

Digital Audio & Hall-Algorithmen

Proseminar: Algorithmen und Werkzeuge zur Audiobearbeitung,
11/2004

Daniel Thaler

Inhaltsverzeichnis

I Digital Audio

1. Definitionen.....	4
2. Sampling & Quantisierung.....	5
Sampling: Abtasttheorem.....	5
Quantisierung.....	6
Datenmengen.....	7
3. Analog <-> Digital Wandler.....	8
A/D Wandler.....	8
D/A Wandler.....	8
4. Audioformate.....	9
Das WAV Format.....	9
Die Compact Disc Digital Audio.....	9

II Hall-Algorithmen

1. Definitionen.....	12
2. Bewertung von Räumen.....	13
Frequenz der Reflexionen.....	13
Frühe Reflexionen.....	13
Nachhallzeit.....	14
Stärke des Halls.....	14
IACC: Akustischer Gesamteindruck.....	14
3. Künstliche Hallerzeugung.....	15
Hallspiralen.....	15
Hallplatten.....	15
Bandhall.....	15
Digitalhall.....	16
Faltung (Convolution).....	16
Ausblick: Akustisches Raytracing.....	17

III Literatur

Zu Teil 1: Digital Audio:.....	18
Zu Teil 2: Hallalgorithmen:.....	19

I DIGITAL AUDIO

In der modernen Audioproduktion ist es inzwischen üblich, dass von der Aufnahme weg die komplette Weiterverarbeitung und Speicherung digital erfolgt. Der erste Schritt dazu ist jedoch die Digitalisierung des Tons, von der die Qualität der Daten in allen weiteren Schritten entscheidend abhängt.

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Theorie der Digitalisierung von Signalen, geht kurz auf die praktische Durchführung ein und schließt mit einer Erklärung der beiden wichtigsten unkomprimierten Audioformate.

1. Definitionen

Ein analoges Signal ist in der Zeit und im Wertebereich kontinuierlich. Es ist also möglich, zu einem beliebigen Zeitpunkt einen beliebig genauen Wert zu bestimmen.

Ein digitales Signal andererseits ist ein diskretes Signal. Digitale Werte haben eine endliche Genauigkeit und existieren nur zu bestimmten Zeitpunkten.

Um ein analoges Signal in ein digitales umzuwandeln muss es abgetastet (zeitdiskret gemacht) und quantisiert (wertdiskret gemacht) werden.

Das Abtasten eines Signals bezeichnet man auch als Sampling.

Die folgende Grafik illustriert die Zusammenhänge noch einmal:

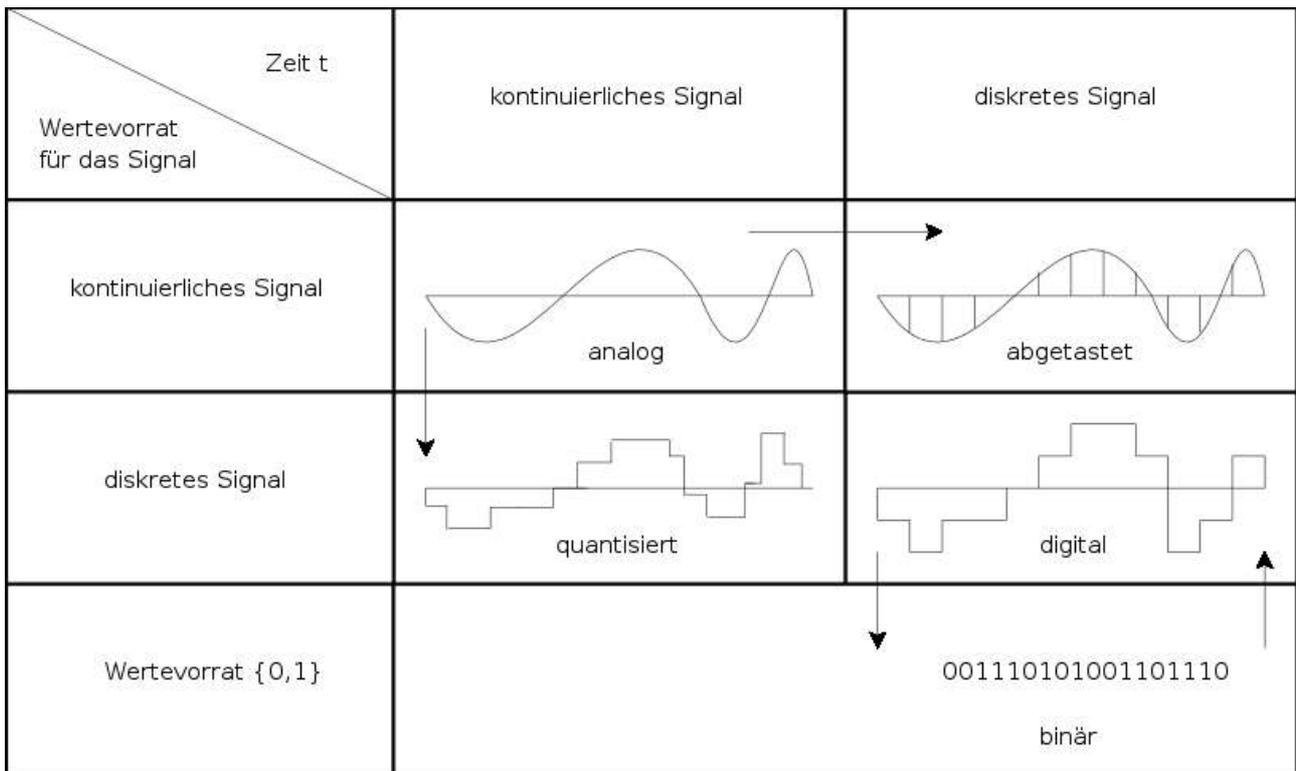


Bild 1: Zusammenhang von digitalen und analogen Signalen

2. Sampling & Quantisierung

Sampling: Abtasttheorem

Bei der Digitalisierung eines analogen Signals wird eine Umwandlung in eine Folge von Impulsen vorgenommen. Dazu wird das analoge Signal regelmässig gemessen. Die Häufigkeit dieser Messung nennt man die Abtast- oder Samplefrequenz.

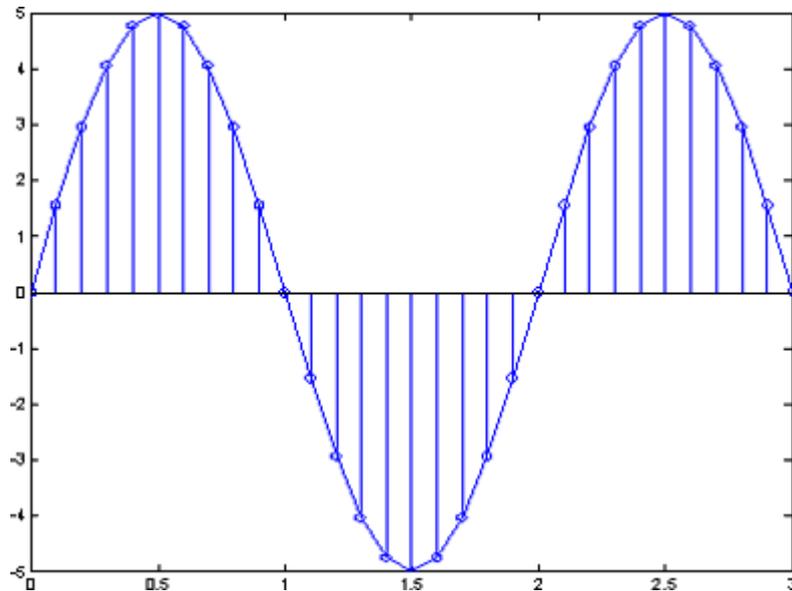


Bild 2: Abgetastete Schwingung

Von grosser Bedeutung beim Abtasten von (Audio-)Signalen ist das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, welches im Jahr 1928 von Harry Nyquist aufgestellt und 1949 von Claude E Shannon bewiesen wurde.

Mathematisch gesehen beruht das Abtasttheorem auf der diskreten Fouriertransformation, mit deren Hilfe ein abgetastetes Signal in dessen Sinus- und Kosinusbestandteile zerlegt werden kann.

Das Abtasttheorem besagt, dass die Abtastfrequenz f_{abtast} grösser als die zweifache höchste Frequenz f_{max} des darzustellenden Signals sein muss, damit aus den Samples das Ursprungssignal ohne Informationsverlust aus den Samples rekonstruiert werden kann.

Es gilt also : $f_{\text{abtast}} > 2 * f_{\text{max}}$

Die Frequenz $\frac{1}{2} * f_{\text{abtast}}$ nennt man auch die Nyquist-Frequenz.

Der Grund, warum man nicht mit genau $2 * f_{\text{max}}$ abtasten kann, kann anhand der Schwingung $\sin(\pi * t)$ in Bild 2 gut erklärt werden: Tastet man diese Schwingung bei $t=0,5;1,5;2,5;\dots$ ab, erhält man im Ergebnis wieder die Sinus-Schwingung. Tastet man aber stattdessen bei $t=0;1;2;3;\dots$ ab, erhält man konstant 0. Eine bloße Phasenverschiebung würde also ausreichen, um das Signal zu verfälschen.

Enthält das Ursprungssignal beim Abtasten noch Frequenzen die grösser als die Nyquist-Frequenz sind, dann kommt es zum sogenannten Alias-Effekt: Diese Frequenzen erscheinen dann im resultierenden Signal als niedrigere

Frequenzen. Im Fall von Audiosignalen bedeutet dies, dass hohe, unhörbare Frequenzen als niedrigere und daher hörbare Frequenzen erscheinen und den Klang verfälschen.

In der Praxis bedeutet das, dass man entweder f_{\max} kennen muss oder alle Frequenzen, die über dem gewählten f_{\max} liegen, mit einem (analogen) Tiefpassfilter herausfiltern muss.

Da Tiefpassfilter nur eine begrenzte Flankensteilheit haben (d.h. höhere Frequenzen verschwinden nicht einfach, sondern werden abgeschwächt), verwendet man meist $f_{\text{abtast}} = 2,2 * f_{\max}$.

Konkret auf Audiosignale angewendet ergibt sich dann folgendes: Das menschliche Gehör ist in der Lage, Frequenzen zwischen 20 Hz und 20000 Hz wahrzunehmen. Daraus ergibt sich eine Abtastfrequenz von etwa 44000 Hz. Tatsächlich ist 44,1 kHz heute die Standardfrequenz für die Speicherung von digitalen Audiodaten, z.B auf CDs, in MP3 usw.

Quantisierung

Der zweite Teil der Digitalisierung ist die Quantisierung, also die Auflösung der Amplitudenwerte des analogen Signals in Werte des digitalen Signals, welche erstens eine endliche Genauigkeit haben und zweitens aus einem begrenzten Wertebereich stammen.

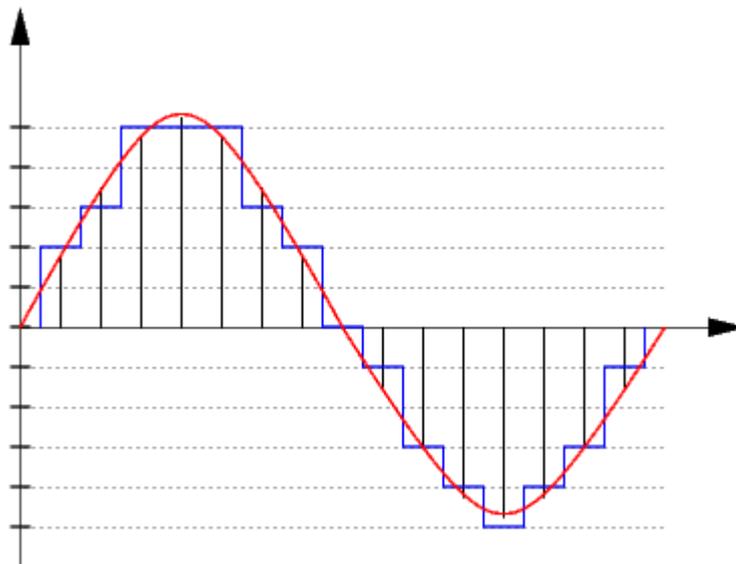


Bild 3: Quantisierung

Wird ein analoges Signal also in ein digitales Signal mit 16 Bit Genauigkeit umgewandelt, muss ein analoger Amplitudenwert der einem Wert von 100,4 entspräche zu 100 gerundet werden, während eine Amplitude, die mit 100000 dargestellt werden müsste, sich im Wertebereich bis 2^{16} (=65536) gar nicht korrekt darstellen lässt und stattdessen den Wert 65535 erhält.

Aus der Rundung von Werten ergibt sich das erste Problem der Quantisierung: Das sogenannte Quantisierungsrauschen.

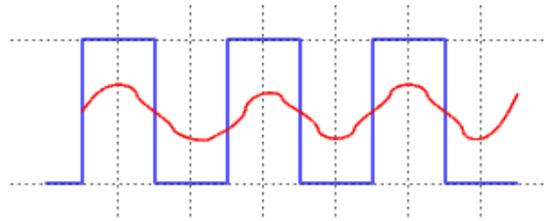


Bild 4: Quantisierungsrauschen

Dabei wird das Eingangssignal aufgrund geringer Schwankungen zu verschiedenen Werten hin gerundet; der Rundungsfehler erscheint als Rauschen.

Das zweite Problem ist das sogenannte Clipping. Wie bereits beispielhaft gezeigt, werden hier besonders laute Frequenzanteile auf einen Maximalwert beschränkt. Die Folge davon ist, dass das Signal keine Dynamik mehr besitzt; ein Audiosignal wäre also an Stellen, an denen Clipping geschehen ist, immer gleich laut, anstatt in der Lautstärke zu variieren.

Beide Probleme werden durch höhere Bitraten, also einen grösseren Wertebereich abgeschwächt, weil man so größere höhere Systemdynamik erreicht.

Den Rauschspannungsabstand SNR (engl. Signal to Noise Ratio) errechnet man mit dieser Formel:

$$\text{SNR} = 20 * \log_{10}(2^{\text{Bitzahl}}) + 1,76 \text{ dB} \quad (= 6,021 \text{ dB/Bit})$$

Das ergibt bei 16 Bit einen Wert von 98 dB, für 24 Bit sogar 146 dB. Die tatsächlich nutzbare Dynamik ist allerdings deutlich geringer: Nach Abzug eines Störpegels von 14 dB, eines Schutzabstandes zum Störpegel von 20 dB und einer Aussteuerungsreserve von 10 dB bleiben noch ca. 54 dB. Das entspricht in etwa einem guten analogen System.

Datenmengen

Der Wunsch nach höherer Qualität steht leider mit dem Verlangen, die Datenmengen in Grenzen zu halten, in Konflikt. Moderne Soundkarten erreichen eine Samplerate von 96 kHz (manche sogar 192kHz!) bei einer Auflösung von 24 Bit, was beim Aufnehmen schnell zu grossen Datenmengen führt.

Formel für die Datenmenge: $\text{Datenrate} = \text{Samplerate} * \text{Auflösung} * \text{Kanäle}$

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft einige Kombinationen:

Samplerate	Auflösung	Kanäle	Datenrate	Verwendung
11025 Hz	8 Bit	1	11 KB/s	Mikrofon einer Digitalkamera
44100 Hz	16 Bit	2	172 KB/s	Standard CD-Audio
96000 Hz	24 Bit	≥ 2	562 KB/s	Professionelle Audioanwendung

Wie man sieht, steigt die Datenrate sehr schnell an, je mehr Qualität man benötigt. Bei CD-Audio Qualität fallen pro Minute 10 Mb an, bei Studioqualität sind es sogar 32 Mb.

3. Analog <-> Digital Wandler

Die Konvertierung zwischen analogem und digitalem Signal erfordert ein eigenes Bauteil, welches halb analog und halb digital ist. Hier werden beispielhaft einige Verfahren vorgestellt, mit denen diese Konvertierung durchgeführt werden kann.

A/D Wandler

Der A/D-Wandler, auch Analog-Digital Umsetzer oder ADC genannt, führt die im letzten Abschnitt theoretisch vorgestellte Digitalisierung praktisch durch.

Die einfachste Methode ist sicherlich die *Kondensatorentladungsmethode*.

Dabei wird ein Kondensator auf die Eingangsspannung aufgeladen und man misst die Zeit, bis sich der Kondensator über einen Widerstand entladen hat. Diese Methode ist ungenau und der Zeitaufwand hängt von der Eingangsspannung ab, aber sie ist sehr einfach und billig umzusetzen.

Man verwendet solche Wandler manchmal in PC-Joysticks.

Eine weitere sehr einfache Methode ist die sogenannte *direkte Methode*.

Das Eingangssignal wird dabei an eine Reihe von Komparatoren angelegt, an deren anderem Eingang verschiedene Referenzspannungen anliegen. Diese Methode ist sehr schnell, dafür aber aufwendig. Um beispielsweise eine 8 Bit Auflösung zu realisieren, braucht man 256 Komparatoren. Die Genauigkeit solcher Wandler hängt wesentlich von der Genauigkeit der Referenzspannungen ab.

A/D-Wandler dieser Bauart werden u.a. für Videosignale eingesetzt.

D/A Wandler

Die direkte Methode bei der Digital-zu-Analog-Umsetzung ist die Umkehr der direkten Methode bei der A/D-Wandlung.

Bei dieser Methode werden alle möglichen Ausgangswerte gleichzeitig zur Verfügung gestellt. Der benötigte Wert wird dann direkt anhand des digitalen Wertes über einen 1-aus-n Schalter ausgewählt. Diese Methode ist sehr aufwendig, aber auch extrem schnell: Mit solchen Wandlern werden teilweise über 1 Milliarde Samples pro Sekunde umgewandelt.

4. Audioformate

Zum Abschluss des ersten Teils werden noch kurz die zwei bedeutendsten unkomprimierten Audioformate vorgestellt: WAV und CD-Audio.

Das WAV Format

Grundlegend für das Verständnis des Wav Formates ist das RIFF Dateiformat.

RIFF, das Resource Interchange File Format (Dateiformat für den Austausch von Ressourcen), wurde 1991 von Microsoft und IBM eingeführt.

Das RIFF-Format ist ein Containerformat, das dazu dient, andere Daten einzukapseln. Es besteht aus einem 12 Byte langen Header, gefolgt von beliebig vielen Blöcken, sogenannten Chunks, welche die Nutzdaten enthalten.

Jedes der 3 Felder des RIFF-Headers ist 4 Bytes lang. Im ersten Feld steht immer 'RIFF', im zweiten steht, wieviele Bytes in der Datei folgen. Das dritte Feld identifiziert den Dateityp.

Auf den Header folgen dann beliebig viele Blöcke, für die nur die ersten 2 Felder (8 Bytes) festgelegt sind: Jeder Block muss eine ID haben, auf die die Angabe über die Anzahl der weiteren Bytes in dem Block folgt.

Wav Dateien sind essentiell RIFF-Dateien, bei denen im letzten Feld des RIFF-Header 'WAVE' steht.

Eine WAV-Datei hat mindestens 2 Blöcke: den 'fmt ' Block, welcher das Format der Audiodaten beschreibt, sowie einen 'data' Block, welcher die eigentlichen Audiodaten enthält.

Eine einfache WAV-Datei enthält nur diese beiden Blöcke, allerdings dürfen auch andere Arten von Blöcken sowie mehrere fmt und data Blöcke vorkommen. Die einzige Regel dabei ist, dass 'fmt' und 'data' nur paarweise auftreten, wobei 'fmt' immer vor 'data' steht.

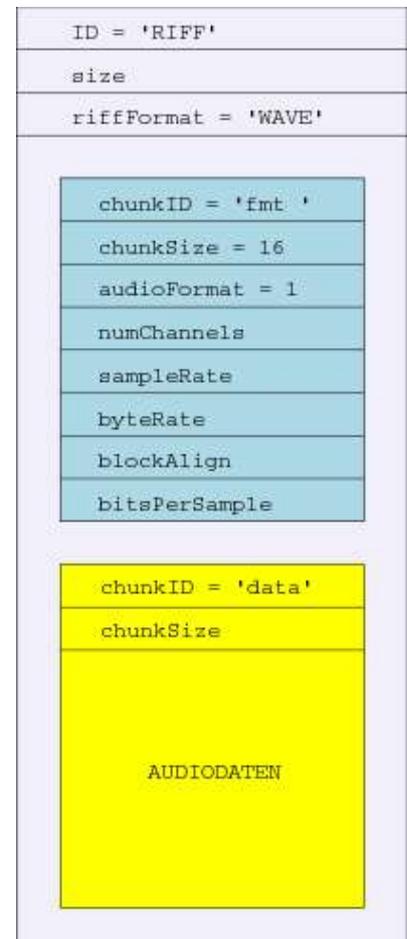


Bild 5: Das wav Dateiformat

Die Compact Disc Digital Audio

Die Audio CD wurde von von Philips und Sony gemeinsam entwickelt und 1982 auf den Markt gebracht.

Äußerlich ist die CD eine Scheibe mit einem Durchmesser von 12 cm und einer Dicke von 1,2 bis 1,5 mm. In der Mitte befindet sich ein Loch von 1,5 cm Durchmesser, womit das Abspielgerät die CD hält.

Der lesbare Bereich der CD befindet sich zwischen Radius 23mm und 58,5mm, der eigentliche Datenbereich befindet sich zwischen Radius 25mm und 58mm. Er beginnt in der Mitte und erstreckt sich über maximal 22501 Windungen (nur 22188 davon enthalten Audiodaten) nach außen. Die Datenspur ist 0,5µm breit und 5,9 km lang. Der Abstand von einer Windung zur nächsten beträgt 1,6 µm.

Die Datenspur selbst besteht aus einer Folge von erhöhten und vertieften Bereichen, den sogenannten Pits und Lands. Dabei repräsentiert jeweils der Übergang zwischen Pit und Land eine 1, während eine Fortsetzung eine 0 darstellt.



Bild 6: Schichten einer CD (Schema)

Dabei dürfen sich Pits und Lands nicht zu schnell abwechseln, daher müssen zwischen 2 Einsen mindestens 2 Nullen stehen. Ausserdem sollen nie mehr als 10 Nullen aufeinanderfolgen, damit die Spur gehalten werden kann.

Um das zu gewährleisten wird jedes Byte nach einem Verfahren, das sich Eight-to-Fourteen-Modulation (EFM) nennt, als 14-Bit Wert codiert, der die Bedingung erfüllt. Ausserdem werden noch 3 Füllbits eingefügt um zu verhindern, dass zwei aufeinanderfolgende EFM-codierte Werte die Bedingung verletzen.

Der logische Aufbau der Datenspur ist wie folgt:

Zuerst kommt das Lead-in. Dieses enthält das Inhaltsverzeichnis der CD, welches auf bis zu 99 Tracks verweisen kann.

Darauf folgt der sogenannte Programmbereich, der alle Tracks der CD enthält. Er besteht aus einer Folge von Frames, die jeweils aus einem 24 Bit Synchronisationswort (nicht EFM moduliert!), 12 Audiosamples (6 je Kanal) und 8 Subchannel-Bits, sowie Paritätsinformationen besteht.

Die Daten der einzelnen Frames sowie die Daten aus mehreren aufeinanderfolgenden Frames werden nach dem sogenannten Cross Interleaved Reed-Solomon Code (CIRC) miteinander verschränkt und mit Fehlerkorrekturdaten versehen. So wird es möglich, 3500 Fehler an einem Punkt (2,5 mm der CD Oberfläche) zu korrigieren. Die Fehlerkorrektur von Audio CDs ist so stark, dass die einzige Art von Fehlern, die in der Praxis das Abspielen beeinträchtigen können, Fehler sind, die dazu führen, dass der Laser die Spur verliert.

Am Ende liegt das Lead-out, welches den Player darauf hinweist, dass der Programmbereich geendet hat.

II HALL-ALGORITHMEN

„Hall ist eines der wichtigsten Gestaltungsmittel jeglicher Musik- und Sprachdarbietungen.“

„Ein guter Hall führt nämlich entgegen vieler Erwartungen zu verbesserter Durchsichtigkeit und Räumlichkeit! Er soll sich dadurch auszeichnen, daß man ihn vielleicht gar nicht bewußt wahrnimmt, ihn aber vermißt, wenn er ausgeblendet wird.“

So schreibt ein professioneller Tontechniker. Tatsächlich ist künstlicher Hall, der möglichst natürlich klingen soll, aus der modernen Musikproduktion nicht mehr wegzudenken. Verschiedene Arten von Musik und Sprache benötigen nämlich unterschiedlichen Hall, um gut zu klingen. Das kann man nur erreichen, indem man die Aufnahme in einer möglichst hallfreien Umgebung macht und anschliessend den Hall beimischt.

Auch künstlich klingender Hall, der allerdings deutlich leichter erzeugt werden kann, ist als Effekt interessant.

Dieser Abschnitt befasst sich mit Definition und Bedeutung von Hall, sowie mit Methoden zur künstlichen Hallerzeugung.

1. Definitionen

Als Hall bezeichnet man die Summe aller reflektierten Schallwellen, die auf einen Impuls folgen. Die reflektierten Schallwellen nennt man Reflexionen

Frühe Reflexionen nennt man die Reflexionen, die innerhalb der ersten 50 Millisekunden eintreffen.

Ein Echo nennt man eine separat wahrnehmbare Reflexion. Eine Reflexion muss folgende Bedingungen erfüllen, damit sie einzeln wahrgenommen wird: Sie muss nach mehr als ca. 50 ms eintreffen und laut genug sein; wie früh sie eintreffen darf und wie laut sie sein muss, hängt dabei vom Winkel aus dem sie eintrifft und der Frequenz ab. Echos werden oft als störend empfunden.

Die Nachhallzeit (T60) ist die Zeit, die verstreicht, bis der Schallpegel gegenüber dem Originalimpuls um 60dB, also zu einem Millionstel der ursprünglichen Schalldichte, abgefallen ist. Die Nachhallzeit ist proportional zum Raumvolumen V und gegenläufig proportional zur Absorptionsfähigkeit A des Raumes.

Die Formel für die Nachhallzeit lautet: $T = 0,172 * V / A$

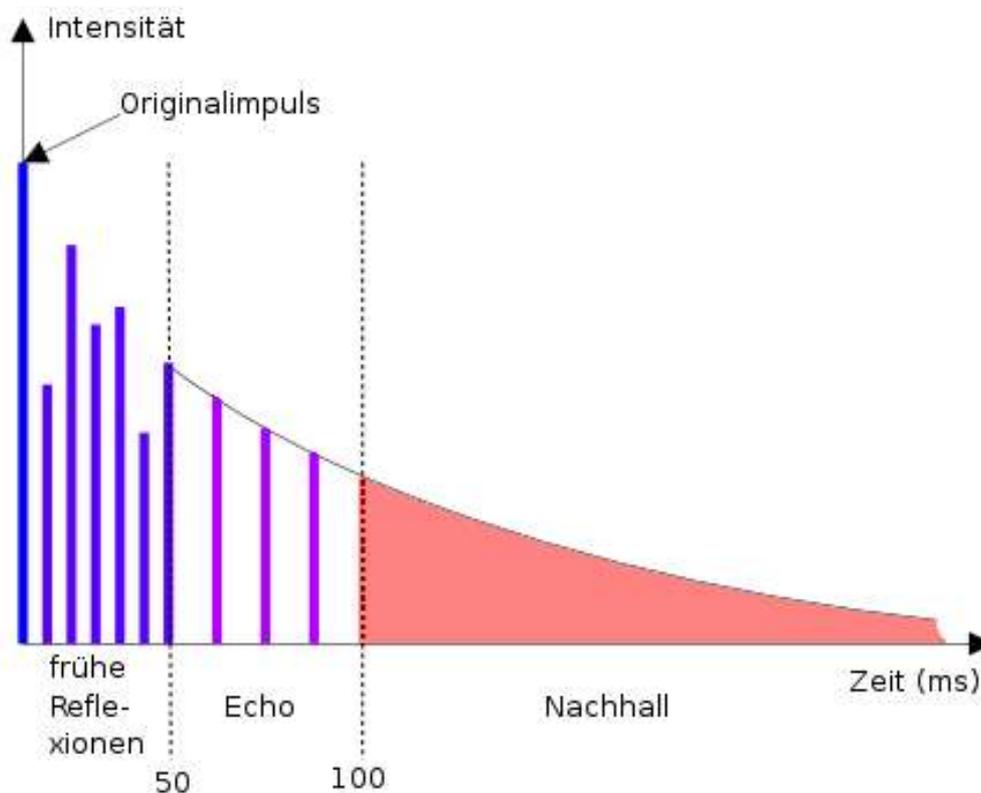


Bild 7: Reflexionsarten

2. Bewertung von Räumen

Hall ist deswegen für die Musikproduktion so wichtig, weil er einem Klang Räumlichkeit verleiht, dem Ton also die Charakteristik eines (u.U. virtuellen) Raumes aufprägt.

Um diesen Effekt zu verstehen, werden im Folgenden die Einzelbestandteile des Halls betrachtet und auf ihre Wirkung hin untersucht.

Frequenz der Reflexionen

Je nach Bauart und Ausstattung eines Raumes haben verschiedene Frequenzen unterschiedliche Nachhallzeiten.

Verschiedene Frequenzen werden in einem Raum unterschiedlich stark absorbiert, hohe besser als tiefe.

Welche Frequenzen wie stark absorbiert werden, hängt von den im Raum verwendeten Oberflächenmaterialien und der Möblierung ab.

Frequenzen über 10 kHz werden sogar von der Luft absorbiert, so dass sie nach spätestens 1,2 Sekunden verklungen sind.

Das nebenstehende Bild zeigt die Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz. Kurve 1 stellt dabei den optimalen Verlauf dar; Kurve 2 ist der Verlauf ohne, Kurve 3 mit Vorhängen.

Die Stärke und Nachhallzeit der Reflexionen beeinflusst den Klangcharakter: steigt die Nachhallzeit der tiefen Töne leicht an, wirkt der Klang warm und mächtig, wenn die Nachhallzeit dagegen abfällt, wirkt der Klang eher klar und durchsichtig.

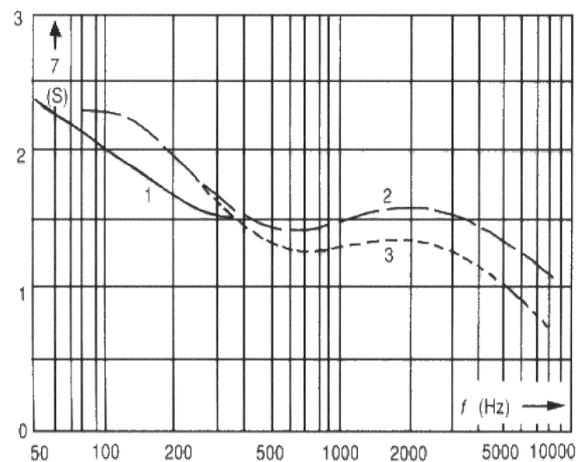


Bild 8: Nachhallzeiten in einem Studio

Frühe Reflexionen

Auch der Zeitpunkt des Eintreffens der Reflexionen ist wichtig. Innerhalb der ersten 15 bis 20 Millisekunden nach dem Originalton werden Reflexionen nur als Änderung der Klangfarbe wahrgenommen.

Die Reflexionen bis ca. 50 ms haben eine wesentlich grössere Bedeutung: Sie geben dem Hörer Aufschluss über die Raumgröße. So kann man eine Aufnahme je nach Wunsch klingen lassen, als ob sie in einer Kirche oder in einer Besenkammer aufgenommen worden wäre.

Ab 50 ms wird es für den Zuhörer möglich, Echos zu hören, wenn die Reflexionen einzeln und in ausreichender Lautstärke eintreffen. Für natürlich klingenden Hall sind Echos selten wünschenswert; man versucht zumeist, dass

Reflexionen ab diesem Zeitpunkt soweit mit dem restlichen Signal verschmelzen, damit kein Echo hörbar wird.

Die Zeit bis zum Eintreffen der ersten Reflexionen beeinflusst zudem die Intimität der Darbietung. Je eher sie eintreffen, desto mehr fühlt sich der Zuhörer am Geschehen beteiligt.

Nachhallzeit

Der Einfluss der Nachhallzeit einzelner Reflexionen wurde oben bereits erwähnt, aber auch die gesamte Nachhallzeit des Ausgangsimpulses muss beachtet werden. Je länger diese nämlich ist, desto mehr verschmilzt der Hall des alten Impulses mit dem neuen.

Das führt zum Beispiel bei Sprache dazu, dass Silben einander überlagern, ineinander verlaufen und die Sprache zunehmend undeutlicher wird, je länger die Nachhallzeit ist. Konkret gesagt, sollte die Nachhallzeit bei Sprache 0,4 Sekunden nicht übersteigen.

Für ein Orgelkonzert andererseits sind Werte von über 3 Sekunden völlig in Ordnung.

Stärke des Halls

Je lauter die Reflexionen und je mehr davon eintreffen, desto stärker ist der Hall. Wenn ein Ton nur schwach hallt, wirkt er verloren. Dieser Effekt ist selten wünschenswert.

IACC: Akustischer Gesamteindruck

IACC (Interaural Cross Correlation) hat als Parameter für die Erzeugung künstlichen Halls keine Bedeutung, ist aber dafür für die Bewertung von Räumen um so interessanter.

IACC ist ein Wert, der über einen PC/Laptop mit zwei Mikrofonen errechnet wird und eine Vielzahl von verschiedenen Faktoren wie die Richtung von Reflexionen, im Raum verwendete Oberflächenmaterialien, bauliche Eigenschaften wie Balkone u.ä. sowie externe Geräusche mit einbezieht.

Das Interessante daran ist, dass es gelingt, mit einem Wert die Tauglichkeit eines Raumes z.B. als Konzertsaal oder als Kongressraum abzuschätzen. Ein Wert von 0,4 bis 0,6 wäre beispielsweise für einen Konzertsaal gut.

3. Künstliche Hallerzeugung

Hallspiralen

Die Hallspirale war eine von zwei populären Methoden zur Hallerzeugung, bevor die aktuellen digitalen Geräte verfügbar waren.

Eine Hallspirale ist eine Anordnung von einer oder mehreren Federn, die an einem Ende elektromagnetisch angeregt werden, und deren Schwingung am anderen Ende gemessen wird.

Das Qualitätsspektrum bei Hallspiralen reicht von schlecht bis mäßig; sehr gute Geräte sind selten und teuer. Der Grund für die schlechte Tonqualität ist in der Sensibilität gegenüber äußeren Einflüssen zu suchen. Steht eine Hallspirale z.B. neben einem Lautsprecher, kann der Schall aus dem Lautsprecher die Spirale anregen und im Extremfall zu einem lauten, unangenehmen Rückkopplungsgeräusch führen.

Manchmal werden Hallspiralen auch heute noch in Gitarrenverstärkern verwendet, wo der unechte Klang nicht stört.

Hallplatten

Hallplatten waren die zweite gebräuchliche Methode zur Hallerzeugung. Eine Hallplatte war eine vertikal aufgehängte Stahlplatte, die mit 1,5 mal 2,5 Meter Größe etwa die Maße eines Bettes hatte.

Die Platte wurde, ähnlich einer Lautsprechermembran, elektromagnetisch angeregt, das Ergebnis wurde mit Tonabnehmern wieder abgegriffen. Die Nachhallzeit konnte man einstellen, indem man die Dämpfung der Platte veränderte.

Auch Hallplatten waren empfindlich gegenüber Erschütterungen und anderen externen Einflüssen und benötigten daher einen möglichst erschütterungsfreien Raum.

Weil die Platten zudem so groß und sehr teuer waren, wurden sie fast ausschließlich in Studios verwendet. Einige Amateure fertigten sich allerdings Hallplatten im Eigenbau, wie die Platte auf Bild 9.



Bild 9: Do-it-yourself Hallplatte

Bandhall

Prinzipiell schon vor dem Plattenhall verfügbar war der Bandhall. Dabei wurde ein Tonsignal aufgenommen und verzögert wieder abgespielt. Diese Technik hatte allerdings den Nachteil, dass das analoge Audiosignal durch das

wiederholte Aufnahmen und Abspielen soweit degradierte, dass u.U. nur Rauschen übrigblieb.

Digitalhall

Die digitale Hallerzeugung ist die heute am weitesten verbreitete Methode.

Diese Methode ähnelt der Hallerzeugung per Bandschleife, denn auch hier werden Reflexionsmuster über rückgekoppelte Verzögerungen erzeugt.

Pionier im Bereich des Digitalhalls ist der Göttinger Professor Manfred Schröder, der schon im Jahr 1962 mit digitaler Hallerzeugung experimentierte.

Schröder entwarf einen digitalen Halleffekt, der aus vier parallelen Kammfiltern mit verschiedenen Verzögerungszeiten, gefolgt von zwei Allpassfiltern bestand.



Bild 10: Schema eines einfachen Kammfilters

Die Kammfilter simulierten dabei

die frühen Reflexionen, während die Allpassfilter den diffusen Nachhall erzeugten. Dieses Design klang bereits recht gut, womit der Grundstein für den digitalen Hall gelegt war.

Einen Raum anhand einzelner Reflexionen nachzubilden war damit allerdings noch nicht möglich, primär weil das zuviel Rechenleistung benötigt hätte. Stattdessen konzentriert man sich darauf, mit einigen Erstreflexionen einen Raumeindruck zu vermitteln und lässt anschliessend einen diffusen, wenig rechenaufwendigen Nachhall folgen.

Alle aktuellen Halleffektgeräte basieren auf diesem Prinzip, wobei die genauen Kombinationen von Filtern natürlich ein streng gehütetes Geheimnis der Hersteller sind. Gemeinsam haben diese Geräte, dass verschiedene Parameter wie Nachhallzeit und Raumgrösse einstellbar sind. Intern werden dabei viele verschiedene Einzelfilter verstellt, ohne dass der Benutzer darüber etwas wissen muss.

Die Gesamtwirkung der verschiedenen Filter wird dabei in Echtzeit berechnet, was es erlaubt die Hallparameter in Echtzeit zu verändern. Gekoppelt mit der niedrigen Latenz ist das der entscheidende Vorteil dieser Geräte.

Faltung (Convolution)

Die Faltung, auf englisch als Convolution bekannt, ist eine prinzipiell seit Jahrzehnten bekannte Methode, einem Signal die Charakteristiken eines anderen Signals „aufzuprägen“.

Mathematische Grundlage dieser Methode ist die Fourier-Transformation, mithilfe derer zwei Impulse miteinander gefaltet werden können. Das Ergebnis der Operation ist die Schnittmenge der beiden Impulse.

Der Rechenaufwand für diese Operation steigt allerdings mit der Länge des zweiten Signales und wächst schnell ins Gigantische, so dass die Durchführung der Faltung auf aktueller Hardware erstmals realistisch wird.

In der Praxis handelt es sich beim ersten Signal um den Audiodatenstrom, der verändert werden soll; das zweite Signal ist ein Sample, das in einem existierenden Raum aufgenommen wurde, oder sogar ein mit einem Hallgerät veränderter Ton.

Nach der Faltung hat dann das Audiosignal die Charakteristik des Raumes, in dem das zweite Sample aufgenommen wurde.

Die Faltung birgt aber auch einige Probleme: Das Ergebnissignal kann nur Frequenzen enthalten, die in beiden Ausgangssignalen vorhanden waren. Fehlt im verwendeten Sample also eine Frequenz, so wird diese aus den Audiodaten herausgefiltert und ist auch im Ergebnissignal nicht vorhanden. Ein Sample zu erzeugen, das alle Frequenzen enthält ist jedoch nicht ganz einfach.

Des weiteren stört viele Musiker, dass man über die Wahl des Samples hinaus keine Einflussmöglichkeit auf den Klang hat; den direkten Zugriff auf die Hallparameter, wie bei einem Effektgerät, gibt es hier nicht.

Ein letztes Problem zeigt sich bei mehrspurigen Aufnahmen: Bestandteil der akustischen Informationen in einem Sample ist immer die Position im Raum. Wird dieses eine Sample dann mit der Aufnahme eines Symphonieorchesters gefaltet, enthält der Klang jedes Instrumentes dieselbe Positionsinformation. Anders gesagt: alle Instrumente stehen dann scheinbar auf demselben Punkt. Das lässt sich zwar lösen, indem jedes Instrument mit einem eigenen Sample gefaltet wird, aber Preis ist ein vervielfachter Rechenaufwand.

Ausblick: Akustisches Raytracing

Der Begriff Raytracing ist vor allem aus der Bildbearbeitung bekannt; weniger bekannt ist die Tatsache, dass dieselben Algorithmen auch auf Schallwellen angewendet werden können.

Dabei wird der Verlauf aller Schallwellen in einem modellierten, virtuellen Raum verfolgt, um das Klangbild des Raumes an einem bestimmten Punkt zu ermitteln.

Bislang wurde das Verfahren vor allem im Computer Aided Acoustic Design (CAAD) eingesetzt, also um noch während der Planung festzustellen, wie ein Raum klingen würde.

Inzwischen gibt es auch Programme, die für einen beliebigen Standort in einem virtuellen Raum ein Sample für die Verwendung bei der Faltung erzeugen können. So erzeugte Samples geben im Gegensatz zu natürlichen, aufgenommenen Samples die Charakteristik des Raumes perfekt wieder.

Für die Zukunft wäre es vielleicht sogar denkbar, das eigentliche Audiosignal direkt im virtuellen Raum zu platzieren und das Ergebnis zu berechnen. Bis dahin muss allerdings die Rechenkraft noch deutlich steigen.

III LITERATUR

Zu Teil 1: Digital Audio:

[http://www.siegert.informatik.tu-muenchen.de/lehre/seminare/ps_ss2000/ausarb/01/:](http://www.siegert.informatik.tu-muenchen.de/lehre/seminare/ps_ss2000/ausarb/01/)
Alte Ausarbeitung zum Thema Digital Audio

[http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist-Shannon_sampling_theorem:](http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist-Shannon_sampling_theorem)
Das Nyquist-Shannon Abtasttheorem

[http://www.audio.uni-lueneburg.de/seminarwebseiten/digaudio/www/adda.htm:](http://www.audio.uni-lueneburg.de/seminarwebseiten/digaudio/www/adda.htm)
Sampling, Quantisierung, Digitalisierung

[http://www.tu-chemnitz.de/urz/lehre/mmn/scripته/html/digitalisierung/quantisierung.htm:](http://www.tu-chemnitz.de/urz/lehre/mmn/scripته/html/digitalisierung/quantisierung.htm)
Quantisierung

[http://en.wikipedia.org/wiki/Analog_to_digital_converter:](http://en.wikipedia.org/wiki/Analog_to_digital_converter)
Analog-Digital-Umsetzer

[http://de.wikipedia.org/wiki/Digital-Analog-Umsetzer:](http://de.wikipedia.org/wiki/Digital-Analog-Umsetzer)
Digital-Analog-Umsetzer

[http://en.wikipedia.org/wiki/DAC:](http://en.wikipedia.org/wiki/DAC)
Digital-Analog-Umsetzer

[http://ccrma.stanford.edu/courses/422/projects/WaveFormat/:](http://ccrma.stanford.edu/courses/422/projects/WaveFormat/)
Überblick über das Wav-Format

<http://www.chipchapin.com/CDMedia/cdda1.php3>
Aufbau & Format einer Audio CD

[http://en.wikipedia.org/wiki/Compact_disc:](http://en.wikipedia.org/wiki/Compact_disc)
Compact Disc Format

[http://web.usna.navy.mil/~wdj/reed-sol.htm:](http://web.usna.navy.mil/~wdj/reed-sol.htm)
Reed-Solomon Fehlerkorrektur

Zu Teil 2: Hallalgorithmen:

http://www.quantec.de/docs_d/pub_rkm1.shtml:

Einleitungssätze

<http://en.wikipedia.org/wiki/Reverb>:

Wikipedia über Hall

<http://www.dcp.ufl.edu/docprogram/dis/gary.html>:

Untersuchung von IACC

<http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Matthias.Glodek/poptext3b.html>:

Simulation akustischer Räume

www.proav.de/data/concerthall-de.html:

Bewertung von Konzerthallen

<http://www.prosoundweb.com/recording/tapeop/plate/plate.php>:

Infos zu Hallplatten & Hallplatte im Eigenbau

<http://ccrma.stanford.edu/~jos/pubs.html>:

Information zu vielen Themen, die mit Audiotbearbeitung zusammenhängen

<http://www.netzmarkt.de/thomann/mspecial34-3.html>:

Hallspiralen und Hallplatten

C'T 08/2004, Seite 186 ff:

Selbstgefaltet. High-End-Raumsimulation durch Impulsfaltung