RAUMFORM UND SCHALLDIFFUSITÄT

Von

K. Vajk

Lehrstuhl für Darstellende Geometrie, Technische Universität Budapest
(Eingegangen am 2. Dezember 1972)

Vorgelegt von Prof. Dr. G. Petrich

1. Raumakustische Aufgaben des Architekten

In einem kleinen Lande werden in der Regel nicht alle Tage — vielleicht nicht einmal jedes Jahr — Gebäude errichtet, bei deren Projektierung auch bedeutende raumakustische Probleme zu lösen wären. Derartige Bauten — Theater, Opernhaus, Konzertsaal, Vortragssaal, großer Konferenzsaal usw.— werden im allgemeinen unter Mitwirkung von Fachleuten der Akustik entworfen.

Schaffende Architekten haben es jedoch oft erlebt, wie schwer sich gegebenenfalls die baulichen und akustischen Forderungen zufriedenstellend aufeinander abstimmen lassen. Es handelt sich jedoch um Bauten, bei denen sich meistens weder der Architekt noch der Akustiker mit Kompromissen begnügen darf. Es muß nicht die optimale Lösung, sondern eine Lösung gefunden werden, bei der das Gebäude schließlich durch seine der Größe der Aufgabe angemessene, anspruchsvolle architektonische Erscheinung und seine womöglich günstigsten akustischen Kennwerte volle Befriedigung gewährt.

Die Schwierigkeit wird fast immer durch die auf objektive Ursachen zurückzuführenden Umstände herbeigeführt, daß nicht alle raumakustische Parameter im voraus genau geplant werden können. Im Laufe der Ausführung des Gebäudes bzw. des Saales müssen die Akustiker mehrfach Instrumentalmessungen durchführen und nach der Verarbeitung der Ergebnisse sind oft Änderungen in der innenarchitektonischen Gestaltung — u. U. die Wahl von anderartigen raumabgrenzenden Flächen — mehr oder weniger kostspielige Umgestaltungen erforderlich.

Offenbar ist der Entwurfsverfasser nicht gerne zu einer architektonischen Umplanung des Innenraumes bereit, noch viel weniger jedoch dazu, die Raumform, die Oberflächengestaltung zu ändern.

Bei derartigen Gebäuden mit großem Zentralraum ist die Formgestaltung des Zuschauerraumes die grundlegende und vielleicht die erste Tätigkeit des Architekten, da sie die Grundrißanordnung und die Geschoßlage, die Verbindungen der anderen Räumlichkeiten direkt, und auch die Fassadengestaltung indirekt beeinflußt. Es darf nicht unbeachtet bleiben, daß der Gesamteindruck des Zuschauerraumes auch zum Erlebnis beiträgt, das die Darbietung im Zuschauer hervorruft. Gerade deshalb ist es wichtig, daß der Architekt bereits bei der »Konzeption« des Raumes mit den akustischen Wirkungen der geometrischen Form rechnet.

Durch die Gestaltung der raumabschließenden Flächen werden mehrere akustische Parameter unmittelbar oder mittelbar beeinflußt, u. zw. im höchsten Maße der raumakustische Kennwert, den man *Schalldiffusität* zu nennen pflegt.

2. Schalldiffusität

Die Schalldiffusität ist einer der wichtigsten akustischen Kennwerte des geschlossenen Raumes. Es wird seit langem versucht, für seine zahlenmäßige Bestimmung eine geeignete mathematische Formel zu finden. Von einigen Instituten werden auch verschiedene, meistens von den eigenen Mitarbeitern ausgearbeitete Formeln benutzt, die sich jedoch allgemein nicht durchsetzen konnten. Für die unbefriedigende Reife ist es kennzeichnend, daß z. B. die Formel von R. Thiele im wesentlichen den Ergebnissen Furrers und Laubers widerspricht (nach der ersteren vermindert sich die Diffusität mit zunehmendem Volumen, nach der letzteren nimmt sie hingegen zu).

Bei der Deutung sind die Ansichten schon einheitlicher. Vollkommene Diffusität besteht in einem geschlossenen Raume, wo

a) in einem gegebenen Zeitpunkt die Energiedichte in sämtlichen Volumenelementen des Raumes gleich ist,

b) die bestimmten Volumenelemente in aufeinanderfolgenden Zeiteinheiten durch gleiche Schallenergiewerte durchströmt werden,

c) die Energieströmung *in allen Richtungen* gleicher Größe ist.

2.1 *Räumlicher Verlauf der Schallerscheinung*

Der Nachhall

In einem geschlossenen Raum besteht — wie bekannt — die Schallerscheinung nie allein aus dem direkten Schall, der aus der Schallquelle geradlinig ins Ohr gelangt, sondern es werden auch von den Gegenständen im Raum, vor allem von den Wänden und der Decke ein-, zwei- oder mehrfach zurückgeschallte sog. Reflexionen wahrgenommen. Diese Schallreflexionen treffen in der Regel selbst bei sehr kurzer Schallerzeugung in so hoher Zahl und mit so großer Häufigkeit ein, daß das menschliche Ohr sie kaum oder überhaupt nicht als gesonderte Schalleindrücke empfindet. So hört man geschlossene Räume in ähnlicher Weise ertönen, wie die Saiten- bzw. die Schlaginstrumente. Diese Erscheinung, die Nachhall genannt wird, erinnert an die erzwungenen Schwingungen in der Schwingungslehre.

a) *Einschwingung* wird die Schallerscheinung genannt, daß man — wegen der verschiedenen Schallrückstrahlungen — die Empfindung hat, daß sich der in einem geschlossenen Raume fortlaufend erzeugte Schall ständiger Leistung verstärkt.

b) Von einem *Beharrungszustand* wird gesprochen, wenn sich die gemessene Schallintensität nicht weiter erhöht.

c) Das *Abklingen* ist die Erscheinung, die nach der Abschaltung der Schallquelle wahrgenommen wird.

Da es nicht unser erstrangiges Ziel ist, die Schallschluckung näher zu behandeln, soll das Vorstehende nur kurz erläutert werden.

zu a) Die Erhöhung der Schallintensität bei der Einschwingung wird dadurch verursacht, daß die mit einer gegebenen Leistung arbeitende Schallquelle der Raum fortlaufend Energie zuführt. Müßte keine Schallschluckung berücksichtigt werden, würde die jeweils empfundene Intensität I der vergangenen Zeit t direkt proportional sein:

$$I = J \cdot t, \tag{1}$$

wo J eine vom Raumvolumen und von der Leistung der Schallquelle abhängige Konstante ist (auf die Beziehung dieser beiden Größen werden wir noch zurückkommen).

zu b) Der für den Baustoff kennzeichnende Schallschluckgrad bedeutet den jeweils absorbierten Anteil der Intensität des anprallenden Schalls. Die Leistung P_t des aus einem geschlossenen Raum mit der Gesamtfläche S und dem mittleren Schallschluckgrad abgehenden Schalls wird mit der Beziehung

$$P_t = S\bar{\alpha}I$$

angegeben, wo

P_t die Abgangsleistung
I die Intensität des an die Oberfläche anprallenden Schalls bedeuten.

Da I laut a) zunächst zunimmt, wird auch der Wert von P_t in Abhängigkeit von der Zeit immer größer. Diese Zunahme dauert jedoch nur solang an, bis die Abgangsleistung die dem Raum zugeführte ständige Schalleistung erreicht:

$$P = P_t = S\bar{\alpha}I\,.$$

Aus dieser Beziehung I ausgedrückt, erhält man

$$I = \frac{P}{S\bar{\alpha}}\,. \tag{2}$$

Bei einem gegebenen Raum sind $\bar{\alpha}$, P und S Konstanten, daher ist auch I konstant!

zu c) Das Abklingen ist der der Einschwingung entgegengesetzte Vorgang. Nach Abschaltung der Schallquelle wird zunächst das Erlöschen des direkten Schalls wahrgenommen, sodann hören während der sog. *Nachhallzeit* die Schallreflexionen immer geringerer Intensität auf (später eintreffende Schallreflexionen gelangen auf einem längeren Weg und im allgemeinen nach mehrfacher Reflexion zum Ohr, daher nimmt ihre Intensität ständig ab).

2.2 *Untersuchung der Reflexionsdichte*

Die Analyse des Nachhallverlaufs, die für die Feststellungen über die Diffusität erforderlich ist, wird im weiteren solang für einen vollkommen absorptionsfreien, fiktiven Raum unternommen, bis lediglich auf der Grundlage der Reflexionsdichte und des Rhythmus der Dichteänderungen Schlüsse gezogen werden.

Die Dichte der Schallreflexionen, die Gleichmäßigkeit ihrer Abstände sind offenbar in unmittelbarem Zusammenhang mit der Diffusität nach **2.**

Nehmen wir an, daß ein Oszillograph zur Verfügung steht, der 1) selbst den kürzesten Schallrückwurf von z. B. 1 ms Dauer mit einer einzigen Linie festhält, 2) wo auf der Ordinatenachse die gemessene Intensität in logarithmischem Maßstab direkt ablesbar ist.

2.21 *Der würfelförmige Raum.* Unsere Untersuchungen sollen mit dieser durch Ebenen begrenzten geometrisch einfachen Raumform beginnen. Die Schallquelle liege im Mittelpunkt K des Würfels, die Meßstelle sei ein beliebiger Punkt P des Raumes.

2.21.1 Es wird zunächst ein kurzer Schallimpuls von 1 ms Dauer erzeugt; wie gestaltet sich dann die Zeichendichte auf dem Oszillogramm? Wie bekannt, pflanzt sich der Schall in einem homogenen Medium geradlinig, in Längswellen fort. Daher ist es sicher, daß der Schallempfänger zuerst durch den direkten Schall erreicht wird (in diesem Augenblick befindet sich die Schallwelle auf einer Kugelfläche mit dem Mittelpunkt K und dem Radius $\overline{KP}$). Auf dem Oszillogramm erhält man also das erste Reflexionszeichen bei dem Abszissenwert $\frac{\overline{KP}}{c}$ (wo c die Schallgeschwindigkeit bedeutet).

Der Schall breitet sich dann auf konzentrischen Kugelflächen in Radialrichtung aus, erreicht die Wandflächen (zufolge der zentrischen Lage der Schallquelle in diesem Falle alle sechs Seiten des Würfels zu gleicher Zeit), wird dann den Gesetzen der Schallreflexion entsprechend zurückgeschallt, als wenn der Schall aus den Spiegelbildern des Punktes K auf den sechs Würfelseiten ausgegangen wäre. Die Mittelpunkte der momentanen Wellenflächen seien K_{11}, $K_{12} \dots K_{16}$.

Man findet also das 2., 3., . . . 7. Impulszeichen des Oszillogramms beim Abszissenwert

$$t = \frac{\overline{PK}_{1n}}{c} \,.$$

Das waren die Zeichen der sog. Reflexion erster Ordnung. Die sich ausbreitende und an Wandflächen anprallende Schallwelle pflanzt sich auf Kugelflächen weiter, die weitere Mittelpunkte bestimmen. Das sind die sog. Reflexionen zweiter Ordnung, zu denen die fiktiven Kugelmittelpunkte K_{21}, K_{22}, K_{2n} gehören, die wiederum die auf sechs Würfelflächen bezogenen Spiegelbilder der bei der Reflexion erster Ordnung erhaltenen Punkte K_{1n} sind.,

Der Abszissenwert je eines Impulszeichens im Oszillogramm wird also in allgemeiner Form mit dem Ausdruck

$$t = \frac{\overline{PK}_{mn}}{c} \tag{3}$$

angeschrieben.

Werden die neuen Punkte K_{mn} in ähnlicher Weise wieder gespiegelt und wird dieses Verfahren immer wiederholt, erhält man unendlich viele Kugelmittelpunkte. Aus den geometrischen Beziehungen läßt sich feststellen, daß die Punkte mit der gleichen Ordnungszahl auf je einer regelmäßigen Oktaederfläche mit dem Mittelpunkt K liegen. Werden nicht nur die Mittelpunkte, sondern auch die zu diesen gehörenden Würfel gespiegelt, erhält man ein rechtwinkliges Raumgitter mit gleichen Ebenenabständen.

Zu Beginn dieses Abschnitts wurde die Untersuchung der Reflexionsdichte zum Ziel gesetzt. Wie viele Anpralle erfolgen also in einem Zeitintervall t_1 oder, mit anderen Worten, wie viele von den durch Spieglung erhaltenen Punkten K_{mn} kleinere Abstände von Punkt P haben werden als der durch den Schall in der Zeit t_1 zurückgelegte Weg? Nach der Beziehung (3) liegen die Punkte X_n des unendlichen Raumes in geringeren Abständen von P als oben angegeben, für die

$$\overline{X_n P} < t_1 \cdot c \,.$$

Solche Punkte sind aber die Punkte innerhalb der Kugel mit dem Radius $t_1 c$. Es stellt sich also die Frage, wie viele Punkte K_{mn} sind in dieser Kugel? Da in jedem würfelförmigen Element des oben beschriebenen Raumgitters je ein Punkt K_{mn} liegt, sind in der Kugel soviele Punkte K_{mn} enthalten, als Raumgitterelemente in der Kugel sind.

Daher erfolgen schließlich in einer Zeit t_1

$$n_1 = \frac{4\,(t_1 c)^3}{3V} \tag{4}$$

Anpralle; das bedeutet, daß bei einem Saal mit gegebenem Volumen die Zahl der Anpralle lediglich von der Zeit abhängig und der dritten Potenz derselben proportional ist.

Die Verdichtung ist also sehr intensiv. Es sei z. B. t_2 das auf t_1 folgende, zweite Intervall gleicher Zeitdauer. Dann gilt $t_2 = 2\,t_1$, daher aufgrund von (4) $n_2 = 8\,n_1$. Somit erfolgen im zweiten Intervall

$$n_2 - n_1 = 7\,n_1 \tag{5}$$

Anprallungen !

2.21.2 Es ist leicht, zwischen der vergangenen Zeit und der Rückprallintensität einen Zusammenhang zu finden. Da die Intensität die Schalleistung je Flächeneinheit bedeutet und die Wellenoberfläche eine Kugel ist, geht die Intensität I_{n_1} des im Zeitpunkt t_1 zum Empfänger gelangenden Schallstrahls der Leistung der Schallquelle direkt, den Quadraten der Schallgeschwindigkeit und der Zeit t_1 umgekehrt proportional:

$$I_{n1} = \frac{P}{4\pi c^2 t_1^2} \tag{6}$$

wo P und c Konstanten sind.

In der Zeit t_1 treffen, wie angenommen wurde, n_1 Reflexionen ein. Damit ist der Energiegehalt des Intervalls t_1

$$\frac{E}{c} = I_1 + I_2 + \ldots + I_{n1}\,.$$

Es sei das zweite Intervall wieder gleich dem ersten, also

$$t_2 - t_1 = t_1\,.$$

Dazu gehört die Anprallzahl: $n_2 - n_1$, damit ist die Intensität der Reflexionszahlen im zweiten Intervall

$$I_{n1+1}, I_{n1+2}, I_{n1+3} \ldots I_{n2} \quad (\text{da ja } I_{n1+n2-n1} \equiv I_{n2})\,.$$

Da die durch den einzigen Anfangsschallimpuls (mit der Leistung P) erzeugte Energie den Raum nicht verlassen kann (weil der angesetzte fiktive, geschlossene Raum absolut schallschluckungsfrei ist), erwartet man, daß die Energiegehalte der beiden Intervalle übereinstimmen. Gesetzt, daß dem so ist, dann gilt

$$I_1 + I_2 + \ldots + I_{n1} = I_{n1+1} + I_{n1+2} + \ldots + I_{n2}\,. \tag{7}$$

Führen wir den Begriff der durchschnittlichen Intensität ($\bar{I}$) ein, der das arithmetische Mittel der Intensitäten der Zeichen innerhalb eines Intervalls bedeutet. Damit läßt sich die Gl. (7) auch in der Form schreiben:

$$\bar{I}'_{n_1} = \bar{I}''(n_2 - n_1), \tag{8}$$

wo $\bar{I}'$ den Mittelwert der Zeichenintensitäten im ersten und $\bar{I}''$ im zweiten Zeitintervall bedeuten. Damit lautet Gl. (8) in anderer Form:

$$\frac{\bar{I}'}{\bar{I}''} = \frac{n_2 - n_1}{n_1}.$$

Aus dieser Beziehung läßt sich ablesen, daß die Änderung der Reflexionsintensitäten den Änderungen der Anprallzahl umgekehrt proportional ist.

2.21.3 Mit zunehmender Zeit t nimmt also der Zeitunterschied der gemessenen Reflexionen schnell ab. Die Dichtezunahme muß also einen Grad erreichen, wo die Zahl der Anpralle je Zeiteinheit gerade gleich dem Teil der Zeiteinheit ist, wie die Dauer des kurzen Anfangsimpulses. Im angeführten Beispiel wird das zutreffen, wenn z.B. in 1 s 1000 Reflexionen von 1 ms Dauer wahrgenommen werden. Von einer weiteren Verdichtung kann eigentlich nicht gesprochen werden, wie auch von keiner weiteren Intensitätsverminderung. Eine weitere Verdichtung bedeutet, daß die Reflexionen sich immer mehr überdecken und damit sich ihre Intensitäten addieren. Der Zustand $\bar{I} \cdot n =$ konst (der mit **J** bezeichnet werden soll) bleibt jedoch auch weiter bestehen.

Bei vollkommener Diffusität muß von dem obengenannten Zustand an auf dem Schallempfänger ein Schallbild mit ständiger Intensität I erscheinen, offenbar der folgenden Beziehung gemäß:

$$1000 \cdot \mathbf{J} = \bar{I}_1 \cdot n_1 = \bar{I}_2 \cdot n_2 = \bar{I}_3 \cdot n_3 \ldots$$

wo sich die Faktoren $n_1, n_2 \ldots$ usw. immer auf den Zeitintervall von 1 s beziehen und die Dauer des Anfangsschallimpulses 1 ms betrug.

Es soll nun der Wert von **J** bestimmt werden! Wir verfolgen zunächst den Weg der Schallenergie und die Änderung des Raumteils, den sie ausfüllt, u. zw. je 1 ms.

Unmittelbar nach dem Ertönen des Schalls von 1 ms Dauer wird durch die Schallenergie der Raum einer Kugel mit dem Mittelpunkt K und dem Radius $r = 0{,}34$ m ausgefüllt. Während der nächsten 1 ms leert sich diese Kugel und bis zum Ende des Intervalls wird durch die Energie der Raum zwischen zwei konzentrischen Kugeln (kurz: Kugelschale) ausgefüllt, wo die äußere eine Kugel mit dem Radius 0,68 m, während die innere Grenzkugel die vorige Kugel mit dem Radius 0,34 m ist. Im weiteren befindet sich die Energie in jedem Zeitraum von 1 ms in je einer konzentrischen Kugelschale, bis der Schall die Umfassungswände erreicht. Die Dicke der Kugelschalen bleibt unverändert, ihr Rauminhalt nimmt jedoch mit dem Quadrat der Halbmesser zu. Damit ändert sich auch die Energiedichte, u. zw. nimmt sie mit zunehmender Zeit ab. Die Schallintensität ist selbstverständlich an der inneren und der äußeren Grenzkugel der Kugelschale nicht gleich $\left(I = \frac{P}{F}\right)$. Die Differenz der inneren und äußeren Oberflächenintensitäten nimmt jedoch ab, wie auch ihr Verhältnis in Abhängigkeit von der Zeit, wobei das letztere gegen Eins strebt:

$$\frac{I_b}{I_k} = \frac{P/F_b}{P/F_k} = \frac{F_k}{F_b} \rightarrow 1 .$$

Wie es zu erkennen ist, ändern die Kugelwellen nach dem Anprall an eine ebene Wand ihren Charakter nicht, sie werden nur gewissermaßen aufgeteilt. Durch die genannten Spiegelungen wurden jedoch diese Kugel- bzw. Kugelschalenteile wieder zusammengesetzt. Es darf also in der Weise gerechnet werden, als wenn die Grenzwände überhaupt *nicht da wären.*

Berechnen wir also den Radius r der Kugel, die die innere Grenzfläche der Kugelschale mit dem gleichen Rauminhalt wie der Rauminhalt V des geschlossenen Raumes darstellt:

$$\frac{4\,(r+0{,}34)^3\pi}{3} - \frac{4r^3\pi}{3} = V.$$

Das ist eine Gleichung zweiten Grades für r, nach deren Auflösung man den positiven Wert von r erhält:

$$r = \frac{-0{,}34 + \sqrt{0{,}938\,V - 0{,}04}}{2} .$$

Da V im allgemeinen groß ist, darf das zweite Glied unter dem Wurzelzeichen vernachlässigt werden. Damit ist der Näherungswert für r:

$$r = \sqrt{0{,}2345\,V} - 0{,}17 .$$

Daraus ergeben sich der mittlere Radius der beiden Grenzkugeln der Kugelschale

$$r = \sqrt{0{,}2345\,V} .$$

und die Zeit, die erforderlich ist, um diese Strecke zurückzulegen

$$t_0 = \frac{\sqrt{0{,}234\,V}}{340} . \tag{9}$$

Aus $I = \frac{P}{F}$ ist also die mittlere Intensität im Inneren der Kugelschale

$$\mathrm{J} = 0{,}339\,\frac{P}{V}\,. \tag{10}$$

Damit gelang es, den Kurzzeitimpuls von 1 ms Zeitdauer durch einen Schall mit gleichmäßiger Leistung zu ersetzen, der — würde er sich realisieren — die vollkommene Diffusität des Raumes beweisen würde. Nun kann versucht werden, durch praktische Annäherung dieses Idealzustands, eine Methode zur Diffusitätsberechnung der Räume zu entwickeln.

2.21.4 Für jede durch Ebenen begrenzte Raumform erhält man durch Spiegelung gegebener Raumformen auf diese Ebenen, und durch mehrfache Wiederholung der Spiegelung in der beschriebenen Weise ein den unendlichen Raum vollständig ausfüllendes Raumgitter, auf dessen Grundlage sich das theoretische Oszillogramm des Kurzzeit-Schallimpulses auf graphischem Wege erstellen bzw. errechnen läßt.

Die Abszissenwerte werden aus Gl. (3), die Intensitätswerte aus Gl. (6) berechnet.

Im weiteren braucht man nur Angaben innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls von 100 ms, dessen Beginn nach Gl. (9) berechnet $t_0 - 50$ ms und dessen Ende $t_0 + 50$ ms ist.

Bei der graphischen Ermittlung wird es gewiß vorkommen, daß sich wegen der annähernd gleichen Abszissenwerte zwei oder mehrere Reflexionen überdecken. In solchen Fällen sind die Intensitätswerte im Prozentsatz der Überdeckung zu summieren (auf der Ordinatenachse wird die Intensität in linearem oder in logarithmischem Maßstab aufgetragen). Es werden sich selbstverständlich zwischen einzelnen Zeichen auch Lücken ergeben.

Schließlich wird aus Gl. (10) J ermittelt und das Oszillogramm gezeichnet.

Um die Diffusität D zu ermitteln, vermerkt man alle Zeichen, die wegen der Summierung über der Pegellinie I liegen, u. zw. mit der Anzahl der summierten Zeichen multipliziert. Die Summe dieser Zahlen sei H. Damit erhält man in Prozenten den Diffusitätsgrad des Raumes aus

$$D = \frac{100}{H + 1}\,. \tag{11}$$

Für D können (im Prinzip) Werte zwischen 1% und 100% erhalten werden (H kann Werte von 0 bis 99 annehmen).

Es ist sehr wichtig zu bemerken, daß $D = 100\%$ der *Maximal*wert der Diffusität, jedoch gewiß nicht das *beste* Ergebnis ist! Es sollte durch Versuche ermittelt werden, welche D-Werte in Räumen mit verschiedenen Zweckbestimmungen die günstigste akustische Wirkung ergeben. Es war auch bisher bereits bekannt, daß in Räumen mit allzu großer Diffusität die Sprachverständlichkeit nicht gerade gut ist, und in einem derartigen Raum auch die musikalischen Wirkungen unangenehm sind (der Toncharakter der einzelnen Instrumente ist schwer zu erkennen). Durch eine übermäßige Diffusität wird auch die Tonreinheit beeinträchtigt.

2.21.5 Für die Bewertung der Diffusität des Raumes bieten sich sogar zwei Möglichkeiten. Die Zahl D gibt darüber Aufschluß, mit welcher Gleichmäßigkeit die Reflexionen zeitlich verteilt sind als ihre Dichte einen bestimmten Grad erreicht hat. Für die Beurteilung des Saales selbst ist auch der Wert von t_0 vielsagend. Es ist nämlich nicht gleichgültig, welcher Zeit es bedarf, um in einem Raum den durch Gl. (10) beschriebenen Zustand zu erreichen. Ein verhältnismäßig hoher t_0-Wert verweist z. B. auf die ungenügende Reflexionsdichte zu Beginn des Nachhalls.

2.21.6 An Hand von in vollständig fertiggestellten Räumen durchgeführten Messungen lassen sich die vorstehenden Ausdrücke nicht verwenden, da ja wegen der Schallschluckung die Grundbedingungen nicht erfüllt sind. Für Modellversuche sind sie jedoch geeignet, wenn das Modell aus einem verhältnismäßig wenig schallschluckenden Werkstoff hergestellt wird. Eine Korrektion des J-Werts und die entsprechende Umrechnung der Koordinaten sind selbstverständlich notwendig.

2.22 *Räume anderer Form.* Obwohl die vorstehenden Ableitungen — der Einfachheit halber — für einen würfelförmigen Raum durchgeführt wurden, lassen sich die Ergebnisse dennoch auch für eine Anzahl von Räumen anderer Form anwenden. Sie werden jedoch unverändert für jede Raumform verwendet, durch deren serienmäßige Spiegelung auf die eigenen Grenzflächen der unendliche Raum restlos ausgefüllt werden kann.

Raumformen, die auf ihre ebenen Grenzflächen abgespiegelt werden können:

Neben dem bereits besprochenen Würfel jedes rechtwinklige Parallelepiped, auch das regelmäßige vierseitige Prisma einbegriffen.

Das regelmäßige, dreiseitige Prisma.

Das regelmäßige, sechsseitige Prisma.

Das dreiseitige Prisma mit rechtwinkliger, gleichschenkliger Dreieck-Grundfläche.

Das Gerade, dreiseitige Prisma mit dem Seitenverhältnis $1 : \frac{1}{2} : \frac{3}{2}$.

Zusammenfassung

Im Beitrag wird ein Teilergebnis der am Lehrstuhl für Darstellende Geometrie der Technischen Universität Budapest in den letzten Jahren durchgeführten theoretischen Forschungen dargelegt. Die Forschungen werden fortgesetzt, um festzustellen, inwiefern oder mit welchen Veränderungen die mitgeteilten Ergebnisse auf hier nicht angeführte, doch den behandelten nahestehende, aus diesen zusammensetzbare oder aus diesen durch Abstumpfen erhaltene Raumformen angewendet werden können.

Am Lehrstuhl wird auch die Wirkung der Raumformen auf andere akustische Parameter untersucht, es wird sogar versucht, eine spezielle Fläche zu finden, bei der voraussichtlich alle akustischen Parameter günstig sein werden.

Schrifttum

CREMER, L.: Geometrische Raumakustik, 1956
BERANEK, L.: Music, Acoustic, Architecture, 1962.
TARNÓCZY, T.: Akustische Projektierung,* Bp. 1966.

* In ungarischer Sprache

Oberassistent Dr. Károly VAJK, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3 Ungarn