

## Vermeidung störender Mehrfachreflexionen

Sebastian Goossens, Roman Stumpner, Jörg Hör

Institut für Rundfunktechnik, 80939 München, E-Mail: goossens@irt.de

### Einleitung

Die aktuelle Architektur und Raumgestaltung bevorzugt klare Linien, glatte Oberflächen und rechte Winkel. Der optischen Transparenz wird besondere Bedeutung zugemessen, was sich in der Anordnung großer Glasflächen äußert. Damit werden die Flächen weniger, die zur Schallabsorption genutzt werden können, und die Entwicklung zum „papierlosen Büro“ entfernt mit den Aktenschränken und Bücherregalen auch akustische Streukörper von den Arbeitsplätzen.

In der Folge kommt es verstärkt zu Beschwerden über Mehrfachreflexionen zwischen parallelen Wänden, den sogenannten Flatterechos (FE).

Die Hörempfindungen, welche die Flatterechos hervorrufen, hängen vom Abstand der parallelen Wände und vom akustischen Signal ab. Bei impulsartigen Signalen (z.B. Klatschen) ist das Gehör in der Lage, die Rückwürfe zeitlich aufzulösen und zahlreiche Impulse nacheinander wahrzunehmen. Bei Sprachsignalen hingegen führen Flatterechos zu Klangverfärbungen bzw. zur Rauigkeit [1].

### Vermeiden von Flatterechos

Um Flatterechos wirksam zu vermeiden, reicht es aus, auf einer der parallelen Wände einen geeigneten Absorber aus schallschluckendem Material aufzubringen. Kommt es auf optische Transparenz an (z.B. bei Fenstern oder Glaswänden) wird diese Maßnahme selbstverständlich nicht akzeptiert. Durch Neigen oder Schrägstellen einzelner Fensterflächen bzw. ganzer Glaswände kann das Flatterecho ebenfalls vermieden werden. Solche Konstruktionen sind allerdings technisch aufwendig, verursachen zusätzliche Kosten und bedeuten im Fall von ganzen Glaswänden einen Verlust an Nutzfläche im Raum. Aus diesen Gründen wurde nach optimierten Möglichkeiten zur Vermeidung von Flatterechos gesucht.

### Messungen im reflexionsarmen Raum und Computersimulationen

Zur Untersuchung von Flatterechos konnten im reflexionsarmen Raum parallele Holzplatten im maximalen Abstand von 6 m aufgebaut werden. In der Computersimulation mit AUVIS wurden Räume mit dem Abstand der parallelen Wände von 4 m, 8 m und 16 m zusammengestellt. Tabelle 1 zeigt die Abmessungen der untersuchten Räume. In der Computersimulation konnte auch der Einfluss unterschiedlicher Nachhallzeiten und seitlicher Reflexionen berücksichtigt werden.

Sowohl im Messraum als auch in der Simulation wurden Impulsantworten ermittelt. Durch Faltung mit geeigneten

Testsignalen konnte man sich die Ergebnisse auch anhören (Auralisierung). Die subjektive Bewertung der zahlreichen Varianten erfolgte durch das Urteil weniger „expert listeners“. Die messtechnische Auswertung erfolgte z.B. in Form von Energie Time Curves (ETC)

Tabelle 1: In AUVIS simulierte Räume

Variante	Parameter		
	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]
Raum 1	4	3	3
Raum 2	8	6	3
Raum 3	16	12	3

### Auslenkung einer ganzen Wand

Die schrittweise Auslenkung einer von zwei parallelen Wänden (Höhe 2m; Länge 2,8m) von 0° bis 12° ergab, dass das Flatterecho erst ab einem Auslenkung von 9° unhörbar wird (Abb. 1). Der größte subjektive Effekt tritt im Winkelbereich bis 4° auf. Werden beide Wände schräg gestellt, reicht der halbe Winkel je Seite (Abb. 2) (z.B.  $\alpha=4^\circ$  und  $\beta=4^\circ$  ist gleichwertig zu  $\alpha=8^\circ$  und  $\beta=0^\circ$ ).

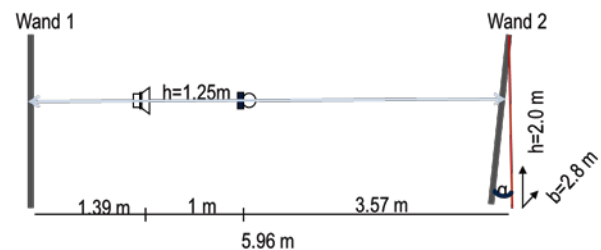


Abbildung 1: Schrägstellung einer Wand.

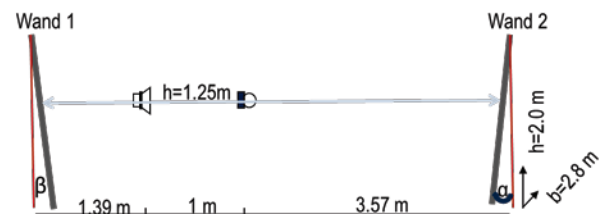


Abbildung 2: Schrägstellung zweier Wände.

Die größeren Wandabstände (8 m und 16 m) wurden mit dem Programm AUVIS simuliert und auralisiert. Entgegen der Erwartung war auch bei größerem Abstand der reflektierenden Wände ein Winkel von  $\alpha=9^\circ$  erforderlich, um das Flatterecho vollständig unhörbar werden zu lassen. Der geringeren Anzahl von Rückwürfen stehen größere

zeitliche Abstände entgegen (Abb. 3). Dadurch werden die Echos subjektiv auffälliger

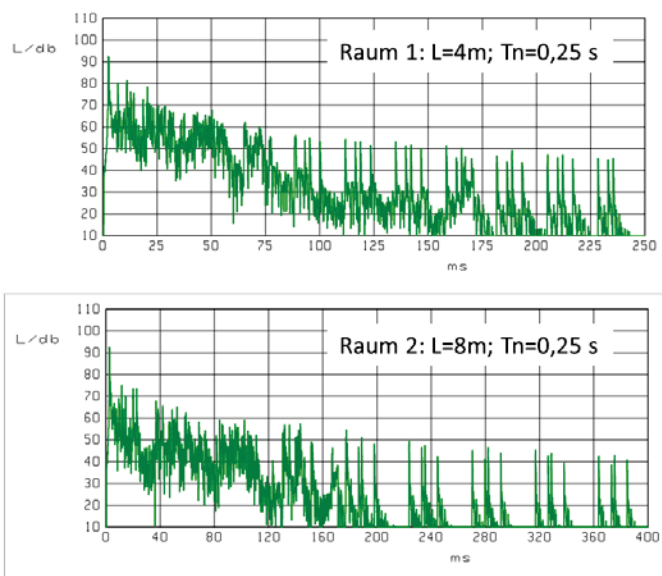


Abbildung 3: Reflektogramme von Flatterechos in Räumen mit verschieden großen Wandabständen (Simulationen).

Die Computersimulationen bzw. Auralisierungen machten deutlich, dass Flatterechos auch in realistischen Raum mit typischer Nachhallzeit deutlich wahrnehmbar sind. Bei längerer Nachhallzeit wirkte das Flatterecho allenfalls etwas „verwaschener“.

Um Flatterechos wirksam zu vermeiden, reicht es in der Simulation aus, auf einer der parallelen Wände (Abstand 4m) einen 5 cm dicken Absorber aus schallschluckendem Material aufzubringen. Nur bei den größeren Wandabständen konnte man in der Auralisierung dann noch ein tieffrequentes Echo hören.

### Mikrofonaufnahmen

Wenn Flatterechos in Aufnahme Räumen auftreten, stellt sich häufig die Frage, inwiefern das aufgenommene Mikrofonsignal von den Reflexionen beeinträchtigt wird. Im reflexionsarmen Raum wurde der Abstand zwischen Quelle (Lautsprecher) und Mikrofon von 100 cm schrittweise bis auf 20 cm verkürzt und jeweils die Impulsantwort gemessen. In Abb. 4 ist die ETC vom Mikrofonabstand 100 cm im Vergleich zu 30 cm und 20 cm dargestellt.

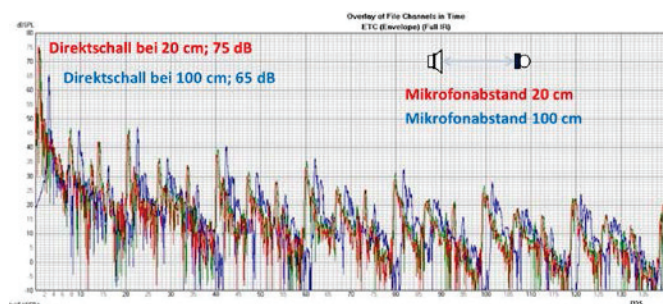


Abbildung 4: Darstellung der ETC für verschiedene Mikrofonabständen von der Schallquelle.

Während die Pegelspitzen der Flatterechos zwar zeitlich verschoben aber auf dem gleichen Niveau bleiben, steigt der

Direktschall bei 20 cm um etwa 10 dB gegenüber dem Mikrofonabstand von 100 cm an.

Somit wird deutlich, dass zwischen dem Hörempfindung im Raum bei der Kommunikation und der Qualität des Aufnahmesignals bei kurzem Mikrofonabstand (z.B. 20 cm) zu unterscheiden ist. Die Qualität des Mikrofonsignals kann durch Verkürzen des Aufnahmeabstandes optimiert werden.

### Optimierungspotential

Im Messraum wurde untersucht, ob es ausreicht nur den Teil der Wand anzuwinkeln, der auf der Reflexionsebene getroffen wird. Da Lautsprecher und Mikrofon auf einer Höhe von 1,25 m angeordnet waren, wurde nur die obere Hälfte der Wand angewinkelt (Abb.5). Im Ergebnis wirkte diese Anordnung schlechter als die Neigung der gesamten Wand. Selbst bei einem Winkel von  $\alpha=12^\circ$  war das Flatterecho noch hörbar.

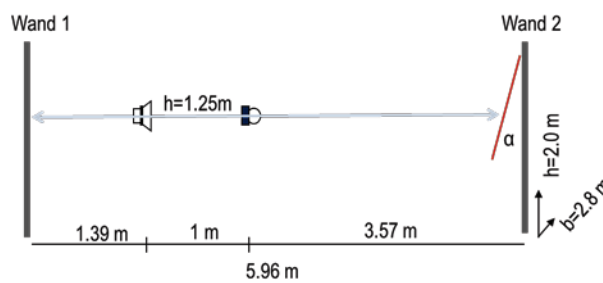


Abbildung 5: Schrägstellung des oberen Teils einer Wand

Ergänzte man diese Anordnung durch ein zweites Brett im unteren Bereich mit einer entsprechenden Neigung nach unten (Abb.6) werden die Reflexionen besser gedämpft als bei Neigung der gesamten Wand mit gleichem Winkel.

Das gilt insbesondere für die frühen Reflexionen. Die Reflektogramme (ETC) in Abb. 7 vergleichen diese gefaltete Anordnung bei einem Winkel von  $\alpha=6^\circ$  mit der Neigung der gesamten Wand um ebenfalls  $\alpha=6^\circ$  und mit der ungeneigten Wand ( $\alpha=0^\circ$ ).

So kann mit geringerer Aufbauhöhe und weniger Verlust an Nutzfläche eine größere akustische Wirkung erzielt werden!

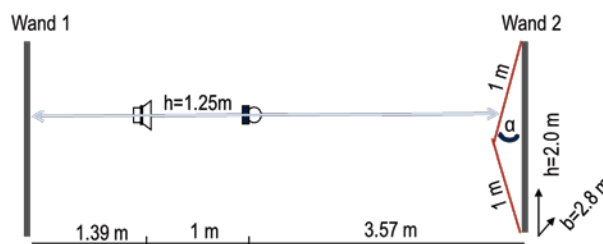


Abbildung 6: Horizontal gefaltete Wand wirkt besser die Neigung der gesamten Wand um denselben Winkel.

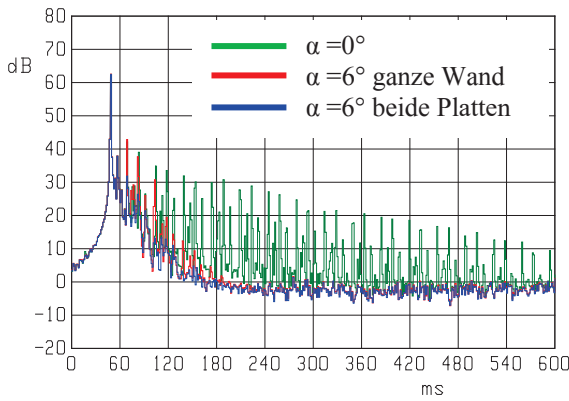


Abbildung 7: Vergleich der ETC für gefaltete Anordnung (beide Platten) mit der Neigung der gesamten Wand für einen Winkel von  $\alpha=6^\circ$  und der ungeneigten Wand ( $\alpha=0^\circ$ )

### Grenzen der geometrischen Akustik

Wird ein 4 cm dicker poröser Absorber nur im unteren Bereich angebracht (Abb. 8), so wird das FE dadurch dennoch vermindert. Allerdings ist die so erzielte Wirkung zu gering. Wird der Absorber nur im oberen Bereich angebracht, wirkt er besser aber ebenfalls nicht ausreichend. Abb. 9 zeigt die zugehörigen Reflektogramme (ETC) im Vergleich.

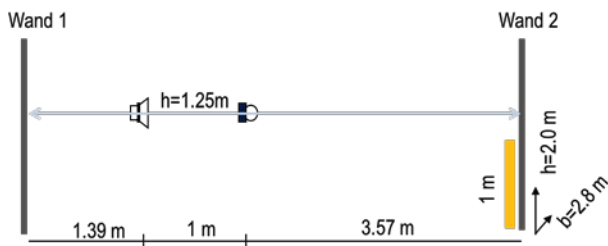


Abbildung 8: Wandabsorber im unteren Bereich der Wand- außerhalb der Reflexionsebene

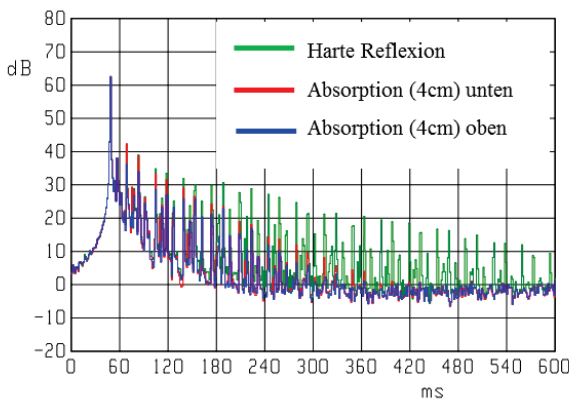


Abbildung 9: Darstellung der ETC für Wandabsorber in der Reflexionsebene und außerhalb der Reflexionsebene

Wird eine Reflektorplatte (ohne Absorption) mit Abstand 5 cm bzw. 10 cm im unteren Bereich senkrecht vor die Rückwand gestellt (Abb. 10), ergibt sich eine Dämpfung der Reflexionen, die in etwa einer Neigung von  $2^\circ$  bzw.  $4^\circ$  entspricht. Abb. 11 zeigt die zugehörigen Reflektogramme (ETC) im Vergleich. Diese Messergebnisse belegen, dass die Betrachtungsweise der geometrischen Akustik (SSQ oder ray-tracing) mit Schallstrahlen und lokalem Reflexionspunkt eine Vereinfachung der komplexen physikalischen Vorgänge bei jeder Schallreflexion darstellt. Die akustische Gestaltung der gesamten Wandfläche beeinflusst das Ergebnis.

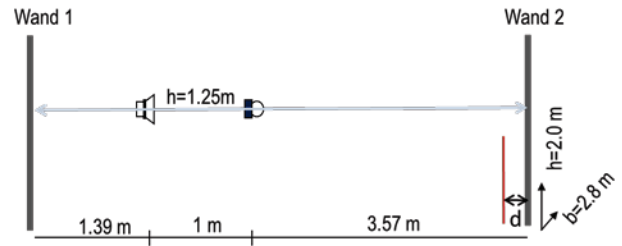


Abbildung 10: Gerade Reflektorplatte mit Abstand d vor Wand

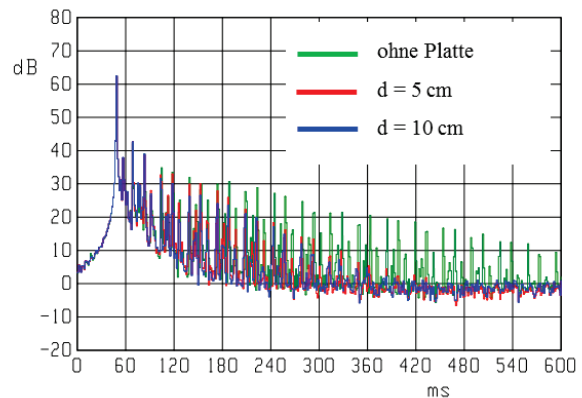


Abbildung 11: Darstellung der ETC für verschiedene Abstände der senkrechten Reflektorplatte vor einer Wand

In der Praxis kann die Berücksichtigung dieser Effekte die Ausbildung von störenden Flatterechos vermindern.

### Zusammenfassung

Mehrfachreflexionen werden erst ab einer Neigung bzw. Schrägstellung von  $9^\circ$  vollständig unhörbar (auch bei großem Wandabstand von 16 m). Eine große subjektive Minderung des Flatterechos ist bereits im Bereich von wenigen Grad (bis  $4^\circ$ ) feststellbar. Werden beide Wände schräg gestellt, reicht der halbe Winkel auf beiden Seiten (z.B.  $\alpha=4^\circ$  und  $\beta=4^\circ$  ist gleichwertig zu  $\alpha=8^\circ$  und  $\beta=0^\circ$ ).

Flatterechos sind auch im realistischen Raum mit typischer Nachhallzeit deutlich wahrnehmbar. Bei längerer Nachhallzeit klingen sie „verwaschener“.

Mit kurzem Mikrofonabstand (z.B. 20 cm) kann ein deutlich im Raum hörbares Flatterecho im aufgenommenen Mikrofonsignal „unterdrückt“ werden.

Die Neigung der oberen Wandhälfte um  $\alpha$  nach oben und der unteren Wandhälfte um  $\alpha$  nach unten wirkt besser als Neigung der gesamten Wand um  $\alpha$ . Mit halber Bautiefe kann also eine größere Wirkung erzielt werden!

Die Absorptionsverteilung und die Struktur der gesamten Wand (auch außerhalb der geometrischen Schallstrahlen) haben deutlichen Einfluss auf die Reflexion.

## Literaturverzeichnis

[1] Demonstration raumakustischer Effekte

“Flatterecho”, URL:

<https://www.irt.de/de/themengebiete/akustik/raumakustische-effekte.html>