

# Faltungshall

Referat, gehalten von Daniel Otto im Tonseminar bei Prof. Curdt im Wintersemester 2009/2010

An der Hochschule der Medien

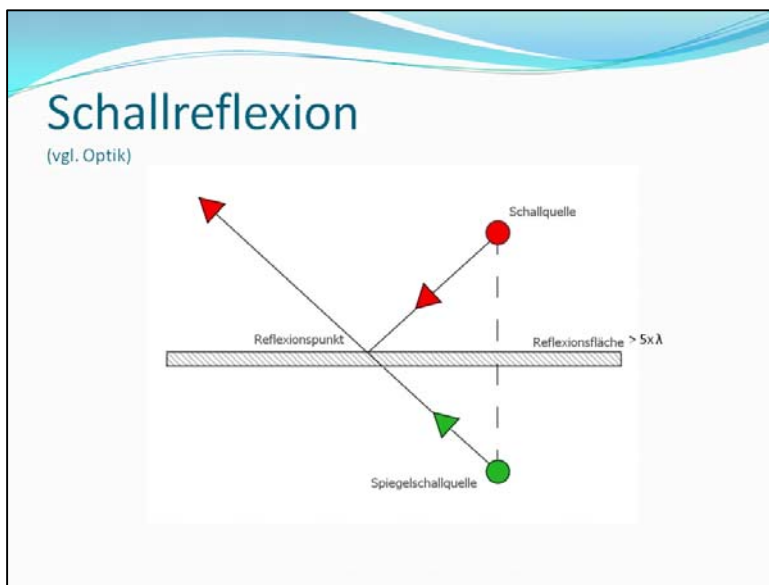
## Inhalt

Einleitung.....	2
Schallreflexion .....	2
Akustischer Eindruck eines Raumes .....	3
Nachhall.....	3
Typen von Nachhallgeräten .....	5
Impulsantwort.....	6
Faltung.....	6
Besonderheiten .....	8
Quellen .....	9



Dieses Referat behandelt zuerst die Grundlagen des Schalls und geht kurz auf den akustischen Eindruck eines Raumes ein. Dem folgt eine Auflistung verschiedener Hallerzeuger zur Erzeugung des Faltungshalls. Faltungshall ist ein akustischer Hall-Effekt, der mit Hilfe der Faltung Abbilder real existierender Räume per

Computersystem auf Audiosignale errechnet.

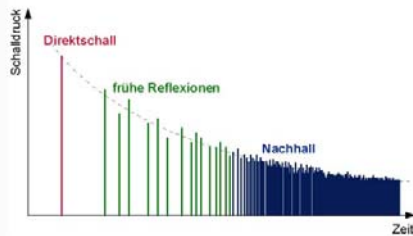


Wird Schall von einer Quelle ausgesendet kommt es an verschiedenen Flächen, in Abhängigkeit von deren Oberflächenbeschaffenheit, zu Reflexionen.

Glatte und schallharte Flächen werfen den Schall ähnlich zurück, wie ein Spiegel das Licht. Dabei ist der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel (Reflexionswinkel).

Bei rauen Strukturen hingegen erfolgt die Reflektion in viele Richtungen. Je rauer ein Material ist, desto diffuser wirft es diesen Schall wieder zurück. Hartes Material absorbiert die Schallwellen kaum, weiches dagegen stärker. Die Reflexionsfläche muss mindestens das Fünffache der zu reflektierenden Wellenlänge betragen, sonst beugt sich die Welle um das Hindernis.

## Akustischer Eindruck eines Raumes

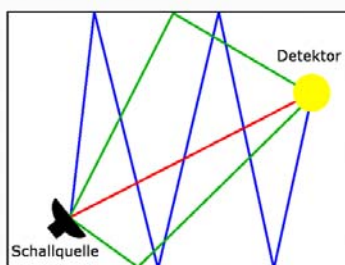


Der akustische Eindruck eines Raumes resultiert aus den Schallreflexionen, die wiederum zu den genannten Oberflächenbeschaffenheiten von der Form, dem Inventar, und ggf. durch ein Publikum abhängig sind. Durch die Reflexionen von Schallwellen, bei denen die Raumgröße ein Vielfaches der Wellenlänge besitzt, kann es zu

Auslöschungen, Addition und demnach zu Verfärbungen im Klang kommen.

Das Schallereignis, welches auf direktem Wege ohne Reflexionen zur Senke, z.B. dem Publikum gelangt, bezeichnet man als Direktschall. Er ist Richtungsbestimmend und gibt daher Klarheit z.B. über die räumliche Aufstellung der Musiker. Desweiteren ist er verantwortlich für die Deutlichkeit und Durchsichtigkeit des Klanges. Die ersten Reflexionen hingegen erhöhen die Lautstärke des Direktschalls und bestimmen die empfundene Raumgröße. Anschließend nimmt man noch das Ausklingen des Raumes wahr, welches als Nachhall bezeichnet wird. Das Verhältnis zwischen indirektem Schall und direktem Schall hat einen Einfluss auf das Empfinden für die Entfernung und Größe (Raumvolumen).

## Nachhall



Raum	Günstige Nachhallzeit in Sek.
Sprecherstudio	0,3
Fernsehstudio (groß)	0,8
Kino	0,9
Konferenzzimmer	1,0
Kammermusikraum	1,2
Opernhaus	1,5
Konzertsaal	2,0
Kirche	über 2,5

Verzögerung (ms*)	Wahrnehmung bei binauralem Hören
0-1	Summenlokalisation
1-50	Präzedenzeffekt (Gesetz der ersten Wellenfront)
bei Sprache > 50, bei Musik > 100	ggf. Echo

1 ms entspricht 34,3 cm Wegdifferenz (bei 20 °C)

Der Nachhall entsteht also als Folge wiederholter Schallreflexionen, die mit der Zeit schwächer werden. Die Abschwächung wird auch zum einen dadurch verursacht, dass, da kein Material ideal schallhart ist, bei jeder Reflexion ein Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird, und zum anderen daher, dass die Ausbreitung des Schalls

in der Luft verlustbehaftet ist, da die Schwingung der Luftpartikel Reibung erzeugt.

In der Praxis spricht man von der Nachhallzeit T60. Es beschreibt die Zeit, in welcher der Schalldruckpegel nach einem plötzlichen Verstummen der Schallquelle um 60 dB abnimmt – im

Englischen häufiger als RT (reverberation time) bezeichnet. Die Abnahme um 60 dB entspricht einer Abnahme des Schalldrucks auf ein Tausendstel des Anfangswertes. Die Nachhallzeit wird im Allgemeinen in Oktavbändern oder in Terzbändern bestimmt. Wird nur ein Nachhallzeitwert angegeben, dann handelt es sich um die Nachhallzeit bei 1000 Hz oder bei 500 Hz.

Der Hall spielt in der Musik eine wichtige Rolle. Fehlt Hall, spricht man von trockenen Räumen oder auch trockenen Aufnahmen. Für die Sprachverständlichkeit ist ein recht trockener Raum sehr gut. Er gewährleistet eine bessere Sprachverständlichkeit. In der Tabelle stehen günstige Nachhallzeiten für verschiedene Anlässe. Zu erkennen ist, dass für Musik der Nachhall in gewissem Umfang erwünscht ist. Musik klingt in einem zu trockenen Raum unnatürlich. Zudem werden Ungenauigkeiten im Spiel sehr gut hörbar.

Ein weiterer in der Akustik verwendeter Begriff ist der Hallradius. Befindet sich ein Hörer in einem Raum nahe bei der Schallquelle, so überwiegt der Direktschall gegenüber dem indirekten Schall. Da der Direktschall mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle schwächer wird (etwa um 6 dB bei Abstandsverdopplung), der diffuse Schall (die Summe an Reflexionen) dagegen im gesamten Raum etwa konstant bleibt, lässt sich ein Abstand von der Schallquelle angeben, bei dem beide Anteile gleich stark sind.

Hall bezeichnet im Unterschied zum Echo kontinuierliche Reflexionen von Schallwellen (Schallreflexionen). Echos sind insbesondere dann leicht wahrnehmbar, wenn nur eine oder nur wenige reflektierende Flächen existieren (Brücken, Felswände usw.). Bei einer Vielzahl von reflektierenden Flächen (etwa in Kirchen) entsteht durch die Dichte der Diffusität eher der Höreindruck eines Nachhalls.

Bei einer Verzögerung von 0 bis 1 ms zwischen Original- und Spiegelschallquelle tritt die Summenlokalisierung auf. Sie ist eine bestimmte Form der Lokalisation von Hörereignissen. Strahlen z.B. zwei Lautsprecher L1 und L2 synchron exakt dasselbe Schallsignal phasenrichtig ab, also mit gleicher Frequenzzusammensetzung und gleichem Schallpegel, so lokalisiert ein auf der Mittelsenkrechten der Lautsprecherbasis befindlicher Hörer nicht zwei getrennte Signale bei L1 und L2, sondern lediglich ein Summensignal in der Mitte der Basisbreite, nämlich einen fiktiven Sender, genannt Phantomschallquelle. Erhöht man kontinuierlich den Schallpegel von L1 gegenüber L2, so wandert die Phantomschallquelle entlang der Lautsprecherbasis. Zwischen 1 und 50 ms bei Sprache bzw. 80 ms bei Musik wirkt der Präzedenzeffekt, der auch Gesetz der ersten Wellenfront genannt wird. Das bedeutet, dass wenn das gleiche Schallsignal zeitverzögert aus unterschiedlichen Richtungen bei einem Hörer eintrifft, dass dieser nur die Richtung des zuerst eintreffenden Schallsignals wahrnimmt. Die verzögert eintreffenden Schallsignale werden dann in der Richtung des

ersten Signals (der ersten Wellenfront) lokalisiert. Überschreitet die Zeitverzögerung Werte von 50 ms (bei Sprache) oder 100 ms (bei Musik), so wird gegebenenfalls der verspätet eintreffende Schall als Echo wahrgenommen; dann wird er richtungsmäßig seiner Einfallsrichtung korrekt zugeordnet. Die Zeitverzögerung, ab der ein verspätet eintreffender Schall als Echo wahrgenommen wird, ist abhängig von der Art des Signals. Für impulshaltige Signale kann dieses ab 50 ms der Fall sein. Für Signale mit nahezu konstanter Amplitude kann die Echschwelle im Bereich von 1 bis 2 Sekunden liegen. Ein Echo entsteht, wenn Reflexionen einer Schallwelle so stark verzögert sind, dass man diesen Schall als separates Hörereignis wahrnehmen kann.



Früher wurden Nachhall-Effekte in eigenen Hallräumen erzeugt. Danach setzte man Metallfedern als Federhall oder als Hammond-Spiralen ein, die zusätzliche verzögerte Schwingungen hinzufügten. Später kamen Hallplatten aus Stahl (EMT-Nachhallplatte 1 m × 2 m) und Goldfolienhall zum Einsatz.

Heute werden Nachhalleffekte

durch digitale Effekt-Prozessoren hergestellt. Komplizierte Algorithmen erzeugen diesen akustischen Effekt. Dabei lassen sich die verschiedenen Attribute wie etwa Nachhallzeit, Vorverzögerung, Frequenzgang der diffusen Hallfahne, Diffusität und Raumgeometrie in Echtzeit verändern. Die Technik ist heute weit fortgeschritten und ermöglicht, bestimmte, in der Realität vorhandene Räume im Nachhallverhalten recht gut nachzubilden.

Noch besser gelingt das durch eine recht neue Art der Hallerzeugung. Dabei wird die Raumimpulsantwort abgespeichert, sozusagen ein „Fingerabdruck“ der akustischen Eigenschaften eines realen Raumes. Mit diesem Fingerabdruck können nun beliebige akustische Signale versehen werden. Diese Form der Hallerzeugung nennt man auch Faltungshall, da bei der Signalerzeugung die mathematische Operation der Faltung verwendet wird.

Diese Technik ist nicht allein auf das Simulieren von Räumen beschränkt, vielmehr kann jedes lineare, zeitinvariante akustische System simuliert werden, also auch Geräte wie Mikrofone.

## Impulsantwort



### Beispiele

Theater



Kathedrale



<http://1-1-1.net/pages/impulses/index.htm>

Die Impulsantwort ist die Antwort eines natürlichen Raums auf die Anregung mit einem Impuls. Sie ergibt einen typischen Signalverlauf, der oft als Fingerabdruck des individuellen Raumklanges bezeichnet wird. Mit diesem individuellen Raumklang kann dann jedes Audiosignal versehen werden.

Bei der einfachen Variante

verwendet man als Impuls häufig Pistolenschüsse, man lässt Luftballons platzen oder man spielt einen Dirac-Stoß (dieser enthält alle relevanten Frequenzen gleichzeitig) über Lautsprecher ein. Der Knall wird im Raum aufgezeichnet. Die bessere Variante sind sogenannte Sweeps. Dabei durchläuft ein Sinuston in einer definierten Zeit den gesamten hörbaren Frequenzbereich. Im Deutschen wird das auch wobbeln genannt. Die Impulsantwort wird benötigt, um das Originalsignal mit ihr zu falten und den sog. Faltungshall zu erhalten. Die Hörperspektive entspricht der Mikrofonposition der Stereomikrofonie bei der Impulsantwort-Aufnahme. Zu bemerken ist, dass ein Lautsprecher den Schall nicht so wiedergeben kann wie ein Instrument. Dadurch entspricht der akustische Eindruck des Raums z.B. nicht dem eines real spielenden Orchesters. Die Methoden des Dirac-Impulses oder Sinus-Sweeps über den Lautsprecher erlauben aber eine recht gute Annäherung.

## Faltung

Die Faltung  $(f * g)$  zweier Funktionen  $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$  ist definiert durch

$$(f * g)(\xi) := \int_{\mathbb{R}^n} f(y)g(\xi - y)dy$$

$$(f * g)(t) = \int_D f(\tau)g(t - \tau)d\tau$$

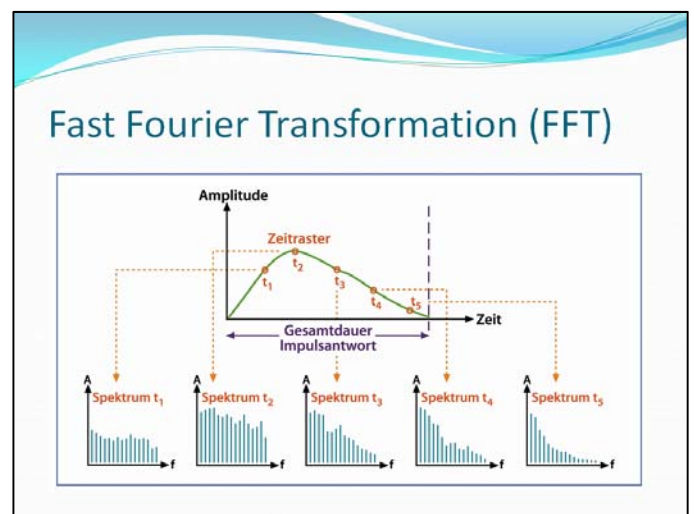
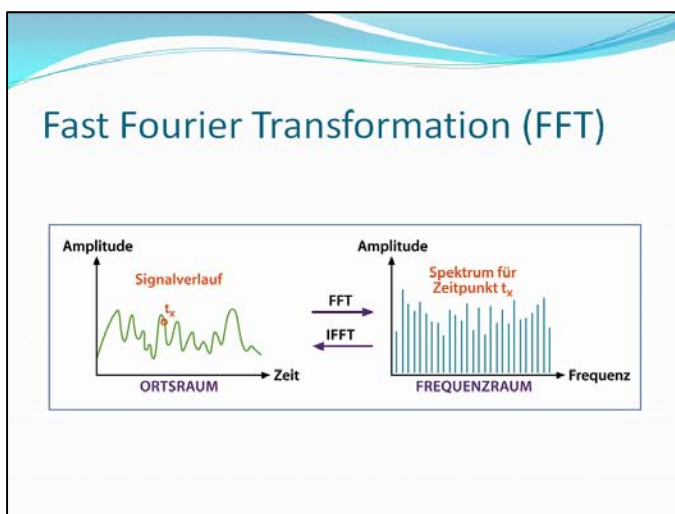
$$y(i) = \sum_{j=0}^{N-1} x(i - j)h(j)$$

In der Mathematik und besonders in der Funktionalanalysis beschreibt die Faltung einen mathematischen Operator, der für zwei Funktionen  $f$  und  $g$  eine dritte Funktion liefert. Diese gibt eine Art „Überlappung“ zwischen  $f$  und einer gespiegelten und verschobenen Version von  $g$  an. Anders ausgedrückt ist die Faltung

eine mathematische Operation, bei der aus 2 Funktionen durch Kreuzmultiplikation oder Addition eine dritte Funktion erzeugt wird.

Die entgegengesetzte Operation, um diese beiden Signale wieder trennen und die Impulsantwort verwenden zu können, nennt man Dekonvolution (deconvolution). Dadurch erhält man sozusagen alle Eigenschaften dieses Systems in Bezug auf die Frequenzen in einem neuen Signal ohne dass Impulssignal.

Die Faltung-Rechenmethode multipliziert jeden Zeitpunkt des zu verhallenden Signals mit jedem Zeitpunkt der Impulsantwort (Formel 1). Da die Berechnung auf digitaler Ebene erfolgt, sind beide Signale (zu Verhallendes und Impulsantwort) diskrete Signale (Formel 2). Bei einer Samplingfrequenz (Abtastrate) von 44,1 kHz hat jeder Audiokanal 44.100 Samples pro Sekunde. Diese Faltung ist aber rechenaufwändig. Daher werden die Signale durch Multiplikationen im Frequenzraum berechnet.



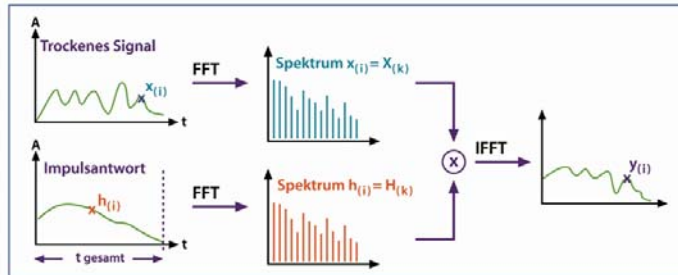
Beim Faltungshall wird jeder Zeitpunkt des zu verhallenden Signals in den Frequenzraum übertragen. Ebenso liegt jeder Zeitpunkt der sogenannten Impulsantwort im Frequenzraum vor. Im Frequenzraum wird jeder Zeitpunkt des zu verhallenden Signals mit jedem Zeitpunkt der Impulsantwort multipliziert und das Ergebnis wieder (an der zeitlich richtigen Position) per IFFT in den Ortsraum übertragen. Das Ergebnis ist wieder ein Verlauf im Ortsraum – das verhallte Signal.

Auf digitaler Ebene bedeutet dies, dass jedes Sample des ursprünglichen Audiosignals mit jedem Sample der Impulsantwort skaliert wird.

Genau wie bei den beiden Ausgangssignalen besteht das neue Signal aus einer individuellen Funktion für jeden Zeitpunkt. Ein Klang bzw. ein Audio-Gesamtsignal ergibt sich nicht aus einer periodischen Funktion. Es weist für jeden Zeitpunkt eine andere mathematische Funktion auf. Darum ist für die Faltung dieser relativ hohe Rechenaufwand nötig, bei dem jeder Zeitpunkt, bzw. jedes Sample des einen Signals mit jedem Sample des anderen Signals verrechnet werden muss.



## Faltung



Wenn beispielsweise die Impulsantwort, also die Nachhallzeit, fünf Sekunden beträgt und das zu verhallende Signal (z. B. ein Instrument) eine Minute dauert, beträgt bei einer Abtastrate von 44,1 kHz die Anzahl an Faltungsoperationen für ein Stereosignal:

$$60 \times 44.100 \times 5 \times 44.100 \times 2 = 1.166.886.000.000$$

Das sind über eine Billion Verrechnungen zweier Frequenzspektren für eine Minute Stereo eines verhallten Signals.

Bei den heutigen Rechenleistungen kann Faltungshall bei der Echtzeitberechnung immer nur genähert werden, sonst wäre die Latenz unakzeptabel lang. Selbst das Rendering erfolgt heute wegen der großen Rechenkapazitäten nur in Annäherung. Die bisher genaueste Simulation bietet die MIR-Anwendung der Vienna Symphonic Library. Dabei werden Instrumente eines Orchesters je einzeln verhallt. Die individuelle Abstrahlcharakteristik jedes einzelnen Instrumentes findet dabei Berücksichtigung.

## Besonderheiten

- Vorteil
  - realistischer Klang
  - kostenlose Verfügbarkeit vieler Impulsantworten im Internet
  - die Technik ist billiger als die alternative High-End-Effektgeräte
- Nachteil
  - VST-basierte Plug-ins brauchen sehr viel CPU-Leistung
  - Impulsantworten sind starr und nicht editierbar (z. B. Position im Raum)
  - Leichte Latenzen

Die Faltungshall-Berechnung kann durch Echtzeitberechnung (Echtzeit-Effekt) stattfinden oder durch Rendering.

Echtzeitberechnung bedeutet, das verhallte Signal wird während des Abspielens errechnet. Wegen der großen Rechenkapazität ergibt sich dabei immer eine bestimmte Zeitverzögerung (Latenz).

Die Vor- bzw. Nachteile sind in

der Folie zusammengefasst.



Quellen:

Die technischen Erläuterungen und Grafiken stammen aus dem Wissensportal <http://wikipedia.de>.

Unter <http://freeverb3.sourceforge.net/ir.shtml> kann man sich ein kostenloses VST-Plugin zum Einbauen von Impulsantworten downloaden. Die Seiten

<http://www.echochamber.ch/responses/index.html> und <http://1-1-1-1.net/pages/impulses/index.htm> bietet sehr viele Impulsantworten zum freien Download an.