

U. Stephenson

Zur Raumakustik großer kreisförmiger Räume

1. Zur Problematik kreisförmiger Räume

Kreisförmige Auditorien sind seit alters her und heute wieder besonders bei Architekten beliebt. Die „Akustik“ antiker Amphitheater ist indes nicht wegen der Kreisform so gut, sondern wegen idealer Freifeldbedingungen u.a. infolge fehlender Seitenwände [1]. Zylindrisch gekrümmte Seitenwände aber sind es, die in geschlossenen großen Kreisräumen (mehr als ca. 20 m Durchmesser) oft für äußerst störende Fokussierungserscheinungen und Echos verantwortlich sind (Hohlspiegelwirkung). In einem Kreisraum werden alle Strahlen von einem Quellpunkt symmetrisch gegenüber in einem Brennpunkt fokussiert. Prominentestes Beispiel dafür und Anlaß zu dieser Studie ist der neue Plenarsaal des Deutschen Bundestages [2]. Bekannt ist der „Flüstergalerie-Effekt“ in manchen Kuppelbauten. Einige Kreisräume, z.B. das „Haus des Lehrers“ in Berlin [3], haben nicht wegen, sondern trotz der Kreisform eine annehmbare „Akustik“, in der Regel nur mit erheblichen raumakustischen Sekundärmaßnahmen erkaufte.

2. Berechnung eines Echokriteriums

Die fokussierende Wirkung der Kreisform muß akustisch aufgehoben werden. Das kann gelingen durch Reflektoren und Diffusoren an den Seitenwänden, die die Strahlen weg vom Fokus lenken. Zur Kennzeichnung der Sprachverständlichkeit kann als berechenbare Größe der Deutlichkeitsgrad dienen, welcher gleich dem relativen Energieanteil früher, d.h. bis 50 ms verspätet ankommender Reflexionen ist. Untersucht wurde vor allem, inwieweit die Deutlichkeitswerte steigen und räumlich gleichmässiger verteilt sind, wenn die „Diffusitätsgrade“ der Seitenwände erhöht werden. Diese beschreiben das Mischungsverhältnis aus geometrisch-spiegelnden Reflexionen (Ausfallwinkel gleich dem Einfallswinkel) und diffusen (Rundum-Streuung nach Cosinus-Gesetz). Diffus reflektierende, „akustisch rauhe“ Wände sind z.B. solche mit einem tiefen Relief, mit Nischen, Verzerrungen, Zick-Zack-Formen usw.

Echos, auf einen engen Zeitbereich konzentrierte, energiereiche Reflexionen, sind besonders störend. Gelingt es, jene räumlich und zeitlich zu zerstreuen, steigert sich die Sprachverständlichkeit beträchtlich, u.U. ohne eine Änderung des Deutlichkeitsgrades. Zusätzlich zum Deutlichkeitsgrad wurde deshalb ein Echokriterium nach Dietsch [4] berechnet, das die genannten Störungskriterien quantitativ berücksichtigt. Zur Berechnung dient ein speziell für Zylinderräume entwickeltes Strahlverfolgungsprogramm RAYCYL, ähnlich dem schon vielfach angewendeten Schallteilchen-Simula-

tionsprogramm SOPRAN [5], das die Darstellung sowohl von Echogrammen einzelner Hörerplätze als auch der räumlichen Verteilung verschiedener raumakustischer Parameter über der Publikumsfläche erlaubt. Ausgegangen wurde von einem Kreisraum von 20 m Radius.

3. Diskussion der Ergebnisse

Als Vorstudie dient ein einfaches zweidimensionales Modell. Bild 1 zeigt eine Kurve von Punkten gleichen Umwegs seitlich reflektierter Strahlen (17 m Umweg, entsprechend 50 ms Zeitverzögerung). In das große, fast kreisförmige Gebiet im Innern kommt demnach bei spiegelnd-reflektierenden Außenwänden (außer dem Direktschall) kein im Sinne des Deutlichkeitsgrades „nützlicher“ Schall. Die Sichelform dieses Defizitgebiets lässt sich dadurch erklären, daß von dem leicht ovalen Gebiet grösseren Umwegs als 17 m dasjenige Kreisgebiet auszuschließen ist, in dem der Direktschall energetisch überwiegt (hier 9 m Radius). Bild 2 zeigt eine mit RAYCYL berechnete Deutlichkeitsverteilung im Zylinder-raum. Ein großes, dunkles Feld weist einen Bereich ungenügender Deutlichkeitswerte gegenüber dem Senderort aus -

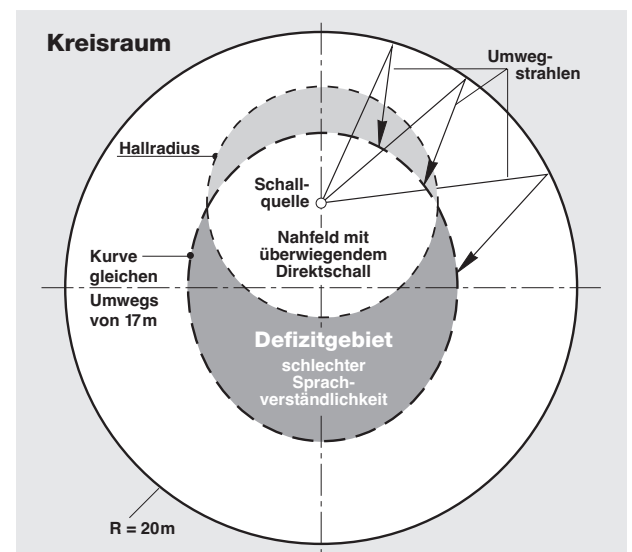


Bild 1: Zentrales Defizitgebiet geringer Deutlichkeit eines Kreisraumes mit 40 m Durchmesser, 50 % Absorption von Boden und Decke und einer Schallquellenposition 4 m vom Mittelpunkt [2].

denkbar ungünstig, da meist dort der Kernbereich des Publikums ist. Bild 3 zeigt die nur wenig geänderte, nun etwa sichelförmige Verteilung für den Fall 50 % diffus reflektierender Seitenwände (ähnlich Bild 1). Die Mittelwerte der Deutlichkeitsgrade blieben praktisch unverändert.

Enttäuschenderweise also ändern Modifikationen an den Außenwänden kaum etwas an Form und Grösse des Defizitgebiets. Erklärung dafür ist das „Prinzip des kürzesten Weges“ (Fermatsches Prinzip). Diffuse Reflexionen verbinden ein Punktepaar aus Sender und Empfänger stets über längere Umwege als geometrische. Verändert man die Wandreflexionseigenschaften, etwa durch vorgesetzte Reflektoren oder Diffusoren, Reliefs etc., so ergeben sich also nur längere Übertragungswege, die Deutlichkeitsgrade können nicht steigen. Es gibt demnach Zonen, in die hinein durch keine Maßnahme an den Außenwänden eines Saales mehr nützlicher „früher“ Schall gelangen kann als vorher. Und diese Zonen sind in Kreisräumen im Vergleich zu Rechteckräumen gleicher Grundfläche nachweislich besonders groß [2]. Diffusoren an den Seitenwänden von Kreisräumen mindern störende Echos aber sehr deutlich (vgl. Bilder 4 und 5). Dies ist plausibel, weil Streuung an den Wänden ehemals konzentrierte Strahllaufzeiten „verschmiert“ (vgl. die Echogramm-bilder 6 und 7). Die Kurven des Echokriteriums an einem kritischen Platz nahe dem Fokus weisen ohne Streuung zahlreiche stark störende Spitzen auf (Maximalwert 3, Bild 6), während mit Streuung nur noch das erste Echo schwächer störend ist (Maximalwert 1,9, Bild 7).

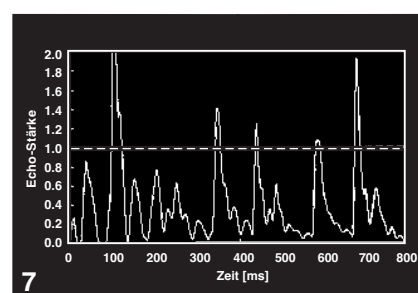
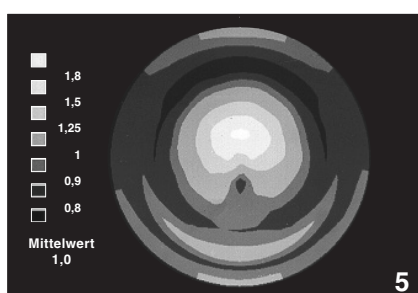
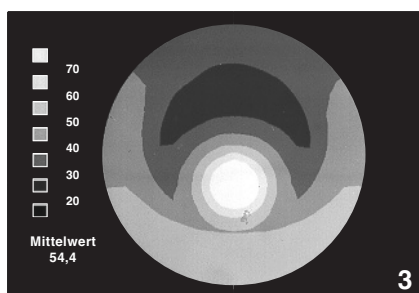
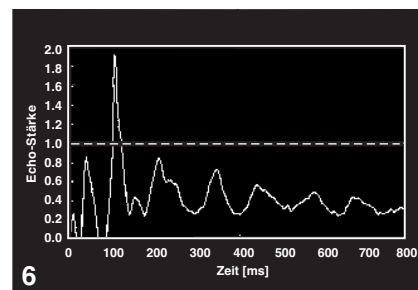
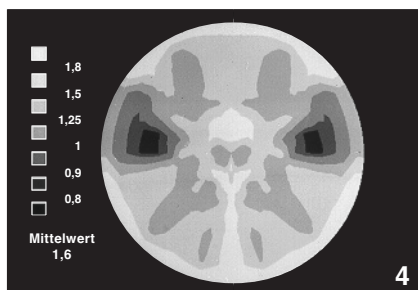
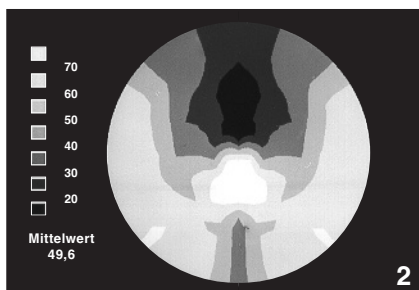
4. Verbesserungsmöglichkeiten für Kreisräume

Raumakustische Verbesserungsmöglichkeiten für Kreisräume sind aus prinzipiellen Gründen beschränkt. Um die

Sprachverständlichkeit zu verbessern und Echos zu vermeiden, sollten sich raumakustische Maßnahmen, optimierte Nachhallzeit vorausgesetzt, auf die gekrümmten Wände konzentrieren, und zwar möglichst auf deren ganze Fläche. Absorber sind hier wirkungsvoll. Wenn sie aber in dem Umfang nicht praktikabel sind (etwa wegen Glasflächen) oder bei Musikdarbietungen, wo sie den Seitenschallgrad mindern, sind Diffusoren (Reliefs, etc.) vorzuziehen. Diese erhöhen zwar nicht die Deutlichkeitsgrade, aber vermindern Echos drastisch. Noch besser können, zwecks Strahlentkung zur absorbierenden Decke oder zum nahen Publikum, in Neige- und Schwenkwinkeln optimierte Reflektorplatten sein. Generell sollten Kreisgrundrisse und Kuppeln so stark wie möglich aufgegliedert werden.

Literatur

- [1] Ruhe, C.: Konnten die Griechen es besser ? Trockenbau, Jahrgang 88, H.3
- [2] Stephenson, U.: Zur Raumakustik großer kreisförmiger Räume am Beispiel des Plenarsaals des Deutschen Bundestages. DBZ 5/1994, S.113-124
- [3] Fasold, W., Winkler H.: Bauphysikalische Entwurfslehre. Band 5: Raumakustik, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1976
- [4] Dietsch, L.; Kraak, W.: Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen. ACUSTICA 60 (1986), S. 205-216
- [5] Stephenson, U.M.: Vom Konzertsaal bis zur Fabrikhalle - das raumakustische Simulationsprogramm SOPRAN. TAB-Technik am Bau 25 (1994), Heft 2, S. 25-27



Bilder 2,3: Deutlichkeitsverteilungen

Schwarz-Weiß-Skala : schwarz: sehr schlecht, weiß: sehr gut, heller als 3. Graustufe : zufriedenstellend, Deutlichkeitsgrad > 50%: Silbenverständlichkeit >85%

Bilder 4,5: Verteilungen des Echokriteriums nach Dietsch

Schwarz-Weiß-Skala: schwarz: unkritisch, bis incl. 1. Graustufe: zu maximal 10% störend, heller: mehr als zu 50% störend

Bilder 6,7: Echogramme in der Nähe des Fokus, aufgetragen Echostärke nach Dietsch,

----- = kritische Grenze 1 für Sprache

Bilder 2,4,6 (obere Zeile): bei spiegellackierten Seitenwänden

Bilder 3,5,7 (untere Zeile): bei 50% diffus reflektierenden Seitenwänden



Fraunhofer Institut
Bauphysik

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK (IBP)

Leiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
D-70569 Stuttgart, Nobelstr. 12 (Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart), Tel. 07 11/9 70-00
D-83626 Valley, Fraunhoferstr. 10 (Postfach 11 52, 83601 Holzkirchen), Tel. 0 80 24/6 43-0