

# About the influence of the reflection coefficient on simulation in room acoustics

Roman Stumpner, Sebastian Goossens

Institut für Rundfunktechnik, D-80939 München, Germany

## Einleitung

Anders als im Konzertsaal sollte die Akustik in Tonstudios neutral sein. Die Räume sollen „trocken“ ,d.h. eine niedrige Nachhallzeit haben, aber dennoch keine reflexionsarmen Räume sein. Dies erfordert einen großen Einsatz von Schallabsorption. Da die raumakustische Simulation und eine darauf aufbauende Auralisation [5] realitätsnah sein soll, um eventuell auftretende störende akustische Effekte frühzeitig zu erkennen, ist es wichtig die Reflexion an den Wänden richtig zu beschreiben.

## Die Reflexionsfaktoren $r_{diff}$ und $r(\Theta)$

In gegenwärtigen Simulationsmethoden wird zur Beschreibung der akustischen Wandeigenschaften der Reflexionsfaktor  $r_{diff}$  verwendet. Er wird aus einem im Hallraum gewonnenen Absorptionsgrad  $\alpha_{diff}$  abgeleitet und kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$r_{diff} = \sqrt{1 - \alpha_{diff}} \quad (1)$$

Die Gründe hierfür sind einfach: Diffusfeldabsorptionsgrade in Terz- oder Oktavbandbreiten stehen dem Akustiker in großer Zahl zur Verfügung. Die Simulation ist einfach und schnell. Dieser über alle Schalleinfallswinkel gemittelte Diffusfeld-Reflexionsfaktor kann jedoch zu Fehlern führen, wenn die Reflexionseigenschaften der Wände stark vom Schalleinfallswinkel  $\Theta$  abhängen und keine diffusen Schallfelder vorliegen. Richtiger ist daher der vom Schalleinfallswinkel abhängige Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$ , der keine Eigenschaften des äußeren Raumschallfeldes enthält.

$$r(\Theta) = \frac{Z_1(\Theta) - Z_0 / \cos \Theta}{Z_1(\Theta) + Z_0 / \cos \Theta} \quad (2)$$

$Z_0$ : Kennimpedanz der ebenen Welle (410 Pa s/m)

$Z_1$ : Wandimpedanz

$\Theta$ : Schalleinfallswinkel

Man kann mit diesem Reflexionsfaktor in guter Näherung rechnen, solange die reflektierenden Flächen (Wände, Schallabsorber) groß und weit genug von Sender und Empfänger entfernt sind ( $> \lambda$ , siehe z.B. [4]). Bezogen auf den Freifeldschalldruck der Schallquelle  $p_0$  in 1 m Entfernung, errechnet sich der reflektierte Schalldruck  $p_1$  nach (3):

$$p_1 = \frac{p_0 r(\Theta)}{(s_0 + s_1)} e^{-jk_0(s_0 + s_1)} \quad (3)$$

$p_0$ : Freifelddruck in 1m

$k_0$ : Wellenzahl in Luft  $2\pi/\lambda$

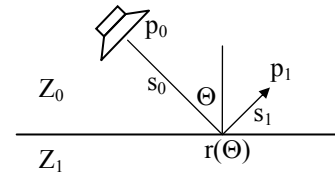


Bild 1 Geometrische Reflexion

Gleichung (2) zeigt, dass selbst bei lokal reagierender Wandimpedanz  $Z_1$  (d.h.  $Z_1$  unabhängig von  $\Theta$ ) eine Winkelabhängigkeit des Reflexionsfaktors gegeben ist. Die Frage ist letztlich aber, wie groß der Unterschied zu  $r_{diff}$  ist, wenn man die Simulation eines ganzen Raumes zu Grunde legt und nicht nur einzelne Reflexionen betrachtet. Der Einfluss, den  $r(\Theta)$  auf das Ergebnis einer raumakustischen Simulation hat, hängt sowohl vom Raumschallfeld ab als auch von der Art der winkelabhängigen Wandimpedanzen  $Z_1$  und vom Flächenanteil mit der sie im Raum vertreten sind. Wenn im Raum bestimmte Richtungen in der Schallausbreitung dominieren, kann das zur Folge haben, dass Reflexionsfaktoren für bestimmte Schalleinfallswinkel  $\Theta$  in ihrer Wirkung hervortreten.

Die Anwendung von (2) setzt die Kenntnis der komplexen Wandimpedanz  $Z_1$  voraus. Prinzipiell kann sie messtechnisch erfasst werden. Der Aufwand ist angesichts der Winkelabhängigkeit jedoch beträchtlich. Als Alternative bietet sich die Theorie der Schallabsorber an [1]. Vorteilhaft ist dabei, dass eine Vielzahl von Absorbertypen und deren Varianten berechenbar sind. Dies gilt insbesondere für poröse Absorbertypen (z.B. Mineralfaser, Vorhänge) in Kombination mit beispielsweise Folien oder Lochblechen. Die in die Berechnung eingehenden Parameter beschränken sich in der Regel auf Strömungswiderstände, Massen und Abmessungen.

## Bisherige Erfahrungen

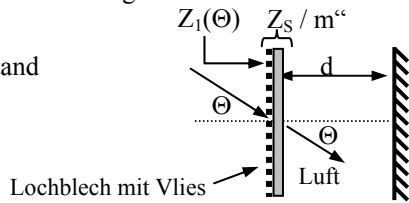
Die Berechnung der komplexen Wandimpedanz  $Z_1$  liefert neben der Winkelabhängigkeit auch die Phase. Vergleichende Simulationen mit und ohne Berücksichtigung der Phase haben bei unterschiedlichen raumakustischen Situationen Unterschiede in den Raum-Impulsantworten ergeben, diese waren in entsprechenden Auralisationen aber nicht wahrnehmbar (siehe auch [3]).

Vergleichende Simulationen zum Einfluss des winkelabhängigen Reflexionsfaktors haben ergeben, dass der Diffusfeld-Reflexionsfaktor in vielen Fällen brauchbare Ergebnisse liefert. Bei Anwesenheit größerer Flächen stark winkelabhängiger Wandimpedanzen kann es jedoch zu deutlich wahrnehmbaren akustischen Effekten kommen, deren realitätsnahe Abbildung die Berücksichtigung von  $r(\Theta)$  erfordert.

## Ein Beispiel aus der Praxis

Am Beispiel einer Tonregie soll der Einfluss des Reflexionsfaktors  $r(\Theta)$  aufgezeigt werden. Nach Fertigstellung waren dort deutlich wahrnehmbare Flatterechos bei Händeklatschen und „metallische“ Klangverfärbungen bei Sprachwiedergabe aufgefallen. Die Messung der Nachhallzeit zeigte ungewöhnliche Abweichungen von der nach Eyring geplanten statistischen Nachhallzeit. Etwa 60% der Raumflächen waren mit Schallabsorbemern nach **Bild 2** belegt.

$Z_S$ : Strömungswiderstand  
 $m''$ : Flächengewicht

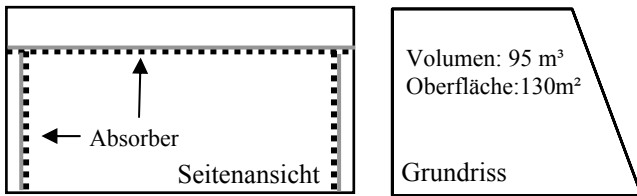


**Bild 2** Dünne poröse Schicht mit Luftpolster

Sowohl die Absorbiertiefe als auch der Strömungswiderstand der porösen Schichten an den Wänden und an der Decke waren unterschiedlich. Weitere Absorber im Raum waren der Teppichboden und Tiefenabsorber.

Decke:  $Z_S=5.5 Z_0$ ,  $d=25\text{cm}$ ,  $m'' = 5.5\text{kg/m}^2$

Wand:  $Z_S=2.2 Z_0$ ,  $d=12\text{cm}$ ,  $m'' = 5.5\text{kg/m}^2$



**Bild 3** Seitenansicht und Grundriss der Tonregie

Für  $r(\Theta)$  und  $r_{\text{diff}}$  wurde eine vergleichende Simulation mit Hilfe des SSQ-Verfahrens durchgeführt. Beide Reflexionsfaktoren werden theoretisch ermittelt.

Mit der Wandimpedanz  $Z_1$  des Absorbers:

$$Z_1(\Theta) = Z_S - j \frac{Z_0}{\cos \Theta} \cot(k_0 d \cos \Theta) \quad (4)$$

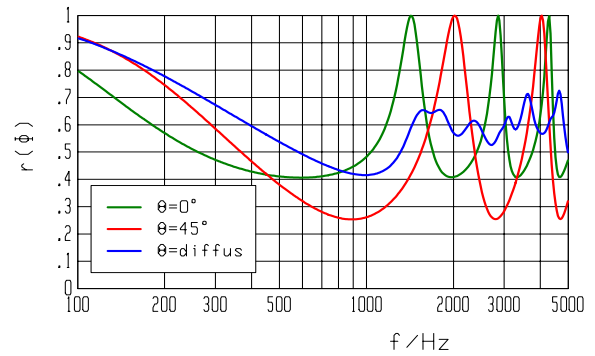
und Gleichung (2) ist der Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$  berechenbar. Der Diffusfeld-Reflexionsfaktor  $r_{\text{diff}}$  errechnet sich aus (1). Dazu wird aus  $r(\Theta)$  mit Hilfe von (5) zunächst der winkelabhängige Absorptionsgrad  $\alpha(\Theta)$  bestimmt.

$$\alpha(\Theta) = 1 - |r(\Theta)|^2 \quad (5)$$

Die Berechnung von  $\alpha_{\text{diff}}$  erfolgt dann mit (6).

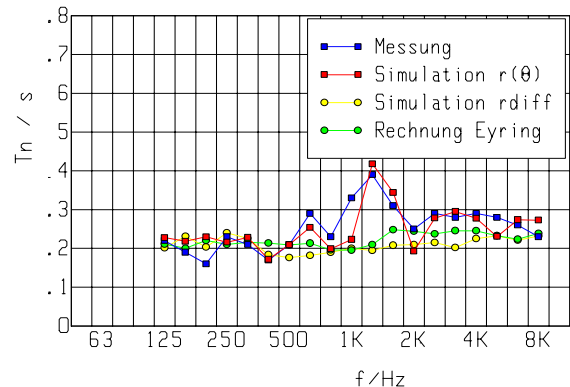
$$\alpha_{\text{diff}} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\Theta) \cos \Theta \sin \Theta d\Theta \quad (6)$$

**Bild 4** zeigt den Reflexionsfaktor des Wandabsorbers mit  $d=12\text{cm}$  und  $Z_S=2.2 Z_0$ . Deutlich zu sehen die starke Abhängigkeit von  $\Theta$  und  $f$  bei schrägem Schalleinfall. Die ausgeprägten Spitzen erreichen für  $d = n\lambda/2$  den Wert  $r=1$ . Dies ist typisch für dünne poröse Schichten mit Luftpolster. Der Verlauf von  $r_{\text{diff}}$  dagegen ist wesentlich ruhiger und weniger zerklüftet.



**Bild 4:** Reflexionsfaktor  $r(\Theta)$  und  $r_{\text{diff}}$ .

Die Simulationsergebnisse sind in **Bild 5** an Hand der aus terzgefilterten Impulsantworten gewonnenen Nachhallzeit dargestellt. Die Berücksichtigung von  $r(\Theta)$  in der Simulation bestätigt den gemessenen Verlauf der Nachhallzeit. Das Gleiche gilt für die entsprechende Auralisation, die einen ähnlichen Höreindruck wie im realen Raum zeigt. Eine Simulation mit  $r_{\text{diff}}$  dagegen kann die akustischen Effekte in diesem Raum nicht nachbilden.



**Bild 5:** Nachhallzeiten für  $r(\Theta)$  und  $r_{\text{diff}}$

## Fazit

Untersuchungen haben ergeben, dass die Anwendung des Diffusfeld-Reflexionsfaktors in der raumakustischen Simulation in vielen Fällen eine gute Näherung darstellt. In Räumen mit großen Flächen mit stark winkelabhängiger Wandimpedanz ist die Berücksichtigung des winkelabhängigen Reflexionsfaktors notwendig.

Die Berücksichtigung der Reflexionsphase hat sich bisher gehörphysiologisch als nicht notwendig erwiesen. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass bei zukünftigen Berechnungen des tieffrequenten modalen Schallfeldes die Berücksichtigung der Phase wichtiger wird.

## Literatur

- [1] Mechel, Schallabsorber Band 1-3, Hirzel Verlag
- [2] Cremer, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Hirzel Verlag
- [3] Becker, Mommertz, Die Modellierung der Wandreflexion in der raumakustischen Simulation, DAGA '93
- [4] Vorländer, Geometrische Raumakustik in kleinen Räumen? DAGA '02
- [5] Goossens, Stumpner, Auralization of room acoustics – A tool for planning broadcast production rooms?, DAGA '04