Flatterechos und wo sie zu finden sind

Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz[1]

[1] *Peutz Consult GmbH, 40599 Düsseldorf, E-Mail: khl@peutz.de*

Einleitung und Motivation

Der Terminus "Flatterecho" bezeichnet periodische Rückwürfe bzw. Rückwurffolgen, welche die Hörsamkeit von Schallereignissen negativ beeinträchtigen können.

Aufbauend auf einer Typisierung der möglichen Erscheinungsformen des Phänomens "Flatterecho" - zeitlich periodisch wiederholte Mehrfachwahrnehmbarkeit von Schallereignissen, messbare Verlängerung der Nachhallzeit und Klangfarbenmodifikation - soll in diesem Beitrag anhand von prägnanten Beispielen aus der Praxis gezeigt werden, welche Geometrietypen und Konfigurationen von Raumbegrenzungsflächen besonders anfällig bezüglich einer Ausbildung von Flatterechos sind.
Darüber hinaus soll die Wirkung verschiedener Typen und Stärken von Flatterechos auf die Verständlichkeit von Sprache und Hörsamkeit mit Hilfe von Auralisationen in Hörbeispielen demonstriert werden.
Die Problematik von Flatterechos und ihrer die Hörsamkeit beeinträchtigenden Wirkungen hat sich u.a. durch die zum Einsatz kommenden Geometrien und Materialien und den immer einfacher verfügbaren exakten Messmethoden im Baugewerbe gegenüber Bauten aus früheren Epochen drastisch verschärft: beispielsweise sind parallele Flächen mittlerweile z. B. durch Einsatz von Lasertechnik exakt parallel baubar - und werden gemäß den heutzutage gebräuchlichen Baustilen auch oft exakt parallel gebaut. Diese Tendenz wird weiter verschärft durch eine zunehmende Ökonomisierung des Bauens in jüngster Zeit.

Diese phänomenologische Darstellung soll dazu dienen, Verständnis des und Sensibilität bezüglich des Phänomens Flatterecho zu schärfen und anhand der dahinterliegenden Prinzipien Wege in der beraterischen Praxis aufzuzeigen, um solche unerwünschten raumakustischen Artefakte bereits vom Entwurfszeitpunkt an möglichst zu vermeiden.

Definition des Phänomens Flatterecho

Regulär abklingende Raumimpulsantworten zeigen keine nennenswerten Echos oder Flatterechos, siehe die Ruamimpulsantwort eines guten Konzertsaals in Abb. 1 [1].

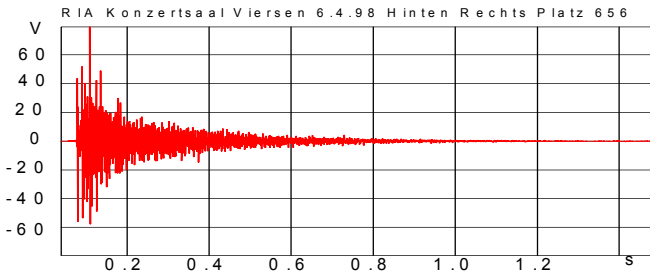


Abbildung 1: Dies ist eine regulär abklingende Raumimpulsantwort aus einem guten Konzertsaal ohne Echos oder Flatterechos (Stadthalle Viersen, aus [1]).

Flatterechos sind definiert als:

- zeitlich periodische Rückwürfe des Direktschalls [2];
- bzw. gering gedämpfte geschlossene Wellenzüge [3].

Bei Flatterechos handelt es sich somit um geometrie-, positions-, frequenz- und materialabhängige Phänomene. Schallfelder, welche Flatterechos aufweisen, sind nicht-sabine'sche Schallfelder, da die Voraussetzung der Diffusität nicht erfüllt ist, denn Schallfelder mit Flatterechos sind nicht homogen und nicht isotrop.
Flatterechos bewirken eine Verringerung der Hörsamkeit, z. B. mehrfache Wahrnehmungen von Percussion-Schlägen in Proberäumen, Verringerung der Verständlichkeit von Sprachdarbietungen oder Irritationen von Sprechern, s. [4].

Typisierung möglicher Erscheinungsformen

Die möglichen Erscheinungsformen von Flatterechos lassen sich wie folgt typisieren, und zwar als [2], [3], [5]:

a. zeitlich periodisch wiederholte Mehrfachwahrnehmbarkeit des Direktschallereignisses [2];
b. messbare Verlängerung der Nachhallzeit [3];
c. Klangfarbenmodifikation, [2], [5].

Ad c.: zwischen nahen Flächen folgen die einzelnen periodisch wiederkehrenden Reflexionen abstandsabhängig derart rasch aufeinander, dass eine Tonhöhe wahrgenommen werden kann ("Repetition Tonality" [5], $f_P > 16$Hz).

Übersicht flatterecho-generierende Geomoetrien

Potenziell Flatterechos generierende zweidimensionale Geometrien sind angegeben z. B. in [6], S. 752.
Räumliche Erweiterungen davon sind quasi jegliche Geometrien mit gegenüberliegenden parallelen oder konkaven schallharten Begrenzungsflächen, so z. B. u.a.:

- Quader, Würfel, Prismen mit geradzalhigen Seiten;
- Kugel, Halbkugel, Kalotte, Kreisring(abschnitt);
- Zylinder, Zylinderabschnitt, Kegel, Kegelstumpf.

Identifizierung echogenerierender Geometrien

Die Entfernung der flatterechogenerierenden Flächen d_P ist bestimmbar über die Messung der Periodendauer T_P und den folgenden Zusammenhang (1) nach [1]:

$$d_P = \frac{1}{2} \cdot c \cdot T_P \qquad [\text{m}^2] \qquad (1)$$

Zur Phänomenologie: Beispiele aus der Praxis

Zur Verdeutlichung sollen typische wie auch extreme Beispiele des Phänomens Flatterecho angegeben werden. Die periodische Struktur der Impulsantworten ist in den folgenden Abbildungen 2 bis 6 deutlich zu erkennen.

Hof 9 des Campus der Universität Wien

Der Hof 9 des Campus AKH der Universität Wien ist im Grundriss trapezförmig, wobei die Glasfassaden der Institute für Musikwissenschaft und Kunstgeschichte parallel zueinander verlaufen. Dazwischen bildet sich bei Impulsanregung ein deutliches Flatterechos aus, s. Abb. 2. Der Hof ist nach oben hin offen, die „Decke“ dieses „Raums“ mithin völlig absorbierend. Wegen seiner deutlichen Wahrnehmbarkeit dient dies Flatterecho den Studierenden der Musikwissenschaft als Anschauungsobjekt.

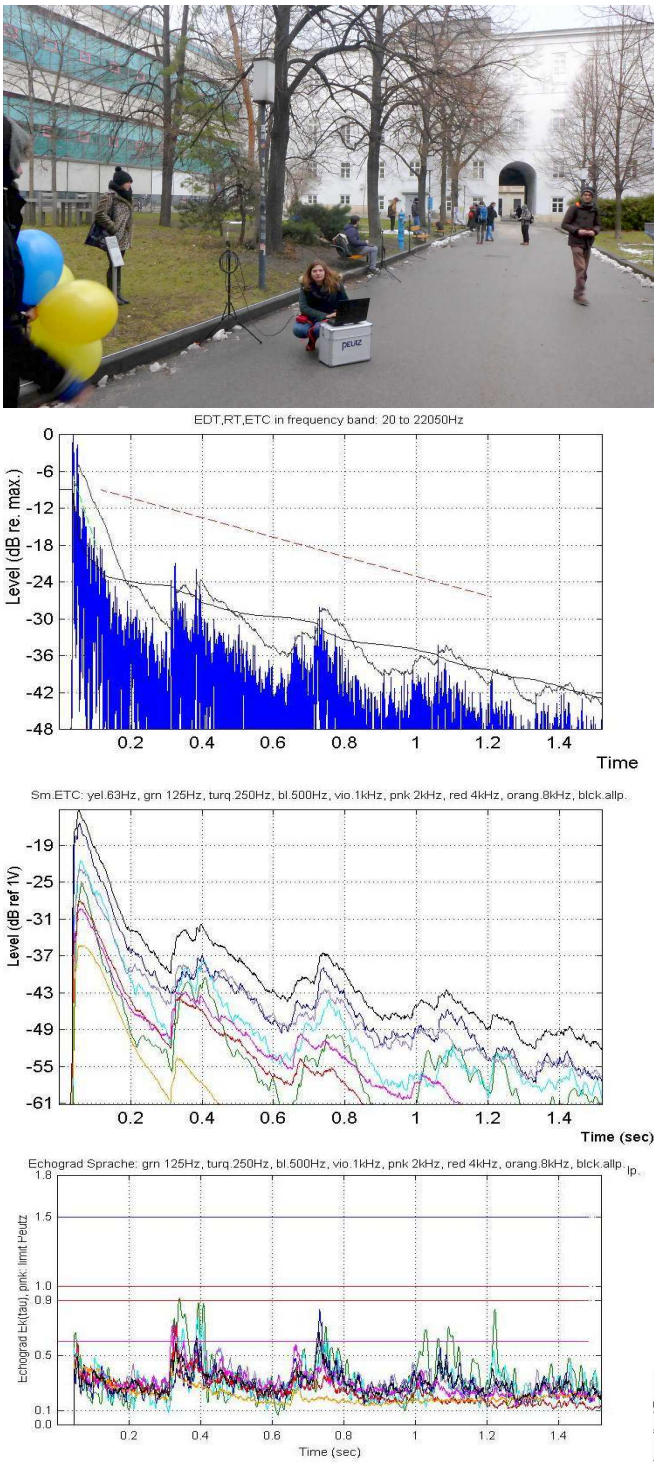


Abbildung 2: Universität Wien, Hof 9, Flatterecho paralleler Glasfassaden; oben: Breitband-ETC, mittig: geglättete ETC, unten: Echograd $E_K(\tau)$, alle in Oktavbändern

Gewölbebogen in einem Brückenfundament

Im Durchgang des östlichen Fundaments der Kennedybrücke in Bonn entsteht bei Impulsanregung zwischen dem reflektierenden Boden und der konkaven schallharten Wölbung ein starkes breitbandiges Flatterecho.
Charakteristisch für die konkave Wölbung ist die zeitliche Sekundärstruktur der Rückwürfe mit lokalen Nebenmaxima.

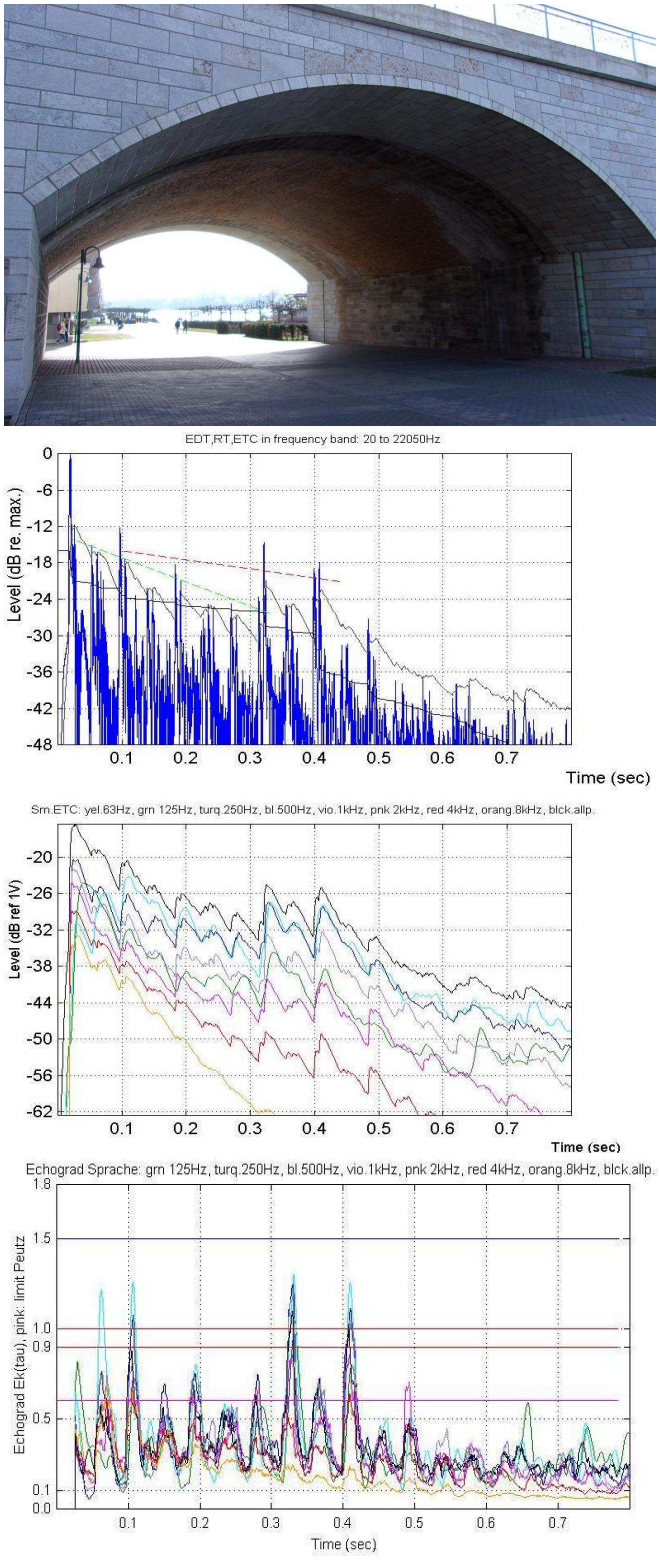
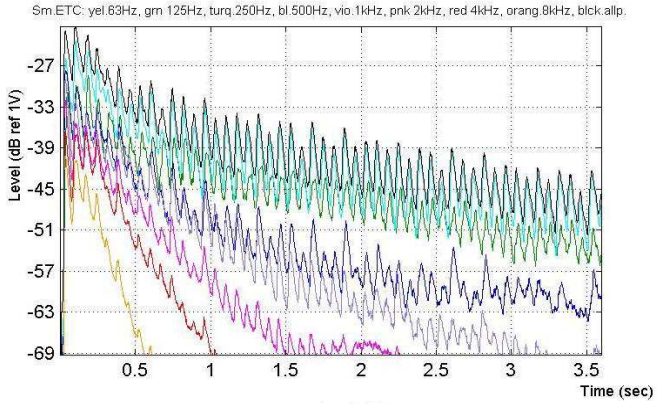
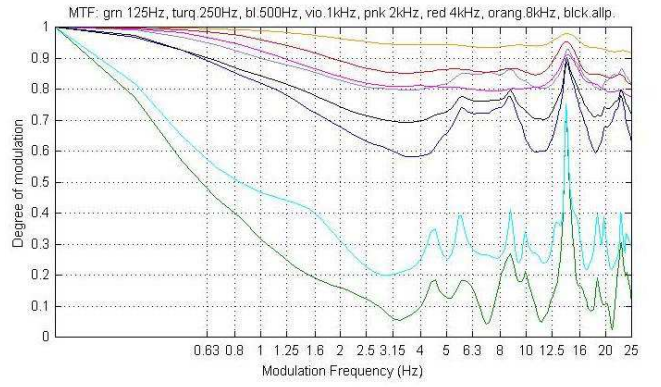


Abbildung 3: Flatterecho eines konkaven schallharten Gewölbes über reflektierendem Boden mit völlig absorbierenden Seiten; oben: ETC (Breitband); mittig: geglättete ETC, unten: Echograd $E_K(\tau)$; alle in Oktavbändern

Gasometer C in Wien

Der Gasometer C in Wien beherbergt Geschäfte in einer Mall. Der Raum weist einen zylindrischen Grundriss auf mit einer flach konkav gewölbten Glaskuppel, siehe Abb. 4. Bei Impulsanregung entsteht zwischen den reflektierenden Begrenzungsflächen ein starkes und sehr lange (> 8 s) wahrnehmbares breitbandiges Flatterecho, s. Abbildung 4.





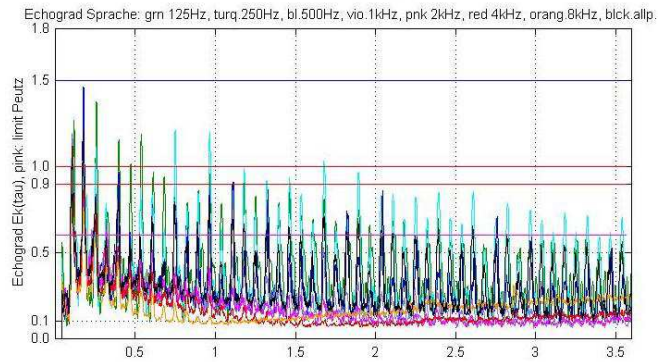
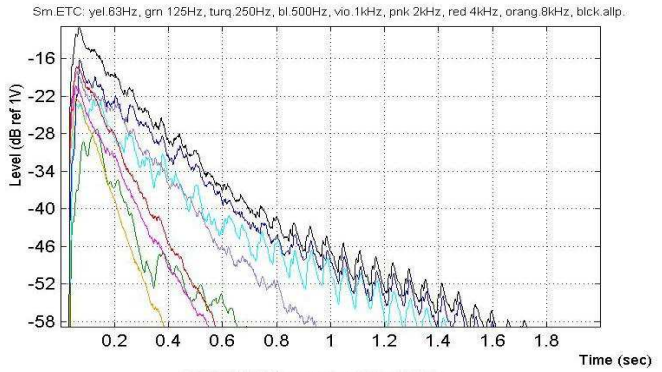
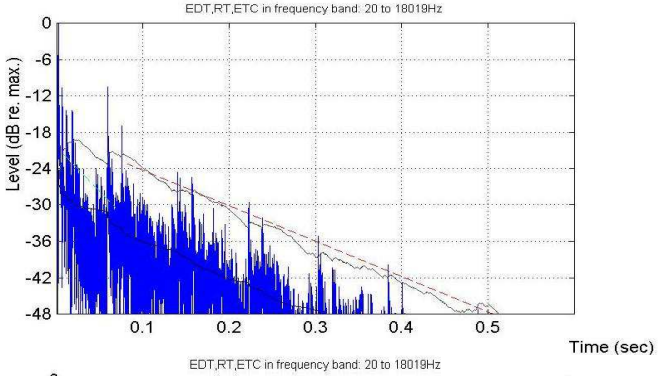


Abbildung 4: Wien, Gasometer C, Flatterecho zwischen den konkaven Begrenzungsflächen und dem Boden; oben: geglättete ETC; mittig: Modulation Transfer Function MTF, unten: Echograd $E_K(\tau)$, alle in Oktavbändern

Quaderförmige Gymnastikhalle

Das folgende Beispiel, ist eine quaderförmige Gymnastikhalle. Der Prallbereich der Wände wurde mit einem hoch- und tieffrequent wirkenden Absorber versehen, weshalb Flatterechos resultieren und insbesondere in den Oktavbändern mit Mittenfrequenz 250 und 500 Hz die Nachhallzeit gegenüber den anderen Oktavbändern verlängern. Die Flatterechos der Längs- und Querrichtung überlagern sich und können mit gerichtet abstrahlenden Quellen separat angeregt werden, siehe Abbildung 6.





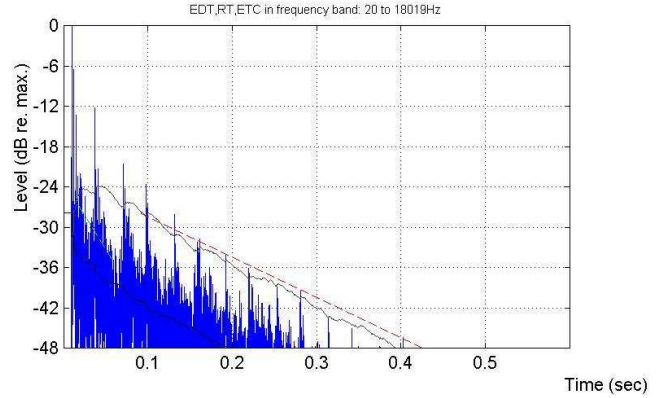


Abbildung 5: Flatterechos in einer Gymnastikhalle; oben: geglättete ETC in Oktavbändern; mittig: ETC, Längsrichtung angeregt, unten: ETC, Querrichtung angeregt

Das Flatterecho als architektonisch-akustische Besonderheit im Arp Museum Bahnhof Rolandseck

In der Regel sind Flatterechos wegen ihrer die Hörsamkeit beeinträchtigen Eigenschaften unerwünschte Artefakte Seltener sind die Fälle, bei denen die besonderen akustischen Eigenschaften von Flatterechos als Effekt eingesetzt werden [5]. Im Arp Museum Bahnhof Rolandseck findet sich ein solches Beispiel für einen akustisch wegen seines Flatterechos besonderem Raum: Den historischen Bahnhof Rolandseck verbindet ein horizontaler Tunnel mit dem Museumsneubau, siehe Abbildung 6:

„Der Korridor vor der Kunstkammer führt in einen zweiten Tunnel. Er wurde in den Rheinhang hineingetrieben, wie man an seinem runden Querschnitt und den unverkleideten Betonwänden erkennen kann. Unter der Lichtinstallation »Kaa, die Schlange« von Barbara Trautmann hindurch, erreicht man am Ende des Stollens den Aufzugturm, der in den Neubau von Richard Meier führt.“[7]

In diesem Tunnel stehen sich 2 konkave Wände gegenüber, während Decke und Boden als nahezu parallele Flächen ausgebildet sind. Bei entsprechender Anregung bildet sich in diesem Tunnel ein deutlich wahrnehmbares und mehrere Sekunden anhaltendes Flatterecho mit "Repetition Tonality" aus, siehe Abbildung 6, was dem Raum eine ganz besondere, zu der besonderen Architektur dieses Museums für moderne Kunst gut passende akustische Atmosphäre verleiht.

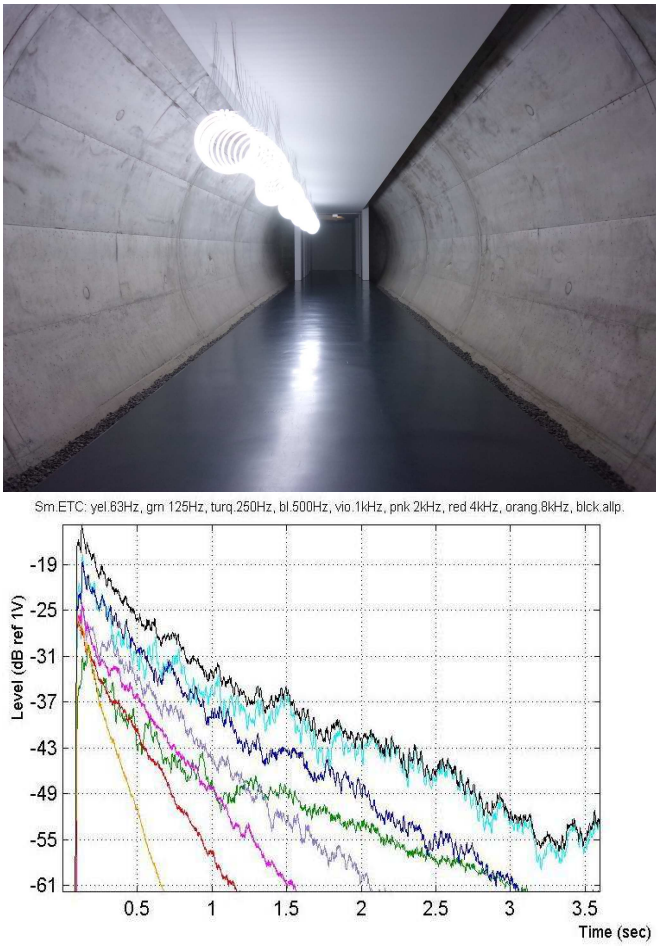


Abbildung 6: Verbindungstunnel zwischen Alt- und Neubau im Arp Musum Bahnhof Rolandseck mit Flatterecho und “repetition tonality“

Fazit und Konsequenzen für die Beratung

Flatterechos sind artifizielle zeitlich periodische Rückwurffolgen (in der Natur treten Flatterechos kaum auf) und können beim Bauen prinzipiell beinahe überall auftreten, insbesondere, wenn sehr parallel gebaut wird, und raumakustische Abhilfemaßnahmen fehlen. Flatterechos sind dabei Nachweise, dass die Schallfelder nicht diffus sind. Die Auswirkungen von Flatterechos - Direktschall-wiederholungen, Tonhöheneindruck, und gegenüber dem diffusen Feld erhöhte Nachhallzeiten - verringern die Hörsamkeit und die Sprachverständlichkeit und sind bei Nutzungen mit Anspruch an die Akustik *zu vermeiden*. Dabei sind alle drei Dimensionen in die Betrachtungen einzubeziehen und mit geeigneten Maßnahmen zu versehen. Absorption, welche nur an gegenüberliegenden Flächen realisiert wird, macht etwaige Flatterechos orthogonal dazu besser hörbar, ist mithin, wenn nicht fachgerecht geplant und realisiert, kein Allheilmittel gegen Flatterechos.

Da Flatterechos breitbandige Phänomene sind, müssen auch die raumakustischen Schall schluckenden oder streuenden Abhilfemaßnahmen breitbandig wirksam sein, sonst können bandbegrenzte Flatterechos resultieren samt der - dann band-begrenzten - negativen Auswirkungen auf die Hörsamkeit. Ausreichend und geeignete Streuung und Absorption an den richtigen Positionen können Flatterechos verringern. Es ist jedoch erforderlich, der Parallelität reflektierender wie auch konkaven Krümmungen von Raumbegrenzungsflächen beraterisch mit Nachdruck entgegenzuwirken - es sei denn, die besonderen Auswirkungen von Flatterechos auf den Klang stellen einen gewünschten Effekt dar, was jedoch in den seltensten Fällen der Fall sein dürfte.

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Gasometer Wien und dem Arp Museum Bahnhof Rolandseck für die freundliche Erlaubnis der raumakustischen Messungen, die in diesem Beitrag vorgestellt wurden.

Literatur

[1] Lorenz-Kierakiewitz, K.-H.: Wie die Akustik verschiedener Konzertsäle den Klang von Stimmen und Musikinstrumenten beeinflusst, in: Sprache und Musik, Hg. von Ulrike Groß, Michael Thiergart, FfaM, 2013

[2] Maa, D. Y.: The Flutter Echoes.
Journal Acoust. Society of America, Vol. 13, Oct. 1941

[3] Kuhl, W.: Nachhallzeiten schwach gedämpfter geschlossener Wellenzüge, Acustica, Vol. 55 (1984)

[4] Esselun, A.: Auswirkungen von periodischen Reflexionen in kleinen Räumen auf die Hörsamkeit, Bachelor-Thesis, Hamburg, 2015

[5] Halmrast, T.: Flutter Echoes; Timbre and possible use as sound effect, Proc. of the 18th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15), Trondheim, 2015

[6] Long, M.: Architectural Acoustics. Elsevier Academic Press, San Diego, 2006, S. 752

[7] URL: https://arpmuseum.org/museum/unser-haus/architektur.html, aufgerufen am 11.03.2019