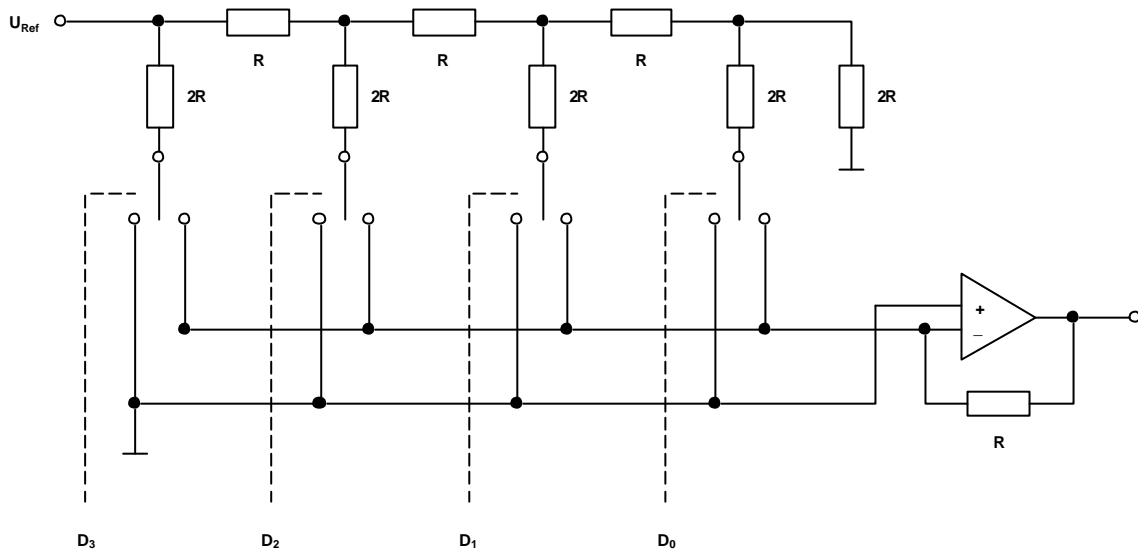


Digitale Audiotechnik



Version 1.2

Inhalt

1 Einleitung	3
2 Analog/Digital-Umsetzung	4
2.1 Abtastung	5
2.2 Quantisierung	6
2.3 Umsetzerprinzipien A/D	7
2.3.1 Parallelumsetzer (Flash-Converter)	7
2.3.2 Umsetzer nach dem Wägeverfahren	8
2.3.3 Sigma-Delta-Umsetzer ($\Sigma\Delta$).....	9
2.4 Umsetzerprinzipien D/A	10
2.4.1 R-2R Umsetzer.....	10
3 Fehlererkennung und Korrektur	11
3.1 Parität	11
3.2 Interleaving	12
3.3 Fehlerverdeckung	13
4 Kanalcodierung	14
5 Digitale Speichermedien	15
5.1 Compact Disk (CD).....	15
5.2 Digital Versatile Disk (DVD), Super Audio CD (SACD).....	17
5.3 Rotary Head Digital Audio Tape (R-DAT)	18
5.4 Digital Audio Stationary Head (DASH), ProDigi (PD).....	19
5.5 Mini Disk (MD).....	20
6 Datenreduktion	21
6.1 Verlustfreie Reduktion.....	21
6.1.1 Huffman-Codierung	22
6.2 Irrelevanzreduktion.....	23
7 Digitale Filter und Effekte	24
7.1 Delay	24
7.2 FIR-Filter	25
7.3 IIR-Filter.....	26
7.4 Faltungshall.....	27
8 Abbildungsverzeichnis	28

1 Einleitung

„[...] so nützlich wie ein altes Achtspur-Band in einem modernen Tonstudio.“

[Michael Moore – Stupid White Men]

Dass die moderne Tontechnik hauptsächlich auf digitalen Systemen basiert, ist allgemein bekannt. Dieses Skript soll einen Einblick in die digitale Audiotechnik bieten und behandelt dabei Ansätze zu den Themen Analog/Digital-Umsetzung, Speichermedien und Bearbeitung von Daten. Vorausgesetzt werden hier Grundlagen, wie sie z.B. im Skript „Digitaltechnik Grundlagen“ (erhältlich unter <http://www.christoph-neuss.de/>) beschrieben werden. In der Darstellung der Zusammenhänge wird mehr auf eine verständliche Erklärung als auf mathematische Herleitungen Wert gelegt.

Das Skript ist als Ergänzung zur entsprechenden Vorlesung konzipiert und fasst die Unterrichtsinhalte in schriftlicher Form zusammen.

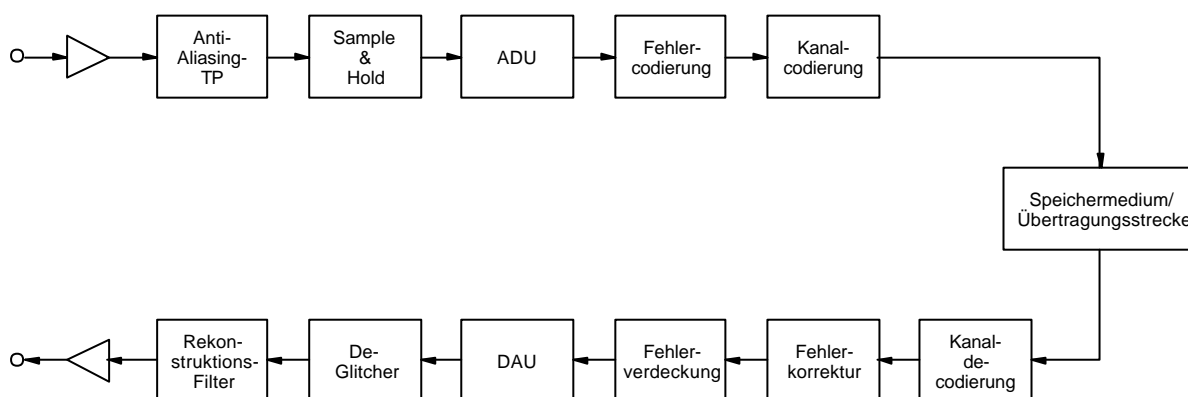


Abbildung 1: Digitale Übertragungskette

Alle Kapitel beschreiben Elemente der Digitalen Übertragungskette, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist. Sie beschreibt den Weg von einem analogen Eingangssignal über eine digitale Bearbeitungskette bis zur abschließenden Digital-Analog-Umsetzung.

Zu Beginn werden Ansätze zur Umsetzung zwischen analog und digital gegeben und durch reale Umsetzungsverfahren ergänzt. Anschließend folgen eine Betrachtung der heute gängigen Speichermedien und einige Ideen zur Datenreduktion und Signalverarbeitung.

2 Analog/Digital-Umsetzung

Die Analog/Digital-Umsetzung kann in der Theorie auf drei Teilbereiche aufgeteilt werden werden, bestehend aus einer Abtastung, einer Quantisierung und einer Codierung.

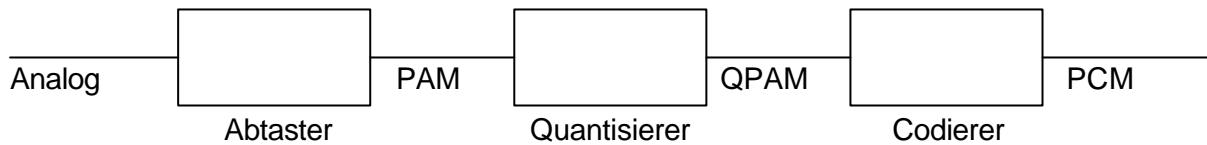


Abbildung 2: Schritte der Analog/Digital-Umsetzung

PAM: Pulse Amplitude Modulation (zeitdiskret)

QPAM: Quantised Pulse Amplitude Modulation (zeit- und wertdiskret)

PCM: Pulse Code Modulation (z.B. binäres Datensignal)

Abtaster: Der Abtaster erzeugt aus einem analogen Spannungssignal ein Signal, das aus kurzen Rechteckimpulsen gebildet wird, die den Spannungswerten des ursprünglichen Signals entsprechen. Die Zeitpunkte der Impulse werden durch die Abtastfrequenz oder Abtastzeit bestimmt. Das entstehende Signal ist zeitdiskret und wird als Puls-Amplituden-moduliert bezeichnet.
(Im englischsprachigen Raum wird die Abtastung als ‚Sampling‘ bezeichnet. Die Abtastfrequenz wird daher auch Sampling-Frequenz genannt.)

Quantisierer: Der Quantisierer setzt die PAM-Impulse auf die vom Digitalsystem vorgegebenen Werte um. Das Signal ist dann zeit- und wertdiskret.

Codierer: Nach der Abtastung und Quantisierung liegt ein Signal in ‚digitaler‘ Form vor, das zur Bearbeitung in Computern noch auf ein entsprechendes Code-Format umgesetzt werden muss. Dabei werden die Spannungswerte zum Beispiel im Zweierkomplement dargestellt. Das Ausgangssignal wird dann als Pulse-Code-moduliertes Signal bezeichnet.

2.1 Abtastung

Die Abtastung eines analogen Signals unterliegt einigen Regeln, die hier kurz erläutert werden sollen.

Abtasten heißt, die „unendlich“ genaue Signalabfolge des analogen Signals auf eine vorgegebene, begrenzte Anzahl von Abtastwerten zu reduzieren. Die Werte werden in der Regel in festen Intervallen, die durch die Abtastfrequenz (Sampling-Frequenz) bestimmt werden, entnommen. Während das analoge Signal zeitkontinuierlich ist, entsteht dadurch ein zeitdiskretes Signal. Da anschließend nicht mehr alle Werte des Signalverlaufes bekannt sind, muss gewährleistet sein, dass genügend Information zur Rekonstruktion des Original-Signals erhalten bleibt. Nach Shannon und Nyquist ist dies der Fall, wenn die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch ist, wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz. Liegt die Abtastfrequenz unterhalb dieses Wertes, so kommt es zu Fehlinterpretationen, die als Spiegelfrequenzen (Alias-Frequenzen) hörbar werden. Die halbe Abtastfrequenz wird auch als Nyquist-Frequenz bezeichnet.

$$\text{Abtastfrequenz} \geq 2 * \text{höchste Signalfrequenz}$$

Die Technik muss dafür Sorge tragen, dass den Analog-Digital-Umsetzer (ADU) keine Frequenzen oberhalb der Nyquist-Frequenz erreichen. Dies wird durch Tiefpassfilterung im Analogteil erreicht.

Da sich der Hörbereich des Menschen bis ca. 20kHz erstreckt, sind Abtastfrequenzen über 40kHz sinnvoll. Hauptsächlich aus technischen Gründen bieten auch höhere Abtastfrequenzen noch Vorteile. Ein hochfrequenter Umsetzer benötigt nur einfache analoge Tiefpassfilter, weshalb oft mit sehr hoher Frequenz abgetastet wird und anschließend eine digitale Filterung und anschließende Dezimation auf die eigentlich gewünschte Frequenz erfolgt. Diesen Prozess bezeichnet man als Überabtastung (Oversampling).

Der Verbleib bei einer höheren Frequenz bis zur Digital-Analog-Umsetzung (z.B. 96kHz) bietet auch merkliche Vorteile. Sowohl die digitale, als auch die analoge Filterung wirkt sich immer auch auf den hörbaren Frequenzbereich aus, was durch eine möglichst hohe Abtastfrequenz allerdings minimiert werden kann.

Die technische Realisierung der Abtastung erfolgt in der Regel über „Sample&Hold“-Schaltungen, die aus einem digitalen Schalter und einem Kondensator (zur Aufrechterhaltung der Spannung während eines Abtastintervalls) bestehen.

2.2 Quantisierung

Die Quantisierung stellt die Diskretisierung der Spannungswerte eines Signals dar. Die Genauigkeit der Einteilung wird dabei durch die Anzahl der zur Verfügung gestellten Bits bestimmt. Die Anzahl der Abstufungen beträgt bei n Bit 2^n . Damit wird schon klar, dass durch eine geringfügige Änderung der Bit-Tiefe erhebliche Genauigkeitsunterschiede erreicht werden. Die Quantisierung bestimmt sowohl den erreichbaren Klirrfaktor, als auch den Signal-Rausch-Abstand des digitalen Systems. Der Signal-Rausch-Abstand in dB errechnet sich aus der Anzahl der Bits n wie folgt:

$$SNR(dB) \approx n \cdot 6dB + 1,76dB$$

Gebräuchliche Werte für die Bit-Tiefe von digitalen Audio-Systemen sind heutzutage 16, 20 oder 24. Für die Berechnungen innerhalb einer Signalverarbeitungskette werden jedoch weit- aus höhere Auflösungen gewählt (z.B. 56 Bit).

Die Quantisierung erfolgt in der Praxis auf unterschiedliche Weise. Einige Möglichkeiten werden im folgenden Abschnitt „Umsetzerprinzipien“ dargestellt.

2.3 Umsetzerprinzipien A/D

Es gibt viele verschiedene Verfahren, ein analoges Signal in diskrete, digitale Werte zu überführen. Je nach Anwendung wird man sich für ein anderes entscheiden, hier sollen beispielhaft drei verschiedene Möglichkeiten dargestellt werden.

2.3.1 Parallelumsetzer (Flash-Converter)

Der Parallelumsetzer ist ein sehr schneller, aber materialaufwändiger Umsetzer. Er wird deshalb nur bei hohen Abtastfrequenzen und geringer Auflösung eingesetzt. Die Anzahl an Widerständen beträgt bei n Bit Auflösung 2^n , hinzu kommen $2^n - 1$ Komparatoren.

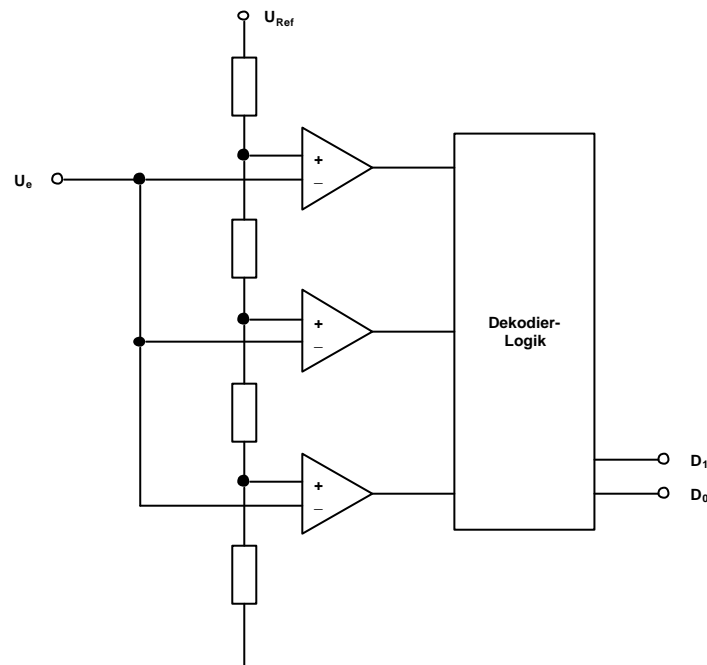


Abbildung 3: 2-Bit-Parallel-Umsetzer

Die Komparatoren vergleichen parallel das einkommende Signal mit einer über Widerstände abgestuften Referenzspannung. Die Komparatoren liefern als Ausgangswert eine 0, wenn das Signal kleiner als die Referenz ist, und eine 1, wenn das Signal größer als die Referenzspannung ist. Da nun alle Komparatoren mit Referenzwerten oberhalb des anliegenden Signals eine 1 ausgeben und alle anderen eine 0, lässt sich die Höhe der Eingangsspannung durch eine Dekodierlogik direkt in einen Dualcode umsetzen.

2.3.2 Umsetzer nach dem Wägeverfahren

Beim Umsetzer nach dem Wägeverfahren wurde ein deutlich niedrigerer Hardware-Aufwand betrieben als beim Parallelumsetzer, er benötigt allerdings mehr Zeit für einen Umsetzschritt.

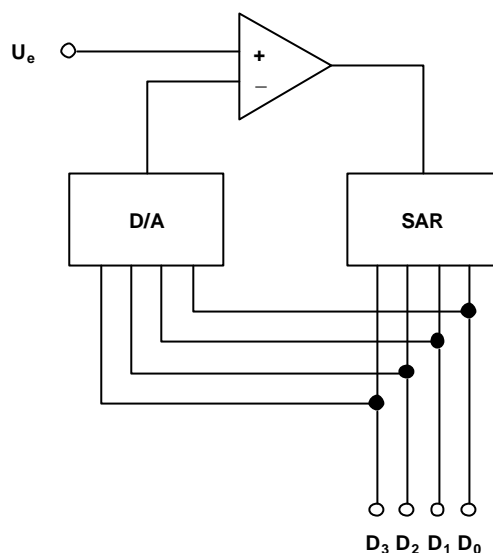


Abbildung 4: 4-Bit-Umsetzer nach dem Wägeverfahren

Die Analog-Digital-Umsetzung erfolgt indirekt über ein Annäherungsverfahren mit Hilfe eines DAU und eines Komparators. Dieses Verfahren wird auch als Sukzessive Approximation (Schrittweise Annäherung) bezeichnet. In einem Register (SAR – Sukzessive Approximation Register) werden nacheinander die Bits durchgetestet, begonnen wird beim höchstwertigen Bit. Die entstandene Bit-Kombination jedes Schrittes wird vom DAU in einen Spannungswert umgesetzt und über einen Komparator mit der Signalspannung verglichen. Liefert der Komparator eine 1 an das SAR (Signal > DAU-Ausgang), so wird das gerade gesetzte Bit beibehalten, anderenfalls (Signal < DAU-Ausgang) wird es wieder gelöscht. Im nächsten Schritt folgt das nächste Bit nach dem gleichen Prinzip. Der gesamte Vorgang benötigt bei einem n-Bit ADU n+1 System-Takte. Da das Verfahren dem Abwiegen mit einer analogen Waage und unterschiedlich großen Gewichten ähnelt, wird es als Wägeverfahren bezeichnet. Eine beispielhafte Umsetzung für einen 4Bit-ADU wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

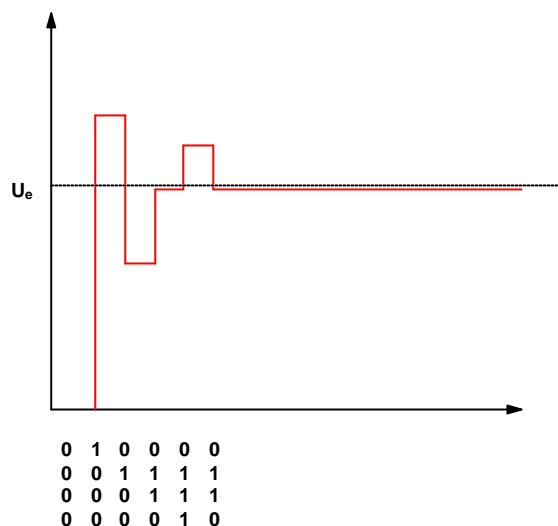


Abbildung 5: Beispiel-Umsetzung für 4Bit Auflösung

2.3.3 Sigma-Delta-Umsetzer (SD)

Der Sigma-Delta-Umsetzer wird in der Regel als Ein-Bit-Umsetzer realisiert. Er wandelt das Signal nicht direkt in einen digitalen Zahlenwert, sondern ermittelt die Differenz zum vorangegangenen Wert. Der Ausgang des Quantisierers beschreibt also die Steigung des Signals und nicht seinen Verlauf.

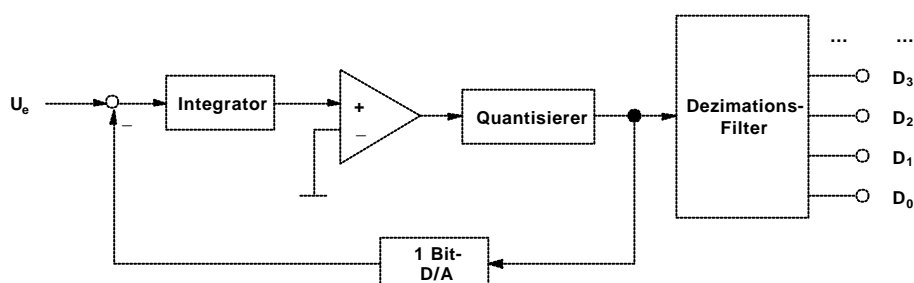


Abbildung 6: 1Bit Sigma-Delta-Umsetzer

Der Signal-Rausch-Abstand eines Sigma-Delta-Umsetzers hängt in erster Linie von der Abtastfrequenz ab. Die Rauschenergie bleibt immer gleich groß, wird dabei aber auf den gesamten Frequenzbereich verteilt. Je größer der abgetastete Frequenzbereich ist, desto weniger Rauschenergie bleibt für den hörbaren unteren Frequenzbereich erhalten. Die Abtastfrequenz eines Sigma-Delta-Umsetzers liegt daher im MHz-Bereich. Da diese Maßnahme nicht ausreicht, wird zusätzlich ein Noise-Shaping durchgeführt. Durch Filtereigenschaften des Systems wird eine Verschiebung des Rauschens in hohe Frequenzbereiche erzielt, was im hörbaren Frequenzbereich eine deutliche Reduzierung des Rauschens zur Folge hat. Das letzte Element des Umsetzers ist ein Dezimationsfilter, das den Frequenzbe-

reich auf den üblichen Bereich bis 22 KHz beschränkt und eine Umsetzung auf Multibit-PCM durchführt.

Das Signal vor dem Dezimationsfilter wird auch als eigenständiges digitales Audio-Format auf der SACD eingesetzt und dann als DSD (Direct Stream Digital) bezeichnet. Die Abtastfrequenz eines DSD-Umsetzers beträgt 2,8224 MHz.

2.4 Umsetzerprinzipien D/A

Die Umsetzung eines digitalen Signals in einen analogen Spannungsverlauf kann, wie schon der umgekehrte Weg, auf verschiedenste Weise durchgeführt werden. Hier soll beispielhaft nur ein einziges, sehr verbreitetes Prinzip dargestellt werden.

2.4.1 R-2R Umsetzer

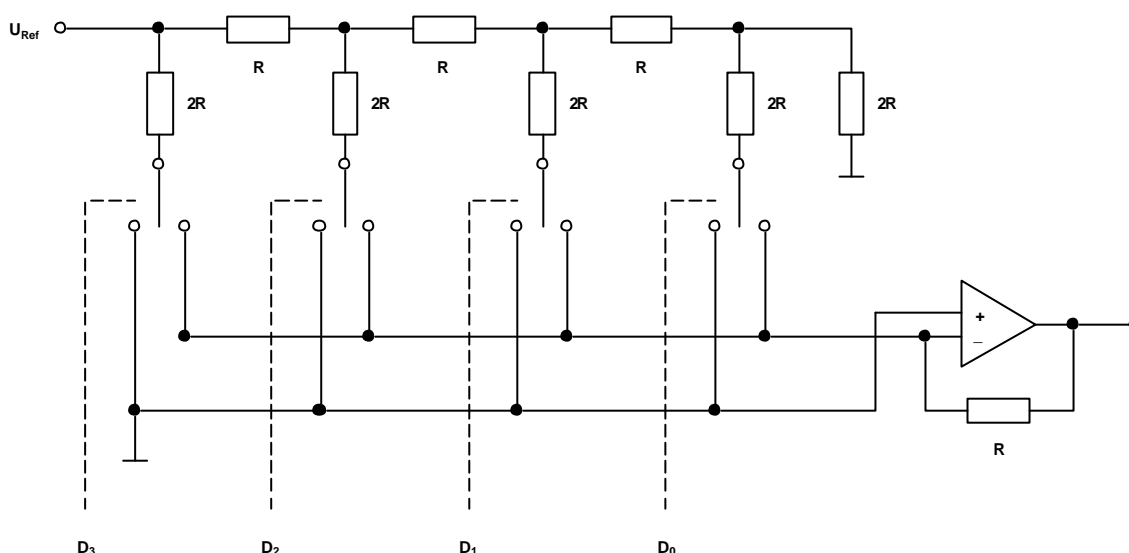


Abbildung 7: 4Bit R-2R Umsetzer

Der R-2R Umsetzer arbeitet mit einer Strom-Addition zur Umsetzung eines digitalen Zahlenwertes in eine analoge Spannung. Für jedes Bit wird über einen Schalter ein abgestufter Stromwert auf eine Sammelschiene geschaltet, deren Strom von einem Verstärker in eine Ausgangsspannung gewandelt wird.

Die Anordnung der Widerstände erzeugt an jedem Knotenpunkt einen passenden Teil der Referenzspannung. Von rechts begonnen können die parallelen Widerstände (Wert jeweils $2R$) paarweise zusammengefasst werden, so dass rechts eines Knotens immer der Widerstand R sichtbar ist. Die Spannung wird dadurch von links gesehen jeweils halbiert. Die Anordnung der Widerstände führte zur Namensgebung des R-2R-Umsetzers.

3 Fehlererkennung und Korrektur

3.1 Parität

Die Übertragung von Paritäts-Bits oder –Worten ist eine einfache Möglichkeit, festzustellen, ob eine Übertragung fehlerhaft war. Das sendende Gerät ermittelt das Paritäts-Wort (bzw. Bit) und überträgt es zusätzlich zu den Daten an den Empfänger. Dieser ist dann in der Lage, die Parität zu überprüfen und mit oftmals ausreichender Genauigkeit Fehler auszuschließen. Die hinzugekommenen Daten erzeugen im Signal eine Redundanz, das heißt, es werden mehr Daten übertragen, als für die eigentliche Information benötigt werden. Durch dieses Hinzufügen von Mehrfachinformation wird die Überprüfung eines Datensatzes überhaupt erst ermöglicht.

Man unterscheidet gerade und ungerade Parität. Ein Paritäts-Bit ergänzt die Einsen in einem Übertragungs-Wort auf eine gerade (bzw. ungerade) Anzahl.

Daten:	10001010
Paritäts-Bit:	1 für gerade Parität
	0 für ungerade Parität

(Wenn ein Datenwort eine ungerade Anzahl an Einsen enthält, ist das Paritäts-Bit 1, bei gerader Anzahl ist es 0)

Die einfache Paritätsbildung kann nur ermitteln, ob in einer Übertragung überhaupt Fehler aufgetreten sind. Für die Ermittlung des fehlerhaften Bits wird eine erweiterte Methode, die so genannte Kreuz-Parität angewandt. Dabei wird für einen Datenblock (bei der CD z.B. ein 16-Bit Wort) ein zweites Paritätswort gebildet, mit dessen Hilfe die Position eines Fehlers innerhalb des Datenblocks ermittelt werden kann.

1011		1
1100		0
0101		0
1111		0
<hr/>		
1101		

Durch die Ermittlung einer Blockparität kann der Empfänger feststellen, in welcher Zeile und in welcher Spalte ein Fehler aufgetreten ist, und anhand dieser Information das fehlerhafte Bit korrigieren.

3.2 Interleaving

Das Interleaving ist eine Methode, die Signale auf einem Speichermedium so zu verteilen, dass eine auftretende lokale Beschädigung des Mediums (z.B. ein Kratzer auf einer CD) keinen nennenswerten Datenverlust zur Folge hat.

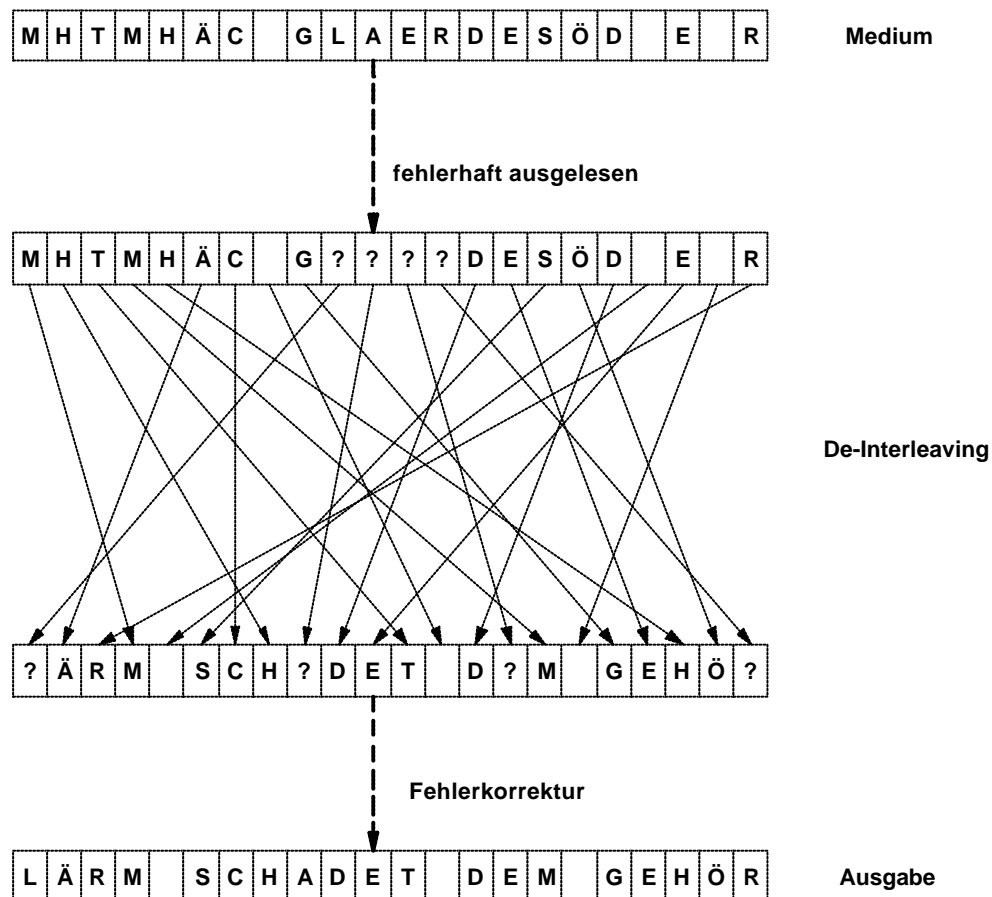


Abbildung 8: Interleaving am Beispiel eines Textes

Unter der Annahme, dass eine Beschädigung einen zusammenhängenden Block des Speichermediums betrifft, werden die Daten auf dem Medium verteilt. Dadurch, dass jetzt zusammengehörende Daten nicht gleichzeitig beschädigt werden, sondern ein Fehler über auseinander liegende Samples verteilt wird, lassen sich die verloren gegangenen Daten von der Fehlerkorrektur leichter beheben.

Das bei der CD benutzte Verfahren wird mit CIRC (Cross Interleave Reed Solomon Coding) bezeichnet, welches auch die Paritätsbildung mit einbezieht und etwas aufwendiger arbeitet als das Beispiel in obiger Abbildung.

3.3 Fehlerverdeckung

Es ist Abspielgeräten nicht immer möglich, beschädigte Audio-Samples komplett zu rekonstruieren. In diesen Fällen sorgt eine nachgeschaltete Fehlerverdeckung für einen möglichst guten Schutz der Folgegeräte (und Ohren). Dies kann auf drei Arten geschehen:

- Interpolation
- Halten des letzten korrekten Wertes
- Stummschalten

Die beste Möglichkeit, einige wenige verlorene Werte zu rekonstruieren, ist eine Interpolation mit einer passenden Filterung. Da dieses Verfahren zu aufwendig sein kann, ist es für kurze Ausfälle möglich, den letzten korrekten Wert noch einmal auszugeben. Dies führt naturgemäß zu hochfrequenten Störungen, die wiederum gefiltert werden sollten.

Die letzte Möglichkeit ist es, den Ausgang des Gerätes stumm zu schalten. Dies ist bei längeren Störungen die einzig praktikable Variante.

4 Kanalcodierung

Die Kanalcodierung ist die Aufbereitung der digitalen Daten für das jeweilige Speichermedium oder für die Übertragungsstrecke. Dabei wird die Darstellung der Daten an die Besonderheiten der Übertragung angepasst.

Bei Magnetbändern ist es grundsätzlich nur möglich, Wechselspannungen aufzuzeichnen. Deshalb wird der Datenstrom so codiert, dass er nahezu gleichanteilsfrei wird. Für die Aufzeichnung auf optische Medien müssen die Daten an die Eigenheiten der Laseroptik angepasst werden, was bei der CD dadurch erreicht wird, dass niemals zwei Einsen in Folge gesendet werden, und zwischen zwei Einsen mindestens zwei Nullen liegen. Die Einsen werden dabei als Wechsel zwischen ‚Pit‘ und ‚Land‘ dargestellt, was einem Übergang von erhabenem zu ebenem Gebiet auf der CD darstellt (siehe auch 5.1).

Das bei der CD angewandte Verfahren wird als Eight-to-Fourteen-Modulation (EFM) bezeichnet. Dabei werden acht Datenbits zu 14 Bits auf dem Übertragungskanal erweitert. Die Umsetzung erfolgt nach einer Tabelle, in der für jeden Wert der entsprechende Code enthalten ist.

Bei der Timecode-Aufzeichnung auf Längsspuren (LTC) werden die Daten durch das Coded-Diphase-Format repräsentiert, das einen Spannungswechsel nach jedem Bit garantiert.

5 Digitale Speichermedien

Bei den digitalen Speichermedien unterscheidet man einige grundsätzliche Gruppen von Aufzeichnungsverfahren. Das ‚klassische‘ Medium ist die Aufzeichnung auf Magnetband mit feststehenden Köpfen (hier: DASH und ProDigi). Eine Abwandlung ist die Nutzung von Video-ähnlichen Laufwerken mit rotierenden Tonköpfen und Schrägspuraufzeichnung auf Magnetbänder (hier: R-DAT). Die heute gebräuchlichsten Speichermedien nutzen optische (hier: CD und DVD), bzw. magneto-optische (hier: MD) Verfahren. Einige Besonderheiten der einzelnen Speicherarten sollen in diesem Abschnitt dargestellt werden.

5.1 Compact Disk (CD)

Die Compact Disk stellt ein optisches Verfahren zur Datenspeicherung dar. Die Information ist in eine spiralförmige Spur aus kleinen Erhöhungen und Vertiefungen (Pits und Lands) codiert, wobei eine 1 durch einen Wechsel zwischen beiden repräsentiert wird sowie eine 0 durch Beibehaltung von entweder Pit oder Land. Da die einzelnen Teile zur Auswertbarkeit der Laseroptik eine gewisse Mindestlänge haben müssen, wird die Eight-to-Fourteen-Modulation angewandt.



Abbildung 9: CD-Medium

Das Trägermaterial der CD besteht aus einem Kunststoff (z.B. Makrolon), auf das eine Reflexionsschicht aufgebracht wird.

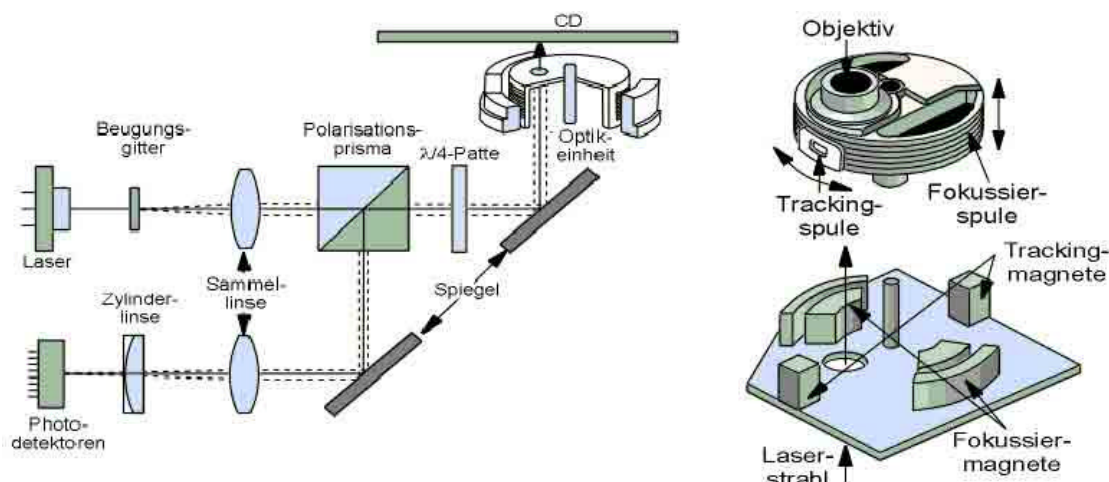


Abbildung 10: Abtastung

Seit Anfang der 90er gibt es beschreibbare CD Medien. Diese unterteilen sich in CD-R und CD-RW Medien. Die CD-R ist ein WORM Medium (Write Once Read Many), das die Daten über eine reflektierende Schicht erzeugt, über der eine organische Schicht liegt, deren Durchlasseigenschaften durch Laserbestrahlung dauerhaft verändert werden. Die Pits werden dabei ‚gebrannt‘. Bei den CD-RW Medien (Rewritable) lässt sich die Reflexionseigenschaft einer Schicht mehrfach durch unterschiedliche Temperaturen des Laserstrahls verändern. Die Reflexionseigenschaften von CD-R Medien erreichen nahezu die der gepressten CD, CD-RW Medien liegen bei ca. 25% des Reflexionsgrades. Dadurch erklären sich die unterschiedlichen Lesegeschwindigkeiten der Medien.

5.2 Digital Versatile Disk (DVD), Super Audio CD (SACD)

Sowohl DVD als auch SACD benutzen das gleiche physikalische Medium. Für die DVD gibt es vier unterschiedliche, genormte Medien, die um weitere Hybrid-Versionen ergänzt werden (z.B. Kombinationen aus CD und SACD).

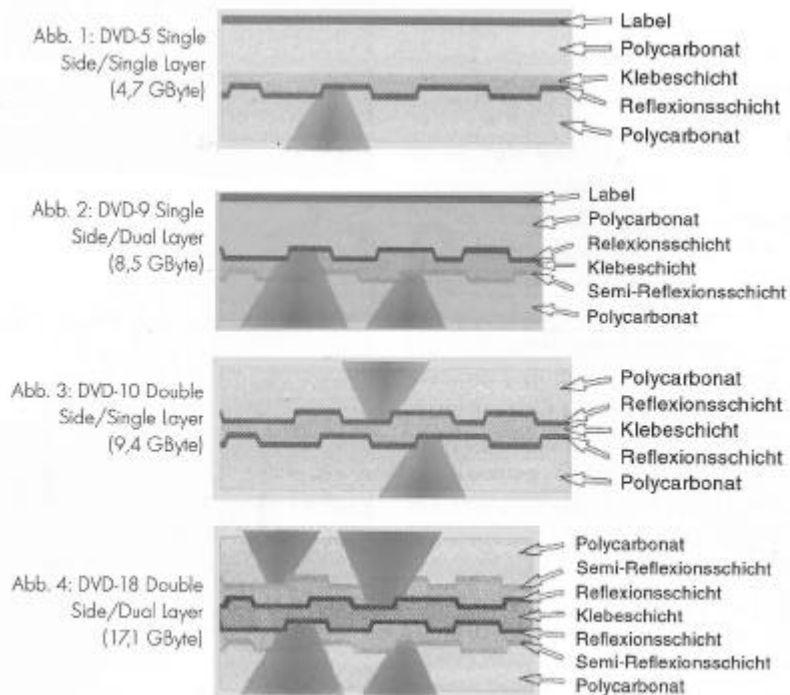


Abbildung 11: DVD-Medien

Die Größe der Pits und Lands, sowie der Spurbstand wurden gegenüber der CD stark verkleinert, wodurch eine höhere Datendichte erzielt werden kann. Je nach DVD-Version können bis zu 17 GB auf einem Medium gespeichert werden.

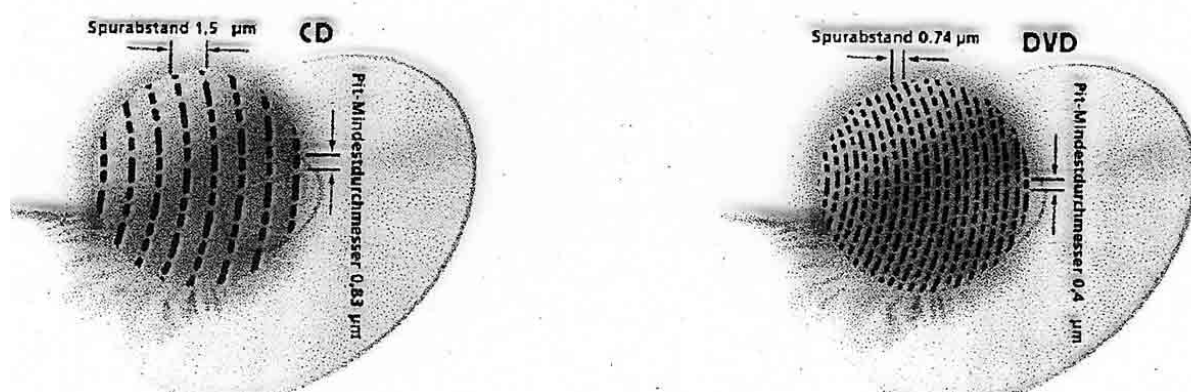


Abbildung 12: CD und DVD im Vergleich

5.3 Rotary Head Digital Audio Tape (R-DAT)

Das R-DAT System basiert auf den Laufwerken der Videotechnik. Das digitale Tonsignal wird von einer rotierenden Kopftrommel auf ein vergleichsweise langsam bewegtes Magnetband aufgezeichnet. Durch die Neigung der Kopftrommel ergeben sich auf dem Band schräge Aufzeichnungsspuren.

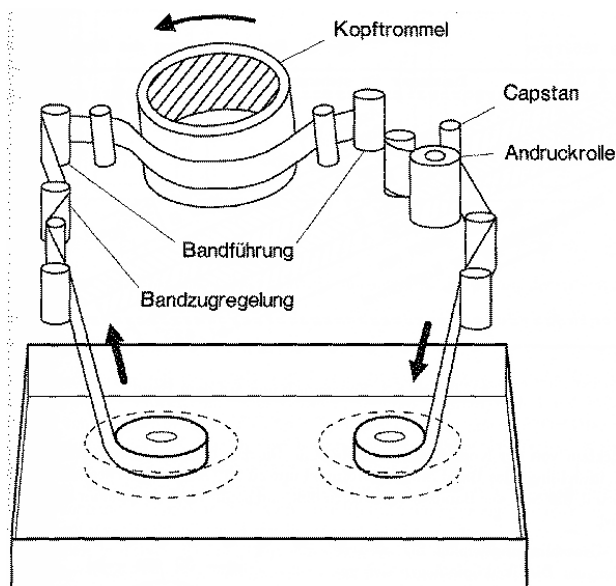


Abbildung 13: R-DAT Laufwerk

Die Kopftrommel ist im Normalfall mit zwei Aufzeichnungsköpfen aufgebaut, kann aber auch zwei weitere zur Ermöglichung einer Hinterbandkontrolle enthalten.

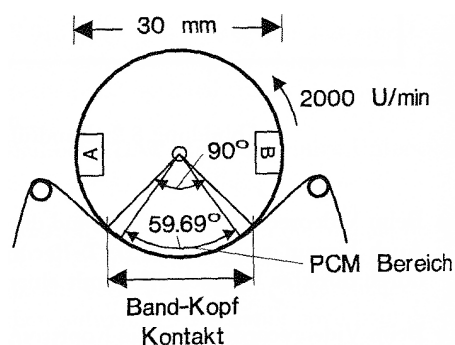


Abbildung 14: R-DAT Kopftrommel

Um die Spuren möglichst dicht nebeneinander anordnen zu können und mit großer Spaltbreite im Tonkopf arbeiten zu können, werden die beiden Köpfe gegeneinander versetzt eingebaut. Dieses Verfahren nennt man Slanted-Azimuth-Verfahren.

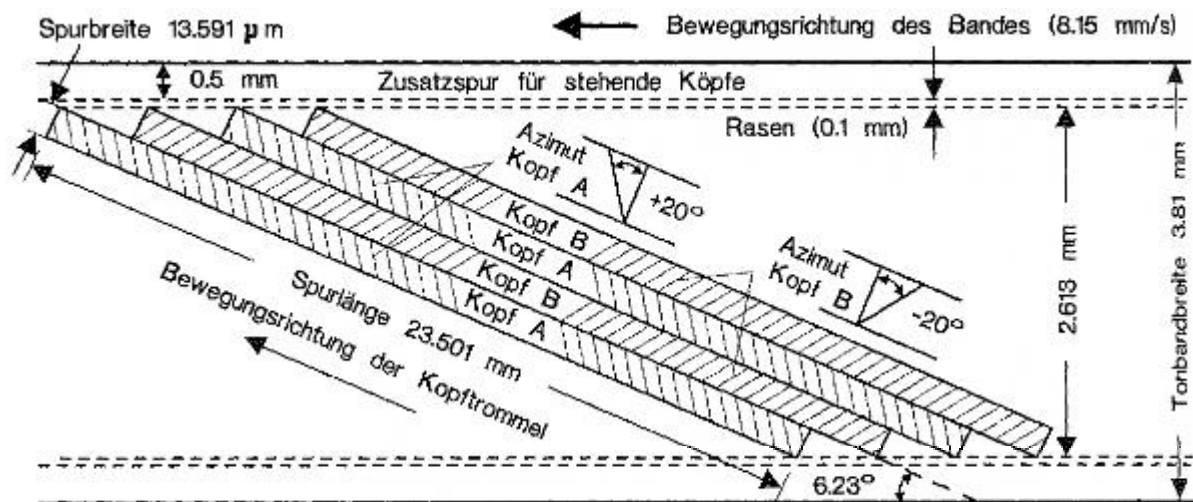


Abbildung 15: R-DAT Spuranordnung

5.4 Digital Audio Stationary Head (DASH), ProDigi (PD)

Diese Maschinen zeichnen digitale Mehrspursignale mit feststehenden Köpfen auf Magnetband auf. Die Spuranzahl und Bandbreite variiert dabei je nach Format. Heute sind DASH-Maschinen mit 48 Spuren und ½ Zoll-Band, sowie ProDigi-Maschinen mit 32 Spuren gebräuchlich.

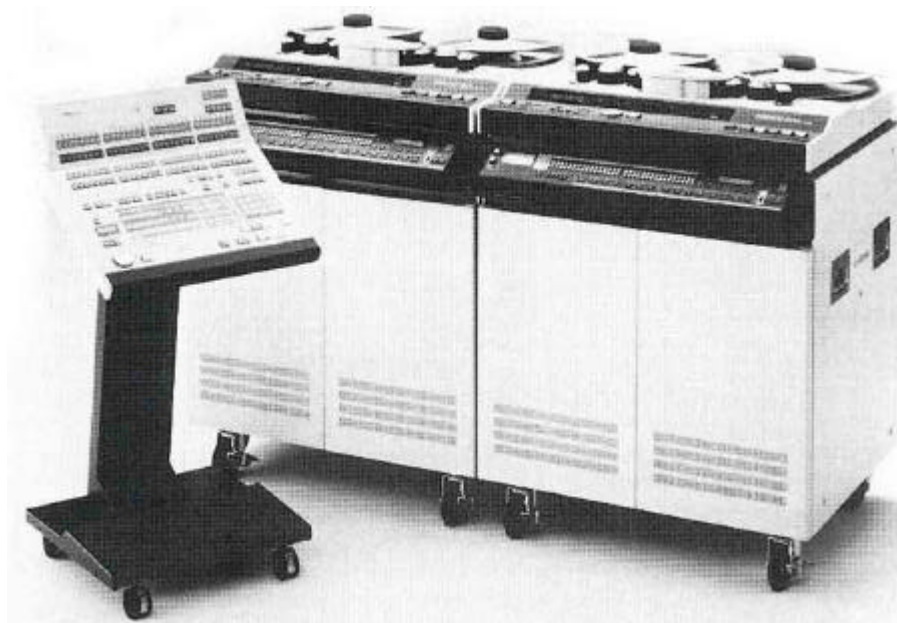


Abbildung 16: Otari ProDigi 32-Spur

5.5 Mini Disk (MD)

Die MD ist ein Medium mit magneto-optischer Aufzeichnung der digitalen Daten. Das Audiomaterial wird nach dem ATRAC-Verfahren datenreduziert.

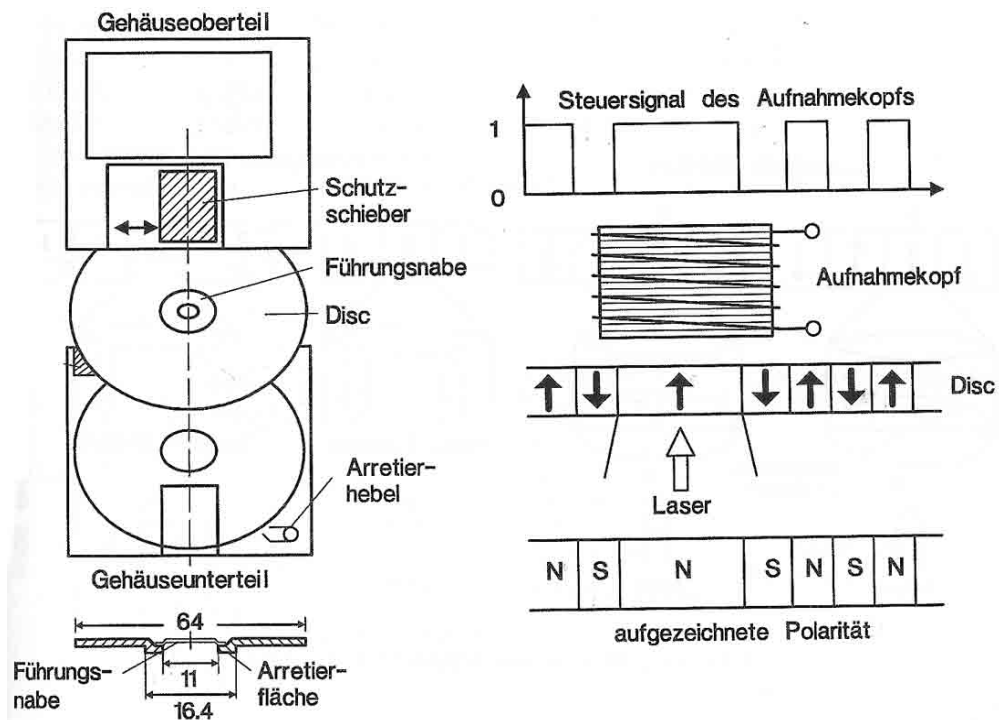


Abbildung 17: MD Aufbau und Aufzeichnungsvorgang

Die Aufzeichnung erfolgt magnetisch, wobei die zu magnetisierende Stelle durch einen Laser erhitzt wird. Dieses Verfahren ermöglicht eine sehr genaue Magnetisierung. Ausgelesen wird die MD optisch, wobei die aufgezeichnete Polarität die Ablenkung des Laserstrahls bestimmt.

6 Datenreduktion

Die Reduktion von Daten für die Aufzeichnung auf ein Speichermedium oder eine Übertragung ist eine gängige Methode, mehr Information auf gleich bleibendem Raum unterzubringen. Man unterscheidet verlustfreie und verlustbehaftete Reduktionsverfahren (Irrelevanzreduktion), die sich in den grundlegenden Reduktionsansätzen unterscheiden, aber durchaus gemeinsam zur Anwendung kommen. Einige bekannte Reduktionsverfahren sind MPEG Audio (z.B. MP3), Dolby Digital, DTS, ATRAC (MD und SDDS), Ogg Vorbis und MLP (DVD Audio), die sich etwas in der Herangehensweise unterscheiden.

6.1 Verlustfreie Reduktion

Es gibt einige Verfahren, die in der Lage sind Audio-Daten komprimiert in einen Datenstrom zu ‚packen‘ und später wieder zu ‚entpacken‘, um dabei exakt das originale Material zu rekonstruieren. Diese Verfahren arbeiten also verlustfrei. In diesem Abschnitt sollen einige Ideen der verlustfreien Reduktion angesprochen werden.

Die meisten Verfahren für verlustfreie Datenreduktion arbeiten mit Wertvorhersage (Prädiktion) und variabler Codewort-Länge (z.B. Huffman). Diese Verfahren werden in der Regel nach einer Transformation in den Frequenzbereich (mit FFT oder Filterbank) angewandt, doch dieser erste Schritt soll hier nicht weiter erläutert werden.

Die Vorhersage von Werten erfolgt immer auf Basis einiger vorangegangener Werte durch eine vorgegebene Rechenvorschrift. Diese Vorhersage ergibt natürlich keinen exakten Wert, aber einen, der sehr dicht am Original liegt. Die Abweichung zwischen Wert und vorhergesagtem Wert wird vom Encoder ermittelt und statt des eigentlichen Wertes in den Datenstrom eingefügt. Der Decoder sagt nach der gleichen Rechenvorschrift ebenfalls jeden Wert voraus und addiert die aus dem Datenstrom erhaltene Abweichung wieder hinzu. Dadurch kann der exakte Signalverlauf rekonstruiert werden.

Der eigentliche Vorteil dieses Verfahrens wird erst im nächsten Schritt vollständig ausgeschöpft. Die Abweichungswerte sollten bei guten Vorhersage-Algorithmen deutlich kleiner sein, als die eigentlichen zu übertragenden Werte. Da große Werte nur sehr selten vorkommen, bietet sich für die Übertragung der Abweichungen z.B. ein Huffman-Code an.

Für den Huffman-Code erhalten Encoder und Decoder die gleichen Code-Tabellen, in denen eine Umsetzung des Wertes in ein Codewort mit variabler Länge enthalten ist. Der Huffman-Code soll im Folgenden für ein Beispiel aus der Textübertragung vorgeführt werden, da dies anschaulicher erscheint, als Abtastwerte zu codieren.

6.1.1 Huffman-Codierung

Für die Übertragung eines Textes werden in der Regel alle Zeichen mit gleicher Code-Länge übertragen (z.B. ein Byte). Da in der Sprache jedoch nicht alle Zeichen gleich häufig vorkommen, wird es möglich sein, einen kürzeren Gesamt-Datenstrom zu erzeugen, wenn man häufig vorkommende Zeichen mit kurzen Bitfolgen - und selten vorkommende Zeichen mit langen Bitfolgen codiert. Eine Methode, solche Bitfolgen zu ermitteln, ist der Huffman-Code.

Für folgenden Beispiel-Text soll ein möglichst optimaler Code gefunden werden:

FISCHERS_FRITZ_FISCHT_FRISCHE_FISCHE

Die vorkommenden Zeichen werden nun nach ihrer Häufigkeit sortiert:

F	I	S	C	H	_	E	R	T	Z
5	5	5	4	4	4	3	3	2	1

Aus der Häufigkeit lässt sich ein Codebaum erzeugen, der immer die niedrigsten Häufigkeiten miteinander verbindet. An die Abzweigungen werden die Bits 1 und 0 geschrieben und abschließend wird durch zurückverfolgen des Baumes (von rechts nach links) für jeden Buchstaben das entstandene Codewort ermittelt.

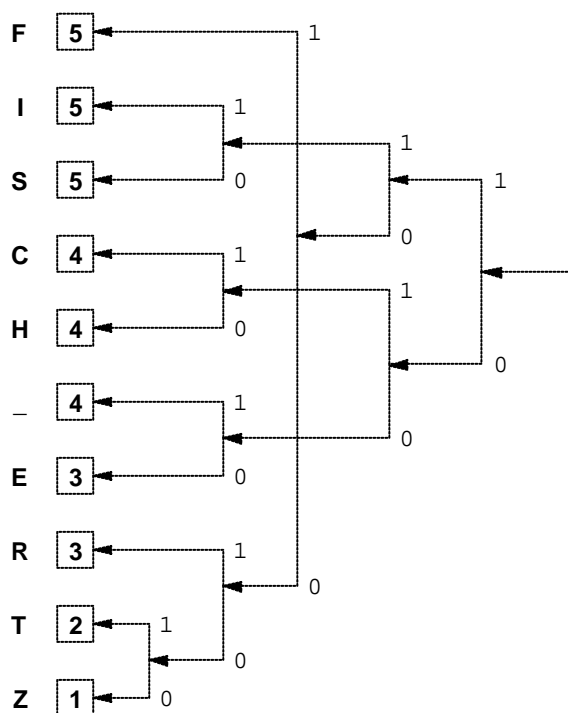


Abbildung 18: Huffman Code-Baum

Beispielsweise ergibt sich für das F der Code 101, für das Z 10000. Die einzelnen Buchstaben können aus einer durchgehenden Codefolge eindeutig zurück gewonnen werden:

101111111001101000010011110001...

ergibt dann:

FISCHERS_...

Für den gesamten Text werden zur Codierung 117 Bits benötigt, was gegenüber einer ‚normalen‘ Codierung mit z.B. 4 Bit (reicht für die 10 verschiedenen Zeichen des Textes aus) einen Gewinn von 27 Bit oder fast 20% bedeutet.

6.2 Irrelevanzreduktion

Die Irrelevanzreduktion basiert immer auf einer psychoakustischen Auswertung des Signals. Da der Mensch nicht in der Lage ist, alle Schallereignisse die das Ohr erreichen wahrzunehmen, können einige davon weggelassen werden. Wenn die benutzten Modelle dem menschlichen Ohr sehr nahe kommen, ist das entstehende Signal vom Original nicht zu unterscheiden. Der wichtigste ausgenutzte Effekt ist dabei der Verdeckungseffekt. Es gibt einen frequenzabhängigen und einen zeitabhängigen Verdeckungseffekt, die beide in der Analyse berücksichtigt werden.

Der frequenzabhängige Verdeckungseffekt tritt immer dann auf, wenn unterschiedlich laute Signale in verschiedenen Frequenzbereichen auf das Ohr treffen. Vornehmlich höhere Frequenzen werden dabei durch lautere tiefere Frequenzen überdeckt, so dass vom Ohr nur die tiefere Frequenz wahrgenommen wird. Die Hörschwellen für die Signalverdeckung wurden dabei experimentell ermittelt.

Zusätzlich gibt es eine zeitliche Verdeckung, die den Zeitraum nach einem lauten Signal (und einen kurzen Zeitraum davor) unempfindlich für leise Signale macht. In der Praxis kann dieser Effekt zum Beispiel beim Verlassen einer Diskothek beobachtet werden. Hier benötigt das Gehör einen Erholungszeitraum, bevor auch leise Umweltgeräusche wahrnehmbar sind. Dieser Effekt tritt allerdings in abgeschwächter Form bei jedem gehörten Signal auf.

Aufgabe des Reduktionsverfahrens ist es also, Signalanteile zu lokalisieren, die von anderen verdeckt werden. Solche Signalanteile können entweder ganz herausgenommen, oder in ihrer Auflösung reduziert werden. Die Analyse des Signals wird dabei wiederum im Frequenzbereich stattfinden.

7 Digitale Filter und Effekte

7.1 Delay

Verzögerungen werden, wie schon bei analogen Bandechos, durch Zwischenspeicherung der Abtastwerte und verzögertes Auslesen realisiert. Dies wird in der Digitaltechnik durch RAM-Speicher realisiert. Die Größe des Speichers wird direkt durch die Länge der Verzögerung bestimmt.



Abbildung 19: Verzögerung um einen Takt

In der Signaltheorie wird als Grundeinheit die Verzögerung um einen Abtast-Takt angenommen. Eine musikalisch sinnvolle Verzögerung wird also durch mehrere Taktverzögerungen dargestellt. Mit Hilfe der Abtastfrequenz kann leicht die Verzögerungszeit bestimmt werden. Zusammen mit einem Rückkopplungsweg können leicht effektvolle Mehrfach-Delays erzeugt werden.

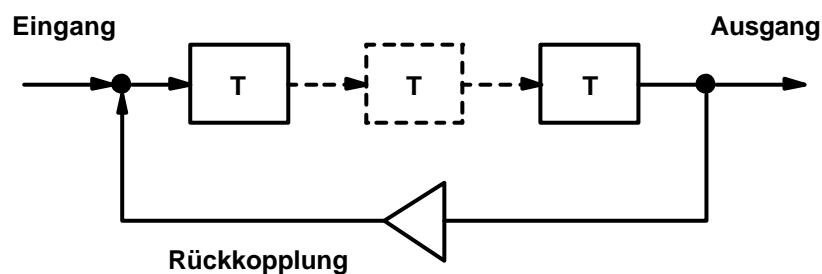


Abbildung 20: Delay mit Rückkopplung

Bei sehr kurzen Verzögerungszeiten ergeben sich durch die Rückkopplung zusätzliche Effekte, die auf der Überlagerung von fast gleichen Signalen beruhen. So werden bestimmte Frequenzen ausgelöscht, andere wiederum verstärkt. Ein Anwendungsfall ist zum Beispiel der Flanger.

7.2 FIR-Filter

Bei digitalen Filtern werden die Auslöschungen und Verstärkungen unterschiedlich verzögerter Signale gezielt genutzt, um Filtereigenschaften nachzubilden. Filter mit endlicher Impulsantwort werden als FIR-Filter (FIR = Finite Impulse Response) bezeichnet. Sie besitzen keinerlei Rückführungen vom Ausgang zum Eingang. Die Verstärkungen der einzelnen Zweige ergeben die Impulsantwort des Filters.

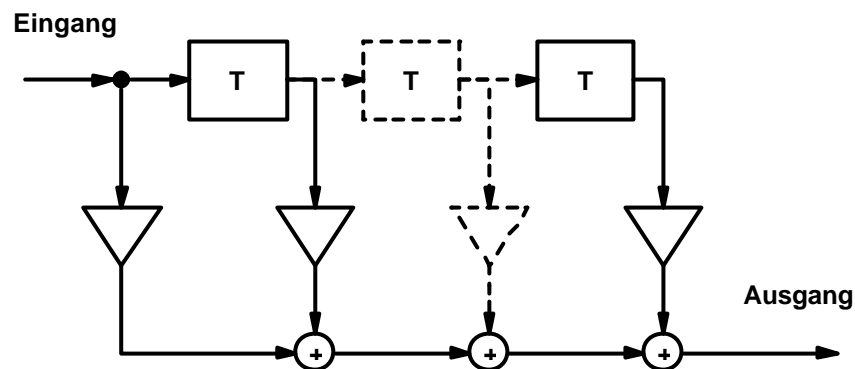


Abbildung 21: FIR-Filter

Vorteile von FIR-Filtern:

- Linearphasige Filter möglich (alle Frequenzen werden gleich verzögert)
- Immer stabil (kein Aufschwingen möglich)
- Geringe Störempfindlichkeit (die Anzahl an Verzögerungsgliedern bestimmt, wie lange eine Störung nachwirkt)

Nachteile:

- Hoher Aufwand für große Filtersteilheit
- Keine Nachbildung analoger Filter möglich

7.3 IIR-Filter

IIR-Filter (IIR = Infinite Impulse Response) besitzen eine theoretisch unendliche Impulsantwort, da ihr Ausgang auf den Eingang zurückgeführt wird und theoretisch eine endlose Schleife bildet. In der Praxis wird die Dauer der Impulsantwort durch die Rechengenauigkeit des Computers bestimmt.

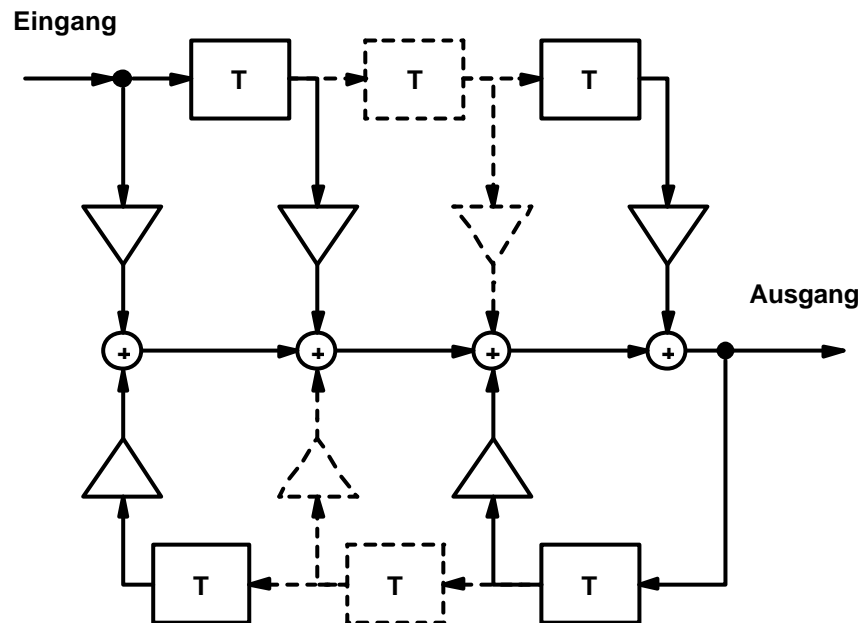


Abbildung 22: IIR-Filter

Vorteile von IIR-Filtern:

- Hohe Filtergüte mit vergleichsweise wenig Aufwand
- Nachbildung von analogen Filtern möglich
- Realisierung von Allpässen möglich (Filter, die nur die Phase beeinflussen)

Nachteile:

- Störempfindlich
- Nicht immer stabil
- Keine linearphasige Filterung möglich

7.4 Faltungshall

Die Raumsimulation über eine Faltungsoperation ist eine elegante Methode, Räume nachzubilden. Als erster Schritt muss die Impulsantwort des Raumes ermittelt werden. Dies geschieht durch Erzeugung eines Knallereignisses und Aufnahme der Raumreaktion. Die Berechnung der Faltung erfolgt über FIR-Filter. Da bei einem FIR-Filter die Verstärkungsfaktoren der Impulsantwort entsprechen, kann auch der umgekehrte Weg eingeschlagen werden. Es wird also die Impulsantwort des Raumes diskretisiert und die einzelnen Abtastwerte werden als Filterkoeffizienten (Faktoren) für das FIR-Filter benutzt.

Ein Knallereignis, das auf den Eingang dieses Filters gelegt wird, erzeugt nun also die gleiche Impulsantwort wie vorher beim Abspielen im Raum. Da sowohl im Raum als auch im Filter jedes Signal wie eine Überlagerung von Impulsen reagiert, ergibt sich eine gute Hallnachbildung.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Digitale Übertragungskette	3
Abbildung 2: Schritte der Analog/Digital-Umsetzung	4
Abbildung 3: 2Bit Parallel-Umsetzer	7
Abbildung 4: 4Bit Umsetzer nach dem Wägeverfahren	8
Abbildung 5: Beispiel-Umsetzung für 4Bit Auflösung	9
Abbildung 6: 1Bit Sigma-Delta-Umsetzer	9
Abbildung 7: 4Bit R-2R Umsetzer	10
Abbildung 8: Interleaving am Beispiel eines Textes	12
Abbildung 9: CD-Medium	15
www.cdrompage.de	
Abbildung 10: Abtastung	15
www.cdrompage.de	
Abbildung 11: DVD-Medien	17
Keyboards 04.03	
Abbildung 12: CD und DVD im Vergleich	17
Abbildung 13: R-DAT Laufwerk	18
Warstat, Görne - Studiotechnik	
Abbildung 14: R-DAT Kopftrommel	18
Warstat, Görne - Studiotechnik	
Abbildung 15: R-DAT Spuranordnung	19
Warstat, Görne - Studiotechnik	
Abbildung 16: Otari ProDigi 32-Spur	19
Warstat, Görne - Studiotechnik	
Abbildung 17: MD Aufbau und Aufzeichnungsvorgang	20
Warstat, Görne - Studiotechnik	
Abbildung 18: Huffman Code-Baum	22
Abbildung 19: Verzögerung um einen Takt	24
Abbildung 20: Delay mit Rückkopplung	24
Abbildung 21: FIR-Filter	25
Abbildung 22: IIR-Filter	26