„Weinberg“ contra „Schuhkarton“ - Wie hängt der Seitenschallgrad vom Grundriss-Typ eines Konzertsaales ab?

Uwe M. Stephenson

HafenCity Universität, Hamburg, E-Mail: uwe.stephenson@hcu-hamburg.de

Motivation, Ziel und Methodik

Neben der Nachhallzeit ist der Seitenschallgrad, der für den „Räumlichkeitseindruck“ verantwortlich ist, der wichtigste raumakustische Parameter für Konzertsäle. Naturgemäß hängt er vor allem vom Verlauf der Seitenwände, dem Grundriss ab. Aller Erfahrung nach scheinen deshalb Rechteck-(„Schuhkarton“) -Räume (wie die berühmten in Wien, Amsterdam, Boston) die besten Konzertsäle zu sein. In letzter Zeit werden, nach dem Vorbild der Berliner Philharmonie (1963) von Architekten „Weinberg“-artige Säle bevorzugt, Zentralräume, in denen „Zwischenmauern“ bzw. eine Terrassierung den Seitenschallgrad erhöhen sollen - wie zuletzt bei der Elbphilharmonie in Hamburg. Aber tun sie das wirklich? Kann man dadurch im Mittel jemals Seitenschallgrade wie im „Schuhkarton“ erreichen? Eine Antwort auf diese Frage ist wegen der Unschärfe des Begriffs „Weinberg“ sicher nie streng beweisbar. Dennoch soll die Frage hier systematisch untersucht werden, wobei es mehr auf Verständlichkeit der Gründe als auf Genauigkeit ankommen soll. Hierzu bietet sich zur Vereinfachung und zur Einschränkung der Vielfalt der Fälle ein zweidimensionales Modell an.

Als Grundriss-Typen werden untersucht: Quadrat, Rechteck, Trapez und, „auf dem Wege zum Weinberg“, reguläre Polygone und Polygone mit „Nischen“ (Terrassen). Es werden variiert: Absolute Größe (Grundfläche bzw. Radius), Raumproportionen, Schallquellenposition und Streugrad oder Substrukturierung der Wände.

Definition Seitenschallgrad

Die (nach Auffassung des Autors) 5 wichtigsten raumakustischen Parameter sind Nachhallzeit (T60), Deutlichkeitsgrad oder Klarheit, Stärkemaß und Seitenschallgrad [1]. Hinzu kommt die Frequenz-abhängigkeit bzw. Spektralverteilung. (Die vorliegende Untersuchung berücksichtigt diese nicht, man mag sich ein mittleres Frequenzband dazu denken.) Alle diese Parameter sind allein aus Energieverhältnissen der Raumimpulsantwort berechenbar. Deshalb genügt eine Berechnung nach der geo-metrischen Raumakustik. Während alle Maße den Zeitverlauf berücksichtigen, ist nur der Seitenschallgrad (*LFC = Lateral efficiency*) auch richtungsabhängig, hängt so auch von der Raum-Form ab und taugt so zur Charakterisie-rung eines Raum-Typs. Leider wird er jedoch erstaunlich selten gemessen und diskutiert.

LFC ist definiert als das Verhältnis der „frühen“ „seitlich“ eintreffenden Energie zur „frühen“ (bis 80ms verzögert eintreffenden) Energie (Glng.1), wobei „seitlich“ durch einen cosinus-Faktor ausgedrückt wird (s. Bild 1). 80ms entsprechen maximal 28m Umweg. Alle Hörer schauen zur Quelle. Berechnet wird hier die *LF=Lateral fraction*

$$\boldsymbol{LF} = \int_{5ms}^{80ms} I(t) \cdot cos^2\big(\varphi(t)\big)dt \,/\, \int_{0}^{80ms} I(t) \cdot dt \qquad (1)$$

(bei LFC heißt es $cos\varphi$ statt $cos^2\varphi$). Zur Orientierung: Der Mittelwert von LF im diffusen Schallfeld - das ist praktisch auch der Maximalwert - beträgt in 3D 1/3, in 2D ½.

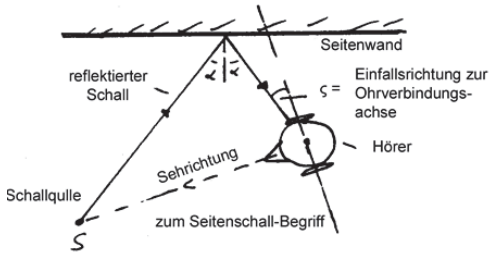


Bild 1: Zur Definition des Seitenschallgrades und des Winkels φ

Methodik: Warum Betrachtung in 2D

Die Einfallswinkel seitlicher Reflexionen und damit auch der Seitenschallgrad hängen hauptsätzlich vom Verlauf der „Seitenwände“ bzw. dem Grundriss ab. (Lautheit und Deutlichkeits-Verteilung hängen dagegen – so ein nützliches raumakustisches Optimierungsschema – hauptsächlich vom Längsschnitt bzw. Decken – und Bodenprofil ab.) Seitenwände sind meist senkrecht, Boden und Decke horizontal und parallel, beeinflussen so nicht die Horizontalkomponente der Schallausbreitung. Der Boden ist zudem meist stark absorbierend, die Decke meist reflektierend. Zu jeder seitlichen Spiegelquelle gibt es so nur jeweils eine Spiegelquelle oberhalb Decke. Die Verteilung dieser Quellen ist wie eine Kopie der Spiegelquellen in der Grundebene. LF ist nur eine Verhältnis von Energien. Näherungsweise genügt deshalb eine 2-dimensionale Betrachtung bzw. eine 2D-Schallteilchen-Simulation.

Streugrad, Nachhallzeit und Simulation in 2D

Die Berechnungen erfolgen nach der Schallteilchen-Simulationsmethode (STSM), einer Variante des *ray tracings* [2]. Die Ergebnisse dieser geometrischen Algorithmen unterscheiden sich letztlich vor allem an der Frage, wie Streuung simuliert wird; ihr Einfluss auf Nachhallzeiten und andere raumakustische Parameter kann kaum überschätzt werden [3,4]. Nach [5] ist der Streugrad σ ($0 < \sigma < 1$) definiert als das Verhältnis:

$$\sigma =: \frac{\text{nicht geometrisch reflektierte Energie}}{\text{gesamte reflektierte Energie}} \qquad (2)$$

Simuliert wird dies durch eine Interpolation zwischen geometrisch-spiegelnder ($\sigma = 0$) und Lambert’sch-diffuser Reflexion ($\sigma = 1$). Danach ist die Wahrscheinlichkeitsdichte der Reflexion (Polarwinkel ϑ)

$$\text{in 3D: } p' =: \frac{dp}{d\Omega} = \frac{cos(\vartheta)}{\pi} \text{ in 2D: } p' =: \frac{dp}{d\vartheta} = \frac{cos(\vartheta)}{2} \qquad (3)$$

erzeugt durch Ziehung von 2 bzw. 1 Zufallszahl(en) z. In 2D sind die Komponenten des Ausfallsvektors dann

$$x{=}2z{-}1 \text{ und } y{=}\sqrt{(1{-}x^2)} \qquad (4).$$

Entweder es wird nun gemäß Definition (2) mit einer weiteren Zufallszahl über geometrisch oder diffus

entschieden (formal korrekt aber unrealistisch), oder es wird, wie hier, linear zwischen den Vektoren interpoliert [2,3]:
$v_{res}{}' = (\mathbf{1} - \boldsymbol{\sigma}) \cdot v_{geo} + \boldsymbol{\sigma} \cdot v_{diff}$, dann renormiert (5).

Bei den Vergleichen von Seitenschallgraden wird versucht, die Eyring'schen Nachhallzeiten konstant zu halten. Die Zeitkonstanten ergeben sich im diffusen Schallfeld prinzipiell aus

$$\tau_{ey} = \frac{\Lambda}{c\,\alpha_{m'}} \qquad (6)$$

[4], wobei die mittlere freie Weglänge in 3D $\Lambda = 4V/S$ (V = Volumen, S= Oberfläche) in 2D ersetzt wird durch $\Lambda = \pi\, S/\mathrm{U}$ ($U = \sum_{i=1}^{K} b_i$=Umfang, b_i = Kanten) und die äquivalente Absorptionsfläche durch eine Absorptionslänge $B = \sum_{i=1}^{K} \alpha_i b_i$. Der mittlere Absorptionsgrad ist dann $\alpha_m = B/U$ und der -Exponent wie gewohnt $\alpha'_m = -\ln(1-\alpha_m)$.
Die Nachhallzeit ist dann statt $T_{Ey} = 0.163\,V/(S \cdot \alpha'_m)$

$$T_{Ey2D} = 0.128\,\frac{s}{m}\,\frac{S}{U\,\alpha_{m'}} \qquad (7)$$

Die STSM unterscheidet sich algorithmisch kaum, jedoch im physikalischen Modell vom *ray tracing* bei der Berechnung der lokalen Immissionen. Bei beiden werden Detektoren, kleine Volumina um Empfangspunkte definiert. Der wesentliche Punkt: es werden bei der STSM bei Durchquerungen von Schallteilchen mit den relativen Energien e_n auch die inneren Durchquerstrecken w_n gewertet; aus den so ermittelten Energiedichten werden (hier in 2D) bei fiktiver längenbezogene Schallleistung P' (modellhaft senkrecht auf der Grundfläche stehender Linienquellen) die lokalen Intensitäten I bestimmt,

$$I = \frac{P'}{S_d \cdot m_0} \sum_{n=1}^{n_0} e_n \cdot w_n \qquad (8)$$

oder, mit entsprechenden Zeitbeschränkungen, die raumakustischen Parameter. (S_d = Detektorfläche m_0= Anzahl emittierter ST, n_0 immittierter ST) [2,3]. Aufgrund dieser Technik kann ein dichtes quadratisches Detektorengitter etabliert werden (Bild 2), ohne Richtwirkung und mit einem schnellen Detektionsalgorithmus [2].

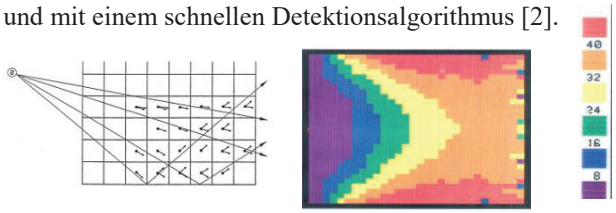


Bild 2: Schallteilchen-Durchquerungen und Detektierung in Detektorengitter; rechts: eine so berechnete Verteilung des Seitenschallgrades als farbige Landkarte, am Rand: Legende

Den so berechneten lokalen Werten raumakustischer Parameter werden entsprechend einer Farblegende Farben zugeordnet und die ortsabhängige Verteilung als farbige Quadrate oder, in den folgenden Bildern, interpoliert als Farbverteilung dargestellt.

Die hier festgelegten numerischen Parameter waren:

- ca. 1000…5000 emittierte Schallteilchen
- verfolgt bis ca. 1/4 der Nachhallzeit mindestens 60m weit, entspr. 2- 3 Reflexionen (für die Berechnung von LF genügen ja 28m Umweg)
- Erwartungswert der Genauigkeit bzw. Fehler der emittierten Energiedichte: 0.13dB (Dafür gibt es eine Prognoseformel [2]).

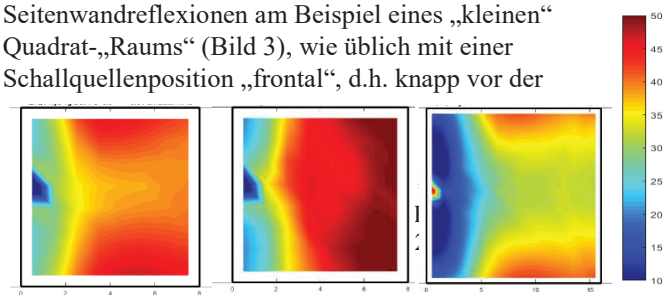
Vergleichsmethodik, variierte Parameter

Welche Raumtypen untersucht wurden, wurde bereits eingangs erwähnt. Natürlich muss die Vielzahl möglicher Varianten sinnvoll begrenzt werden. Als Bezugsabmessung wurde die Kantenlänge a des Ausgangsraums, des Quadrat-„Raums" gewählt, variiert wurde jeweils um Faktoren 2, der größte Raumtyp sollte etwa für 1000 Zuhörer sein, also ca. 1000m² Grundfläche haben. So ergaben sich Raumgrößen bzw. -Flächen: „klein": 8^2 =64m², „mittel": 16^2 =256m², „groß" : 16^2 =1024m². Bei Erhöhung von a ändert sich auch $\Lambda = 4V/S$ und somit die Nachhallzeit proportional. Um sie konstant zu halten, wurde (s. Glng. 6) jeweils der Absorptionsexponent α'_m halbiert: α'=.128, α'=.256,α'=.512; dazu gehören mittlere Absorptionsgrade aller Kanten von α=.12, α=.225, α'=.4. (Auf unterschiedliche Absorptionsgrade wurde vorerst verzichtet, eigentlich, in 3D, wird die Absorption ja ohnehin meist richtungs-unabhängig durch die Grund- bzw. Publikumsfläche erzeugt.) Die Nachhallzeiten betrugen so idealerweise (nach Glng. 7) 1s, 2s, 4s. Bei den Vergleichen verschiedener Formen (Winkel, Proportionen…) wurde grundsätzlich die Grundfläche konstant gehalten. Die Streugrade betrugen: 0 (geometrische Reflexion), 25%, 50%, 100% (total= Lambert streuend), i.d.R. für alle Kanten.

Ergebnisse von Simulationen

Quadratraum

Begonnen wurde mit der Frage des Einflusses diffuser Seitenwandreflexionen am Beispiel eines „kleinen" Quadrat-„Raums" (Bild 3), wie üblich mit einer Schallquellenposition „frontal", d.h. knapp vor der



Mitte der „Vorderwand". Es zeigt sich: der Seitenschallgrad in diesem rel. kleinen Quadratraum ist relativ hoch (37%)- fast ein Maximalwert! Mit leicht diffus reflektierenden Wänden (mehr als 25% ist selten realistisch) erhöht er sich im Mittel nur gering (auf 40%), aber die Verteilung wird gleichmäßiger, auch „hinten" würde es dann „räumlicher" klingen. Solche Aussagen sind aber fast immer abhängig auch von der absoluten Größe des Raumes. Das liegt daran, dass in das Kriterium LF die feste, physiologisch bedingte Zeit-verzögerung von 80ms entsprechend einem Schall-Umweg von 28m eingeht; das zeigt klar das mittlere Bild 3 (LFm=29%). Im Folgenden sollte man weniger auf die Mittelwerte von LF (LFm) achten, sondern mehr auf die Farbe in den Publikumsbereichen; denn in den Mittelwert gehen hier (in dieser Programmversion) auch die eigentlich irrelevanten Werte „auf der Bühne" ein.

Natürlich hängt (aufgrund der Definition, dass alle Zuhörer zur Schallquelle gucken sollen) die Seitenschallverteilung auch immer stark von der Position der Schallquelle ab. Wie das in jenem „kleinen" Quadratraum aussieht, zeigt Bild 4.

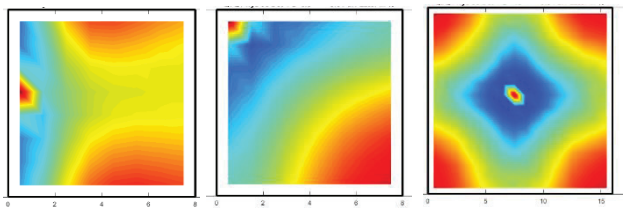


Bild 4: „kleiner“ Quadratraum (*S= 8²= 64m², α'_m = 0.512, T= 0.5s*) mit unterschiedlichen Schallquellenpositionen: links: frontal; Mitte: Diagonalnutzung; rechts: Quelle zentral

Aufgrund der geringeren Nachhallzeit bzw. höheren Absorption ist zunächst LF mit 34% etwas geringer als in Bild 3 links. Erstaunlich ist: LF ist im Mittel für alle 3 Positionen fast gleich, Diagonalnutzung ist sogar günstig, wenn man bedenkt dass „vorne“, wo der Raum ungünstigerweise breiter wird, ja „keiner sitzt“. Ohne Bild sei hinzugefügt: Das gilt aber nur für kleine Räume; bei Diagonalnutzung im großen Raum ist LF ganz schlecht.

Rechteckraum

Wie hängt der Seitenschallgrad bei gleicher Grundfläche (und Nachhallzeit) von den Proportionen eines Rechteckraumes ab? Dies wird in Bild 5 dargestellt.

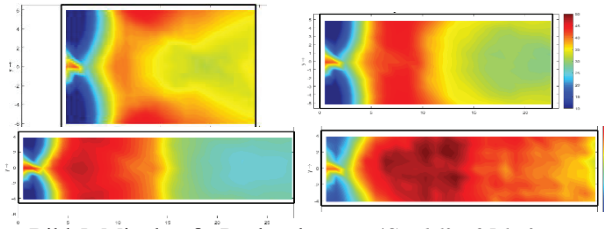


Bild 5: Mittelgroße Rechteckräume (*S= 16²= 256m², α'_m=0.2..0.23, T= 2s,* geometrisch refl.) mit unterschiedlichen Proportionen q: oben: links: q=1.5 frontal; vergl. Bild 3 links mit q=1; rechts: q=2; unten: q=3; rechts: 50% diffus reflekt.

Der Mittelwert von LF bleibt mit 33% gleich, LF ist aber bei länglichen Räumen nur vorne hoch. Das ist schon gut, verbessert sich aber in länglichen Räumen noch deutlich, wenn die Seitenwände diffus reflektierend sind (LF = 41% rechts unten). Das etwa ist das Optimum. Das gilt jedoch wieder nur bei dieser Raumgröße, bei doppelter Größe (Breite 18m, Länge) ist LF sehr schlecht.

Trapezraum: Stufen und Streuung

Viele Hörsäle, auch manche Konzertsäle sind trapezförmig (hinten breiter). Wegen der dann an den Seitenwänden geometrisch eher nach hinten als nach innen gelenkten Strahlen ist zu erwarten, dass der Seitenschallgrad schlechter als im Quadratraum (gleicher Grundfläche) ist. Das bestätigen die Bilder 6.

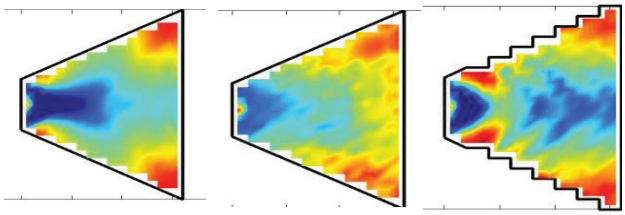


Bild 6: Mittelgroße Trapezräume (*S= 256m², α'_m=0.256, T= 2s),* geometrisch reflektierend, Öffnungswinkel beidseitig 30°: links: LFm=29%, zu vergl. mit 33% beim gleichgroßen Quadrat; mitte: mit 100% Streuung: LFm=31%; rechts: mit 7-facher Stufung: Lfm=30%.

Schon bei 5° Divergenzwinkel verschlechtert sich LF, die „gute Plätze“ sind nur noch vorne an der Seite. LFm sinkt mit steigendem Öffnungswinkel. Entgegen der Erwartung lässt sich auch durch Stufung der Seitenwände LF kaum verbessern. Auch nur minimal besser ist es bei feinerer z.B. 15-er Stufung (LFm=32%), auch nicht bei unregelmäßiger, etwa hinten weiter nach innen geschwenkter Stufung.

Polygonräume

Naheliegender nächster Grundrisstyp „auf dem Wege zum Weinberg“ sind reguläre Polygone (auf die Untersuchung irregulärer wurde verzichtet, da im Mittel keine grundlegend anderen Ergebnisse zu erwarten). Bild 7 zeigt als erstes Beispiel ein Hexagon mittlerer Größe (S= 256m², α'_m = 0.256, T_{Ey} ca. 2s), geometrisch reflektierend. Ist die Quelle am Rand, ergibt sich eine sehr gute LF-Verteilung, noch günstiger als im Quadratraum! (LFm=34%). Sogar bei zentraler Quelle ist die Verteilung bemerkenswert gut (36%).

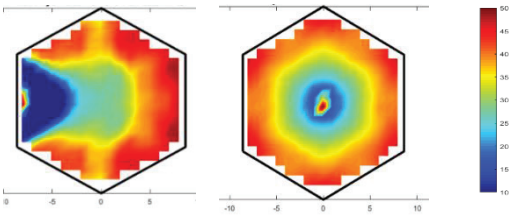


Bild 7: 6er-Polygon, links: Quelle am Rand, rechts: zentral

Bilder 8 zeigen das Gleiche für ein 12-er Polygon.

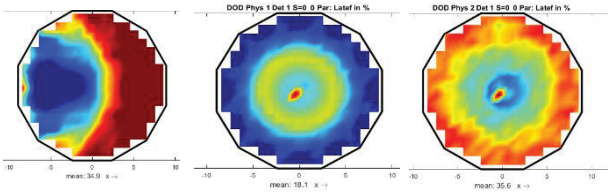


Bild 8: 12er-Polygon, links: Quelle rechts am Rand, mitte: Quelle zentral , rechts: Wände total diffus reflektierend

Der Seitenschallgrad beim „Zentralraum“ (mitte) ist extrem gering (selbst im Mittel hier nur 18%, im Zuhörerbereich unter 10%). Der Effekt beim 6-Eck lässt sich also nicht auf alle regulären Polygone verallgemeinern, er ist offenbar winkelabhängig, es gibt in einem nahezu kreisförmigen Raum bei zentraler Quelle eben kaum „seitliche“ Flächen, kaum tangential laufende Strahlen - plausibel. Mit diffusen Wandreflexionen ändert sich dies drastisch (LFm= 36%) – allerdings erst bei unrealistisch 100% diffusen Reflexionen. Bei sehr großen Räumen (S= 1024m²) ist LF im ersten Fall noch schlechter, selbst mit diffusen Reflexionen ist LFm nur 26%. Ein Kreisraum lässt sich also dadurch kaum verbessern (wie übrigens auch in anderer Hinsicht: der Deutlichkeit). Mit Einsatz von Wandstreuung kann LF erheblich verbessert werden, jedoch nur bei (unrealistischer) 100%-Streuung.

Polygonräume mit „Nischen“

Als nächster Schritt auf dem Wege zum Weinberg wurden die Polygone durch Zwischenwände („Zacken“) verschiedener Tiefe und Winkel unterbrochen (parametrisch erzeugt für „große“ „Räume“ gleicher Grundfläche (S=1024m²) gleicher mittlere Absorption α'_m = 0.256 und daher relativ langer Nachhallzeit (T_{Ey} ca. 2.7-3.5s)). Bild 9 zeigt als Beispiel einen 6-Nischen-Raum. Bei „geraden“ Nischen mit

parallelen Seitenwänden (links) ist erwartungsgemäß LF äußerst gering (da die Schallstrahlen praktisch nur auf radiale Wege gezwungen werden). Das kann stark verbessert werden durch diffus reflektierende Seitenwände (jedoch nur total diffus reflektierend, also unrealistisch, mitte). Als Nächstes wurden die Nischen (wie i.d.R. in der Realität) abgeschrägt. Auch dadurch lässt sich eine drastische Verbesserung erreichen (rechts) (rote Flächen, ***LFm=27%)***

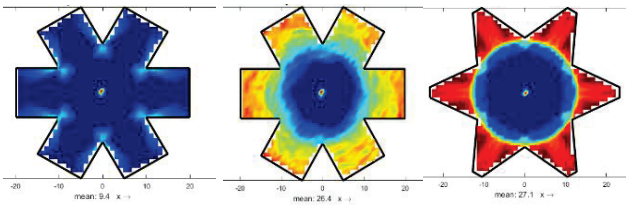


Bild 9: 6er-Polygon mit Nischen (50% des Radius tief): links: ohne Abschrägung, mitte: diffus reflektierend, rechts: mit um 25° abgeschrägten Nischen

Das nächste Bild zeigt, etwas realistischer, die Verhältnisse bei „Räumen“ mit nur 25% Nischentiefe

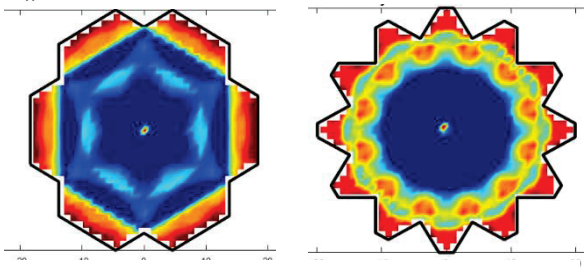


Bild 10: Polygone mit um 30° abgeschrägten Nischen, rel. Nischentiefe 25%. links 6. rechts 12 Nischen

Gegenüber dem vorletzten Bild (ohne Abschrägung) zeigt sich durch die Abschrägung eine erhebliche Verbesserung (in den Nischen rot, d.h. LF >40%, im Mittel LFm=25%), also sehr gute „Räumlichkeit“.

Welche Wechselwirkung gibt es zwischen den Nischen? Vermutlich kaum eine (die Spiegelquellen einer Nische sind für die einer benachbarten kaum „sichtbar“). Der Grundriss ist in der Rotation periodisch. Zur Untersuchung wurden deshalb einmal Schallstrahlen nur in eine Nische geschossen (als Beispiel Bild 11).

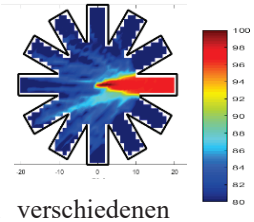


Bild 11: Pegelverteilung bei Schuss von 100 Strahlen in den Winkelbereich einer Nische (15°…+15°, Laufstrecke ca. 1.5 Radien, diffuse Reflexion), -10dB entspr. 10% Energieanteil, 0.5dB Fehler)

Die Vermutung bestätigt sich. Bei verschiedenen Raum- und Nischenformen gab es sehr gute Übereinstimmung der mittleren Seitenschallgrade in nur einer Nische mit Werten aus vollen Nischen-Polygonen (12er Polygon, 1024m²) .

Übergang zu 3D: geschichtete „Nischenpolygone“

Alle bisherigen Untersuchungen in 2D sind grobe Vereinfachungen. Sind sie auf reale 3D-Räume mit verschieden gestuften Terrassen, verschieden hohen „Zwischenwänden“ anwendbar? Näherungsweise ja. Man stelle sich die bisherigen gezackten „Nischenpolygone“ dazu ausgeführt auf konzentrischen Ringen vor, auf verschiedener Höhe (Bild 12), jeweils dazu nahezu parallele 2D-Schallausbreitung.

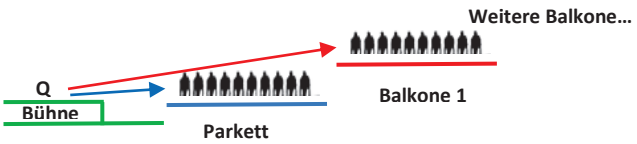


Bild 12: Geschichtete „Nischenpolygone“ im vertikalen Schnitt: zu jeder Terrassenebene (blau, rot) gehört ein Nischenpolygon, wie etwa in Bild x1. Q= zentrale Schallquelle

Die Mittelwerte von S in 3D, über alle Terrassen (Nischen) gemittelt dürften etwa Mittelwerten über den bisherigen 2D-Ergebnissen entsprechen, Wechselwirkungen gering sein.

Vorläufige Schlussfolgerungen

Der Seitenschallgrad hängt stark vom Grundriss ab und kann leicht in 2D berechnet werden. Hinsichtlich Seitenschallgrad LF bzw. Räumlichkeitseindruck gilt:

- LF ist in Quaderräumen am höchsten (Grundriss-Proportionen 1:1 bis 1:3).
- Bei kleineren Räumen ist auch Diagonal- und Zentralnutzung gut möglich; diffuse Seiten-Reflexionen bringen leichte Verbesserung; die absolute Größe ist wichtig: Raumbreiten > 27m sind ungünstig.
- Trapezräume (nach hinten breiter) sind ungünstig; auch gleichmäßige Stufung der Seitenwände bringt hier kaum Verbesserung, eine variable (hinten weiter nach innen geschwenkt) auch kaum mehr.
- Reguläre Polygone als Grundrisse (n>=8) sind bei zentraler Quelle ungünstig, im 12-Eck bzw. in nahezu kreisförmigen Räumen ist LF äußerst gering; falls Quelle nahe dem Rand jedoch gegenüber hoch. Mit Einsatz von Wandstreuung kann im ersten Fall LF erheblich verbessert werden, jedoch nur bei (unrealistischer) 100%-Streuung.
- In “Weinbergen” (“Nischen-Polygonen”) ist LF im Allgemeinen eher geringer als im Quader (gleicher Grundfläche). Das kann jedoch durch stark streuende Seitenwände oder durch Schrägstellung (verengend, am besten oft ca. 30°) erheblich verbessert werden.

Literatur

[1] ISO 3382-1, “Acoustics—Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces” (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009).

[2] Stephenson, U.: Eine Schallteilchen-Computer-Simulation zur Berechnung der für die Hörsamkeit in Konzertsälen maßgebenden Parameter. ACUSTICA 59 (1985)

[3] Stephenson, U.M.: How wrong may the Sabine formula be? - On the influence of the ceiling profile on the reverberation time; proc. of Internoise, 2010, Lisbon

[4] Stephenson, U.M.: Are there simple reverberation time formulae also for partially diffusely reflecting surfaces ?; in: proc. of Internoise, New York, 2012

[5] ISO 17497, Acoustics- Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2004