Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 1

Artikel: Die digitale Tonaufzeichnung

Autor: Lagadec, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904533

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die digitale Tonaufzeichnung

R. Lagadec

Nach einer Periode des schnellen Fortschrittes steht die digitale Tonaufzeichnung kurz vor ihrer praktischen Einführung. Gleichzeitig scheint die längst fällige Normung Fortschritte zu machen. Der Beitrag beschreibt einen neuen Formatvorschlag für die digitale Tonaufzeichnung, der den Anforderungen der professionellen Technik entspricht und eine ähnliche Kompatibilität der Geräte zum Ziel hat, wie man sie von den heutigen analogen Aufzeichnungen her kennt.

L'enregistrement numérique du son, après une longue période d'avances techniques, va bientôt entrer dans la pratique. Simultanément, il semble possible d'en faire progresser la standardisation, dont le manque de succès présent frène les développements. L'article traite d'un nouveau format d'enregistrement numérique répondant aux exigences des utilisateurs professionnels, et visant à une compatibilité des équipements similaire à celle offerte par la technique analogique d'aujourd'hui.

Adresse des Autors
Dr. *Roger Lagadec*, Willi Studer AG, 8105 Regensdorf.

1. Ein Überblick

Die Tontechnik umfasst die verschiedensten Aufgaben wie die Aufnahmetechnik, d.h. die Kunst, Töne möglichst treu in elektrische Signale umzuwandeln, die Aufzeichnungstechnik, d.h. das Speichern elektrischer Signale auf Magnetband, die Mischtechnik, die Übertragungstechnik sowie Sendetechnik, Herstellung der Schallplatten und Kassetten usw. Wie in anderen Gebieten der angewandten Elektrotechnik beobachtet man einen wachsenden Einsatz der Ditigaltechnik. Die meisten Probleme, und auch die grössten Fortschritte, sind heute bei der Aufzeichnung sichtbar.

Der vorliegende Beitrag behandelt im wesentlichen die *löschbare* Aufzeichnung auf Band. Die eben eingeführte Compact-Disc, welche als mechanisch-optisch lesbare Endaufzeichnung extrem hoher Dichte keine weitere Verarbeitung zulässt, gehört nicht dazu. Der Einsatz eines ähnlichen Mediums für die professionelle Tontechnik, etwa auf der Basis der magnetooptischen Aufzeichnung, wird noch einige Jahre auf sich warten lassen.

Die Digitalisierung des Tonsignals erlaubt, technische Engpässe der analogen Tontechnik zu beseitigen, wenn auch mit einem beträchtlichen Aufwand. Vorausgesetzt, dass Fehler nicht auftreten oder zumindest erkannt und korrigiert werden, sind die Übertragung und Speicherung digitaler Tonsignale bekanntlich ohne Qualitätsverschlechterung möglich. Insbesondere das mehrmalige Aufzeichnen (Kopieren) ist ohne Zunahme des Rauschens möglich, eine Tatsache, die die zukünftige Studiopraxis erleichtern wird.

Die analoge Technik bietet anderseits, trotz den physikalischen Beschränkungen des Aufzeichnungsmediums, eine beachtliche Reife und Flexibilität. Analoge Tonbandgeräte sind heute ungleich vielseitiger und praktischer als digitale; analoge Mischpulte kennen noch kaum eine digitale Konkurrenz. Dank Zeitcode und Automatisierungshilfen ist die heutige analoge Tontechnik bereits von der Datentechnik erschlossen. Unter Zeitcode versteht man digitale Daten, die die laufende Zeit darstellen und die Synchronisation von Aufnahmen auf unterschiedlichen Geräten erlauben.

2. Die fehlende Normung

Von allem Anfang an ist die fehlende Normung der professionellen Digitalaudiotechnik eine Hauptsorge der Fachwelt gewesen. In den Anfängen der digitalen Tontechnik hat man weder von der Vergangenheit der Ton- und Bildtechnik, noch von der Tonbearbeitungstechnik oder der Telefonie gelernt. Auch hat man keine Rücksicht auf die Zukunft genommen. So ist zu verstehen, dass die digitale Tontechnik nicht den vor fünf Jahren vorschnell prophezeiten Durchbruch erzielt hat.

Eine Standortbestimmung im Jahre 1980 zeigte ein entmutigendes Bild: keine Norm für das «digitale Tonkabel» zur Verbindung von digitalen Tongeräten, keine allgemein anerkannte Abtastfrequenz, kein Verfahren, das beliebige Abtastfrequenzen bewältigen konnte, kein allgemein anerkanntes Format zur digitalen Tonaufzeichnung und schliesslich kein Konzept, um das erwünschte universelle Format bei Aufzeichnung und Übertragung mit den bestehenden Zeitcodes zu verbinden.

Wenn auch heute noch einige dieser Probleme nicht ausgeräumt sind, sind doch erhebliche Fortschritte zu verzeichnen. Die Technik der digitalen Abtastfrequenzumsetzung wurde entwickelt. Damit wurde es leichter, sich auf eine universelle Abtastfrequenz für professionelle Anwendungen, ohne Rücksicht auf Videofrequenzen, zu einigen. Sie wurde auf 48 kHz festge-

legt, obwohl der technisch und systemtechnisch bedauerliche Wert von 44,1 kHz für die Compact-Disc weiterbestehen wird.

Ein serielles Übertragungsformat bei digitalen Tonsignalen ist erarbeitet worden (AES/EBU-Interface). In nächster Zeit wird die Kopplung von Digitalaudio mit beliebigen Zeitcodes definiert. Schliesslich zeichnet sich auf dem zentralen Gebiet der professionellen Aufzeichnung die Möglichkeit einer Normung ab. In all diesen neuen Entwicklungen hat die schweizerische Industrie Wesentliches beigetragen.

3. Das Problem der Kompatibilität

Die analoge Aufzeichnungstechnik untersteht bestimmten Regeln, welche die Spurlage, die Entzerrung, die Bandgeschwindigkeit usw. betreffen. Hinzu kommen einfache Vorschriften für die Aufzeichnung eines allfälligen Zeitcodes. Diese Regeln sind das Ergebnis jahrzehntelanger Erfahrung und sinnvoller Normung. Kompatibilität, d.h. der freie Austausch von Bändern, ist eine Selbstverständlichkeit.

Bei der Aufzeichnung digitaler Tonsignale trifft dies leider nicht zu. Zwar ist die Aufzeichnung des Einzelbits scheinbar einfacher, braucht man doch lediglich das Band bis in die Sättigung zu magnetisieren. Die Computertechnik lehrt uns aber, wie problematisch es sein kann, Datenträger verschiedener Herkunft auszutauschen. Um die Schwierigkeiten der Normung zu verstehen, muss zuerst der Vorgang der digitalen Aufzeichnung genauer betrachtet werden.

4. Parameter der digitalen Tonaufzeichnung

Das Grundprinzip der digitalen Tonaufnahme mit stationären Köpfen ist denkbar einfach: Zur hochqualitativen Digitalisierung eines Musiksignals genügt nach heutigen Erkenntnissen eine Abtastfrequenz, die knapp unterhalb von 50 kHz liegt, sowie eine Auflösung von 16 bit. Das daraus bei Stereo resultierende serielle Binärsignal hat eine Datenrate von etwa 1,6 Mbit/s.

Die Wandlung einer analogen Grösse in ein digitales Signal innerhalb von 20 µs mit 16 bit Auflösung ist eine extrem schwierige Aufgabe. Zuerst muss das analoge Signal gefiltert werden, um allfällige Hochfrequenzkomponenten zu entfernen. Der Anteil an Klirr- und Rauschkomponenten gegenüber Vollpegel soll dabei -96 dB nicht überschreiten. Bei Signalen im Bereich von ±10 V beträgt die bei der Wandlung verlangte Genauigkeit etwa 150 µV. Bei den heute üblichen Wandlern liegt die effektiv erreichte Qualität noch unterhalb von 15 bit. Die Rückwandlung in ein analoges Signal stellt weniger Probleme. Die Aufgabe ist leichter, und der grosse kommerzielle Markt mit digitalen Abspielgeräten hat zu kostengünstigen Lösungen geführt.

5. Prinzipien der digitalen Aufzeichnung

Bei Tonbandgeräten für den professionellen Einsatz wird, aus Gründen der Flexibilität, die Aufzeichnung mit *stationären* Köpfen bevorzugt. Bei der digitalen Aufzeichnung entfällt eine Vormagnetisierung; das Band wird bis in die Sättigung magnetisiert. Bei den üblichen Bandgeschwindigkeiten (von 19,05 bis 76,2 cm/s) und Spurzahlen (typisch 8) resultieren dabei Aufzeichnungen mit kleinen Wellenlängen, die durch Staub und andere Störeffekte (Drop-outs) massiv beeinträchtigt werden können. Techniken aus der Datenübertragung werden für die effiziente Aufzeichnung und für die Erkennung und Korrektur der bei Aufnahme und Wiedergabe auftretenden Fehler herangezogen. Sie gewährleisten eine weitgehende Beseitigung der Fehler, erfordern jedoch eine Erhöhung der gesamten Datenrate (Redundanz) um typisch 50 Prozent.

Bei der Aufzeichnung mit stationären Köpfen sind die erwähnten Datenraten bzw. die damit verbundenen Aufzeichnungsdichten auf einer einzelnen Spur nicht realistisch. Die Datensignale werden daher auf verschiedene Spuren verteilt. Bei 8 Spuren, einem die Bandbreite reduzierenden Kanalcode und 19,05 cm/s kommt man auf 1000 bit/mm, d.h. auf eine Wellenlänge von 2 µm (DASH[1]) bzw. 96 kHz Bandbreite pro Spur. Eine andere technische Variante arbeitet ohne Bandbreitereduktion bei 38,1 cm/s, was einer Dichte von 768 bit/mm entspricht, bzw. mit 2,6 µm minimaler Wellenlänge oder 144 kHz Bandbreite. Demgegenüber arbeiten Geräte der Informatik mit Dichten, die etwa dreimal tiefer liegen, während die zur Zeit diskutierte digitale Kompaktkassette bereits 1680 bit/mm vorsieht. In allen Fällen ist die Dichte so gross, dass der Einfluss der Drop-outs praktisch gleich gravierend ist.

[1]) vgl. 9.

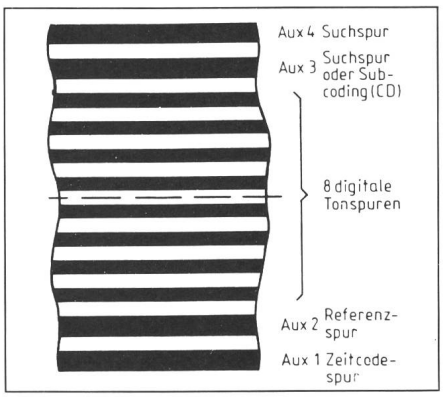


Fig. 1 Spurgeometrie und -funktion des ¼-Zoll-Bandes beim DASH-S-System

6. Band und Spurgeometrie

Es existiert noch keine Norm für ein PCM-Band. Generell wird ein Band mit physikalischen Parametern, wie sie bei der Videoaufzeichnung üblich sind, verwendet. Die Banddicke beträgt 25 bis 30 µm. Das sehr dünne und leichte Band lässt sich nicht gut manipulieren, schneiden und kleben. Die Wickeleigenschaften lassen zu wünschen übrig, was zu Kantenbeschädigungen Anlass gibt, sobald das Band mit mehr als etwa 3 m/s bewegt wird.

Man behauptet gerne, digitale Recorder könnten dank der Elektronik auf eine hochqualitative Mechanik, wie sie in der Analogtechnik üblich ist, verzichten. Wie wenig diese Behauptung stimmt, zeigt die Betrachtung der Spurgeometrie eines typischen Digitalformats. Beim Viertelzollband (6,3 mm) wird mit typisch 12 Spuren gearbeitet (Fig. 1).

Der Zwischenabstand beim Ferritschreibkopf (Fig. 2) muss minimal 0,2 mm betragen; somit beträgt die Breite der Schreibspur maximal 0,34 mm. Als minimale Breite der Lesespuren kann man etwa 0,16 mm annehmen. Die Magnetisierungsbreite der Spuren wird zwischen diesen Werten bei etwa 0,25 mm festgelegt. Sie definiert das Gebiet des Bandes, das trotz Schwankungen der Bandbreite, Temperatur, Feuchtigkeit, Bandzug, Einstellfehler und Kantenbeschädigungen beschrieben werden muss. Bei exakt zentrierten Spuren müssen Toleranzen von 45 µm eingehalten werden. Praktisch sind es etwa 35 µm. Diese Genauigkeit der Bandführung verlangt eine extrem präzise Mechanik.

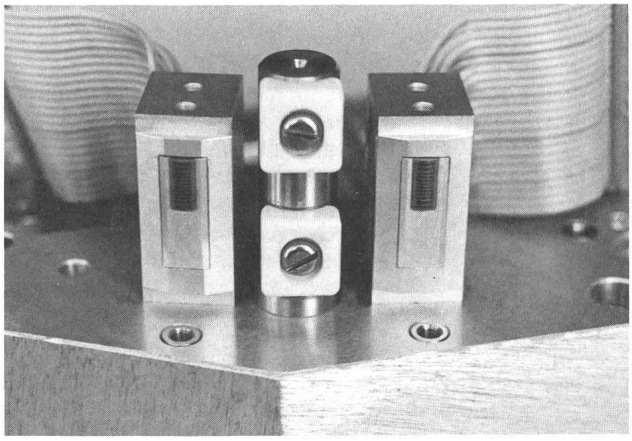


Fig. 2
Prototypköpfe für ¼-Zoll-Band, 12spurig

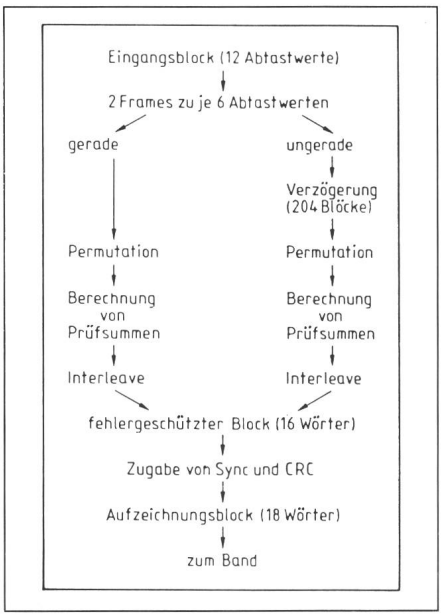


Fig. 3 Formatierung der Blöcke bei DASH

7. Formatierungstechnik

Fassen wir kurz die Techniken, die allen digitalen Aufzeichnungen gemeinsam sind, zusammen. Bei den Geräten mit stationären Köpfen geschieht die Längsaufzeichnung zuerst auf endlosen Spuren. Die Wiedergewinnung der seriell aufgezeichneten Daten bedingt eine Blockstrukturierung der Spuren mit Hilfe von Synchronisierwörtern.

Lange Folgen mit dem konstant aufgezeichneten Wert 1 oder 0 machen bekanntlich die Wiedergabe, vor allem die Taktrückgewinnung, schwierig. Anderseits beanspruchen Signalfolgen der Gestalt 01010101 ... ein Maximum an Bandbreite. Deshalb drängt sich die Verwendung eines Modulationscodes (Kanalcodierung) auf, bei welchem die Bitfolge auf eine Aufzeichnungsfolge mit günstigeren spektralen Eigenschaften abgebildet wird.

Vor der Aufzeichnung können die digitalen Signale je nach gewählter Aufzeichnungsdichte und Bandgeschwindigkeit auf mehrere Spuren verteilt werden. Es sind mehrere Methoden mit verschiedenem Verhalten bei Fehlern und bei Spurausfall bekannt.

Fehler bei der Aufzeichnung und Wiedergabe durch Bandbeschädigung, Staub, Fingerabdrücke, Banddefekte usw. sind unvermeidlich. Bei einer analogen, d.h. kontinuierlichen Aufzeichnung führen solche Fehler aus physikalischen Gründen zu einer geringen Verschlechterung des Signals, die bei stärkeren Defekten stetig zunimmt. Bei digitalen Signalen hingegen treten die Fehler abrupt auf; bei den üblichen Aufzeichnungsdichten werden durch Staubpartikel beispielsweise Hunderte von Bits unkenntlich gemacht.

Es sind mehrere Verfahren bekannt, um Fehler zu erkennen und zu korrigieren. Sie können aus Fachbüchern zur Theorie der Codierung entnommen werden. Sie unterscheiden sich im mathematischen Verfahren, in der allfälligen Verwendung mehrerer Spuren, in der Strategie zum Fehlerschutz, in der Art der Verteilung der Abtastwerte auf das Band (Interleaving), im elektronischen Aufwand usw. Verschiedene Verfahren erlauben, wie bei den Analogbändern, einen mechanischen Schnitt für Korrekturen von Bandbeschädigungen usw. Optimale Verfahren zum Fehlerschutz gibt es nur im mathematischen Sinne. Es fällt auch schwer, die Defekte einer digitalen Bandaufnahme mit einem mathematischen Modell nachzubilden.

8. Inhalt eines Formats

Folgende Punkte sind bei einem Format zu spezifizieren:

Abtastfrequenz: Üblich sind heute 48 kHz für die professionellen Anwendungen und 44,1 kHz für die Compact-Disc-Anwendungen.

Wortformat: Heute arbeitet man mit 16 bit. Eine Erhöhung der Dynamik durch Verwendung einer Block-Fliesskommadarstellung steht zur Diskussion. Sie ist kompatibel zur bestehenden 16-bit-Darstellung.

Physikalische Eigenschaften: magnetische, elektrische und mechanische Parameter des Bandes,

Bandgeschwindigkeit,

Spurgeometrie,

Organisation der digitalen Tonspur, insbesondere der Dichte, der Kanalcodierung, des Verfahrens zum Fehlerschutz und dessen Parameter sowie

Funktion und Organisation der Hilfsspuren.

Die Gesamtheit aller Parameter, die einen freien Austausch bespielter Bänder erlaubt, wird mit dem Sammelbegriff Format bezeichnet. Ein Format ist äusserst komplex, und seine Wahl ist nicht ganz frei von teilweise subjektiven Argumenten.

9. Das DASH-Format

DASH (Digital Audio, Stationary Heads) ist ein Format zur digitalen Aufzeichnung von Tonsignalen, das den Anwendungsbereich von 2 bis 48 Kanälen abdeckt. Bei der Gestaltung von DASH (Fig. 3) war ein Leitgedanke die Modularität des Formats, d.h. die Verwendung gleicher Prinzipien und Grundschaltungen für alle Ausführungsformen. Das Format ist entstanden aus Beiträgen der drei Firmen Matsushita, Sony und Studer.

DASH basiert auf der Aufzeichnung mit zwei Abtastfrequenzen (48 und 44,1 kHz) und einer Wortlänge von 16 bit. Im DASH-Format existieren immer vier Hilfsspuren. Bei 2-Kanal-Geräten dienen sie der Aufzeichnung eines Suchsignals (Mono oder Stereo), eines Referenzsignals zur örtlichen Adressierung des digitalen Tonsignals, eines herkömmlichen Zeitcodes und (bei späteren Anwendungen) einer Anzahl von Hilfsdaten und Labels. Die Bandgeschwindigkeit ist der gewählten Abtastrate proportional, wobei die Standardwerte von 19,05, 38,1 und 76,2 cm/s der professionellen Abtastrate von 48 kHz zugeordnet sind.

Bei DASH wird jede Spur für sich codiert und geschützt. Dem übergeordnet kann durch Verknüpfung der Spuren eine weitere Schutzfunktion realisiert werden. Eine Kanalcodierung namens HDM-1 reduziert die Aufzeichnungsbandbreite um 33%.

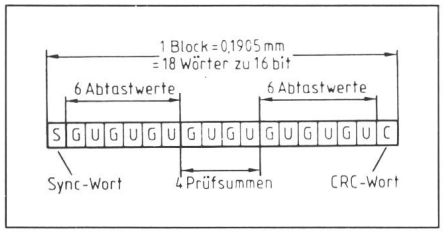


Fig. 4 DASH-Blockformat
G gerader Abtastwert
U ungerader Abtastwert

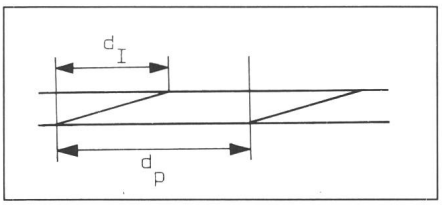


Fig. 5 Grössenordnung der Datenverteilung auf dem DASH-Band
d_I Interleave-Länge, 22,8 mm (119 Blöcke)
d_P Verzögerung gerade–ungerade, 39 mm (204 Blöcke)

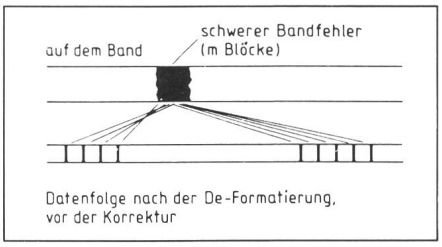


Fig. 6 Einfluss der Gerade-Ungerade-Verzögerung und von Interleave auf die Fehlerverteilung
Fehler innerhalb 30 Blöcken bzw. 5,7 mm können vollständig korrigiert werden.

Zum Schutz jeder Spur werden eine Reihe von Massnahmen getroffen:

- Die zu codierenden Daten werden in Blöcke aufgeteilt; dementsprechend findet man auf dem Band Synchronisierwörter, welche eine taktrichtige Wiedergabe erlauben (Fig. 4).
- Jeder Aufzeichnungsblock wird mit einem CRC-Wort[2]) abgeschlossen, das zur Fehlerdetektion dient.
- Vor der Aufzeichnung wird die Folge der zu codierenden Abtastwerte in zwei Teilfolgen (mit geraden und ungeraden Abtastwerten) aufgeteilt, die identisch verarbeitet, jedoch getrennt aufgezeichnet werden.
- Die Abtastwerte der dadurch entstehenden Halbblöcke (Frames) werden in vertauschter Reihenfolge aufgezeichnet (Interleave).
- Zusätzlich zu den Abtastwerten werden Prüfsummen mitaufgezeichnet. Sie erlauben eine robuste Korrektur einmal detektierter Fehler.

Die örtliche getrennte Aufzeichnung der «geraden» und «ungeraden» Daten erhöht die Robustheit bei massiven Fehlern und erlaubt insbesondere ein Schneiden der Bänder ohne wesentlichen Signalverlust.

Die Fehlerkorrektur bei Wiedergabe erfordert folgende Schritte:

- Datenentzerrung und Bildung eines, eventuell fehlerbehafteten, binären Wiedergabesignals.
- Detektion der Synchronisierung und Rasterung der Daten.
- Durchführung der CRC-Prüfung und Detektion allfälliger Fehler. Bei jedem Fehler werden alle Wörter des betroffenen Blocks als falsch markiert.
- Korrektur der Fehler mit Hilfe der Prüfsummen.
- Detektion allfälliger Sonderfehlermuster (Spleissung, unkorrigierbare Fehler, Spurverlust).

Bei hoher Bandgeschwindigkeit (DASH-F, bei 76,2 cm/s) wird *ein* Tonkanal auf *eine* ihm zugeordnete Spur aufgezeichnet. Wie erwähnt, lassen sich auch Schutzspuren bilden, die jedoch nach den gleichen Gesetzmässigkeiten aufgezeichnet werden. Bei den zwei anderen Geschwindigkeiten des Formats (DASH-M bei 38,1 cm/s, DASH-S bei 19,05 cm/s) wird ein Audiokanal auf zwei bzw. vier Spuren aufgezeichnet. Es wird eine Matrixaufteilung verwendet, die die Robustheit weiter erhöht und insbesondere das Verhalten bei Spurverlust verbessert.

Zur Illustration sollen die folgenden geometrischen Grössenordnungen dienen: Ein Block belegt etwa 0,19 mm des Bandes. Zur Berechnung der Prüfsummen werden Werte aus Blöcken verwendet, die 2,86 mm auseinander liegen. Das Frame-Interleave erstreckt sich auf 16,2 mm. Schliesslich werden gerade und ungerade Frames 39 mm auseinander aufgezeichnet (Fig. 5 und 6).

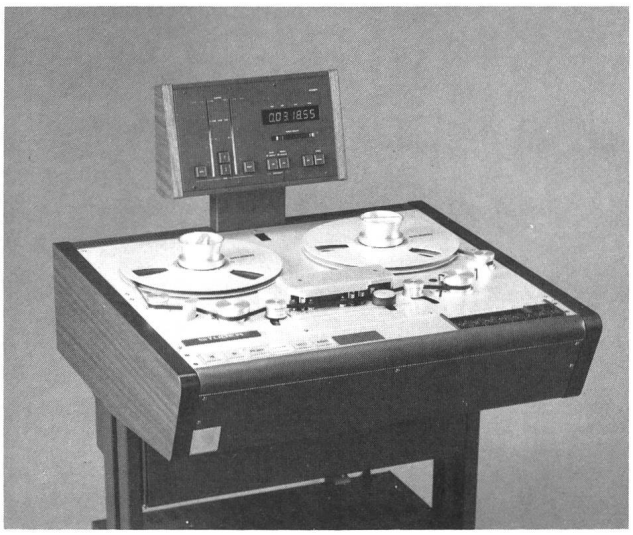
Bei einem optimalen DASH-Decodierer bleibt der vollständige Ausfall aller Spuren über 5,7 mm, entsprechend 30 Blöcken, ohne Folgen und kann vollständig korrigiert werden. Diese Aussage trifft natürlich nur dann zu, wenn in unmittelbarer Nähe der beschädigten Stelle keine zusätzlichen Fehler auftreten. Die tatsächliche Robustheit bei konkret auftretenden Fehlern lässt sich nicht ohne weiteres in Zahlen angeben.

Fingerabdrücke sind ein Hauptproblem; sie beeinträchtigen Tausende von Bits. Die praktische Erprobung zeigt, dass bisherige DASH-Recorder ein vernünftiges Mass an Fingerabdrücken zulassen, dass aber das digitale Band sorgfältig behandelt werden muss.

Zuverlässigkeit muss die Haupteigenschaft eines Digitalrecorders sein, und zwar nicht nur in der Form einer sehr niedrigen Fehlerrate beim digitalen Tonsignal. Ebenso wichtig ist die Robustheit der Maschine unter normalen Arbeitsbedingungen (Rauch, Fingerabdrücke, Beschädigung der Bandkanten). Für die betriebliche Zuverlässigkeit eines Recorders ist die mechanische Toleranz mitbestimmend.

Das DASH-Format erlaubt das mechanische Schneiden der Bänder in allen DASH-Versionen. Der Schnitt wird vertikal oder fast vertikal gemacht, die wiedergegebenen Signale

Fig. 7
Prototyp des DASH-Recorders D 820 (19 cm/s, 2 Kanäle)



[2]) Cyclic redundancy check

können elektronisch überblendet werden. Ebenso ist es möglich, durch synchrone Aufnahme elektronisch zu schneiden.

10. Zusammenfassung

Die digitale Tontechnik (Fig. 7) bietet dem Ingenieur ein faszinierendes Spektrum an Aufgaben. Zu erwähnen sind die Physik der Aufzeichnung mit hoher Dichte, die mathematisch orientierte Disziplin der Fehlerkorrektur und der Kanalcodierung, die Kunst der Signalwandlung am Interface zwischen sehr genauer analoger Schaltungstechnik und schneller digitaler Elektronik, die Präzisionsmechanik, die vielen Fragen der Software, der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, der Ergonomie und nicht zuletzt die Verbindung zur Musikwelt. In der ersten, euphorischen Phase der digitalen Tontechnik hat man nur allzu gerne das bevorstehende Ableben der etablierten, analogen Technik prophezeit - eine im Rückblick naive Erwartung. Die Aufgabe lautet heute nüchterner, digitale Geräte zu bauen, die bei einem höheren Preis ein besseres Verhältnis von Kosten zu Nutzen bieten, als es in der Analogtechnik möglich war.