ursache hierfür ist durch die raumakustischen Verhältnisse bedingt: Der Raum hat ein Volumen von etwa 10 000 m³ und besitzt in dieser Oktave seine maximale Nachhallzeit, die mit 3,5 s bis 4 s für ein Auditorium relativ lang ist (vgl. Bild 4). Daher trifft noch sehr viel Schallenergie aus allen Richtungen später als 50 ms nach dem Direktschall beim Empfänger ein. Messpunkt R7 zeichnet sich dagegen durch eine Position unterhalb einer niedrigen schallabsorbierenden Zwischendecke aus (1,8 m über dem Messpunkt, vgl. Bild 2), wodurch der Schall, der nicht auf direktem Wege von der Schallquelle kommt, erheblich geschwächt wird. Die Deutlichkeitskurve wird dadurch wesentlich ausgeglichener, was zu einer höheren Sprachverständlichkeit führt.

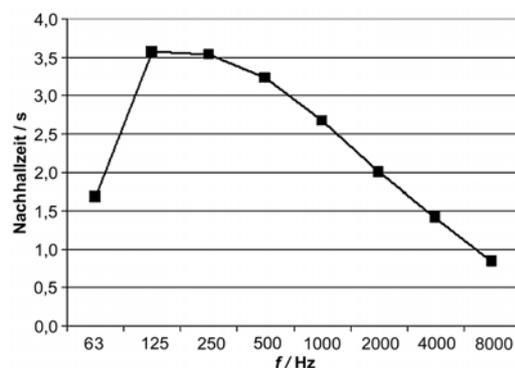


Bild 4: Mittelwerte der in Oktavbändern gemessenen Nachhallzeit des Städtischen Museums Braunschweig. Die hohen Werte sind durch das große Volumen und die geringe Absorption des Raumes ab 125 Hz bedingt, in der 63 Hz-Oktave wird die Ausklingzeit durch die Absorption der gläsernen Gewölbedecke deutlich verkürzt.

2 Subjektive Bewertung von raumakustischen Eigenschaften

Da die akustische Qualität eines Raumes nicht allein durch raumakustische Parameter bestimmt werden kann, sind subjektive Beurteilungen und Vergleiche ein wesentlicher Bestandteil der Raumakustik. Für derartige Hör-

vergleiche bedient man sich der so genannten Auralisation, einer Darbietung räumlicher Schallereignisse vorwiegend über Kopfhörer, bei der das beidohrige Hören wie im realen Raum simuliert wird. Im Prinzip sind verschiedene Konfigurationen zur Signalaufbereitung für die Auralisation möglich, wobei die Kunstkopftechnik die wesentliche Voraussetzung für die Realisierung darstellt. Hierzu wird eine Nachbildung eines menschlichen Kopfes verwendet, in dessen Ohrkanälen sich zwei Mikrofone an Stelle der Trommelfelle befinden, mit denen der Klang so übertragen werden kann, dass bei Wiedergabe dieser Signale über Kopfhörer ein Eindruck vermittelt wird, als befände man sich akustisch am Ort des Kunstkopfes.

2.1 Direktaufnahme des Schallereignisses über den Kunstkopf

Für eine reale Schallquelle kann der Klang am Ort des Kunstkopfes bei Wiedergabe über geeignete Kopfhörer sehr realistisch nachempfunden werden. Hierbei ist insbesondere die räumliche Wahrnehmung des Schalls der Wiedergabe über Lautsprecher deutlich überlegen. Das Verfahren der Aufzeichnung und Wiedergabe der beiden akustischen Ohrsignale wird als *Binauraltechnik* bezeichnet. Wird nun dieselbe Schallquelle in verschiedenen Räumen aufgenommen, kann durch Hörvergleich solcher Kunstkopfaufnahmen ein subjektiver Test durchgeführt werden, bei dem Versuchspersonen zu den Unterschieden der Raumeindrücke befragt werden.

2.2 Faltung mit gemessener binauraler Impulsantwort

Wird anstelle realer Schallereignisse eine Impulsantwort binaural aufgezeichnet, besteht die Möglichkeit, beliebige Quellsignale hiermit zu falten und über Kopfhörer wiederzugeben. Die hierbei zu verwendenden Quellsignale dürfen allerdings keine Reflexionen aus dem Aufnahmeraum enthalten, da sonst gleichzeitig die Raumeigenschaften zweier Räume übertragen werden. Daher werden hierfür Aufnahmen aus reflexionsarmen Räumen benötigt. Auf diese Weise muss für einen Hörvergleich verschiedener Räume keine natürliche Schallquelle mehr vorhanden sein, sondern es genügt, die verschiedenen Impulsantworten beim Faltungsprozess zu verwenden.

2.3 Faltung mit berechneter binauraler Impulsantwort

Eine weitere Möglichkeit für Hörvergleiche besteht in der Verwendung von Computersimulationen. Hierzu werden in einem Rechner die Ausbreitungseigenschaften zwischen Schallquelle und virtuellem Kunstkopf entsprechend dem programmierten Raummodell und deren

Oberflächeneigenschaften simuliert. Dabei wird in kommerziellen Programmen zurzeit noch mit einer Beschränkung auf geometrische Schallausbreitung gearbeitet. Das bedeutet, dass Welleneffekte und Resonanzerscheinungen, wie sie besonders in kleineren Räumen auftreten, nicht realisiert werden können.

Die Vorteile der binauralen Auralisationsmöglichkeiten liegen auf der Hand: Es können im Direktvergleich völlig verschiedene Räume mit demselben Quellsignal miteinander verglichen werden und im Falle von Computersimulationen ganz gezielt einzelne Parameter (Position von Wänden, Absorptionsgrade, Streugrade) variiert und ihr Einfluss auf den subjektiven Eindruck untersucht werden.

Andererseits bietet die Auralisation auch die Möglichkeit, raumakustische Simulationen eines real existierenden Raumes mit Messungen zu vergleichen, indem geeignete Quellsignale einerseits mit der gemessenen und andererseits mit der durch Simulation gewonnenen Impulsantwort gefaltet werden.

Wie die von der PTB initiierten Ringvergleiche gezeigt haben, hat die Qualität heutiger Simulationsprogramme einen hohen Standard erreicht. Voraussetzung für eine zuverlässige Vorausberechnung der raumakustischen Parameter eines Raumes ist allerdings eine genaue Kenntnis der akustischen Eigenschaften der Raumboflächen, das heißt deren frequenzabhängige Absorption und der Streugrad [3-5].

3 Programm zur Auralisation bei tiefen Frequenzen

Die Auralisationsmodule von aktueller Raumsimulationssoftware können wegen der die Rechnung vereinfachenden Beschränkung auf energetische Ausbreitungsvorgänge die Verhältnisse bei tiefen Frequenzen meist nicht korrekt wiedergeben. Für die Berechnung von Schallfeldern in kleinen Räumen ist jedoch die Berücksichtigung der Phasenlage des Schalldrucks unerlässlich, da Resonanzeffekte durch Überlagerung mehrerer Schallwellen gleicher Frequenz mit unterschiedlicher Ausbreitungsrichtung den Raumeindruck im Frequenzbereich unter 300 Hz ganz wesentlich prägen. Um den subjektiven Eindruck dieser oft sehr störenden Klangwirkung bewusst zu machen, wurde in der Arbeitsgruppe Geräuschmesstechnik ein Programm entwickelt, das als Ergänzung zu herkömmlichen Auralisationen eingesetzt werden kann.

3.1 Stehende Wellen

In kleineren Räumen gewinnen zu tiefen Frequenzen hin die Welleneigenschaften bei der Schallausbreitung zunehmend an Bedeutung. So führt beispielsweise in einem rechteckförmigen Raum die Parallelität je zweier gegenüber-

liegender Wände zu einem Resonanzverhalten in Form stehender Wellen. Für diejenigen Frequenzen, deren Wellenlänge und deren ganzzahlige Vielfache gleich dem doppelten Abstand $2*b$ zwischen den parallelen Wänden ist, bilden sich besonders starke Schallfelder aus, da sich zwischen den Wänden eine cosinusförmige räumliche Abhängigkeit des Schalldrucks ergibt. Diese Schalldruckverteilung mit Maximalwerten an den beiden Wänden ist insbesondere dann gegeben, wenn genau mit einer der zugehörigen Resonanzfrequenzen $f_n = n*c/(2*b)$, ($n = 1,2,3,\dots$) angeregt wird. Man spricht hier von den so genannten *Raummoden*. Die sich einstellende Schalldruckamplitude ist neben der Stärke der Schallquelle sowohl von den Reflexionseigenschaften der beiden Wände als auch vom Abstand der Schallquelle sowie dem Messpunkt zwischen den beiden Wänden abhängig. Bei Anregung in einem Schalldruckminimum kann theoretisch bei der betreffenden Resonanzfrequenz kein Schall erzeugt werden. Befindet sich die Schallquelle dagegen in einem der Maxima (insbesondere an den Wänden), ist der erzeugte Schalldruck bei der betreffenden Frequenz dagegen besonders hoch.

Da ein rechteckförmiger Raum aus drei solchen parallelen Wandpaaren besteht, ergeben sich für alle drei Raumrichtungen gleichartige Zusammenhänge. Zusätzlich können sich auch kombinierte Moden ausbilden, bei denen gleichzeitig zwei oder drei Wandpaare beteiligt sind. Die Anzahl der in einem bestimmten Frequenzbereich auftretenden Raummoden ist jedoch eindeutig durch die Raumabmessungen bestimmt.

3.2 Idealer Rechteckraum

Für einen idealen Rechteckraum ohne Mobiliar lassen sich die stehenden Wellen in ihrer räumlichen Verteilung, sowie ihre zugehörigen Resonanzfrequenzen und Dämpfungen genau berechnen. Das aus der mechanischen Schwingungsanalyse bekannte Messverfahren der Modalanalyse ermöglicht es, durch Messung an einer Vielzahl von Messpunkten an der Oberfläche schwingender Strukturen auf deren wesentliche Resonanzeigenschaften zu schließen. Aus der Kenntnis der Resonanzfrequenzen, deren Dämpfung und der zugehörigen Schwingungsformen, der so genannten „modalen Parameter“, kann auf das Schwingungsverhalten bei jeder Frequenz, und bei jedem beliebigen Anregungsort geschlossen werden.

In ähnlicher Weise kann in der Raumakustik durch die Kenntnis dieser drei Größen bei den diskreten Resonanzen auf das Verhalten des Schallfeldes bei jeder beliebigen Frequenz in der Umgebung der Resonanzen geschlossen werden [6]. Der Einfluss der einzelnen Resonanzen bei einer

bestimmten Frequenz hängt sowohl vom Ort der Anregung und der Messung ab, als auch von den Frequenzen der Resonanzen und deren Dämpfung. Dieser Zusammenhang ist im Rechteckraum mit einfachen mathematischen Hilfsmitteln berechenbar. So lassen sich frequenzabhängige Übertragungsfunktionen vom Schallsender zum Empfänger berechnen, wenn die Positionen und Raumdaten (Abmessungen und Absorption) bekannt sind. Aus diesen Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich lassen sich durch inverse Fourier-Transformation im Zeitbereich die zugehörigen Impulsantworten bestimmen. Sie können dazu verwendet werden, beliebige Schallsignale genau so zu modifizieren, wie es der Raum durch seine modalen Eigenschaften macht.

Das in der Arbeitsgruppe entwickelte Rechenprogramm ermöglicht dem Benutzer zunächst interaktiv die Dimensionen eines Rechteckraumes und die Absorption der Wände einzugeben. Nach Eingabe der Positionen von Schallquelle und Hörer kann die zugehörige Impulsantwort berechnet und mit beliebigen Schallsignalen gefaltet werden. Bei der Wiedergabe des Ergebnisses über Kopfhörer kann die Wirkung der Raumresonanzen im direkten Vergleich mit dem Originalsignal beurteilt werden.

Da die Berechnung nur für die tiefen Frequenzen durchgeführt wird, bei der die Raummoden von Bedeutung sind, besteht die Möglichkeit, diesen Frequenzbereich allein abzuhören oder auch die höheren Frequenzen unverändert zuzumischen. Ferner ist es möglich, unter Verwendung eines herkömmlichen Raumsimulationsprogramms auf der Basis der geometrischen und statistischen Akustik den Einfluss des Raumes auch auf die höheren Frequenzen zu untersuchen. Dazu können Klänge, die mit einem solchen Programm zur Auralisation erstellt wurden, als Eingangssignal für das modale Programm verwendet werden.

Das neue Programm kann auf diese Weise als Ergänzung zur Auralisation von Raumsimulationsprogrammen verwendet werden. Das Programm verschafft dem Benutzer einen klaren Höreindruck zum Einfluss von tiefen Raumresonanzen auf den Klang von Schallquellen in kleinen Räumen. Typische Anwendungen sind Untersuchungen zur Optimierung von Lautsprecheraufstellungen für subjektive Hörtests in kleinen reflexionsarmen Räumen, da für tiefe Frequenzen stehende Wellen auch in solchen Messräumen nicht vernachlässigt werden können. Darüber hinaus kann der Einfluss der Wandabsorption und der Raumgeometrie auf den Klang sowie zur Aufstellung von Aufnahmemikrofonen in kleinen Räumen untersucht werden. Das Programm ermöglicht durch Vergleich mit dem Originalklang ein bewusstes Wahrneh-

men der Wirkung von Raumresonanzen und eignet sich daher auch für die Ausbildung in tontechnischen Berufen.

3.3 Beliebige Raumformen

Für die Praxis der akustischen Raumoptimierung ist die Beschränkung auf ideale Rechteckräume nicht ausreichend. Daher wurde auch untersucht, wie mit Hilfe eines universellen mathematischen Berechnungsprogramms auf der Basis der finiten Elemente (FEM) die gesuchten Übertragungsfunktionen auch für beliebige Raumformen bestimmt werden können. An einem Beispiel soll gezeigt werden, wie sich die Schalldruckverteilung einer Raummode bei 33,3 Hz verändert, wenn in einem Rechteckraum geringfügige Abweichungen von der Idealform eingefügt werden. In diesem Beispiel wurde eine senkrechte Raumkante durch eine schräge Wand verändert sowie der Einfluss zweier Klimaanlagekanäle berücksichtigt. Die zunächst deutlich sichtbaren senkrecht zueinander stehenden Knotenflächen werden durch die Veränderung stark verformt, ohne dass die Resonanzfrequenz wesentlich verändert wird.

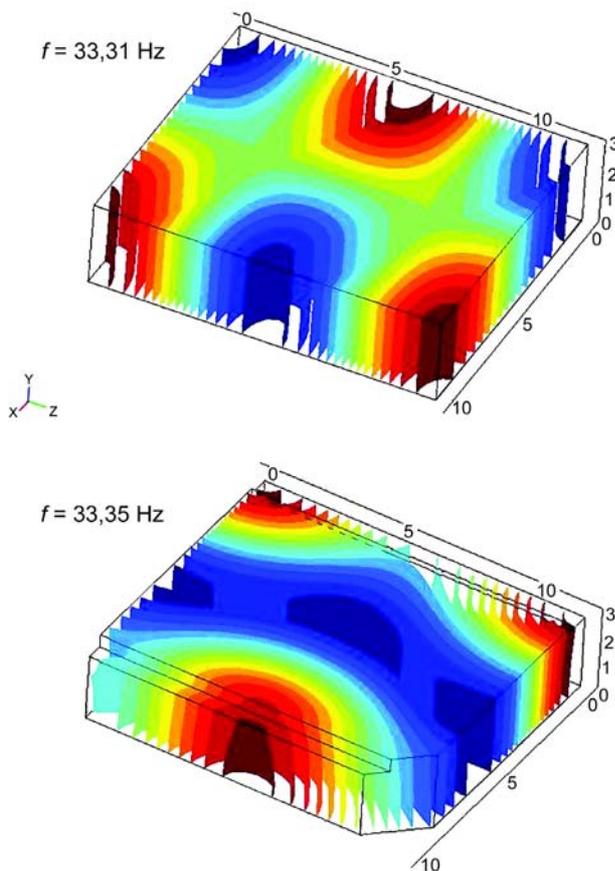


Bild 5:

Veränderung der Schalldruckverteilung im Rechteckraum bei 33,3 Hz durch eine schräge Raumecke und zwei Klimakanäle im Deckenbereich. Blau: Flächen konstanten Schalldrucks mit positiver Phase, rot: Flächen konstanten Schalldrucks mit umgekehrter Phasenlage. Die Farbintensität entspricht der lokalen Schalldruckamplitude

Der mathematische Aufwand für derartige Berechnungen zur Auralisation tiefer Frequenzen ist zwar erheblich größer, aber es hat sich gezeigt, dass grundsätzlich keine Einschränkungen bei der Realisierung zu erwarten sind, insbesondere in Anbetracht der weiterhin zunehmenden Leistungsfähigkeit moderner Rechner.

4 Ausblick

Die aus den Impulsantworten gewonnenen raumakustischen Parameter stellen wichtige Messgrößen für die Beschreibung der akustischen Qualität von Räumen dar. Die Analyse des Frequenzganges solcher Parameter an verschiedenen Orten im Raum lässt wichtige Rückschlüsse auf die raumakustischen Eigenschaften und deren Ursachen zu. Neuere Schallpegelmessgeräte erlauben zusätzlich die Bestimmung einiger raumakustischer Parameter und ermöglichen damit detailliertere Aussagen über die Ursachen hoher Schallbelastung und schlechter Sprachverständlichkeit.

Die Auralisation stellt ein wertvolles Werkzeug zur Darstellung raumakustischer Messungen und Simulationen dar, das dem Hörer auch ohne Kenntnis der raumakustischen Parameter einen akustischen Eindruck des räumlichen Schallfeldes vermittelt und damit eine subjektive Qualitätsbewertung ermöglicht. Bei der raumakustischen Simulation und Auralisation kleiner Räume ist die Berücksichtigung des Resonanzverhaltens bei tiefen Frequenzen durch stehende Wellen unerlässlich.

Für die angewandte Geräuschesmesstechnik bilden die vorgestellten Methoden der Raumakustik und der Auralisation eine Basis zur Optimierung von Schallausbreitungsvorgängen, bei der auch subjektive Komponenten berücksichtigt werden können.

Literatur

- [1] *Beranek, L.:* Concert and Opera Halls: How They Sound, 2. Auflage, Springer-Verlag, 2003).
- [2] DIN EN ISO 3382, Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik
- [3] *Bork, I.:* A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation, *Acustica united with acta acustica* Vol. **86** (2000), S. 943–956
- [4] *Bork, I.:* Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. **91** (2005), S. 740–752
- [5] *Bork, I.:* Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part II: Calculations, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. **91** (2005), S. 753–763
- [6] *Bork, I.:* Modalanalyse von Schallfeldern, *Acustica* **75** (1991), S. 154–167

Elastodynamische Materialparameter

Martin Schmelzer¹, Christoph Kling²

Einleitung

Ein Aspekt der Materie sind ihre mechanischen Eigenschaften. Dazu gehört der Effekt der Verformung unter Einwirkung von Kräften. Hiervon macht das Ingenieurwesen (z. B. in der Fertigungstechnik beim Umformen durch Pressen und Walzen) aber auch die Messtechnik (z. B. für Wägezellen) regen Gebrauch. Auch erfordern hohe Maschinengeschwindigkeiten (z. B. bei Kolbenmaschinen, Turbinen und zunehmend auch bei Robotern) die Berücksichtigung der Verformung infolge von Trägheitskräften. Das Gebiet der Akustik wiederum basiert auf der Ausbreitung von Verformungen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern.

Die Irreversibilität dieser Prozesse kann in Form dämpfender Bauelemente für technische Anwendungen (z. B. bei Knautschzonen in der Sicherheitstechnik) genutzt werden. Gerade in der Bauakustik war aber der Einfluss der Materialdämpfung auf die Schalldämmung lange Zeit noch weitgehend unerforscht. Dies lag auch daran, dass bereits einfache technische Systeme große physikalische Komplexität besitzen und daher hohe Anforderungen an die Modellbildung stellen. Hierin hat die PTB Untersuchungen aufgenommen.

Die Verformung und ihre Dämpfung hängen ab von u. a. der chemischen und physikalischen Beschaffenheit der Materialien und der Vorgeschichte von Verformung, Belastung und Umgebungsbedingungen wie der Temperatur. Die Beschreibung von Verformung und deren Dämpfung erfolgt mathematisch. In den Gleichungen tauchen quantifizierende materialspezifische Parameter auf, die experimentell zu bestimmen sind.

Die Übertragbarkeit der Materialbeschreibung auf andere Anwendungsfälle ist eine äußerst wichtige Anforderung. Hierfür werden auch in der Bauakustik und in der PTB große Anstrengungen unternommen. Die Übertragbarkeit wird möglich, wenn die Materialbeschreibung unabhängig von der Bauteilgeometrie ausgeführt wird. Hierbei kommen infinitesimale Beschreibungen über Spannungs- und Verzerrungstensoren zum Einsatz.

Ein einfacher Hookescher Zusammenhang reicht jedoch für viele industriell interessante

Werkstoffe und auch in der Bauakustik nicht mehr aus, um deren Gedächtniseffekte zu beschreiben. Abhilfe schafft der Übergang auf die Beschreibung linear-viskoelastischen Verhaltens, formuliert z. B. mit Gedächtnisintegralen [2], inneren Variablen [1], [6] oder – im Fall harmonischer Schwingungen – mit frequenzabhängigen komplexen Moduln. Einen Überblick bietet [5].

Die in den Materialbeschreibungen auftretenden Parameter müssen für jedes Material individuell bestimmt werden. Hierfür gibt es verschiedene, teils genormte Experimente: [4]. Häufig wird von Resonanzexperimenten Gebrauch gemacht: [10]. Aber auch Stoß- und Ausschwingexperimente finden Anwendung: [7], [9]. Die Richtlinie [11] bietet in ihrem fünften Teil einen Überblick.

Das Beispiel Acrylglas

Die Bestimmung der materialspezifischen Parameter wird im Folgenden exemplarisch vorgeführt.

Hintergrund war hierbei, dass in der Bauakustik die Materialdämpfung einen Einfluss auf die Schalldämmung besitzt, der an der PTB untersucht werden sollte. Dazu wurden Schalldämmungsmessungen an einem Modellprüfstand aus Acrylglas verglichen mit numerischen Simulationen dieser Konstellation. Für die Numerik wurden die Materialparameter bis zu Frequenzen von 10 kHz als Eingangsdaten benötigt und mussten folglich in gesonderten Experimenten bestimmt werden.

Die in der Einleitung angesprochenen Anforderungen an die Übertragbarkeit und die Frequenzabhängigkeit der Materialparameter waren dabei die Hauptherausforderungen.

Aufbau und Messung

Das Probenstück wurde als Balken ausgeführt, mittig eingespannt und dort mit einem elektrodynamischen Shaker anregt. An dem Balken waren sowohl an der Einspannung als auch symmetrisch vor den freien Enden Beschleunigungssensoren angebracht. Zu jeder Seite besaß der Balken eine Länge von 1 m. Der Querschnitt war quadratisch mit 2,5 cm Kantenlänge. Bild 1 zeigt eine Skizze des Aufbaus.

¹ Dr. Martin Schmelzer, PTB-Arbeitsgruppe „Bauakustik“
E-Mail: martin.schmelzer@ptb.de

² Christoph Kling, PTB-Arbeitsgruppe „Bauakustik“
E-Mail: christoph.kling@ptb.de

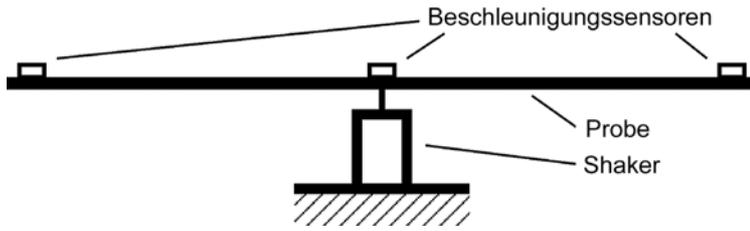


Bild 1:
Skizze des Aufbaus der Balkenprobe

Gemessen wurden die Übertragungsfunktionen zwischen der Einspannung und beiden freien Enden. Die Ausführung dieser Messungen geschah mit Maximalfolgen und Sweeps.

Rechnung

Da die Werkstoffeigenschaften bis zu hohen Frequenzen benötigt wurden, wurde die Probe nicht als Euler-Bernoulli-Balken sondern als Timoshenko-Balken modelliert:

$$\begin{aligned} \rho I \dot{\varphi} &= \sum_{p=0}^n \left(G_p A \left[(w' - \tilde{w}'_p) - (\varphi - \tilde{\varphi}_p) \right] + E_p I (\varphi'' - \tilde{\varphi}''_p) \right) \\ \rho A \dot{w} &= \sum_{p=0}^n G_p A \left[(w'' - \tilde{w}''_p) - (\varphi' - \tilde{\varphi}'_p) \right] \\ \dot{\tilde{w}}_p &= b_p (w - \tilde{w}_p) \quad p=0, \dots, n \\ \dot{\tilde{\varphi}}_p &= b_p (\varphi - \tilde{\varphi}_p) \quad p=0, \dots, n \end{aligned} \tag{1}$$

mit der Massendichte des Materials ρ , dem Flächenmoment zweiter Ordnung I , der Querschnittsfläche A und den zu bestimmenden Moduln G_p und E_p und deren Zeitkonstanten b_p aus der Werkstoffbeschreibung mit inneren Variablen. Die orts- und zeitabhängigen Größen w und φ bezeichnen die Durchbiegung des Balkens und die Verdrehung der Querschnitte. Die Größen mit einer Tilde sind die jeweiligen inneren Variablen.

Für harmonische Schwingungen mit der Anregungsfrequenz Ω erhält man daraus:

$$\begin{aligned} -\rho I \Omega^2 \varphi &= G(\Omega) A (w' - \varphi) + E(\Omega) I \varphi'' \\ -\rho A \Omega^2 w &= G(\Omega) A (w'' - \varphi') \end{aligned} \tag{2}$$

mit nur noch ortsabhängigen Größen w und φ , den Moduln

$$\begin{aligned} G(\Omega) &= \sum_{p=0}^n G_p \frac{i\Omega}{i\Omega + b_p} \\ E(\Omega) &= \sum_{p=0}^n E_p \frac{i\Omega}{i\Omega + b_p} \end{aligned} \tag{3}$$

und der imaginären Einheit $i = \sqrt{-1}$. Dabei werden die Real- bzw. Imaginärteile von $G(\Omega)$ und $E(\Omega)$ als Speicher- bzw. Verlustmodule bezeichnet.

Bei der Bestimmung der G_p , E_p und b_p sind thermodynamische Gesetzmäßigkeiten zu beachten. Forderungen durch den 2. Hauptsatz werden automatisch erfüllt, wenn man die Identifikation statt mit dem Youngschen Modul $E(\Omega)$ mit dem Kompressionsmodul $K(\Omega)$ ausführt und $E(\Omega)$ berechnet, vgl. [8]

$$E(\Omega) = \frac{9 K(\Omega) G(\Omega)}{3 K(\Omega) + G(\Omega)} \tag{4}$$

Die Randbedingungen sind von der Art, dass bei der Einspannung die Auslenkung vorgegeben wird und die Gesamtneigung aus Gründen der Symmetrie Null ist. An den freien Rändern sind alle Kraftgrößen Null. Mit dem üblichen Exponentialansatz kann nun die Schwingungsform berechnet werden. Das Verhältnis der Auslenkungen an den Sensorpositionen – einerseits an der Einspannung, andererseits an den freien Enden – liefert die Übertragungsfunktion zwischen diesen Punkten.

Ergebnisse

Ein Suchalgorithmus mit Simplex-Verfahren ähnlich [3] wählte Werte für die Parameter G_p , K_p und b_p mit $p = 0, \dots, n$, führte damit stets die Neuberechnung der Übertragungsfunktion nach dem zuvor beschriebenen Schema aus, verglich die so berechnete Übertragungsfunktion mit der gemessenen und führte die beiden zur optimalen Deckung. Letzlich ergab sich die in Bild 2 gezeigte gute Übereinstimmung. Dabei ist das Identifikationsverfahren auch in der Lage, kleinere Lücken im Frequenzbereich der Messung zu überbrücken.

Mit den Parametern G_p , K_p und b_p für $p = 0, \dots, n$, aus dem Identifikationsalgorithmus und den Gleichungen (3) und (4) erhält man die in den Bildern 3 und 4 aufgetragenen reellen und imaginären Komponenten der komplexen Moduln.

Mit diesen komplexen Moduln wird das Materialverhalten im Frequenzbereich von 5 Hz bis 10 kHz beschrieben. Diese Parameter charakterisieren ausschließlich das Material und sind daher auf andere Anwendungsfälle übertragbar. Um das Schwingungsverhalten eines anderen Bauteils zu berechnen, z. B. einer Wand, deren Schalldämmung zu simulieren ist, sind diese Moduln in die Gleichungen jenes anderen Bauteils einzusetzen.

Unsicherheit

Die Bestimmung der Größen des Aufbaus (Abmessungen, Massendichte) ist mit Unsicherheiten behaftet, ebenso die Messung der Übertragungsfunktion und der Identifikationsalgorithmus. Daraus ist die Unsicherheit der Werkstoffparameter zu berechnen. Dies ist für die PTB eine wichtige Aufgabe.

Doch die mathematischen Anforderungen sind insbesondere wegen der hochgradigen Nicht-linearität und der Implizitheit der Funktionen sehr hoch. Die Existenz komplexer Größen in den Gleichungen erhöht den Aufwand weiter. Erste Untersuchungen deuten an, dass die Unsicherheiten bei den Frequenzen am kleinsten zu sein scheinen, wo die Resonanzen des Messobjekts liegen. Der Einsatz der Monte-Carlo-Simulation befindet sich in Vorbereitung. Endgültige Werte können daher noch nicht angegeben werden.

Literatur

- [1] M. A. Biot: Theory of Stress-Strain Relations in Anisotropic Viscoelasticity and Relaxation Phenomena. *J. appl. Phys.*, Vol. 25, No. 11 (1954), pp. 1385–1391
- [2] M. E. Gurtin, E. Sternberg: On the Theory of Viscoelasticity. *Arch. Rat. Mech. Anal.*, Vol. 11 (1962), pp. 291–356
- [3] J. A. Nelder, R. Mead: A Simplex Method for Function Minimization. *Comp. J.*, Vol. 7 (1965), pp. 308–313
- [4] DIN 53535: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Grundlagen für dynamische Prüfverfahren, Beuth, 1982
- [5] N. W. Tschoegel: Time Dependence in Material Properties: An Overview. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 1, No. 1 (1997), pp. 3–31
- [6] A. R. Johnson: Modeling Viscoelastic Materials Using Internal Variables. *Shock and Vibration Digest*, Vol. 31, No. 2 (1999), pp. 91–100
- [7] W. Chen, F. Lu, B. Zhou: A Quartz-Crystal-Embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials. *Experimental Mechanics*, Vol. 40, No. 1 (2000), pp. 1–6
- [8] S. B. Sane, W. G. Knauss: On Interconversion of Various Material Functions of PMMA. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 5, No. 4 (2001), pp. 325–343
- [9] M. Schmelzer: Identifikation der Parameter von Zeitbereichsmodellen linear-viskoelastischer Werkstoffe. *Inst. für Dynamik und Schwingungen*, Techn. Univ. Braunschweig, 2004, zugl. *Techn. Univ. Braunschweig, Diss.*, 2003
- [10] R. Caracciolo, A. Gasparetto, M. Giovagnoni: An Experimental Technique for Complete Dynamic Characterization of a Viscoelastic Material. *J. Sound Vibration*, Vol. 272 (2004), pp. 1013–1032
- [11] VDI-Richtlinie 3830: Werkstoff- und Bauteildämpfung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004/2005
- [12] C. Kling, M. Schmelzer: Dämpfung in der Bauakustik – Ermittlung der Materialdämpfung mit Hilfe eines N-Parameter-Modells. *Fortschritte der Akustik – DAGA '06*, (2006), pp. 469–470

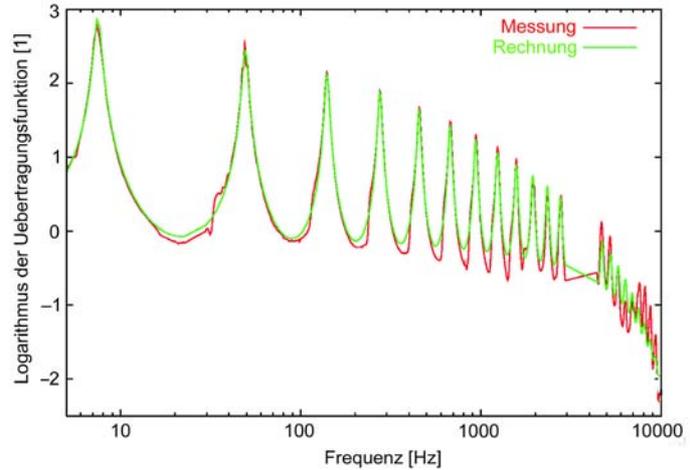


Bild 2:

Gemessene und gerechnete Übertragungsfunktionen im Vergleich, gezeigt ist der Betrag, es gibt bei der Messung eine Lücke im Frequenzbereich von 3 kHz bis 4,5 kHz.

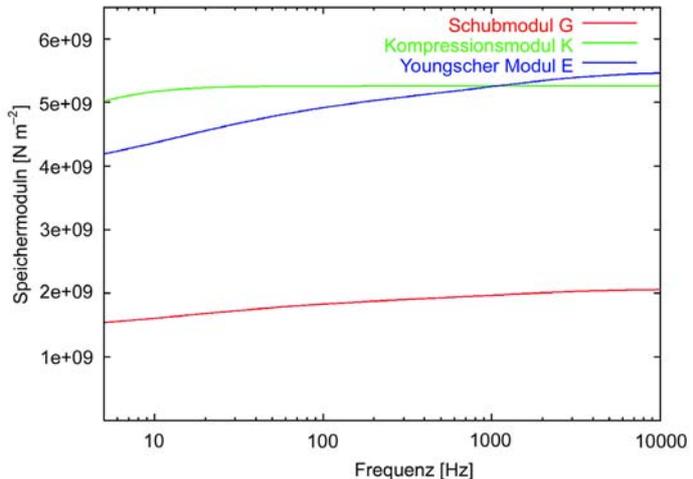


Bild 3:

Identifizierte Speichermoduln (Realteile der Gleichungen (3) und (4))

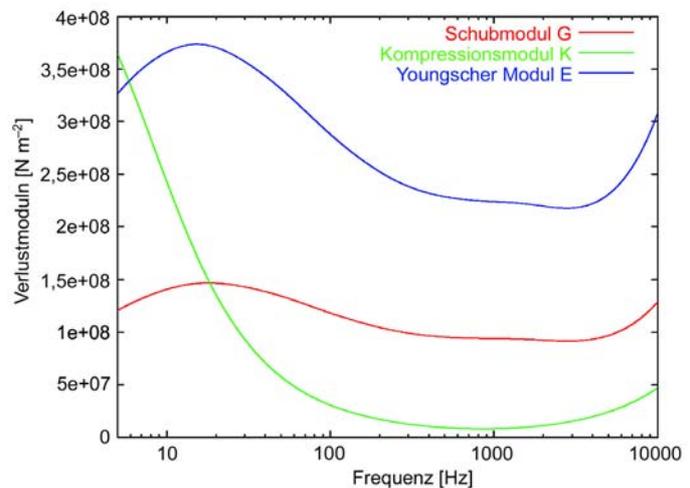


Bild 4:

Identifizierte Verlustmoduln (Imaginärteile der Gleichungen (3) und (4))