

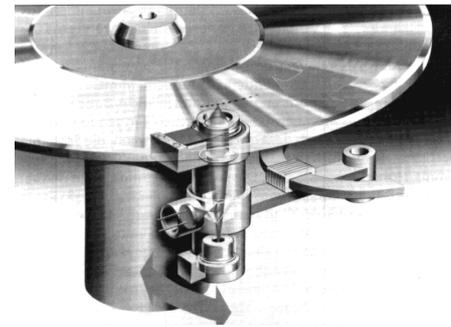
Optische Datenspeicher Der CD-Player

Fachdidaktik-Seminar Physik, Prof. Dr. T. Kuhn

Autor: Jörg Asshoff

Erstellt im April 1997

Direkt zu den [Links](#) und [Literaturhinweisen...](#)



Ursprünge der Compact Disc

Schon Mitte des 19. Jahrhunderts bereiten signifikante Ereignisse die digitale Schallaufzeichnung vor. Erste mathematische Modelle der Informationsverarbeitung liefern die Grundlagen für digitale Schaltungen und Datenverarbeitung, während etwa zeitgleich erste analoge Tonaufnahmegeräte verfügbar werden, 1887 stellt E. Berliner die Schallplatte vor. Die für Audioverstärker notwendigen aktiven Bauteile werden Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt, Ende der 20er Jahre sind die wesentlichen mathematischen Diskussionen um Kanalkapazitäten und Abstraten abgeschlossen. Die Pulsmodulation wird 1937 von A. Reeves veröffentlicht, im gleichen Jahr erhält IBM erste Vorschläge für elektromechanische Rechner. Nach dem Zweiten Weltkrieg kommen Magnettonbänder in den Handel, ein funktionsfähiger Transistor wird gebaut, die Schallplatte ist in heutiger Form herstellbar, und es liegt eine geschlossene Informationstheorie vor. Im folgenden Jahrzehnt werden alle wesentlichen Aufsätze zu Fehlererkennungs- und Korrekturcodes und minimaler Redundanz veröffentlicht, der Laser erfunden und gebaut sowie erste integrierte Schaltkreise bereitgestellt. Ende der 60er Jahre sind alle grundlegenden Komponenten digitaler Aufnahme-/Wiedergabesysteme marktreif, zwei digitale PCM-Audiorecorder auf Videobandbasis werden vorgestellt.

Der niederländische Physiker K. Compaan erweitert 1969 ein vorher bei RCA zur preisgünstigen Vervielfältigung von Hologrammen über mikroskopisch kleine Master entwickeltes Verfahren zu einer Speichermöglichkeit für Bilder aller Art auf Glasplatten. Gemeinsam mit P. Kramer stellt er 1970 bei Philips Eindhoven den Prototyp eines Projektionsbildträgers vor und entwickelt wegen diverser Unzulänglichkeiten eine darauf basierende Methode, um ein FM-Videosignal auf Glasplatten in Form von Vertiefungen kodiert zu speichern. Zum Auslesen ist wegen der Speicherdichte und Präzision ein Laser erforderlich, ein Farbprototyp steht 1972 zur Verfügung. Die Laser-Disc-Player können aufgrund der fortschreitenden Entwicklung hochintegrierter Schaltkreise bald vereinfacht werden.

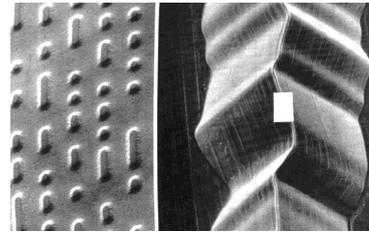
L. Ottens, ein Philips-Direktor und Vater der Compact-Cassette, weist die Audio-Entwicklungsabteilung an, die Laser-Disc-Technologie in kompakter Form (CD) für Schallaufzeichnung umzuarbeiten. Aus Qualitätsgründen wird ein digitales Aufzeichnungsverfahren (14bit, 44kHz) gewählt. Ab 1977 zeigen auch andere Firmen Prototypen digitaler Audioplatten, erste Digitalprozessoren werden in Großserie gefertigt, Polygramm entwickelt ein Trägermaterial aus Polycarbonat. Philips und Sony vereinbaren 1979 Kooperation und erklären 1980 einen gemeinsamen CD-Standard, ein Jahr später gilt dieser als allgemein anerkannt. Sharp gelingt 1981 die Massenfertigung von Laserabtasteinheiten auf GaAs-Basis, Sony und Philips beenden ihre Kooperation und entwickeln unabhängig in anderthalb Jahren die erste verkaufsfähige Generation von CD-Playern, Markteinführung Ende 1982. Ab 1984 sind Geräte der zweiten Generation mit deutlich veränderter Elektronik sowie Portables erwerbbar, bei heutigen Geräten spricht man von der dritten Generation. Heute kann die analoge LP als fast vollständig von der CD verdrängt angesehen werden.

Technische Daten des Compact-Disc-Systems

Parameter der Compact Disc		
Spielzeit	75 Minuten	60 Minuten
Plattendurchmesser	12cm	
Innenlochdurchmesser	15mm	
Aufzeichnungsbereich	46mm - 117mm	
Programmbereich	50mm - 116mm	
Plattendicke	1.2mm	
Material	transparent mit Brechungsindex 1.55 meist Polycarbonat (TM: Makrolon)	
aufgezeichnetes Signal	Digitalsignal, 4.3Mbit/s	
Drehrichtung	ab Laser: Gegenuhrzeigersinn	
Spurlage	spiralförmig, innen nach außen	
Abtastgeschwindigkeit	1.2m/s	1.4m/s
Drehzahl innen	486/min	568/min
Drehzahl außen	196/min	228/min
max. Pitlänge	3.05µm	3.56µm
min. Pitlänge	0.833µm	0.972µm
Pitbreite	0.5µm	
Pittiefe	0.11µm	
Spurabstand	1.6µm	
Spezifikationen des Audio-Bereichs der Compact Disc		
Kanalzahl	2, bei doppelter Geschwindigkeit 4	
Frequenzgang	20Hz bis 20kHz	
Systemdynamik	besser 90dB	
Klirrfaktor	unter 0.05%	
Gleichlaufschwankungen	nicht meßbar	
Spezifikationen des Digital-Bereichs der Compact Disc		

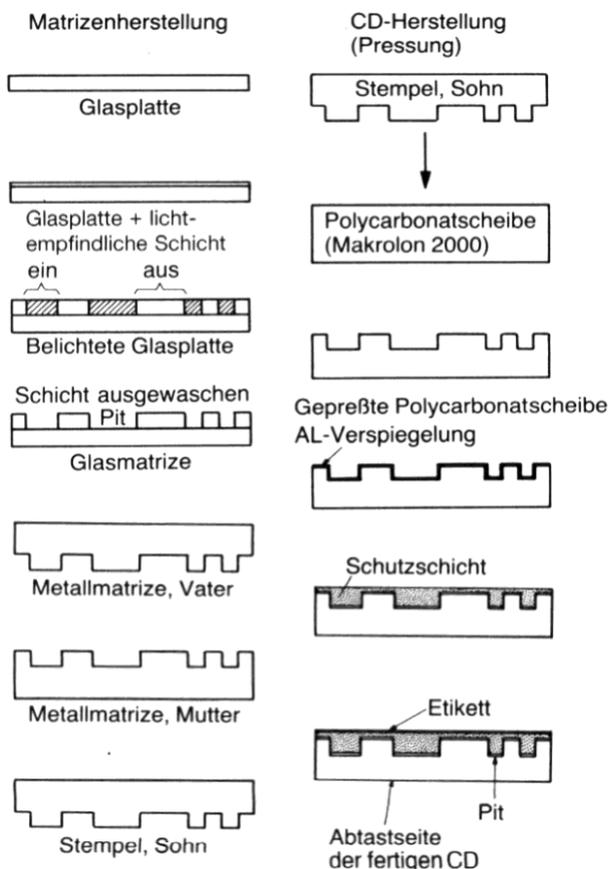
Die Informationen der CD, das sog. Programm, sind auf einer spiralförmig nach außen verlaufenden Spur angeordnet, sie belegen maximal 85% der CD-Gesamtfläche. Der Programmbereich reflektiert Licht mit deutlichen Farberscheinungen wegen seiner Mikrostruktur, den Pits. Länge und Abstand dieser kleinen Vertiefungen bilden einen seriellen digitalen Code, der die gespeicherte Information repräsentiert. Auf einer Audio-CD können maximal 99 Musiktitel gespeichert werden, dazu hat jede Scheibe ein Inhaltsverzeichnis (TOC, table of contents) und einen der Information eingelagerten Zeitcode, Texteinblendungen und weitergehende Informationen können optional aufgebracht werden. Die Abtastung der CD erfolgt kontaktlos über einen der Spur nachgeführten Laser-Interferenzdetektor von der spiegelnden Unterseite her. Die Taktfrequenz der eingelesenen Daten hängt von der Drehzahl der CD ab, diese wird zugunsten einer konstanten Datentaktrate für nach außen fahrendes Abtastsystem gedrosselt, so daß sich eine konstante Lineargeschwindigkeit (CLV) ergibt. Bei Verfahren ähnlich der Analogschallplatte spricht man hingegen von konstanter Winkelgeschwindigkeit (CAV). Für Audio-CDs sind zwei verschiedene Abtastgeschwindigkeiten mit ergo unterschiedlichen Drehzahlen und Spielzeiten von 60 und 74 Minuten spezifiziert. Die Zusammenstellung einiger der im sog. Red Book verzeichneten Systemspezifikationen findet sich in nebenstehender Tabelle.

Abtstfrequenz	44.1kHz
Quantisierung	16bit linear (simultan alle Kanäle)
Kanalratenrate	4.3218Mbit/s
Signalratenrate	3.0338Mbit/s
Kanalcodierung	EFM-Modulation
Emphasis	50µs oder 15µs
Fehlerkorrektur	CIRC (25% Redundanz)
Daten- zu Kanalbits	8:17
Mindestanforderungen an das optische System	
Standardwellenlänge	$\lambda = 780\text{nm}$
Schärfentiefe	$\pm 2\mu\text{m}$



Die Basisanforderungen an einen CD-Player sind in den Spezifikationen für das Signalformat festgehalten, der CD-Standard legt sowohl die Samplingfrequenz fest, als auch Länge des Quantisierungswortes, Datenrate, Fehlerkorrekturcode und das Modulationsschema. Ebenso erfreuen sich die Hersteller der CDs gewisser Freiheiten bei den Systemtoleranzen der Discs. Einzig kostentreibend sind die zur Herstellung der Pitstruktur

nötigen Reindräume.



Herstellung der Compact Disc

Obwohl Teile des Produktionsablaufs der CD von bereits bekannten Technologien wie z.B. Spritz-Preß-Verfahren und Metallisierung abgeleitet werden konnten, erforderte der erste Fertigungsschritt die Entwicklung eines völlig neuen Systems außerordentlicher Präzision, da sich ein Matrizenfehler durch die gesamte Produktion fortpflanzt.

Die als NTSC-Masterband mit Zeitprotokoll vorliegenden Audio-Daten werden einer stark automatisierten Schneidemaschine übergeben, die den Glasmaster erstellt. Neben dem gängigen Photoresist-Verfahren, das auch in nebenstehender Abbildung beschrieben ist, sind noch der Non-Photoresist-Process sowie das Direct-Metal-Mastering (DMM) realisiert.

Die Schneideinheit belichtet mit einem Argon-Ionen-Laser abhängig vom speziell aufbereiteten Audiodatenstrom eine völlig plan geschliffene Glasplatte (5.9mm stark, etwa 240mm Durchmesser), die im Spin-coating-Verfahren

gleichmäßig mit Fotolack beschichtet wurde. Die gesamte Mechanik ist in speziell vibrationsgedämpften und mit aufwendigen Luftfiltern abgeschlossenen Behältern untergebracht, oft wird der Glasmaster zusätzlich durch eine nur von den Maschinen zu öffnende Reinluftkassette geschützt. Anschließend wird die belichtete Platte in einer Entwicklungsmaschine behandelt, wo der belichtete Fotolack weggeätzt wird. Die Tiefe der entstehenden Pits wird von einem Laser ständig kontrolliert, der den Ätzprozeß terminiert. Zum dauerhaften Schutz (Lebensdauer: einige Wochen) wird der Master mit einer dünnen Silberschicht überzogen. Anschließend wird eine optoelektronische und akustische Qualitätskontrolle durchgeführt. Der bei weitem teuerste

Herstellungsabschnitt (mehrere tausend Mark) ist somit abgeschlossen.

Aus einem wenige Stunden dauernden Galvanisierungsverfahren (Ströme bis 100A) gewinnt man den Nickelvater, der sich am versilberten Glasmaster anlagert. Bei der Abtrennung der Vatermatrize wird die Informationsschicht des Masters zerstört. Auch für die Galvanisierungsprozesse sind Reinraumbedingungen und hohe Temperaturkonstanz sowie gut umgewälzte Bäder nötig.

Für Kleinserienfertigung wird direkt der Vater verwendet, bei Großproduktionen hingegen erstellt man galvanische Abzüge, die Metallmütter, welche wiederum eine strenge Qualitätsprüfung durchlaufen. Von ihnen zieht man mehrere Metallsöhne, die gespült nach Abschlußkontrolle mit einem Leselaser auf ein Mikron genau zentriert werden.

Im Spritz-Preß-Verfahren wird geschmolzener Kunststoff in Scheibenform gebracht und dieser Scheibe mittels der Sohn-Matrizen die Audioinformation aufgeprägt. Damit die Vertiefungen für den Laser lesbar werden, muß noch eine reflektierende Schicht, üblicherweise 50 bis 100nm Aluminium, aufgedampft werden, die anschließend durch einen ebenen Kunststoffüberzug aus Nitrolack oder Acryl versiegelt wird. Auf die Kunststoffschicht wird in einem letzten Arbeitsgang das Label aufgedruckt (kleben könnte Verzerrungen der CD hervorrufen), zusätzlich wird das Mittelloch gestanzt. Es ist unmittelbar einsichtig, daß die Labelseite bei Kratzern weit empfindlicher ist als die Unterseite der CD.

Kanalcodierung - Aufbereitung der Audio-Daten für das System CD-Player

Die Spezifikationen für CD-Player legen fest, daß die zu reproduzierenden Audio-Daten vor der Speicherung auf CD als serielles 16bit-Digitalsignal mit Samples der Frequenz 44.1kHz je Kanal vorliegen müssen. Weiterhin ist eine lineare Analog-Digital-Wandlung festgeschrieben, die Leitung wird nicht nach jedem Bit zusätzlich auf Null gesetzt (16bit NRZ, non return to zero).

Folgen Pegelwechsel im seriellen Digitalsignal nur in größeren Abständen, so stellen sie für jeden Übertragungskanal eine sehr niederfrequente Information dar, wechselt hingegen der Leitungszustand ständig, so kann das Signal als hochfrequent mit der halben Datenrate betrachtet werden. Ein nachgeschalteter Übertragungsweg mit ausgeprägten Bandpaßeigenschaften kann mit diesem Signal also nicht angesteuert werden. Ein den Eigenschaften des Übertragungskanals entsprechend aufbereitetes Datensignal bezeichnet man als Kanalcode.

Ein Kanalcode muß mehreren Anforderungen genügen, zunächst soll das Resultat gleichspannungs- und niederfrequenzfrei sein, damit es auf Magnetband aufgezeichnet werden kann und die zur Filterung der geräteeigenen Rumpelgeräusche notwendigen Hochpaßfilter ungehindert passiert. Bei der Umwandlung in einen Kanalcode werden dem seriellen Datensignal zusätzliche Pegelwechsel hinzugefügt, wobei die spektrale Energieverteilung so gewählt werden muß, daß ab der oberen Grenzfrequenz des Kanals keine informationstragenden Energieanteile mehr auftreten. Da bei serieller Datenübertragung kein zusätzlicher Zeittakt übertragen wird, muß dieser aus den Flanken des kanalcodierten Signals ableitbar sein. Außerdem ist die Codiervorschrift der verwendeten Fehlerkorrektur anzupassen.

Vom bereits erwähnten NRZ-Signal leitet man konventionelle Kanalcodes ab, indem zunächst eine binäre Eins statt durch einen high-Pegel durch einen Flankenwechsel innerhalb der Bitzelle repräsentiert wird (NRZ-I, inverse NRZ). Wegen seiner hohen Gleichspannungsanteile kann aus NRZ-I kein Zeittakt abgeleitet werden, daher geht man weiter zum Bi-Phase-Code, bei dem die binäre Eins durch eine ansteigende und die Null durch eine abfallende Flanke in der Mitte der Bitzelle dargestellt werden. In eine Folge mehrerer gleicher Wertigkeiten werden zusätzliche Flankenwechsel im Taktrhythmus, also am Rand der Bitzelle, eingefügt. Der Bi-Phase-Code ist

selbsttaktend, erfordert aber wegen der häufigen Pegelwechsel eine große Kanalbandbreite.

Für die direkte Aufzeichnung von Audio-Signalen verwendet man komplexere Kanalcodes, meist sog. MNRZ-I (modified NRZ-I). Gemäß einer festgelegten Codierungstabelle werden m Datenbits durch Hinzufügen weiterer Pegelübergänge in n Kanalbits umgewandelt. Wieder entspricht ein Pegelwechsel der binären Eins. Gängig in der Magnetbandtechnik ist der 4/5MNRZ-I ($m=4$, $n=5$). Zur Speicherung auf CD wird ein 8/14MNRZ-I verwendet, EFM (eight-to-fourteen-modulation) genannt.

Eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung von Kanalcodes ist die Lauflänge T , wird ein definierter Abstand zwischen zwei Pegeländerungen eingehalten, spricht man von RLL-Codes (run length limited). Bei diesen gängigen Verfahren gibt es einen minimalen und einen maximalen Abstand zwischen Pegelwechseln, bezeichnet mit T_{min} und T_{max} . Weitere wichtige Kenngrößen des Kanalcodes sind dessen Zeitfensterbreite (Jitter Margin) T_W und seine Digitalsumme DSV (digital sum value). Erstere entspricht der halben minimalen Lauflänge und bezeichnet den Zeitraum, in welchem trotz Gleichlaufstörungen und anderen möglichen Einflüssen der zu registrierende Pegelwechsel erfolgen muß um erkannt zu werden. Der DSV gibt an, in welchem Maße Gleichspannungsanteile im Signal vorhanden sind. Dazu zählt man high-Pegel-Bits mit +1 und low-Pegel-Bits mit -1. Ergibt diese statistische Summe über weite Strecken Null, so besitzt die serielle Information keine Gleichspannungsanteile.

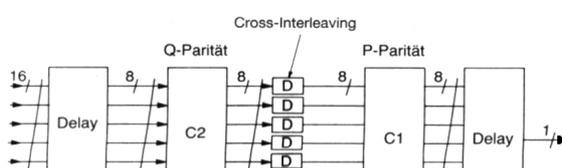
Die besprochenen Kenngrößen dienen dem Wartungsdienst als Anhaltspunkte für eine korrekte Justierung des CD-Spielers. Dazu gibt man das detektierte Digitalsignal direkt auf den Y-Eingang eines Oszillographen und synchronisiert X mit dem Systemtakt. Diese Meßpunkte sind in fast allen handelsüblichen CD-Playern deutlich ausgewiesen. Man erhält ein sog. Augenzillogramm, dessen Öffnungsfläche die Qualität des Übertragungskanals widerspiegelt.

Aufnahmeverfahren und Datenformat des Compact Disc Systems

Neben den reinen Audiodaten enthält die Signalfolge auf der CD noch Informationen zur Fehlerkorrektur, Displayanzeige, Zeit- und Ablaufsteuerung. Zusätzlich wächst die Datenmenge durch die Kanalcodierung an. Der genaue Aufbau dieses dem Schneidelaser bei der Aufnahme zugeführten Datenstroms soll nachfolgend erläutert werden.

Die beiden Stereokanäle werden zunächst getrennt verarbeitet. Noch im analogen Teil des Aufnahmewegs wird eine Höhenanhebung zur Verbesserung des Fremdspannungsabstands durchgeführt, der verwendete Wert wird in die Zusatzinformationen eingebunden. Anschließend erfährt das Audiosignal durch ein Anti-Aliasing-Tiefpaßfilter eine Bandbegrenzung bei 20kHz. Dieses Analogsignal wird bei linearer 16bit-Quantisierung in ein Digitalsignal umgewandelt. Mit einem Multiplexer (MUX) vereinigt man die Daten der Stereokanäle zu einem seriellen Signal der Datenrate $2 \cdot 16\text{bit} \cdot 44.1\text{kHz} = 1.4\text{Mbit/s}$.

Bevor die digitalen Audiosignale über den weiteren Signalweg gehen, werden Maßnahmen zur Fehlerverdeckung und Fehlerkorrektur getroffen. Hierzu fügt man den Quelldaten weitere Datenbits hinzu, verschachtelt die Daten untereinander und verschlüsselt die gesamte Datenstruktur nach einem bestimmten Code. Als Fehlerkorrekturcode wird ein doppelter Blockcode verwendet.



Blockerzeugung und Hinzufügen der Korrekturdaten erfolgen im CIRC-Encoder (Prinzipschaltbild nebenstehend). Je sechs 16bit-Werte des rechten und linken Kanals werden zu einem Block von

vierundzwanzig 8bit-Wörtern, Symbole genannt, umgruppiert.

Den 24 Symbolen werden im C2-Codierer, einem Paritätsgenerator, vier Q-Symbole hinzugefügt. Anschließend erfolgt eine zeitliche Codespreizung über verschiedene Delay-Module. Diese bewirkt, daß zeitlich aufeinander folgende Daten auf der CD räumlich verteilt gespeichert sind (Interleaving), was die Fehlerkorrektur enorm begünstigt.

1 Frame 256bit					
Frame n - 1	Informationsbits 12 Symbole zu je 8bit = 96bit	CIRC Q-Parität 4 Symbole	Informationsbits 12 Symbole zu je 8bit = 96bit	CIRC P-Parität 4 Symbole	Frame n + 1
	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11	12 13 14 15	16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27	28 29 30 31	

Die 28 verschachtelten Symbole werden einem zweiten Paritätsgenerator (C1-Codierer) zugeführt, welcher das Signal um vier P-Symbole erweitert. Die P- und Q-Symbole werden dabei als Zeilen- und Spaltensummen einer Datenmatrix berechnet, man bezeichnet den am Ausgang des C1-Codierers anliegenden Datenstrom als CIRC (cross interleave Reed-Solomon code, nach den Entwicklern des mathematischen Verfahrens). Die gesamte Abfolge der nachstehenden Form bezeichnet man als Frame (Rahmen), ein Frame ist 256bit breit.

Jedes Frame enthält die Information von sechs Stereo-Abtastwerten. Ein Abtastwert wird laut Spezifikation alle 44.1kHz aufgenommen, also liegt alle $1/44.1\text{kHz} = 22.67\mu\text{s}$ ein Wert vor. Eine Gruppe von sechs Abtastwerten muß also alle $6 \cdot 22.67\mu\text{s} = 136\mu\text{s}$ bearbeitet werden. Damit ergibt sich die Wiederholrate für Frames: $\text{Framefrequenz} = 1/136\mu\text{s} = 7350\text{Hz}$. Dieser Wert ist von besonderer Bedeutung, da er sämtliche anderen Taktfrequenzen im Compact-Disc-System mitbestimmt

Wie bereits erwähnt, befinden sich auf der CD zusätzliche Daten über den Inhalt der abgespeicherten Informationen, man nennt diese Daten Kontrollsignal. Ein Kontrollsignal ist ein 8bit-Symbol, das nach jeweils sechs Abtastwerten der bisherigen Framestruktur hinzugefügt wird. Man nennt die entstehende Informationseinheit erweitertes Frame, sie hat einen Umfang von 264bit.

Kontrollsignal und Steuersignalblock, EFM und endgültige Framestruktur

Die jedem Frame hinzugefügten acht Kontrollbits werden oft als C&D-Bits (control and display) und mit den Buchstaben P bis W bezeichnet. Da ein Kontrollsymbol längst nicht für alle anfallenden Zusatzinformationen ausreicht, faßt man derer je 98 zu einem Steuersignalblock zusammen. Die darin enthaltene Information nennt man subcode.

Der 98bit lange Datenblock enthält acht getrennte Kanäle (bitparallele wortserielle Datenverarbeitung). Bei der bereits genannten Framefrequenz von 7350Hz wird alle 75Hz = $7350\text{Hz} / 98$ ein kompletter Subcodeblock gebildet. Diese Einteilung bestimmt auch den Zeitcode, mit dem die Spielzeit eines Musikstückes angegeben wird, jede Sekunde ist in 75 Zeiteinheiten untergliedert.

Die Inhalte der nach den Bits benannten Kanäle P bis W sind genormt, 1984 erfolgte die letzte Revision.

Der P-Kanal enthält nur Bits, die Start und Ende der Musikstücke signalisieren, sog. flagbits oder Kennzeichenbits. Im Einlaufbereich der CD liegt der P-Kanal konstant auf low. Zwei bis drei Sekunden vor dem ersten Titel erfolgt ein Wechsel auf high, während des Musikstücks liegt der Pegel wieder auf low. Zwischen den Titeln springen die P-Bits wieder auf high, auch nach Ende des letzten Musikstücks folgen zwei bis drei Sekunden high-Pegel. Im Auslaufbereich (lead-out) liefert der P-Kanal ein 2Hz intermittierendes Signal.

S0	S1	Kontroll	ADR	data	CRC
2bit		4bit	4bit	72bit	16bit
98bit = 1 Steuersignalblock					

Der Q-Kanal enthält alle Informationen, die der Mikroprozessor der Ablaufsteuerung im CD-Spieler benötigt. Nebenstehend ist die Datenstruktur angeführt.

Die beiden S-Bits dienen der Synchronisation. Die Kontrollinformation kennzeichnet Aufnahme- und damit Abspielverfahren: 0000/0001 steht für zwei Kanäle ohne/mit preemphasis, 1000/1001 für 4Kanal ohne/mit Höhenanhebung.

Die ADR-Bits enthalten einen Code für die Betriebsart des Q-Kanals. Für ADR=0001 (mode1) enthält der Kanal Angaben über Anzahl der Titel, Indizierung, Einzel- und Gesamtspielzeit. Bei mode2 (0010) liegen Katalogisierungsdaten und bei mode3 (0011) eine ISRC-Identifikation vor. Daten für mode2/3 sind nicht auf jeder CD enthalten, viele Abspielgeräte können diese Informationen nicht auswerten.

Die 72 Datenbits enthalten abhängig vom Betriebsmodus die Informationen, aus denen unter anderem die Displayanzeige abgeleitet wird. Da die C&D-Bits nach CIRC-Codierung eingefügt werden, ist eine eigene Fehlerkorrektur nötig, die sechzehn CRC-Bits enthalten diese Redundanzinformation.

Q-channel data: 72bit = 9 · 8bit; lead-in								
TNO	POINT	MIN	SEC	FRAME	ZERO	PMIN	PSEC	PFRAME
8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit
Q-channel data: 72bit = 9 · 8bit; program-area								
TNO	X	MIN	SEC	FRAME	ZERO	AMIN	ASEC	AFRAME
8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit	8bit

In der meist verwendeten mode1-Betriebsart werden aus den Datenbits des Q-Kanals die Display-Anzeige und die von der Ablaufsteuerung benötigten Kontrollinformationen erzeugt. In nebenstehender

Tabelle sind die leicht unterschiedlichen Datenstrukturen für Eingangs- und Programmbereich aufgeführt.

Die Blöcke im Einlaufbereich bilden die TOC (table of contents), das Inhaltsverzeichnis einer CD, zur Erkennung wird die TNO auf 00 gesetzt. Die TOC wird aus den POINT-Feldern zusammengesetzt, sie enthalten die Nummer des Titels, auf welchen sie "zeigen". Die Lage des

Titels auf der CD wird als absolute Anfangszeit in PMIN, PSEC und PFRAME als sechsstellige BCD-Zahl angegeben, es gilt (Subcodefrequenz) $1\text{sec} = 75\text{frames}$. Außerdem kann POINT die hexadezimalen Werte A0, A1 und A2 annehmen, bei A1 findet sich in PMIN die Nummer des letzten Titels, bei A2 steht in der Pointerzeit der Anfang des lead-out-Bereichs, was natürlich der Gesamtspielzeit entspricht. Mit diesen Werten leiten CD-Player meist die Anzeige nach Einlegen einer Disc her. Jeder Verzeichniseintrag wird zweimal direkt und die TOC über den gesamten Einlaufbereich wiederholt, im lead-out ist TNO = AA.

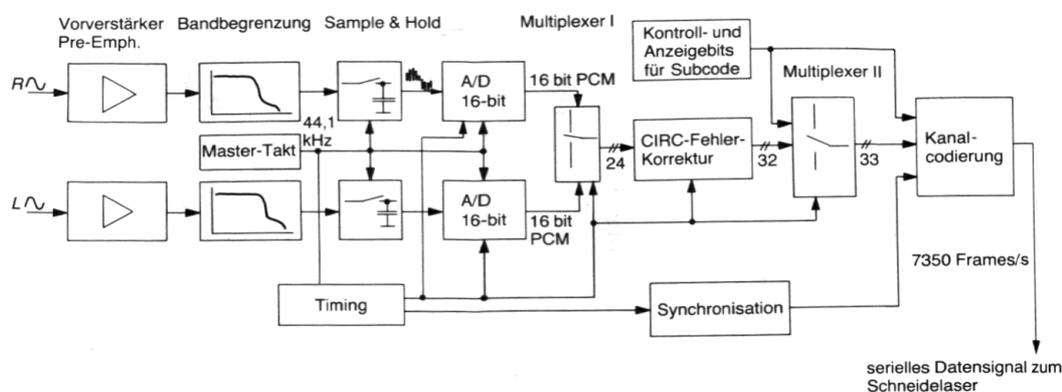
Die 24 MIN-, SEC- und FRAME-Bits bilden den Zeitcode der CD (sechsstellig BCD), er beginnt am Plattenanfang mit 0. Eine Pause wird als negativer Zeitvorlauf (Zeitcode-Erniedrigung) realisiert.

Im Programmbereich steht die Gesamtspielzeit des jeweiligen Titels in AMIN, ASEC und AFRAME, in X kann der Titel in 99 Teile indiziert werden, ZERO ist ein informationsloses 8bit-low-Signal.

Bei Modus-2-Betrieb des Q-Kanals werden nur maximal 99% der Subcode-Blöcke wie bereits beschrieben verwendet. Die verbleibenden enthalten die Katalognummer der CD als 13stellige BCD-Zahl, ein 12bit ZERO sowie die Angabe AFRAME. Die Katalogisierung erfolgt nach UPC/EAN.

In der Modus-3-Betriebsart werden mindestens 1% der Subcode-Blöcke zur Speicherung von ISRC-Informationen genutzt. Zunächst bilden zwei 6bit-Felder die Länderkennung, darauf folgend drei weitere den Eigentümercode. Es folgen zwei low-bits und anschließend im BCD-Format zweistellig das Aufnahmejahr und fünfstellig die Seriennummer der Aufnahme. Abschließend folgen ein 4bit-ZERO und die AFRAME-Angabe.

Für die noch nicht beschriebenen Subcode-Kanäle R..W erfolgte 1984 eine umfangreiche Normung., bisher sind vier Betriebsarten festgelegt. Die Informationen dieser Kanäle dienen zur Darstellung von Schrift- und Bildgrafik auf einem anzuschließenden Monitor, sie werden bisher kaum genutzt.



Nach dem Hinzufügen des Kontrollsignals zum CIRC-Block besteht ein einzelnes Frame nun aus 33 Symbolen. Um die Information an die

Systemeigenschaften des CD-Players anzupassen, muß eine Kanalcodierung vorgenommen werden. Diese erfolgt nach dem EFM-Verfahren, bei welchem aus jedem quellcodierten 8bit-Symbol ein 14bit-kanalcodiertes Datenwort erzeugt wird, eine binäre Eins repräsentiert ein Flanke in der Bitzellenmitte.

EFM verwendet man, weil Untersuchungen in der Entwicklung der CD-Player ergeben haben, daß eine sichere Übertragung nur erfolgen kann, wenn zwischen zwei binären Einsen mindestens zwei binäre Nullen auftreten und wenn nie mehr als zehn binäre Nullen aufeinander folgen. Damit ergeben sich sofort die bereits bei den Kenngrößen erläuterten Lauflängen zu $T_{\min} = 3\text{bit}$ und $T_{\max} = 11\text{bit}$. Die 8bit-Symbole können 256 verschiedene Werte darstellen, erfüllen aber nicht die Lauflängenbegrenzung. Erst bei 14bit-Datenworten genügen 267 der mehr als 16000 möglichen Kombinationen den Anforderungen der Übertragungsstrecke, von denen man noch die elf ungünstigsten streicht.

Gemäß einer in den technischen Spezifikationen festgeschriebenen Übersetzungstabelle wird jedem 8bit-Symbol bei EFM eins der 256 für den Kanal günstigen 14bit-Worte zugeordnet, im CD-Player ist diese Tabelle als ROM realisiert. Damit wird der Hardware-Aufwand weitestgehend auf die Aufnahmeseite verlagert, der CD-Player kommt mit einfachen Bauteilen aus.

Um die bereits erwähnte digitale Summe DSV, also den Gleichspannungsanteil der Übertragung zu optimieren, folgen nach jedem 14bit-Wort drei informationslose Mergin-Bits (Koppelbits), deren Wertigkeit so gewählt ist, daß die Lauflängenbegrenzung erfüllt und wenn möglich zudem die DSV erniedrigt wird. Man erreicht in der Praxis, daß im abgetasteten Datensignal keine Störanteile im Bereich der Servosteuerersignale auftreten.

Um später im CD-Player die einzelnen Frames aus dem Datenstrom selektieren und die Drehzahl der CD synchronisieren zu können, werden noch 24 Synchronisationsbits an den Anfang eines jeden Frames gestellt. Sie haben immer die Wertigkeit 100000000001000000000010 und werden über drei Mergin-Bits an die bisherige Frame-Struktur angekoppelt, in der Pitstruktur stellen eine maximale Pitlänge mit anschließender maximaler Pitpause dar.

Das endgültige Frame mißt also $24_{\text{sync}} + 14_{\text{C\&D}} + 112_{\text{P/Qparity}} + 102_{\text{mergin}} + 336_{\text{audio}} = 588_{\text{bit}}$, den Kanalbits. Mit der Framefrequenz 7350Hz ergibt sich im Übertragungskanal CD-Player ein Datenstrom von $7350_{\text{Hz}} \cdot 588_{\text{bit}} = 4.3218_{\text{Mbit/s}}$, ein Bit wird also in 231.39ns übertragen. Für die beiden Abspielgeschwindigkeiten ergeben sich minimale Pitlängen von ca. 1µm und maximale von ca. 3µm.

Aufbau und Funktion von CD-Playern

Jeder CD-Player teilt sich in zwei Hauptbereiche auf: den Signalverarbeitungsbereich und den Steuer-Regelsektor für das Laufwerk. Zur Wiedergabe der auf der CD gespeicherten Informationen wird die Pitstruktur berührungslos mit einem Laser abgetastet. Die Abtastung erfolgt hierbei von der Rückseite der CD, der Transparenzschicht aus. Die verspiegelte und von den Pits (aus Sicht der Unterseite auch als bumps, Erhöhungen, bezeichnet) strukturierte Informationsebene moduliert das reflektierte Laserlicht, das dann in einer Fotodetektoreinheit in eine elektrische Signalform umgewandelt wird.

Die Audiodaten gelangen vom Abtastsystem durch eine Reihe von Verarbeitungsstufen, bis schließlich das analoge Signal am Ausgang bereitsteht. Dieser Datenpfad besteht bei Abspielgeräten der aktuellen Generation aus Elementen wie Datenausleser mit Zwischenspeicher und ggf. shock-protection-memory, De-Interleaving-RAM, Fehlerkorrekturschaltungen, Oversamplingfilter, D/A-Wandler und analogen Ausgangsfiltern.

Der Steuerbereich kontrolliert die mechanischen Systeme des Players: Disc-Antrieb, Spurhaltung und Autofocus des Abtaststrahls. Außerdem werden Tastaturabfrage und Displayanzeige hier abgearbeitet. Heute ist die sog. Ablaufsteuerung meist in einem herstellereigenen VLSI-IC untergebracht.

Der Abtastlaser muß immer genau fokussiert sein und der sehr feinen Pitspur exakt folgen können. Das Resultat ist ein hochkomplexes Abtastsystem, der sog. Pick-Up mit integriertem Zwei-Achsen-Element für Fokus- und Spurkontrolle, das von Servokreisen mechanisch gesteuert wird, die Servos verwenden die Signale vom Abtaster zur horizontalen und vertikalen Justage relativ zur Plattenoberfläche.

Ein schneller Elektromotor treibt eine in die Disc greifende Haltemuffe mit konstanter Kineargeschwindigkeit, d.h. die Drehzahl der CD variiert abhängig von der Position des Lasers. Ein

weiterer Servokreis nimmt mit Hilfe der gelesenen Daten selbst eine Feinregulierung vor und ermöglicht mit Hilfe des rückgekoppelten Systemtakts eine konstante Datenrate.

Die von der CD gelesenen Daten müssen decodiert werden, um das Audiosignal wieder in analoge Form zu bringen. Die EFM-Daten werden demoduliert, Fehler werden von den Korrekturschaltungen gefunden und wenn möglich korrigiert, die Hörbarkeit von Flächenfehlern wird durch Interpolation und "weiches" Muting minimiert. In vielen Playern werden diese korrigierten Daten an einen digitalen (meist "optischen") Ausgang geschickt, bevor sie in die analoge Form rückgewandelt werden. Mit Digitalfiltern wird das Signal überabgetastet (oversampling), damit Aliasing-Komponenten von analogen Ausgangsfiltern mit geringer Flankensteilheit leichter entfernt werden können. Für die eigentliche Digital-Analog-Wandlung werden je nach Prinzip ein oder eine gerade Anzahl von D/A-Wandlern verwendet.

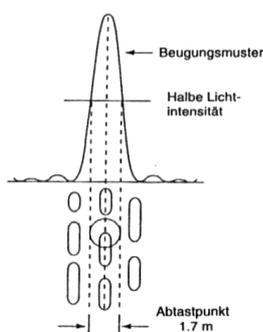
Eine letzte Analogstufe bildet die Schnittstelle zur Außenwelt. Meist erzielt sie nur 1:1-Verstärkung bei Wandlung auf möglichst geringe Ausgangsimpedanz zugunsten störungsempfindlicher Signalübertragung.

Der elektrische Aufbau der CD-Player hat seit der Einführung des Systems zwei wichtige Entwicklungsschritte vollzogen. Die Player der ersten Generation verwendeten für die D/A-Wandlung Multi-Bit-Wandler mit nachfolgenden äußerst steilen Analogfiltern. Die zweite Generation blieb bei den genannten Wandlern, ersetzte aber die steilen Analogfilter durch digitale Oversamplingfilter vor der eigentlichen Wandlung.

Die aktuelle dritte Playergeneration behält die digitale Filterung bei, benutzt aber Ein-Bit-D/A-Wandler. Diese zwei großen Evolutionsschritte - Oversamplingfilter und 1bit-D/A - wurden durch die Entwicklung von leistungsfähigen schnellen Signalprozessoren möglich, die eine Vielzahl von Multiplikationen und Additionen nach teils festen Schemata äußerst schnell erledigen.

Technische Weiterentwicklungen sind einerseits bei höherer Speicherintegration unter Verwendung kurzwelligerer Laser zu erwarten (z.B. 635nm rot und 0.6mm Dicke bei single layer Digital Versatile Disc DVD: 4.7GByte), andererseits wird bereits nach geeigneten teilreflektierenden Materialien geforscht, um Mehrschicht-DVD zu realisieren, bei denen Datenebenen durch unterschiedliche Fokussierung abgefragt werden können, derzeit erreicht man mit dual layer unter Verwendung von Gold als Reflektor 8.5GByte. Eine herkömmliche Audio-Disc enthält "nur" 780MByte. Der Versuch, Audio-CDs mit 20bit Sample-Auflösung anstelle der üblichen sechzehn zugunsten einer verbesserten Klangqualität herzustellen, ist wohl gescheitert.

Optische Auswertung der Pitstruktur: Interferenzdetektor



Es soll zunächst unbeachtet der technischen Details erläutert werden, wie der CD-Player aus den winzigen spiralförmig angeordneten Erhöhungen auf der reflektierenden Scheibe die abgespeicherte Audioinformation zurückgewinnt. Die größte Rolle dabei spielt das Herzstück des CD-Players, der Pick-Up, eine nachführbare Einheit aus Laserstrahler, Linse und Fotodetektor.

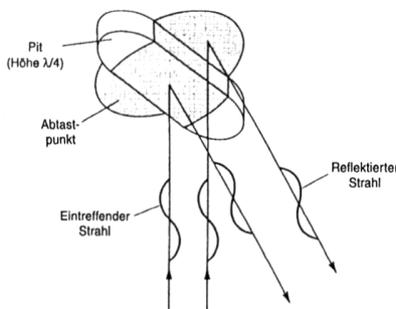
Der Laserstrahl wird so auf die CD fokussiert, daß der Lichtpunkt (Spot) auf der Unterseite der CD 0.8mm Durchmesser hat, ein Wert, der direkt mit der rechnerischen Öffnung von 0.45 der Laseroptik zusammenhängt. Andererseits ist es zum Auslesen so kleiner Strukturen wie Pits nötig, daß der Spot auf der reflektierenden Schicht einen Durchmesser von $1.7\mu\text{m}$ hat, was etwa der dreifachen Pitbreite und der doppelten minimalen Pitlänge entspricht (Abb.). Eine präzise Fokuskontrolle ist also besonders bei Betrachtung der störenden Einflüsse von Vibrationen und Höhenschlägen beim Abspielen

unerlässlich.

Die Fokussierung wird in besonderem Maß durch die Beschaffenheit der CD selbst begünstigt. Die Transparenzschicht, auf welche der Spot zunächst mit 0.8mm Durchmesser trifft, hat einen Brechungsindex von 1.55, welcher über die gesamte an jeder Stelle genau 1.2mm dicke Schicht sehr konstant gehalten wird. Dem liegt die Idee zugrunde, daß beim CD-System der Laserstrahl mit einem relativ großen Spotdurchmesser auf die Unterseite treffen kann. Die eigentliche Fokussierung auf etwa Pitgröße erfolgt dann durch den Brechungseffekt im Kunststoff der Transparenzschicht. Somit wird klar, warum Beschädigungen der Größenordnung 0.5mm auf der Transparenzseite keine Lesefehler zur Folge haben. Die Pitstruktur hingegen wird durch weit kleinere Fehler unbrauchbar.

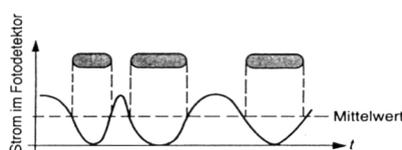
Im CD-Spieler werden Halbleiterlaser auf Galliumarsenidbasis verwendet, ihre Wellenlänge liegt bei 780 oder 790nm und ihre Abstrahlleistung wird auf einen Wert zwischen 0.5 und 1.0mW eingestellt. Leistungsregelung und Ausgleich von spannungs- oder thermisch bedingten Schwankungen erfolgen über eine direkt in den Halbleiter miteingebrachte Monitorfotodiode mit angeschlossener Vergleichsschaltung. Das emittierte Licht ist neben monochrom auch kohärent. Diese Eigenschaften der Lichtquelle, gleiche Wellenlänge und gleiche Phasenbeziehung, werden im CD-System ausgenutzt.

Der fein fokussierte Laserstrahl trifft bei optimaler Spurlage und Fokussierung entweder auf eine Fläche ohne Pit, also zu 100% auf land, oder teilweise auf ein Pit. Da der Strahl ca. dreimal so breit ist wie die erhöhte Fläche, werden je nach Pitlänge und Auftreffort zwischen 30% und 50% des Spots vom Pit reflektiert, während der restliche Teil erst vom umgebenden Bereich der verspiegelten Fläche zurückgeworfen wird, welcher im Strahlengang weiter entfernt liegt. Bei einer Pithöhe von konstant $0.11\mu\text{m}$ sind also ein pitreflektierter und ein landreflektierter Strahl um $0.22\mu\text{m}$ "ortsverschoben".



Aus den Folgerungen der Maxwellgleichungen der Elektrodynamik für Lichtwellen ergibt sich, daß die Wellenlänge des Lichts in einem Medium reziprok vom Brechungsindex des Materials abhängt. Für die Laserwellenlänge im Kunststoff der Transparenzschicht ergibt sich $\lambda_{\text{Makrolon}} = 780\text{nm} / 1.55 = 503\text{nm}$, was etwa das Doppelte der vorher diskutierten Verschiebung von pit- zu landreflektierten Strahlen ist. Anders gesagt sind die Strahlen um $\lambda/2$ phasenverschoben (Abb.).

Bringt man solche Strahlen wieder zusammen, so interferieren sie destruktiv, sie löschen sich gegenseitig aus. Da der Strahl real kaum zu gleichen Teilen auf Pit und Grund trifft und die Pithöhe selten exakt einer viertel Wellenlänge entspricht, kommt es anstelle der vollständigen Auslöschung zu einer Intensitätsmodulation des reflektierten Lichtbündels. Interferenzdetektoren sind klarerweise nur mit monochromatischem und kohärentem Licht möglich.



Das von der CD reflektierte Licht wird in einen Fotodetektor geleitet. Dieser wandelt dann das Licht und die Schwankungen in der Lichtintensität in einen intensitätsmodulierten Fotostrom um (Abb.). Dieser wird dann den Schaltkreisen des CD-Players zugeführt, welche daraus den Systemtakt, die Spur- und

Autofokusinformationen wie auch Fehlerkorrektur, Displayanzeige und schließlich die Audiodaten ableiten.

Technische Realisierungen des Abtastsystems (Pick-Up)

Eine CD kann bis zu drei Milliarden präzise in einer Spiralspur angeordnete Pits enthalten. Der optische Abtaster muß sich auf diese Spirale fokussieren, ihrer Spur folgen und ihre Daten lesen. Das komplette optische System, eine Kombination aus Laserdiode mit Selbstregelkreis, einer fest vergessenen und justierten Optik aus Linsen und Polarisatoren oder teildurchlässigen Spiegeln, dem Zwei-Strahl-Element zur Justierung von Spurlage und Fokus und aus dem Fotodetektor, muß verschiedenen Anforderungen genügen. Es muß klein genug sein, um sich unter der CD radial frei bewegen zu können und außerdem Sprünge über mehrere tausend der insgesamt 22188 "Runden" der Datenspur bei einer Titelwahl in akzeptabler Zeit ausführen. Desweiteren soll der Abtaster seine Funktion auch bei verschmutzten Discs und bei leichten Stößen oder Vibrationen möglichst fehlerfrei erfüllen. In der Konstruktionsvielfalt der heute marktreifen Pick-Ups spiegeln sich die Schwierigkeiten bei der Lösung dieser Aufgabe wider.

Ausschließlich der Laserstrahl berührt die CD, was besondere Anforderungen an die ausschließlich aus den gelesenen Daten ableitbare Spurnachführung stellt. Alle CD-Spieler verwenden ein automatisches System zur Kontrolle der Spurlage, das Auto-Tracking-System. Dieses muß mit einer Exzentrizität von maximal $300\mu\text{m}$ entsprechend etwa 60 "Runden" der Spur und mit Vibrationen der Größenordnung der Pitztiefe fertig werden. Zwei unabhängige Entwicklungslinien haben sich durchgesetzt, die Drei-Strahl-Laser und die Einstrahl-Systeme.

Die Pick-Ups müssen neben hoher Spurfestigkeit auch schnell und sicher fokussieren können, dabei sind laut Spezifikationen Höhengschläge von bis zu $600\mu\text{m}$ zu tolerieren, während der der Spot innerhalb einer Toleranz von $2\mu\text{m}$ fokussiert bleibt. Andernfalls würden mit den Informationen über Phasenverschiebung der reflektierten zu den einlaufenden Strahlen auch Audio-Daten und natürlich nicht zuletzt die Daten zur Fokussteuerung verlorengehen. Die Objektivlinse muß also in der Lage sein, bei wechselnden Abständen zur CD die Schärfe nachzustellen, die Steuerung des zuständigen Teils vom Zwei-Achsen-Element übernimmt ein eigener Servokreis.

Der Abtaster muß naturgemäß Fokus- und Spurregelung gleichzeitig erledigen, das komplexe System vereint zwei unabhängige Regelkreise mit eigener Mechanik. Beim Einstrahl-System hat sich die Push-Pull-Methode oder Gegentaktabtastung mit Foucault-Fokussierung etabliert, der Drei-Strahl-Laser arbeitet mit astigmatischer Fokussierung.

Einstrahl-Laser sind normalerweise am Ende eines Dreharms angebracht, der den Abtaster in einem Bogen unter der CD entlang führt (heute im wesentlichen in Abspielgeräten der Oberklasse). Dreistrahl-Laser befinden sich immer auf einem Schlitten, der linear angetrieben wird.

Optischer Aufbau von Drei-Strahl-Lasern

Obwohl sich einzelne Aspekte bei den verschiedenen Herstellern deutlich unterscheiden, funktionieren Dreistrahl-Systeme im Prinzip ähnlich, der optische Pfad ist untenstehend dargestellt. Die Pick-Ups werden heute meist als Einheit ohne nachträgliche Justiermöglichkeiten geliefert und bei Defekten als Baugruppe komplett ersetzt.

Die Laserdiode befindet sich im Brennpunkt einer Kollimatorlinse mit langer Brennweite, deren Aufgabe es ist, die divergierenden Lichtstrahlen parallel zu richten. In direkter Nähe der Laserdiode sitzt im Halbleiter auch die Regeldiode, die die Lichtleistung des Lasers überwacht und so eine konstante Lichtausbeute trotz thermischer und spannungsbedingter Schwankungen sichert.



Für die Spurkontrolle werden beim Dreistrahl-Laser zwei zusätzliche Lichtbündel benutzt. Zur Erzeugung dieser Strahlen passiert das Licht ein Beugungsgitter, einen Schirm mit Schlitzen, nur wenige Laser-Wellenlängen entfernt, einige Hersteller verwenden auch spezielle Blenden. Beim Passieren des Gitters wird das Licht teilweise gebeugt und daher aufgespalten.

Wird die so erzeugte Strahlengruppe wieder fokussiert, entsteht in der Mitte ein heller Hauptstrahl mit einer Reihe von schwächer werdenden Strahlen auf jeder Seite. Dieses Beugungsmuster trifft auf die Oberfläche der CD. Ein Dreistrahl-Laser liest die Daten und fokussiert mit dem Hauptstrahl, zwei Sekundärstrahlen sind nur für die Spurnachführung zuständig.

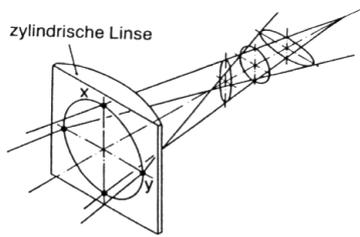
Der nächste Teil des optischen Systems, der Strahlteiler, läßt den Laserstrahl zur CD durch und lenkt das reflektierte Licht zum Fotosensor. Er besteht aus zwei Prismen mit einer gemeinsamen 45° -Fläche, so daß die Anordnung als Polarisationsprisma wirkt, in einer ausgezeichneten Richtung linear polarisiertes Licht passiert das Prisma ungehindert während Licht mit auf der Vorzugsrichtung senkrecht stehender Polarisation an der Grenzfläche im Biprisma vollständig reflektiert wird. Einige Anordnungen ersetzen das Nicol auch durch einen halbdurchlässigen Spiegel, bei dem die Lichtenergie ausschlaggebend für Transmission oder Reflexion ist.

Das Laserlicht läuft weiter durch den als Parallelrichter wirkenden Kollimator und ein $\lambda/4$ -Plättchen, einen anisotropen Kristall, der die Polarisationssebene des Lichts zur Unterstützung der späteren Trennung von einlaufendem und reflektierten Strahl um 45° dreht. Schließlich werden die drei Lichtbündel von der im Zwei-Achsen-Element sitzenden Objektivlinse auf die CD fokussiert.

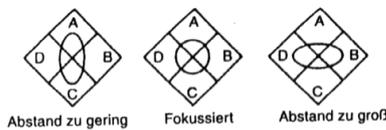
Das von der CD reflektierte Licht durchläuft erneut nach dem Objektiv das $\lambda/4$ -Plättchen und hat somit eine insgesamt um 90° gegen die ursprüngliche Richtung gedrehte Polarisation. Daher werden alle drei zurücklaufenden Strahlen am Biprisma durch eine zylindrische Linse in den Fotodetektor reflektiert, dessen Fotostrom somit der Datenstruktur der CD entspricht. Der Detektor besteht aus einer Matrix von vier rautenförmig angeordneten quadratischen Fotodioden (4-Feld-Detektor), aus einer ungleichmäßigen Verteilung der Ausleuchtung des Detektors gewinnen die Servokreise im CD-Player Informationen zur Spurnachführung und Fokuskontrolle. Als Datensignal der CD nimmt man die Summe aller vier Diodenströme, um eine maximale Intensitätsverteilung auswerten zu

können.

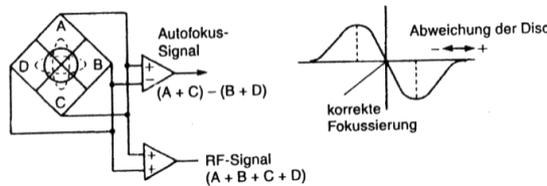
Dreistrahl-Autofokus



Diese eigenständige Kontrolleinheit mit Zugriff auf einen Servokreis der Objektivlinse ist zwingend notwendig, da Verwellungen und andere Unregelmäßigkeiten beim Abtasten der CD zu vertikalen Abweichungen der Informationsebene aus dem Schärfebereich und damit aus dem Detektionsraum des Interferenzdetektors heraus führen. Bei Dreistrahl-Systemen macht man sich die Eigenschaft des Astigmatismus zunutze, mit der zylindrischen (astigmatischen) Linse direkt vor dem Fotodetektor kann die Fokussierung direkt überprüft werden wie rechts gezeigt.



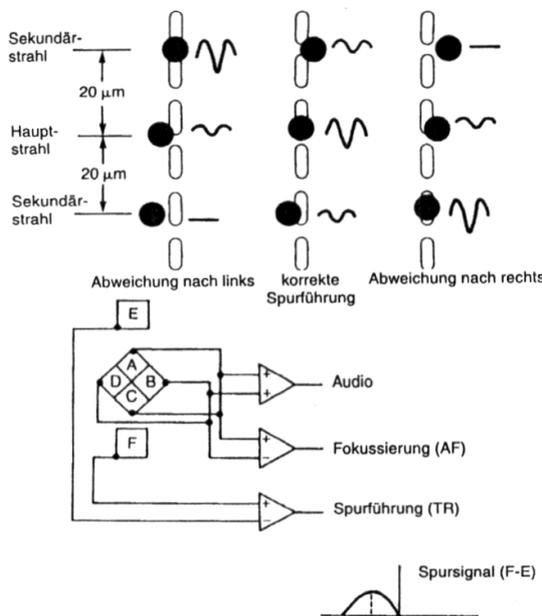
Der Krümmungsgrad der astigmatischen Linse steht in direktem Verhältnis zum Soll-Durchmesser des Laser-Spots auf der CD-Unterseite. Bei korrektem Abstand zwischen Sammellinse und CD fokussiert die zylindrische Linse eine Kreisform auf den 4-Feld-Detektor. Verändert sich der Abstand zwischen Objektivlinse und Disc, so entsteht ein Fokusfehler, der einen anderen Strahldurchmesser zur Folge hat. Ein vom Soll-Wert abweichender Strahldurchmesser wird durch die Zylinderlinse als elliptischer Leuchtfleck auf den Fotodetektor abgebildet. Je nach Fokusfehler



verändert sich die Ellipse in der horizontalen oder vertikalen Lage. Über einen im Vorverstärker integrierten Differenzverstärker erhält der Fokusservokreis die Fokusfehlerspannung, deren Verlauf rechts abgebildet ist.

Da die Reichweite des Systems begrenzt ist, sind besondere Schaltungen für eine Startfokussierung bei jedem Neustart des Disc-Motors notwendig.

Spurführung beim Drei-Strahl-Laser



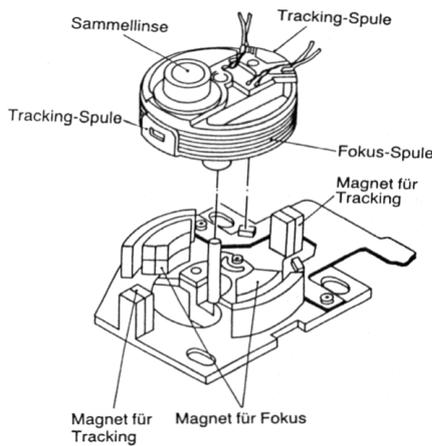
Der Spurbabstand auf einer CD beträgt 1.6µm, was für ein mechanisches Nachführsystem deutlich unter der Toleranzschwelle liegt. Man nutzt daher beim Drei-Strahl-System die Hilfsstrahlen zur Spurnachstellung. Die Auswertung erfolgt mit erweiterten 4-Feld-Fotodetektoren, die zusätzlich zur rautenförmigen Matrix diagonal oben und unten in einiger Entfernung vom Viererfeld je eine zusätzliche Fotodiode in den Halbleiterschichten eingebracht haben (vgl. Abb. rechts). Die Hilfsstrahlen im Pick-Up werden auf die zusätzlichen Dioden gelenkt.

Ist der Hauptstrahl exakt auf die Pitspur ausgerichtet, trifft ein Teil der beiden Hilfsstrahlen auf die Pitkanten, der andere Teil bedeckt die ebene Fläche zwischen den einzelnen Spuren. Sobald die drei Strahlen von ihrer Ideallinie abweichen, ändert sich

die Menge des von den Hilfsstrahlen reflektierten Lichts. Der Hilfsstrahl, der sich in Richtung Zwischenfläche bewegt, reflektiert mehr Licht, der auf ein Pit getroffene weniger.

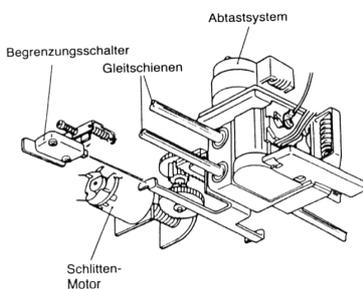
Weil die Strahlen nicht parallel, sondern hintereinander versetzt über die Oberfläche laufen, muß das Signal des vorderen um $30\mu\text{s}$ verzögert werden. Dann kann mit einem Differenzverstärker direkt ein Spurregelsignal erzeugt werden. Über den Spurservo wird daraus eine Information an die Horizontalspulen des Zwei-Achsen-Elements abgeleitet.

Drei-Strahl-Mechanik - Zwei-Achsen-Element



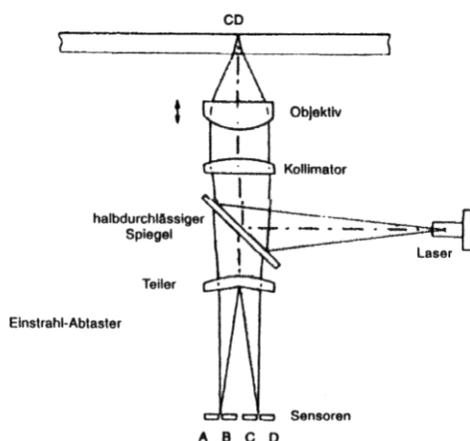
Meist werden die Steuersignale für Fokus und Spur zusammen einem zweiachsigen Stellglied zugeführt, das aus einem Magneten und einer Fokussier-/Spurführungsspule besteht. Der Abtaster befindet sich auf einer Basis, die von einem Rundmagneten eingefaßt wird. Ein kreisförmiges Joch trägt eine Spule mit getrennten Windungen für Fokus und Spur. Liegt nun ein Kontrollsignal für die Fokussierung an, bewegt sich die Spule und mit ihr die Objektivlinse auf oder ab, um den richtigen Abstand zur CD zu gewährleisten. Zur Spurnachführung dreht sich die Spule um eine Achse, damit sich das Objektiv seitwärts bewegt. Die Richtung dieser Lateralbewegung wird von der Polarität der Regelspannung vorgegeben, so daß der Laserstrahl anschließend wieder mittig verläuft.

verläuft.



Ein Dreistrahl-Abtaster muß eine lineare Bewegung ausführen, weil die drei Strahlen ihre feste Position relativ zur Pitspur beibehalten sollen. Deshalb wird der Abtaster auf einen Schlitten montiert, der sich radial unter der CD entlang bewegt. Man kann diesen Schlitten mit einer Gewindestange (Schneckengetriebe) antreiben, wobei deren Steigung immer ein Kompromiß zwischen gering für normale Abtastung und groß für schnellen Vor- und Rücklauf ist. Die höherwertigen Abspielgeräte verwenden Linearmotoren, die schnelles und gleichzeitig präzises Rangieren ermöglichen (Abb. unten).

Optischer Aufbau von Ein-Strahl-Lasern



Die Bestandteile eines Einstrahl-Systems sind in nebenstehender Abbildung aufgeführt zusammen mit der Sensoranordnung für Fokussier- und Spurführsignale. Der Laserstrahl trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel (statt des Strahlteilers), dann wird er von Kollimator und Objektivsystem auf die CD fokussiert. Wieder ergibt sich ein intensitätsmodulierter rücklaufender Strahl, der zu 50% den halbdurchlässigen Spiegel passiert. Dann wird das transmittierte Lichtbündel von einem optischen Keil in

zwei Teile gesplittet. Die zwei Teilstrahlen treffen auf vier nebeneinander angeordnete Fotodioden. Die Summe aller Ströme wird als Daten der Demodulatorstufe zugeführt.

Einstrahl-Autofokus

Aus der Einzelauswertung der vier Sensoren wird das Fokussiersignal gewonnen. Hierbei wird die sogenannte Foucault-Fokussierung angewendet. Bei korrektem Fokus erscheinen zwei scharfe Bilder zwischen den paarweise angeordneten Sensoren. Verändert sich der Abstand, verschiebt sich der Brennpunkt des Systems und die aufgeteilten Strahlen wandern enger zusammen (Abstand zur CD zu gering) oder weiter auseinander. Aus der Differenz $(A+D) - (B+C)$ wird im Fokusservokreis ein Steuersignal für den auch im Einstrahl-System vorhandenen Vertikalteil des Zwei-Achsen-Element generiert. Der Wirkungsbereich der Einstrahl-Autofokussysteme ist so groß, daß besondere Startprozeduren im Gegensatz zum Dreistrahl-Laser nicht notwendig sind.

Einstrahl-Spurführung

Die bereits erwähnten Fotosensoren erzeugen gleichzeitig auch die Korrektursignale für die Spurführung. Wenn der Laserstrahl auf die Mitte der Pitspur trifft, wird er symmetrisch reflektiert. Kommt er aber von der Spur ab, trifft keine Seite des Strahls auf mehr reflektierende Oberfläche, es entstehen weniger Interferenzen und die Reflexion ist intensiver. Der von dieser Seite kommende Teilstrahl ist also heller und bewirkt beim zugehörigen Sensorpaar eine stärkere Reaktion. Als Fehlerspannung bildet man daher $(A+B) - (C+D)$.

Durch Schmutz auf der Linse und durch Alterung kann der reflektierte Strahl jedoch zunehmend asymmetrisch werden. Um einen resultierenden permanenten Spurfehler zu umgehen, legt man eine Wechselspannung (z.B. 600Hz) an die Tracking-Spule, sodaß das Ausgangssignal der Fotosensoren moduliert wird. Wird die Schwingung unregelmäßig, so liegt ein Tracking-Fehler vor. Das Signal wird wieder gleichgerichtet und produziert ein driftfreies Spurfehlersignal, auf dessen Grundlage die bereits berechnete Spurfehlerspannung korrigiert wird.

Obwohl die meisten Einstrahl-Abtaster auf einem Dreharm montiert sind, kann man auch einen Linearantrieb benutzen. Beim ersteren beschreibt der Dreharm einen radialen Bogen unter der CD-Oberfläche. Im Drehpunkt des Arms ist ein Magnet-Spulen-System installiert, das bei Stromzufuhr den Abtaster an beliebige Stellen positioniert und auch die Spurnachführung erledigt.

Schneller Vor- und Rücklauf sowie Titelsprünge werden realisiert, schickt der Hauptprozessor direkte Signale zum schnellen Vortrieb, die aktuelle Position wird aus den letzgelesenen Subcode-Blöcken abgeleitet. Beim groben Erreichen des Ziels wird die Kontrolle dem Spurservo zurückgegeben.

1bit D/A-Wandlung bei 256fachem Oversampling

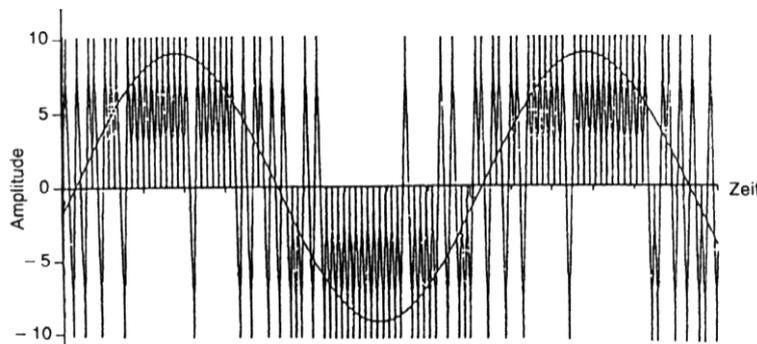
Die Technik der Multi-Bit-Wandler ist bis zu 18bit-ICs für den Einsatz im CD-Player fortgeschritten, bei denen die Klangqualität meist nur durch Aufnahmeseite und Endverstärker beschränkt wird. Andererseits hat diese Technik ihre Probleme: Die Referenzspannungen für den 18bit-Wandler müssen hochgenau und extrem stabil sein, und zur Vermeidung von Drift ist ein hoher Aufwand notwendig. Während ein gängiger 16bit-Wandler mit einer Genauigkeit von 1:65536

kalibriert werden muß, verlangt ein 18bit-Wandler ein Verhältnis von 1:262544. Mit anderen Worten: Die größere Genauigkeit erfordert in der Praxis einen entsprechend hohen Aufwand.

Deshalb wurde ein vollkommen neues Verfahren zur internen Signalverarbeitung im CD-Player erdacht. Anstatt parallele Digitalwörter mit der Geschwindigkeit der Ausgangsrate zu konvertieren, benutzte man jetzt kürzere Wörter bei höherem Tempo. Genauso, wie man mit dem Oversampling die Unzulänglichkeiten der analogen Filterung durch Verlagerung in den digitalen Bereich in den Griff bekam, wurden die Tücken der parallelen Wandlung (was einen analogen Prozeß darstellt) bei der 1bit-Wandlung bewältigt, indem die Wandlung mit Hilfe von DSPs auf digitaler Ebene verläuft. Die Mehrzahl der heutigen Player verwendet eine solche Wandlertechnik der dritten Generation.

Ein Multi-Bit-Wandler stellt die analoge Kurve als Amplitudensignal dar: Sample für Sample wird die Amplitude gemessen und weiterverarbeitet. Die Methode stößt an ihre Grenzen, wenn durch die Quantisierung Fehler in der Amplitudendarstellung entstehen. Und weil eine Vielzahl von Bits verwendet wird, von denen jedes einen unterschiedlichen Fehler enthält, variiert der Gesamtfehler mit jedem Sample., was eine Kompensation außerordentlich erschwert.

Ein 1bit-System verwendet einen grundsätzlich anderen Ansatz. Zur Darstellung des Signals wird nur ein einziges Bit verwendet, aber mit sehr hoher Frequenz. Im Gegensatz zur Amplitudendarstellung wird hier das Signal in Form von Zeitabschnitten abgebildet. Nach der Tiefpaßfilterung (Integrator) entsteht genau wie bei Multi-Bit-Methoden das analoge Signal. Durch die Beschränkung auf ein Bit bleibt ein Amplitudenfehler konstant, es entsteht kein relativer Fehler. Von Jitter abgesehen, würde ein Fehler lediglich einen Offset produzieren, der leicht wieder entfernt werden könnte. Mit zeitlicher Aufteilung kann ein Signal prinzipiell genauer dargestellt werden als mit Amplitudendarstellung.



Wie man mit einem 1bit-Signal (Ein/Aus) Zwischenwerte präzise ausdrücken kann, läßt sich vielleicht am Beispiel eines Lichtschalters zeigen: Durch ständiges schnelles Umschalten erreicht man verschiedene Helligkeitswerte im Raum erzeugen. Bleibt der Schalter aus, so ist es dunkel, ist er eingeschaltet, so ist es am hellsten.

Genauso bildet der 1bit-Wandler ein Audiosignal ab. Ein komplett positives Signal besteht aus lauter Einsen, ein komplett negatives aus lauter Nullen. Sich gleichmäßig abwechselnde Einsen und Nullen ergeben einen Signalwert von Null, andere Variationen erzeugen Zwischenwerte. Nebenstehende Abb. zeigt eine mit 1bit-Auflösung gesampelte Sinuskurve. In der Praxis müssen allerdings noch Störgeräusche mit Noise Shaping herausgefiltert werden, die für eine störfreie Reproduktion nötige Taktfrequenz von $44.1\text{kHz} \cdot 2^{16}$ (1bit-Samples pro 16bit-Wort) = 2.9GHz gegenwärtig technisch nicht preiswert realisierbar ist. Man versucht daher mit digitalen Filtern, das Rauschen aus dem hörbaren Bereich heraus zu verlagern. Ein bekanntes technisches Verfahren mit mehrfacher Filterung ist das multi stage noise shaping M.A.S.H. von Matsuhita (TM: Technics).

Nachsatz 3/2000:

Mittlerweile sind besagte 1-Bit Hochfrequenzsysteme in jedem handelsüblichen CD-Player vertreten (weshalb diese Geräte auch in Flugzeugen zu Einstreuungen neigen). Ein besonderes Rauschfilterverfahren wird nicht mehr beworben, Signalprozessoren optimieren allerdings fast immer den Höreindruck. Diese sind oft gekoppelt mit Equalizer-Systemen wie Bass-Anhebung.

Die Technik der letzten Jahre hat sich zunehmend auf Störfreiheit konzentriert, so sind immer ausgefeiltere Anti-Shock-Speicher entwickelt worden. Diese früher nach einem FIFO (first in first

out) Prinzip arbeitenden Speicher sind zunehmend mit Kompressions- und Optimierungsalgorithmen ausgestattet worden, heute erreichen CD-Spieler mit 4MB Speicher bis zu 40sec Ausfallfreiheit, allerdings auf (hörbare) Kosten der Klangqualität im Extremeinsatz (Joggen, Schlagen, etc.). Zusätzliche Sicherheit bieten verbesserte Ausleseverfahren, die auch bei Aussetzern im Datenstrom vermutlich bald benötigte Teile der CD im Voraus auslesen.

Weitere Quellen im Web:

[Facharbeit von Rudolf Thöni zum Thema, super Grafiken](#)

[Viele Sekundärinformationen und technische Daten bis zur DVD](#)

[Dr. Feickert GbR - bietet einen Jitter-Avoider mit hochgenauer Clock an. Tipp zur Klangverbesserung von nahezu jedem CD-Player, habe ihn selbst allerdings nicht getestet!](#)

Literaturempfehlungen

Claus Biaesch-Wiebke
CD-Player und R-DAT-Recorder: digitale Audiotechnik in der Unterhaltungselektronik, 3. Aufl.
Vogel-Verlag Würzburg 1992
ISBN: 3-8023-1412-3

Sehr geholfen haben mir direkte Anfragen bei den Firmen Sony, Matsuhita (Technics) Panasonic und insbesondere Philips. An dieser Stelle meinen herzlichen Dank dafür.

Ken Pohlmann
Compact-Disc-Handbuch: Grundlagen des digitalen Audio, technischer Aufbau von CD-Playern, CD-Rom, CD-I, Photo..., 1. Aufl
IWT-Verlag München bei Vaterstetten, 1994
ISBN: 3-88322-500-2
Original: The compact disc handbook, A-R Editions Inc, Madison, Wisconsin

Grundlage kann bieten:
Gernot Winkler
Tonaufzeichnung Digital - Moderne Audiotechnik mit Computerhilfe
Elektor Verlag, Aachen, 1990
ISBN 3-921608-87-2