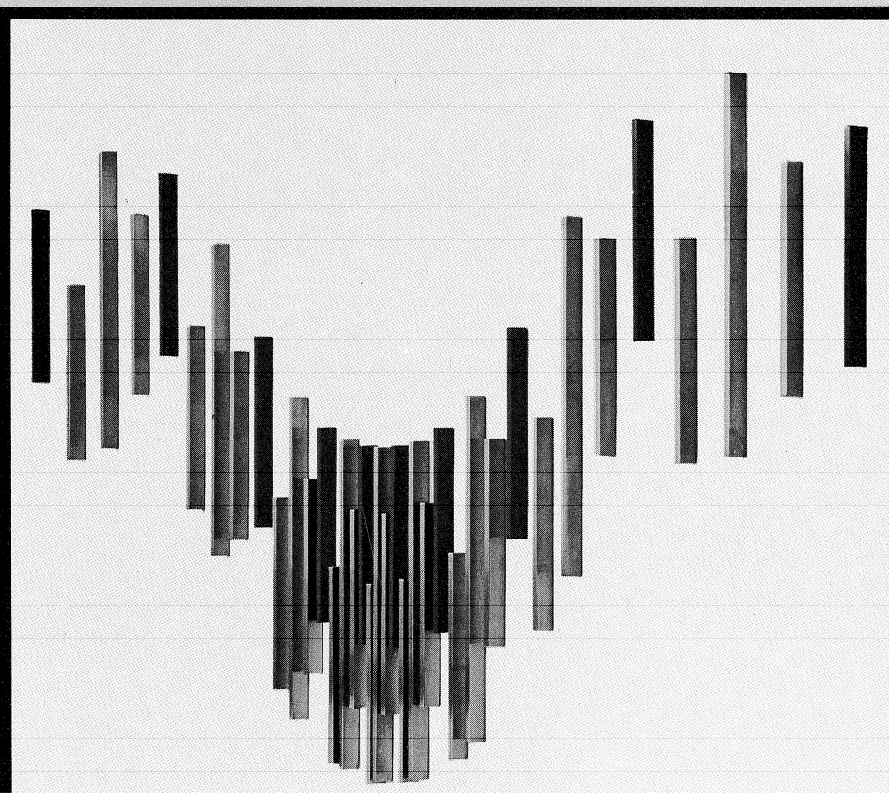


# STUDER

1011101101101 000000100 00110010 01101001  
0011011011100011 101010100111010 010011111 011100000  
010100101100001010 1001001110101010010 0110101000 10010111001  
0011100101100100110 110011010000100011000 001100110010 10001100100  
11100110 11111110 10100011010011010110100 1001101110101 1100000011110  
11110100 1010111101001001 111000111001001101010101001000000101  
01000011 0100011000010000 10001000100000100100100110100000100  
111010111101001101010010000 10000010111010110011000111 10010101  
001010000111111101 00011001 01111000 00001111 00000101  
1010101100100000 10110101 01010011 10010 10101000  
00000111100100 01001011 1100001110000111 110 00101001  
11101110 11111111 11001111011111010 10100101  
00001110 01101110100011010010011 11010110 11110010  
11101000 101111000001111111010 01111111 11101011  
11110001 0001111000111111101 01001000 00100001  
11011100 000011110001100 10100111 10011001  
01101011 0110000001 01100010 00010010

010010111100001000 011001001 01111110111  
10001111 01111 010001001  
01010 010 101111  
111 01 001  
110 1 1  
1010 1111101 1  
001 101100110 1  
1 101000101  
1 101110101101001110  
1 101111011100001010  
1 110110000  
000101011101 0101001  
001111110010  
1110011010100 1  
00110110101111 100  
0011110110000010 1001  
1010101001010110 10111101 00011000100

101100101001  
100011001001  
000000010001  
000111101011  
101000110001  
101101111011  
010000111000  
100110110011  
001010011010  
110111001001  
110110001011  
011110101001  
011101011000  
110000001100  
000101111000  
110001010001  
011100000000  
111100111100  
111011011100  
110000001100  
000100110011  
101110101101  
010000101010  
111001001001  
110110011100



111111111111  
010000111101  
001000111000  
110000111100  
000101101011  
111100010110  
111011101010  
001100110001  
001001011101  
000101101011  
010011010010  
000010110111  
011000001000  
110110101101  
101111111011  
011000100000  
110001111000  
011101111100  
001010011010  
111100111001  
111110101101  
101100000110  
001110010000  
001010110111  
111010001100

Die Titelseite zeigt eine Chromnickelstahl-Wandplastik vom Schweizer Künstler Bruno Raimondi. Dieses Kunstwerk wurde eigens für den Empfangsraum unseres neuen Hauptsitzes in Regensdorf geschaffen (1976).

# EINFÜHRUNG

Die digitale Audiotechnik ist im Kommen. Wie wir alle wissen, arbeiten bereits die ersten Prototypen. Die ersten Mehrkanalgeräte werden bald im Handel erhältlich sein. Normen zur digitalen Audiotechnik wurden vorgeschlagen und werden zur Zeit diskutiert. Die digitale Audiotechnik ist im Begriff, auch die Aufnahmestudios zu erobern. Vieles wird sich ändern, einiges könnte dabei schiefgehen.

Wird sich die Firma STUDER an dieser technischen Umwälzung beteiligen? Geht STUDER den digitalen Weg?

Eindeutig ja. Die Firma verfügt über das notwendige technische Wissen und ist seit langem mit den Bedürfnissen der Aufnahmestudios vertraut. Sie wird sich auch auf diesem Markt behaupten.

Allerdings sind wir der Ansicht, man könne die analoge Technik nicht vorschnell abschreiben. Die Geräte in heutiger Technik stellen für die Studios eine beträchtliche Investition dar. Es wäre daher völlig unwirtschaftlich, in aller Eile umzurüsten. Neuartige, verbesserte und mit mehr Bedienungskomfort versehene Maschinen in konventioneller Technik werden weiterhin parallel zu den digitalen Geräten gebaut werden. Während längerer Zeit können beide Techniken friedlich nebeneinander leben.

Für den Anwender ebenso wie für den Hersteller ist es ausserordentlich wichtig, die digitale Audiotechnik auf die richtige Art und zum richtigen Zeitpunkt einzuführen. Um Ihnen eine entsprechende Entscheidungsgrundlage zu liefern, möchten wir Sie im folgenden über die neue Technik informieren.

# DIGITALE AUDIOTECHNIK: DIE TECHNIK VON MORGEN

Wird die analoge Aufzeichnung eines Audio-signals durch eine digitale Aufzeichnung ersetzt, werden sich zwangsläufig alle wichtigen Eigenschaften der Maschine ändern. Für den Anwender sind solche grundsätzlichen Änderungen jedoch nur von Interesse, wenn die Bandmaschine dadurch besser arbeitet und bequemer zu bedienen ist. Mit dieser Broschüre möchten wir die technischen und betrieblichen Konsequenzen der Umrüstung auf Digitaltechnik schildern.

Durch die Einführung der Audio-PCM-Technik sind sicher wesentliche Verbesserungen zu erwarten. Bei einer derart komplexen Aufgabe sind aber Fehlentscheidungen nicht auszuschließen. Es zeichnet sich sogar die Möglichkeit ab, dass der Anwender der Audio-PCM-Technik mit verschiedenen, sich widersprechenden Signalnormen leben müssen. Dadurch wäre der Programmaustausch ganz wesentlich erschwert. Es ist unsere Hoffnung, dass die Anwender professioneller Studiogeräte eine klare Haltung einnehmen und zu einer realistischen und praxisnahen Norm für Audio-PCM beitragen werden.

Selbstverständlich wird der Übergang zur PCM-Technik eine drastische Verbesserung der Signalqualität mit sich bringen. Die Dynamik wird erhöht, der Rauschabstand vergrößert und der Frequenzbereich erweitert. Die bereits vertrauten Grenzen, welche die Analogtechnik einer Aufnahme setzten, werden fehlen. Sicher wird der eine oder andere sagen, damit fehle auch der Klang einer «richtigen» Aufnahme, doch zeigt eine ernsthafte Betrachtung in aller Deutlichkeit, dass die Vorteile von Audio-PCM gegenüber der heutigen Aufnahmetechnik überwiegen.

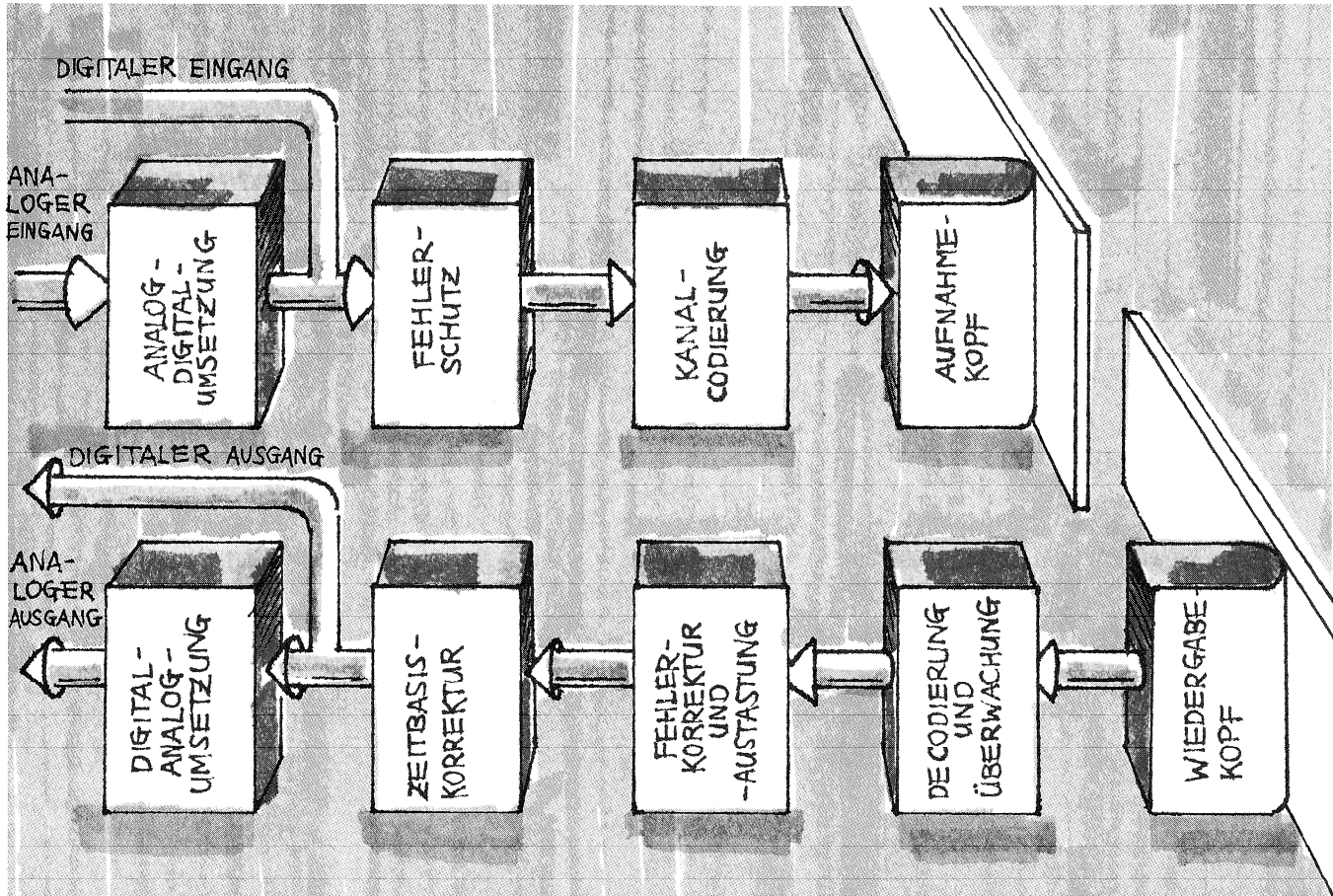
Im Idealfall soll eine Bandmaschine in Audio-PCM-Technik nicht nur einen besseren Klang, sondern auch einen erhöhten Bedienungs-komfort bieten. Da die Maschine von Grund auf digital ist, ist sie für den Einbau von «Intelligenz» prädestiniert. Wir denken zum Beispiel an eine einfache Fernbedienung, an eine echte Programmierbarkeit und einen einfachen Anschluss an andere digitale Maschinen. «Intelligente» Studiomaschinen können aber nur dann auf den Markt kommen, wenn eine einfache Norm eingeführt wird, die neben dem digitalen Audiosignal auch die notwendige digitale Schnittstelle für den Austausch von Steuer-information umfasst.

Wie schnell wird sich die digitale Audiotechnik durchsetzen? Sicher recht schnell. Hoffentlich nicht zu schnell, so dass eine sinnvolle Normierung gewährleistet bleibt. Es gibt gegenwärtig sehr viele analoge Maschinen und sehr viele analoge Aufnahmen. Digitale Studiomaschinen und digitale Programme gibt es fast keine. In 10 Jahren werden beide Techniken stark vertreten sein. Neben zahlreichen PCM-Aufnahmen wird es immer noch viele analoge Bänder geben. Die Geschwindigkeit, mit der sich PCM durchsetzen wird, hängt im grossen Masse davon ab, wann und ob überhaupt eine sorgfältige Normierung erreicht wird.

Die Bezeichnung Audio-PCM bezieht sich auf eine Vielzahl von Produkten: Spulentonbandgeräte, Videorecorder, PCM-Plattenspieler, Systeme zur Signalverarbeitung sowie Maschinen für den Unterhaltungs- und den professionellen Sektor. In dieser Broschüre werden wir uns mit dem professionellen Spulentonbandgerät befassen. Seine Einführung wird den eigentlichen Beginn der digitalen Studiotechnik signalisieren.

# DIE AUDIO-PCM-BANDMASCHINE

## DAS AUDIO-PCM-BANDGERÄT IM ÜBERBLICK



Bevor wir uns im Detail mit der Audio-PCM-Technik befassen, möchten wir einen Überblick über die Arbeitsweise der PCM-Bandmaschine geben. Obwohl die PCM-Produkte noch in den Kinderschuhen stecken, zeichnen sich bereits einige ihrer wichtigsten Eigenschaften klar ab, und es ist nicht mehr mit einer wesentlichen Änderung ihrer Prinzipien zu rechnen.

Auf der Eingangsseite der PCM-Bandmaschine sorgt ein Analog/Digital-Wandler für die Umsetzung des kontinuierlichen Audiosignals in eine Folge digitaler Abtastwerte in binärer Form. Redundante Prüfinformationen müssen beigelegt werden, um die Daten vor Aussetzfehlern (Drop-outs) bei der Aufnahme und der Wiedergabe zu sichern. Schliesslich bedarf es einer speziellen Kanalcodierung, die die Datensignale in eine Form bringt, welche Aufnahme und Wiedergabe erleichtert. Natürlich besteht die Möglichkeit, die digitalen Daten eines einzelnen Kanals auf mehrere parallele Spuren zu speichern.

Beim Abspielen werden die digitalen Daten decodiert und auf allfällige Fehler geprüft. Einfache Fehlermuster werden aufgrund der mitgespeicherten Prüfinformation sofort korrigiert. Schwerwiegendere Fehler, welche die Korrekturkapazität des Datensicherungscode überfordern, werden unterdrückt (ausgetastet). Dazu ersetzt man die fehlerhaften Abtastwerte durch einen Schätzwert, den man aus den benachbarten und fehlerfreien Abtastwerten berechnet. Schliesslich können die digitalen Abtastwerte mit Hilfe entsprechender Digital/Analog-Wandler und Filter in ein hochwertiges Analogsignal umgesetzt werden.

Soll ein Bandaustausch zwischen verschiedenen Digitalmaschinen gewährleistet sein, müssen diese Maschinen bestimmte Parameter gemeinsam haben:

- gleiche Abtastrate
- gleiches Wortformat
- gleiches Verfahren und gleicher Code der Datensicherung
- gleiche Kanalcodierung zur Aufzeichnung der binären Daten auf dem Band, und schliesslich
- gleiches Bandformat, somit
- gleiche Verteilung der Datenspuren.

Besitzen nun die verschiedenen, sich konkurrierenden PCM-Maschinen gemeinsame Parameter? Ja und nein. Der grundsätzliche Aufbau bleibt immer gleich. PCM-Fachkreise haben jedoch bisher keine einheitliche Meinung in bezug auf die wichtigsten Parameter wie Abtastrate, Datensicherungs- und -speicherungscode, Bandformat und Steuerinformation.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Vielzahl komplexer Verarbeitungsschritte notwendig ist, um digitale Audiosignale fehlerfrei auf Band aufzuzeichnen. Dementsprechend detaillierte und genaue PCM-Normen sind unerlässlich, sofern Kompatibilität und Bandaustausch Wirklichkeit werden sollen. Heute kann man sich jedoch nicht des Eindrucks erwehren, dass die Technologie zu schnell voranschreitet, um einer allgemeingültigen PCM-Normierung Raum zu lassen.

# DIE AUDIO-PCM-TECHNIK

## Digitalisierung des Audiosignals

---

Der erste Verarbeitungsschritt in der digitalen Audiotechnik ist die Umsetzung des Audiosignals in eine gleichwertige Folge digitaler Abtastwerte, die man in binärer Form darstellt. Die Auflösung und die Abtastrate der digitalen Daten sowie die Filterung, die vor der Wandlung unerlässlich ist, müssen so gewählt werden, dass die ursprüngliche Qualität des Signals erhalten bleibt.

Unter der Abtastung eines Analogsignals versteht man die Messung seiner Momentanwerte zu äquidistanten Zeitpunkten. Das Abtasttheorem gibt Auskunft darüber, wie gross die Abtastrate sein muss. Ein Audiosignal von 20 kHz Bandbreite zum Beispiel, muss wenigstens 40 000 mal pro Sekunde abgetastet werden, um den vollen ursprünglichen Informationsinhalt beizubehalten. Technisch gesehen hat das Abtasttheorem zwei wichtige Konsequenzen. Liegen Störsignale im Frequenzbereich oberhalb der Hälfte der Abtastfrequenz, so werden sie durch die Abtastung heruntergemischt und können sich im Audioband hörbar machen. Dieses Phänomen wird häufig als «Aliasing» bezeichnet. Weiter muss das Tiefpassfilter, welches das Signal von hohen Frequenzanteilen befreien soll, mit grösster Sorgfalt ausgelegt werden. Allfällige Rauschsignale und Klirrkomponenten werden dem Audiosignal zugefügt. Dies verlangt insbesondere den Bau äusserst klirrarmer und zugleich selektiver Analogfilter, was im Fall von 16 Bit-PCM keineswegs ideal ist.

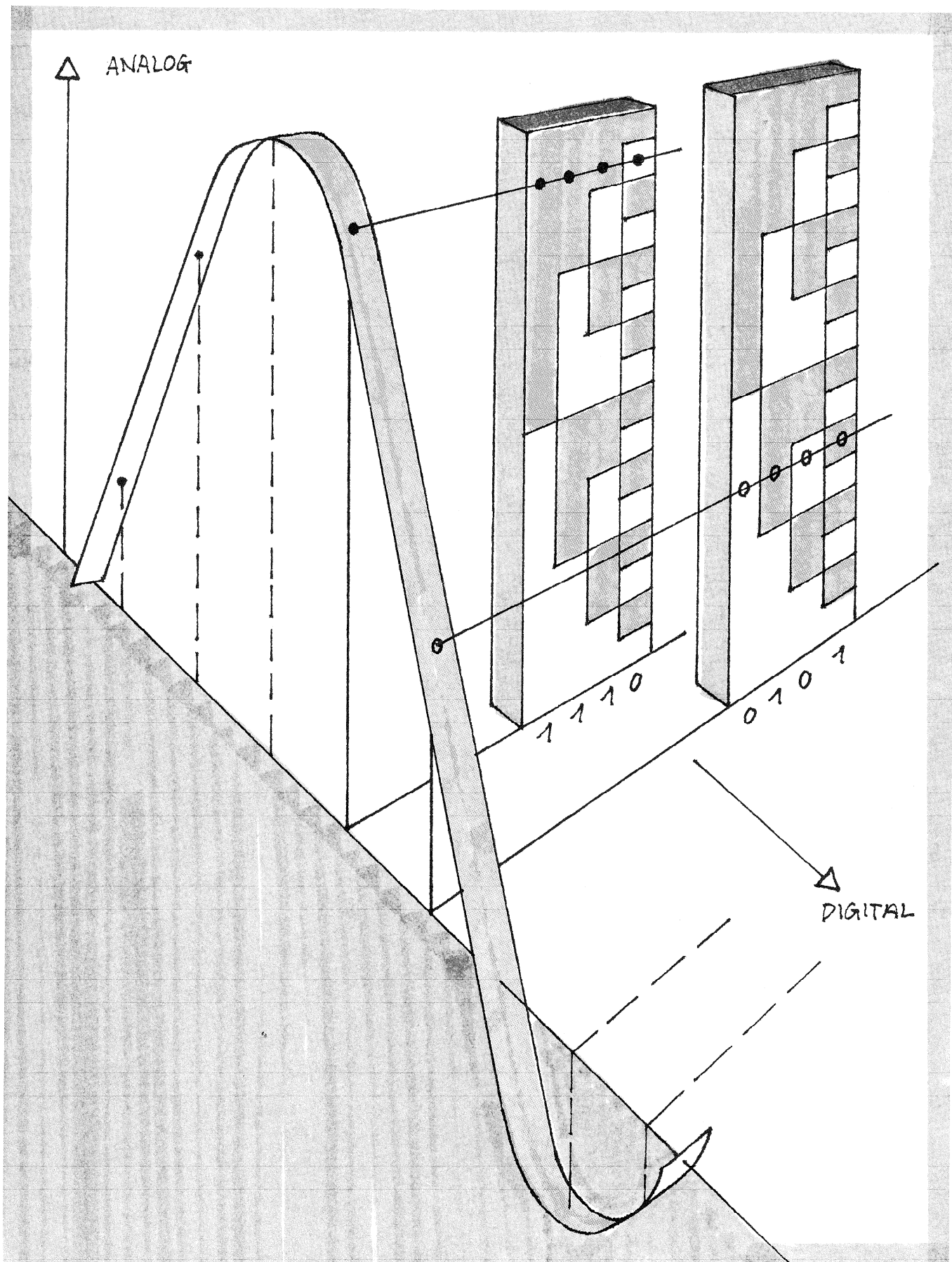
Momentanwerte des gefilterten Eingangssignals werden von einem Abtast- und Halteglied geliefert. Über einen elektronischen Schalter wird ein Kondensator bis auf die Eingangsspan-

nung geladen, und die analoge Spannung wird solange gehalten, bis ein A/D-Wandler die Umsetzung vollzogen hat. Um die Auflösung von 1: 65 000 zu sichern, die für 16 Bit-PCM charakteristisch ist, braucht man einen Schalter höchster Qualität. Der Abtastpuls muss auch sehr schmal sein: würde man Kurzzeit-Mittelwerte anstelle von Momentanwerten speichern, so ergäbe sich daraus eine Abschwächung der höheren Frequenzen. Schliesslich muss man darauf achten, dass die Abtastpulse extrem periodisch sind: eine einzige Nanosekunde Jitter verfälscht bereits das digitale Signal in unzulässiger Weise. Bis heute kennt man nur sehr wenige Abtast- und Halteglieder, die den strengen Spezifikationen von Audio-PCM gewachsen sind.

Die eigentliche Digitalisierung geschieht in einem Analog/Digital-Wandler. Beim heutigen Stand der Technik handelt es sich um hochpräzise Analogschaltungen, und Spezifikationen wie 16 Bit-Auflösung und 50 kHz-Abtastrate sind nur sehr knapp erfüllbar. Mit anderen Worten, die Digitalisierung ist eine sehr heikle und kostspielige Operation.

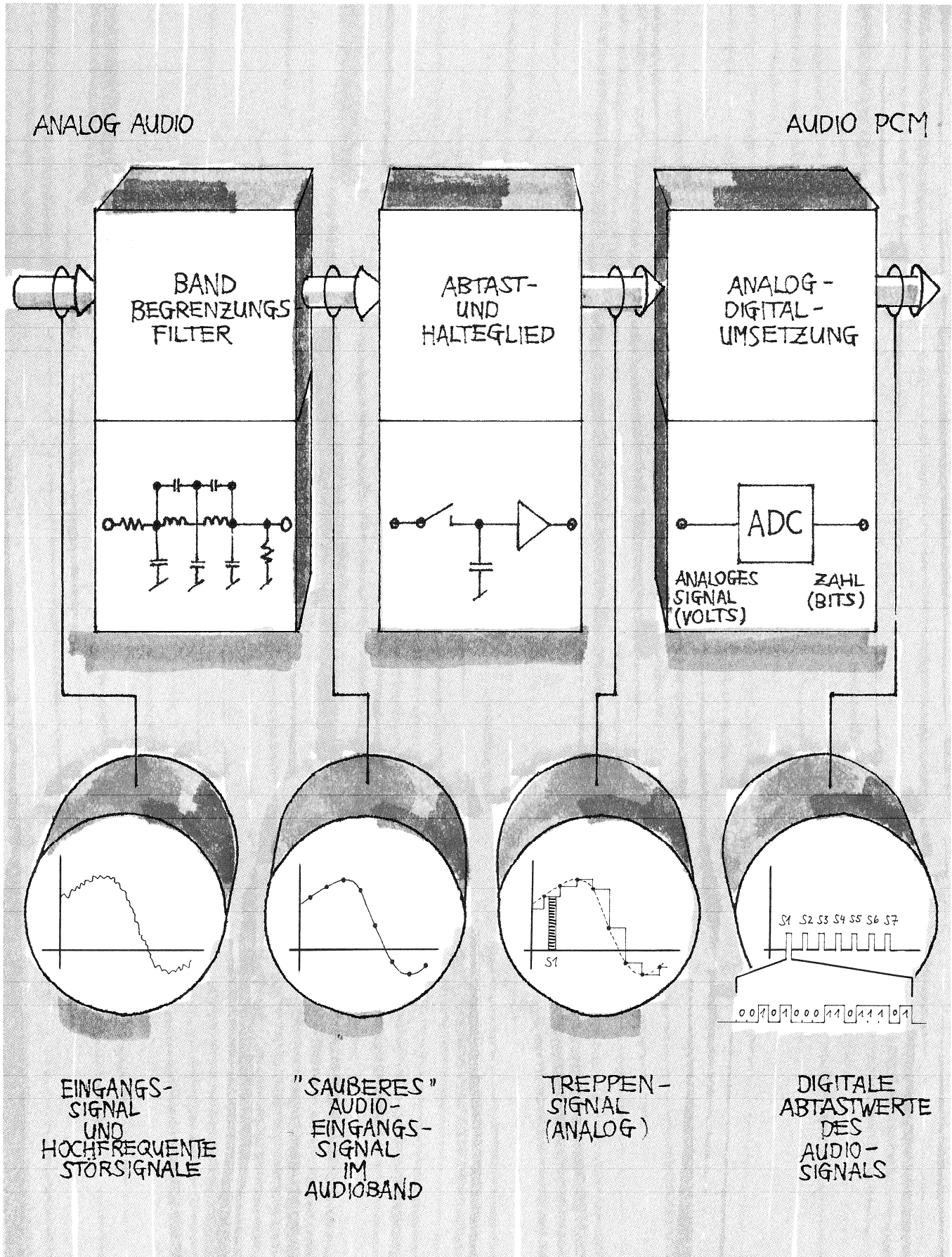
In Zukunft werden vermutlich Wandler entwickelt werden, die mit wesentlich höherer Geschwindigkeit jedoch bei niedrigerer Auflösung arbeiten. Das gewünschte digitale Signal mit 16 Bit-Auflösung wird aufgrund komplizierter Algorithmen digital berechnet. Man erhofft sich von diesen Wandlern, die weniger enge Toleranzen aufweisen, zahlreiche Vorteile: sie sollen wirtschaftlicher sein und die aufwendigen Verfahren der Eingangsfilerung und der Abtastung vereinfachen.

# DIGITALISIERUNG



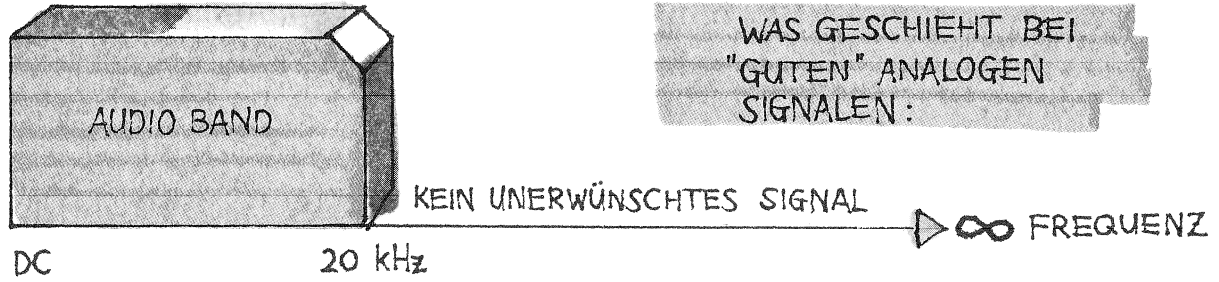


# DIGITALISIERUNG

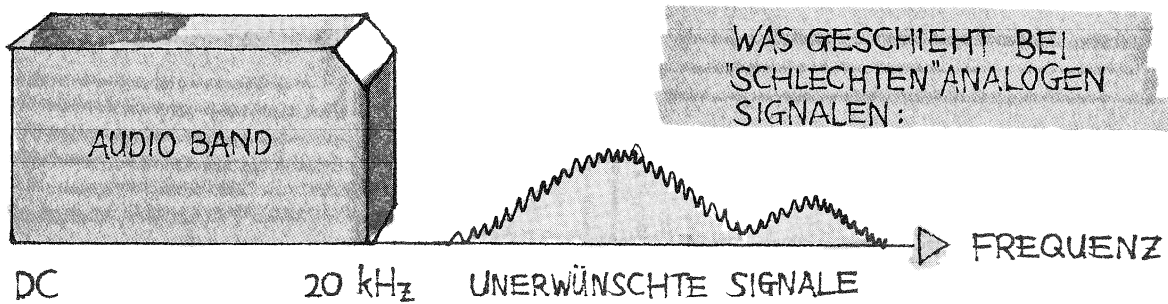
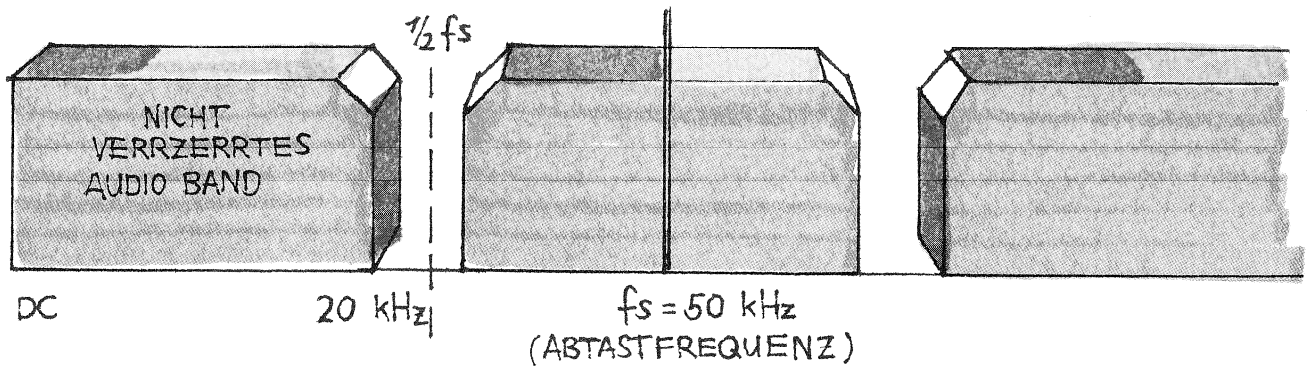


# DIGITALISIERUNG

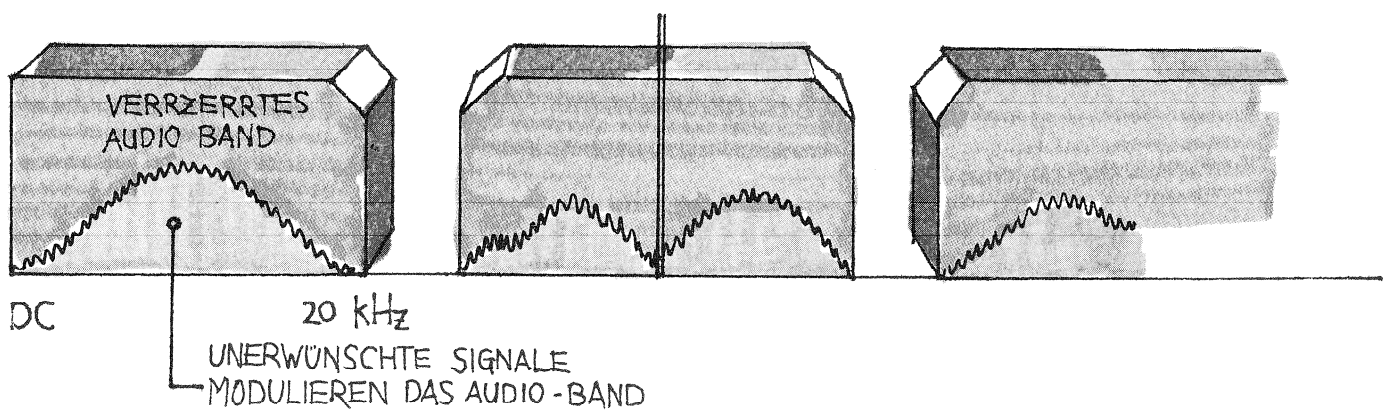
## VOR DER ABTASTUNG



WAS GESCHIEHT BEI "GUTEN" ANALOGEN SIGNALEN:



WAS GESCHIEHT BEI "SCHLECHTEN" ANALOGEN SIGNALEN:



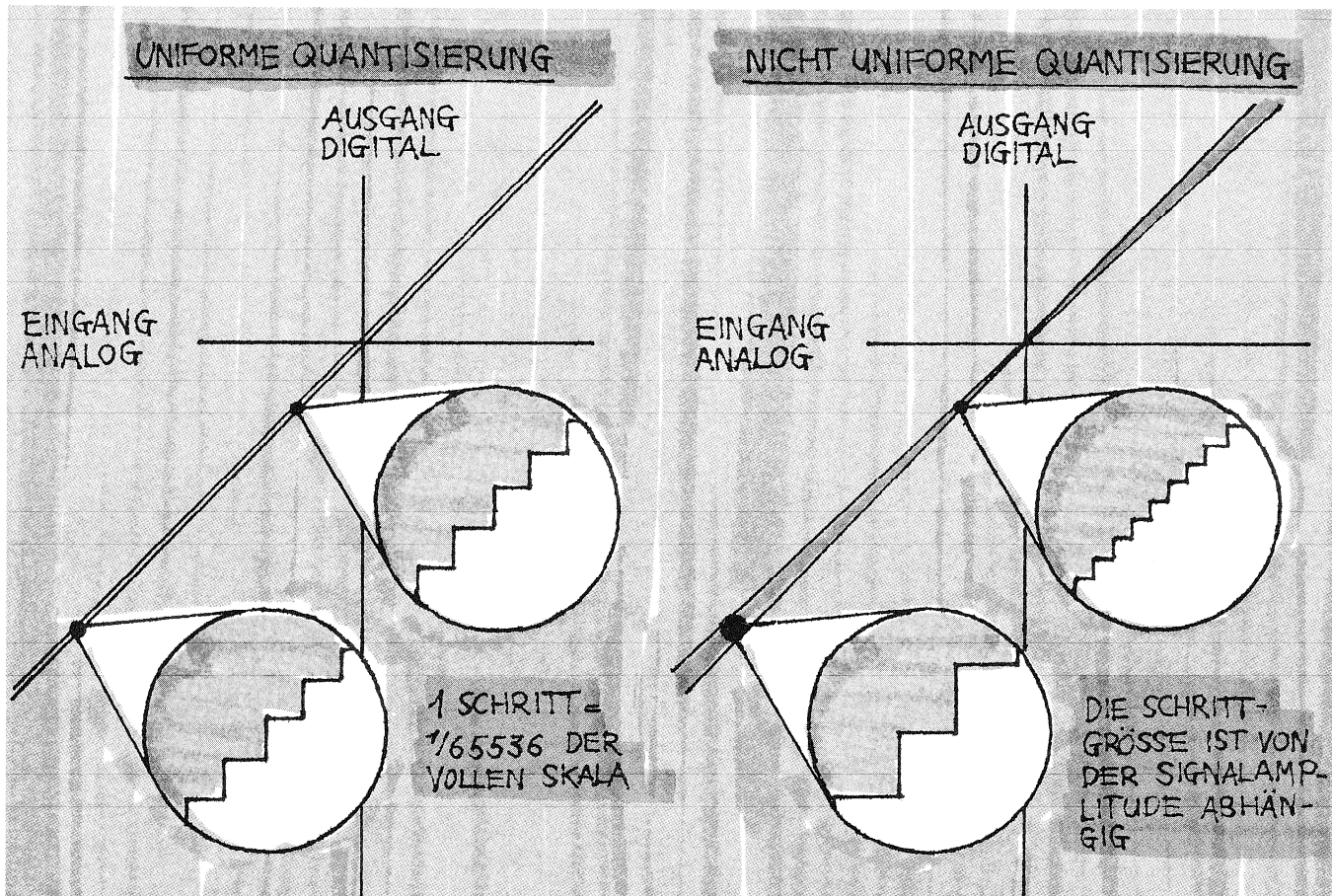
## Digitale Signale

Wie wir sehen konnten, wird die Digitalisierung des Audiosignals in einem A/D-Wandler vorgenommen. Über die Codierung der digitalen Werte, d.h. über die Zuordnung des analogen Wertes zu dem eines entsprechenden binären Wortes, wurde aber nicht gesprochen.

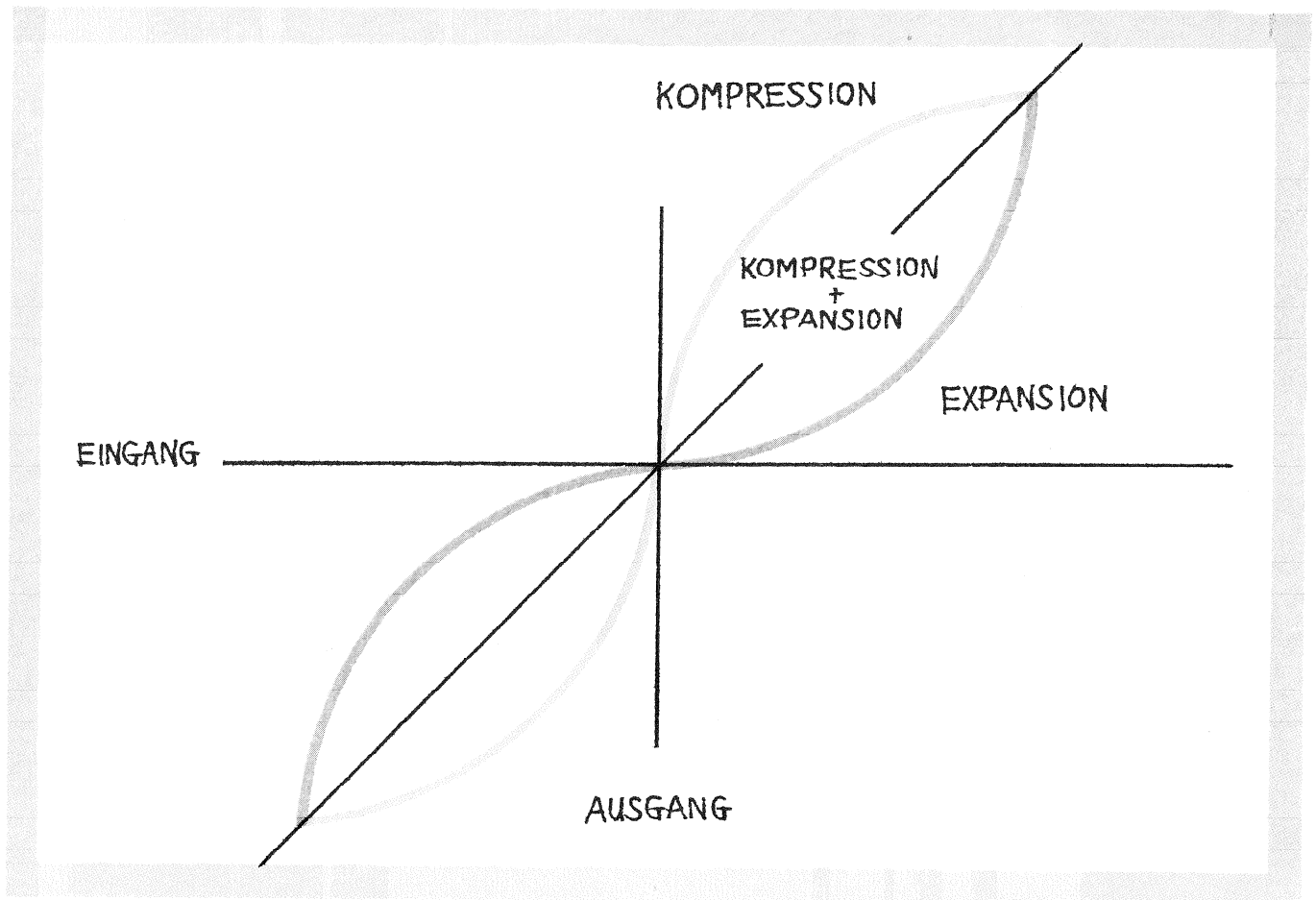
Digitale Signale haben grundsätzlich eine endliche Auflösung. In der Praxis bedeutet dies, dass die A/D-Wandlung immer mit einer kleinen Signalverfälschung verbunden ist; man spricht von Quantisierungsrauschen. Die einfachste Art der Codierung digitaler Werte – und sicher auch diejenige, die sich am einfachsten normieren lässt – basiert auf einer gleichmässigen

Quantisierung. In diesem Fall liefert der A/D-Wandler Daten in herkömmlicher binärer Darstellung, meistens im Zweierkomplement. Daneben sind auch wirksamere Verfahren zur Quantisierung der Signale, zum Beispiel in der heutigen digitalen Fernmeldetechnik, bekannt. Dort verwendet man eine Kompondierung, um die Dynamik der darstellbaren Signale zu erhöhen. Im Gegensatz zur gleichmässigen Quantisierung, die sich sehr einfach beschreiben lässt, bedingt die Kompondierungstechnik die exakte Definition einer nichtlinearen Kennlinie.

## QUANTISIERUNG



## KOMPANDERKENNLINIE



Da nun die Meinungen über Kompanzierkennlinien stark auseinandergehen, ist eine entsprechende Normierung nur schwer zu verwirklichen. Vor kurzem wurden raffinierte Verfahren zur Übertragung digitaler Radioprogramme in kompanzierter Form vorgeschlagen. Generell ist das digitale Format von Audio-PCM ein dringender Gegenstand für die internationale Normierung.

Digitale Signale lassen sich sowohl seriell wie auch parallel übertragen. Im allgemeinen ist die serielle Übertragung langsamer, jedoch wirtschaftlicher und flexibler. Eine Aufgabe erster Priorität für die Normierung von Audio-

PCM wird es sein, eine einfache digitale Schnittstelle für den Anschluss von Audio-PCM-Einrichtungen zu definieren (digitale Tonbandmaschinen, Nachhallgeräte, Filter und Entzerrer, Mischpulte).

## Aufnahme und Wiedergabe der digitalisierten Signale

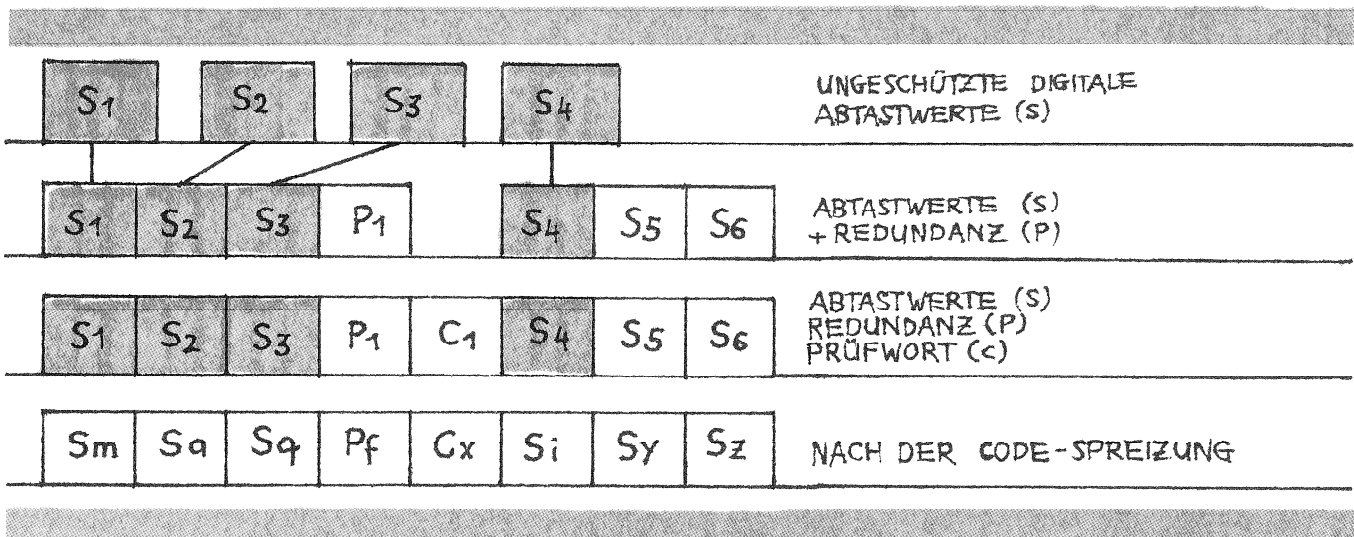
Bei der Digitalisierung besteht die Hauptschwierigkeit in der Gewährleistung einer hohen Auflösung und Genauigkeit bei gleichzeitig hohen Abtastraten. Die schwierigste Aufgabe bei der Realisierung einer Audio-PCM-Tonbandmaschine ist die fehlerfreie Speicherung digitaler Signale auf dem Magnetband sowie deren Wiedergabe. Prinzipiell stösst man dabei auf Probleme die bei Bandstationen für die Computerperipherie bereits bekannt sind. Charakteristisch für Audio-PCM ist zudem eine sehr hohe Datenrate, verbunden mit einer niedrigen Bandgeschwindigkeit. Die technologischen Anforderungen sind demnach auch viel höher. Tastet man beispielsweise die Audiosignale mit 50 kHz ab, und codiert man sie mit einem Format von 16 Bits, so ergibt sich pro Kanal eine Bitrate von 800 kBit/s. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 76 cm/s folgt daraus eine Aufzeichnungsdichte von 25 kBit/inch oder 1000 Bit/mm, was die Leistungen heutiger Computerbandstationen bei weitem übertrifft.

Zwei grundsätzliche Aspekte, nämlich Aussetz-

fehler (Drop-outs) und Schwankungen der Bandgeschwindigkeit, erschweren die Speicherung und die Wiedergabe der digitalen Signale ganz wesentlich. Bei der Aufzeichnung digitaler Daten hoher Dichte wirken sich Aussetzfehler bedeutend schlimmer aus als in analoger Technik.

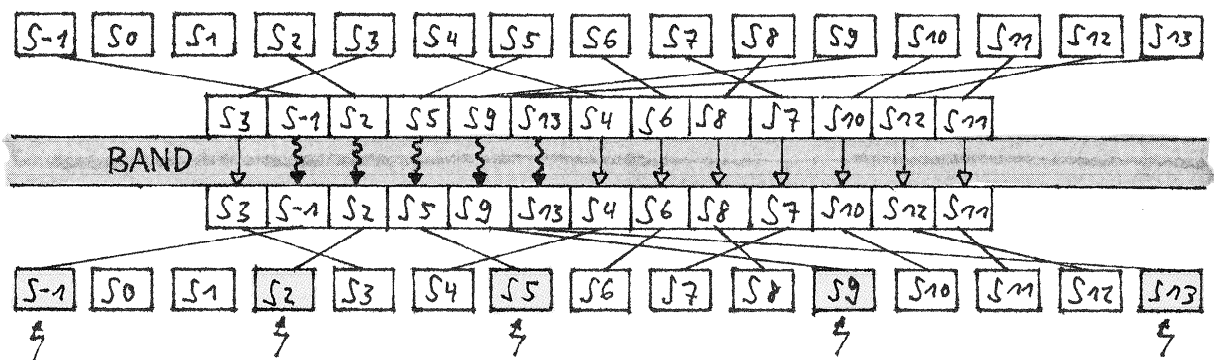
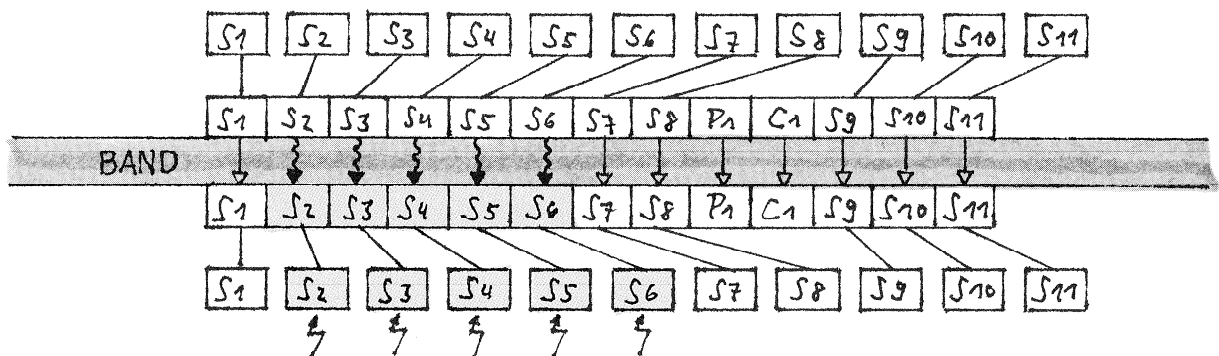
Die sehr hohe Signalbandbreite erfordert Aufnahme- und Wiedergabeköpfe kleinster geometrischer Abmessungen. Aus obigen Zahlen lässt sich abschätzen, dass ein Einzelbit einen Bandabschnitt von einem  $\mu\text{m}$  Länge beansprucht. Folglich werden kleinste Defekte der Köpfe oder des Bandes sowie kleinste Schwankungen des Kontaktes zwischen Kopf und Band lange Sequenzen von Bits verfälschen. Die begrenzte Bandbreite von Köpfen und Band wird die Detektion der gespeicherten Signale erschweren, obwohl digitale Signale grundsätzlich niedrigere Rauschabstände tolerieren. Abspielfehler bei digitaler Signalaufzeichnung sind prinzipiell unvermeidbar und können nur durch den Einsatz umfangreicher Datensicherungsverfahren, wie man sie bei der analogen Signalaufzeichnung nicht kennt, bekämpft werden.

### CODE ZUM FEHLERSCHUTZ



## CODESPREIZUNG

EINFLUSS EINES DROP-OUT OHNE CODESPREIZUNG:  
DIE ABTASTWERTE WERDEN GRUPPENWEISE VERFÄLSCHT



EINFLUSS EINES DROP-OUT MIT CODESPREIZUNG:  
NUR EINZELNE ABTASTWERTE WERDEN BETROFFEN

Audio-PCM verlangt eine hohe Aufzeichnungsdichte und eine niedrige Häufigkeit von Drop-outs, was die Verwendung hochwertiger Digitalbänder bedingt. Die Aufnahme- und Wiedergabeköpfe weisen Spalte von weniger als  $1 \mu\text{m}$  auf, um pro Spur eine Datenrate in der Größenordnung von 1 Megabit/s zu bewältigen.

Drop-outs stellen die wichtigste Fehlerquelle in der digitalen Tonbandmaschine dar und führen zu den aufwendigsten Schaltungen in der Audio-PCM-Technik. Sie werden einerseits durch Oberflächendefekte und andere Unzulänglichkeiten des Bandes, andererseits durch momentanes Abheben des Bandes von den

Köpfen verursacht. Naturgemäß ereignen sich Drop-outs sowohl bei der Aufnahme wie bei der Wiedergabe. Ihre statistischen Eigenschaften wurden intensiv untersucht und es gelingt heute, diese modellmässig befriedigend darzustellen. Die unmittelbare Folge der Drop-outs ist die Zerstörung der Information auf längeren, bis zu mehreren hundert Bits umfassenden Strecken. Die Korrektur solcher Fehler ist zwangsläufig mit sehr grossem Aufwand verbunden.

Wie man aus der Codierungstheorie entnimmt, ist es bei gleichbleibender Fehlerhäufigkeit viel leichter, zufällig auftretende Fehler zu korrigieren.

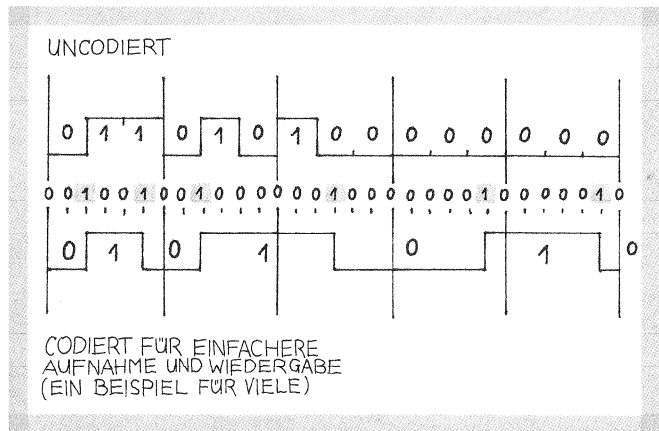
ren, als solche, die gruppenweise auftreten. Um die Aussetzfehler auf dem Band zu verteilen, wird die Technik des Interleaving (Codespreizung) eingesetzt: die Reihenfolge der einzelnen Abtastwerte wird vor der Aufzeichnung durcheinandergebracht, so dass zeitlich benachbarte Abtastwerte auf dem Band weit auseinander zu liegen kommen. Erst nach der Wiedergabe wird die ursprüngliche Reihenfolge wiederhergestellt. Bei diesem Vorgang werden die Drop-outs auseinander gespreizt, was die Fehlerkorrektur drastisch erleichtert.

Mit Hilfe fehlererkennender und fehlerkorrigierender Codes, die die Mitspeicherung redundanter Information bedingen, ist es nun möglich, die Datenqualität zu überwachen. Ergibt diese Überwachung, dass ein Fehler nicht korrigiert werden kann, so wird der betroffene Abtastwert durch einen aus der fehlerfreien Umgebung errechneten Schätzwert ersetzt.

Verschiedene voneinander stark abweichende Verfahren zur Datensicherung sind vorgeschlagen worden. Allen gemeinsam ist der hohe Anteil an redundanter Information, der für den Fehlerschutz in Kauf genommen werden muss. Die einzelnen Operationen des Interleaving (Codespreizung), der Codierung und Decodierung, der Fehlerüberwachung und der Fehleraustastung erfordern einen hohen Aufwand an digitaler Elektronik.

Es ist aus praktischen Gründen nicht möglich, beliebige Datensequenzen auf Magnetband zu speichern und wiederzugeben: bei rasch wechselnden Signalen liegt die obere erforderliche Grenzfrequenz sehr hoch, während lange Folgen gleichbleibender Daten die Synchronisierung verunmöglichen. Man kennt verschiedene Verfahren zur sogenannten Kanalcodierung der Daten, die eine zuverlässige Wiedergabe und Synchronisierung bieten. Daneben besteht die

## KANALCODIERUNG



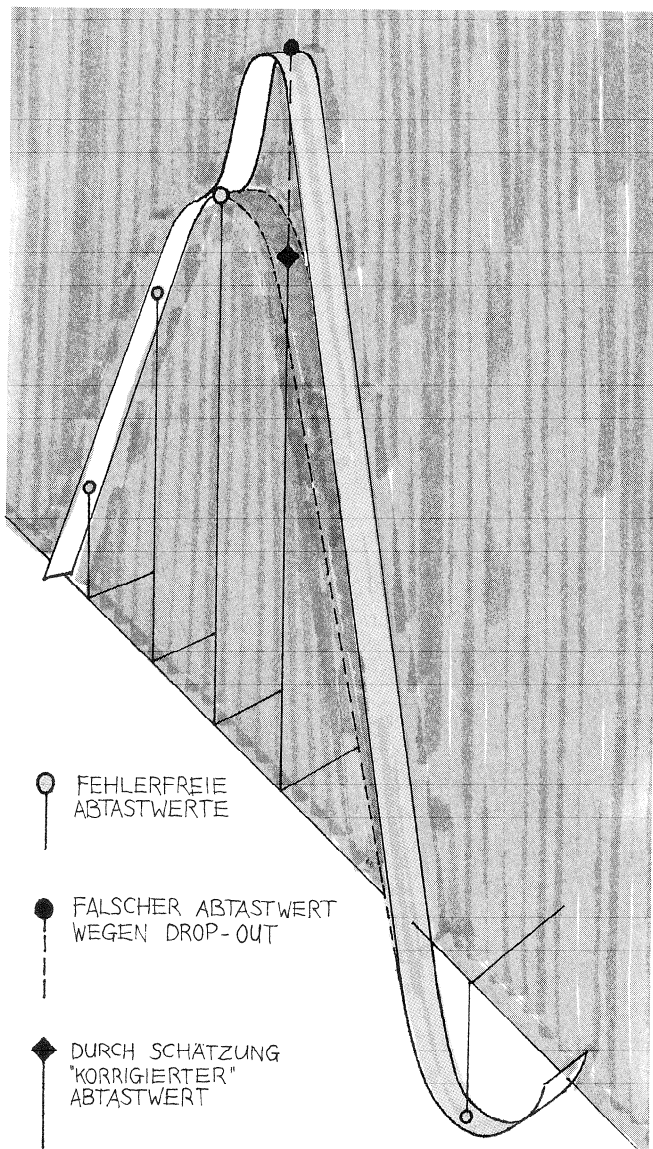
Möglichkeit, den Datenstrom auf mehrere Parallelschienen zu verteilen, wodurch jedoch die Spurendichte und der Aufwand an Elektronik erhöht wird.

Die Abtastrate lässt sich ohne weiteres aus der aufgezeichneten Datenfolge rekonstruieren, so dass eine Servoregelung die genaue Einhaltung der durchschnittlichen Bandgeschwindigkeit sichert. Kurzzeitige Schwankungen hingegen, würden zur Folge haben, dass einzelne Abtastwerte wiederholt oder unterdrückt würden. Man bedient sich deshalb einer Zeitbasiskorrektur: die Abtastwerte werden mit ihrem leicht schwankenden Takt in einen Pufferspeicher geschrieben und mit der exakt definierten Taktrate wieder ausgelesen. Der Füllstand des Pufferspeichers kann zur Verbesserung der Geschwindigkeitsregelung verwendet werden.

Im Rückblick stellt sich die magnetische Aufzeichnung und Wiedergabe digitaler Audiosignale als ein recht komplizierter Prozess dar, der nicht ohne großen elektronischen Aufwand auszuführen ist.

Sollen unter verschiedenen PCM-Maschinen Bänder ausgetauscht werden können, so müssen alle Maschinen mit der gleichen Abtastrate, mit dem gleichen Bandformat, der gleichen Kanalcodierung und (im wesentlichen) mit dem gleichen Verfahren zur Datensicherung arbeiten.

## FEHLERUNTERDRÜCKUNG



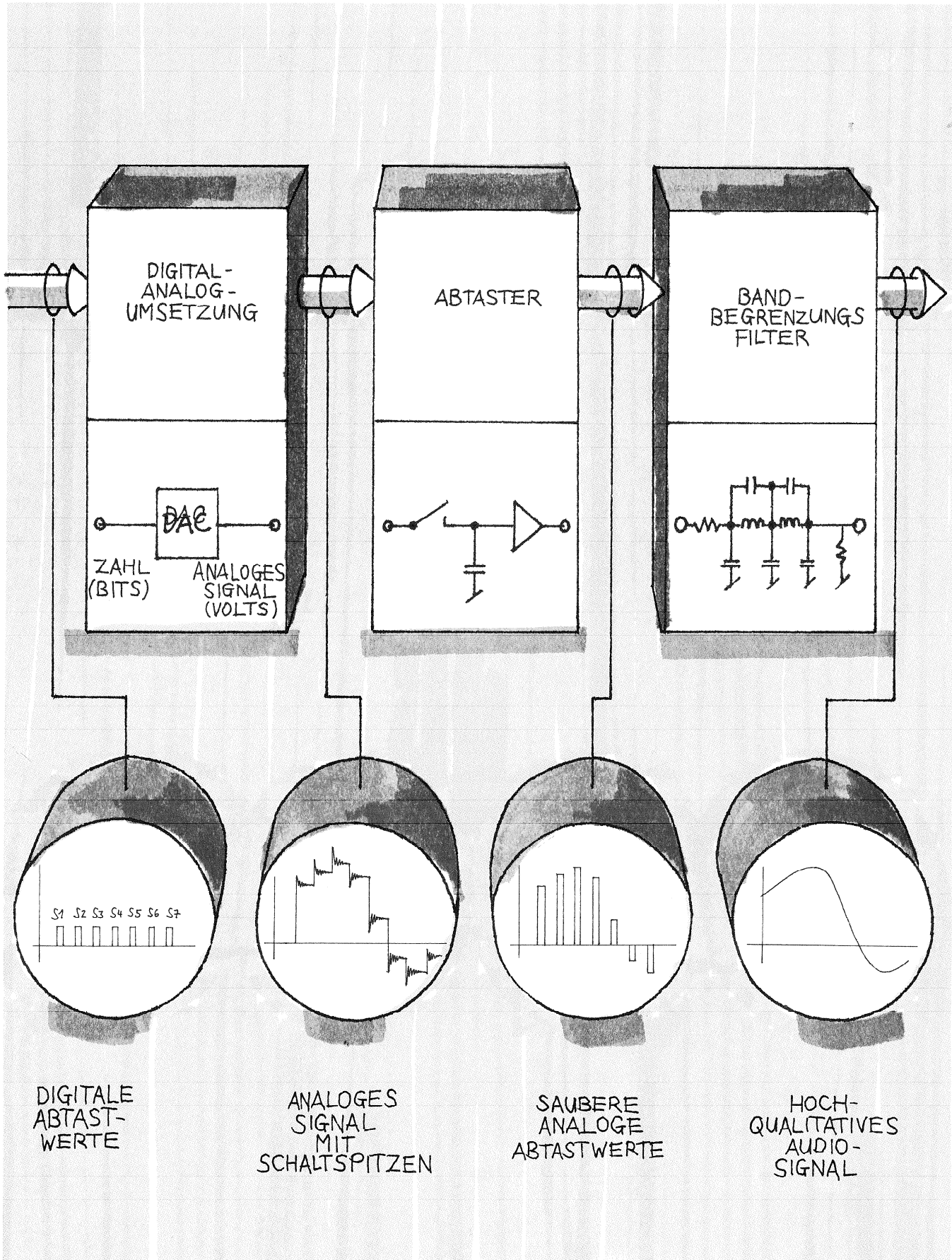
## Wiedergewinnung des analogen Signals

Um die Audio-PCM-Maschine an die analoge Peripherie anzuschliessen, ist es nötig, aus den digitalen Abtastwerten ein hochwertiges analoges Ausgangssignal zurückzugewinnen. Verglichen mit der Digitalisierung, ist die Wiedergewinnung des analogen Signals um einiges einfacher. Zuerst werden die einzelnen Abtastwerte in einem Digital/Analog-Wandler in eine analoge Spannung umgesetzt, bei gleichzeitiger Expansion, falls der A/D-Wandler mit Kompression gearbeitet hat. Das aus dem D/A-Wandler kommende Signal kann jedoch nicht direkt verwendet werden. Einerseits enthalten die Schalttransienten («Glitches») eine viel zu grosse Stör-energie; andererseits weist das Treppensignal im oberen Teil des Audiobandes eine gewisse Abschwächung auf sowie eine beträchtliche Signalenergie ausserhalb des NF-Bandes.

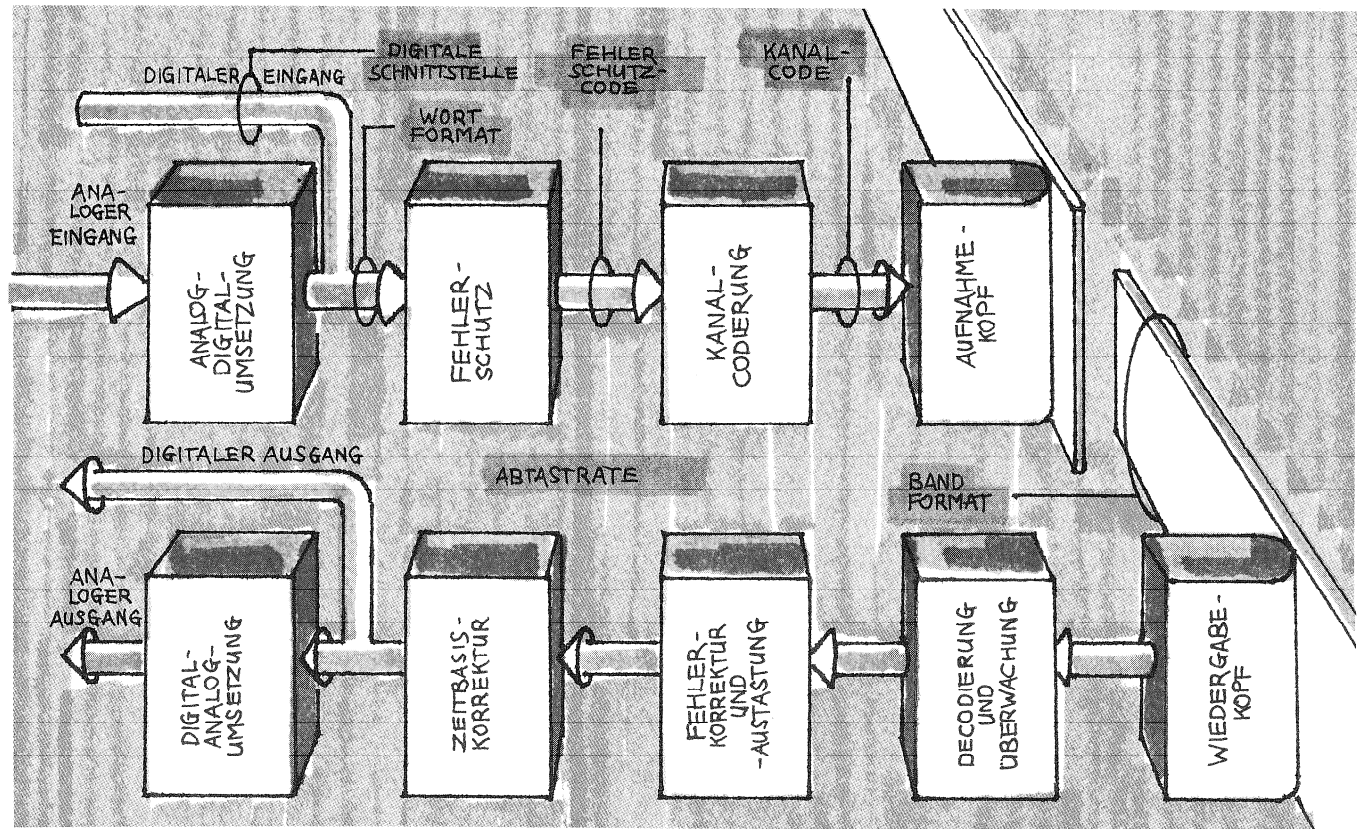
Die Signalqualität ist erheblich besser, wenn das Ausgangssignal des D/A-Wandlers mit einem schmalen Puls erneut abgetastet wird («Deglitcher»). Dadurch werden die transienten Spitzen beseitigt, und das Signalspektrum bleibt im ganzen Audioband unverzerrt. Die beträchtlichen hochfrequenten Anteile des Signals müssen freilich noch mit einem Tiefpassfilter unterdrückt werden, denn sie könnten ohne weiteres Lautsprecher beschädigen.



# DIGITAL-ANALOG-UMSETZUNG



## WAS NORMIERT WERDEN KANN

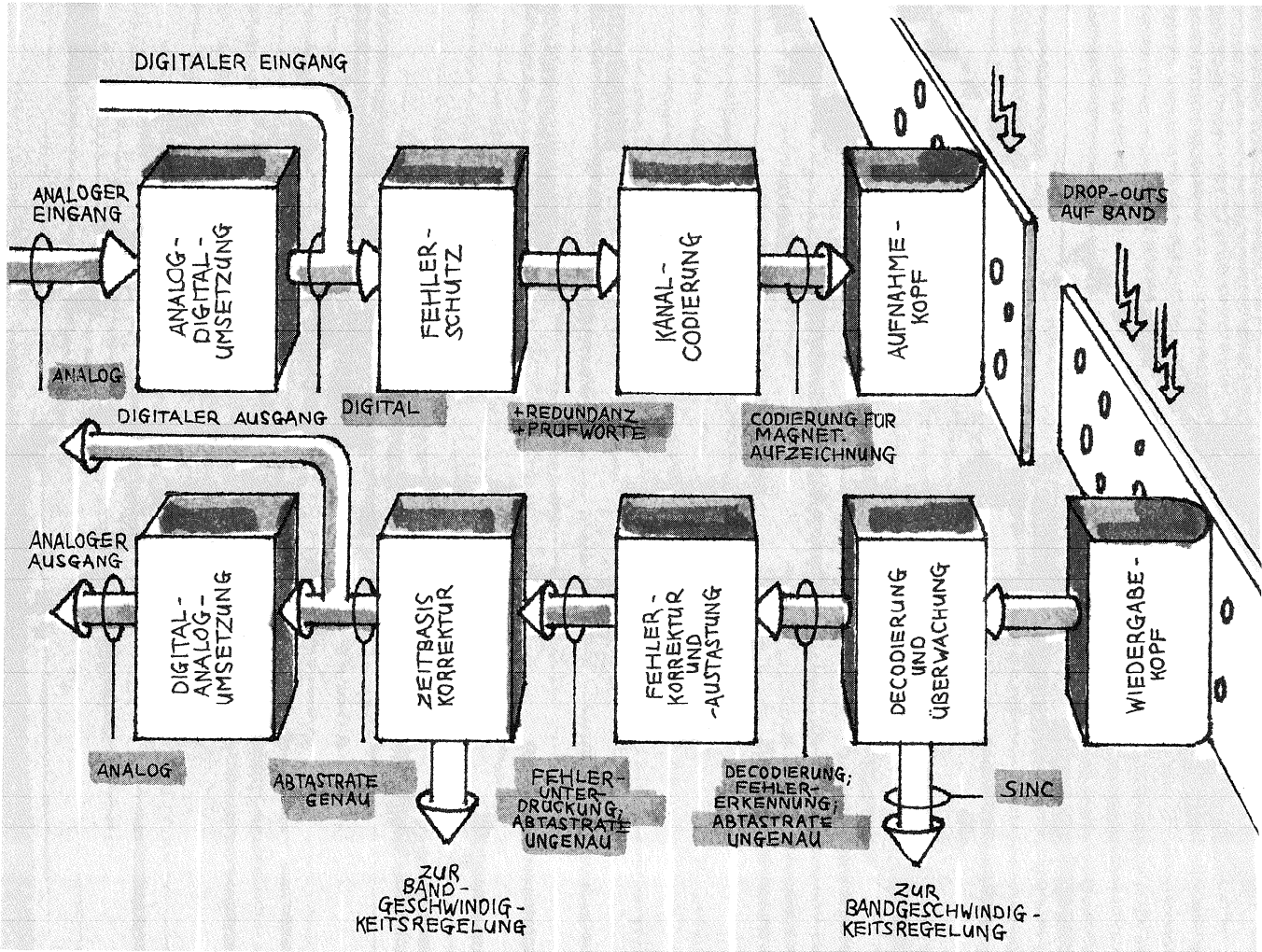


Die Rekonstruktion des analogen Ausgangssignals geschieht also mit Hilfe eines hochgenauen D/A-Wandlers, gefolgt von einem Abtaster und einem Tiefpassfilter zur Unterdrückung aller unerwünschten Signalanteile, die sich durch die Abtastung ergeben.

Bei sorgfältiger Dimensionierung bieten Digitalisierung und analoge Rekonstruktion die Gewähr für eine nahezu transparente PCM-Maschine, die zwischen 0 Hz und der Hälfte der Abtastfrequenz praktisch frei von Amplitudenschwankungen ist.

Ähnlich wie A/D-Wandler, sind Digital/Analog-Wandler zur Zeit teure Schaltkreise höchster Genauigkeit mit sehr engen Toleranzen. In naher Zukunft ist damit zu rechnen, dass neuartige Wandler in weitgehend digitaler Technik die Rekonstruktion des analogen Signals stark vereinfachen werden.

# AUDIO PCM BANDGERÄTE-FUNKTIONEN



Um sich auf die Dauer durchzusetzen, muss die digitale Audiotechnik dem Anwender herkömmlicher Studioeinrichtungen nicht nur eine bessere Signal- und Klangqualität, sondern auch betriebliche Vorteile bringen, die eine rationellere Arbeitsweise erlauben. Es kann sogar sein, dass zukünftige Studioausrüstungen in PCM-Technik nicht ihrer besseren Signalqualität wegen, sondern aufgrund ihrer bequemerer Bedienung und ihrer fortgeschrittenen Automation den Vorzug erhalten werden. In diesem Abschnitt werden wir uns mit den Aspekten des praktischen Einsatzes von PCM-Material befassen. Wie schon erwähnt, beziehen wir uns auf eine PCM-Maschine mit 50 kHz-Abtastrate und einem Format von 16 Bit in linearer Quantisierung.

## Die Signalqualität von Audio-PCM

Ein unmittelbares Ziel bei der Entwicklung von Audio-PCM ist zweifellos die Verbesserung der Audioqualität. Für alle wichtigen Parameter bringt Audio-PCM merkliche Verbesserungen. Verzerrungen, die fast ausschliesslich im Wandler verursacht werden, können auf Werte unterhalb von 0,1% gehalten werden. Mit der Einführung neuerer Wandlertypen sollen diese Zahlen sogar noch zurückgehen. Der Rauschpegel ergibt sich im wesentlichen aus der Wortlänge im digitalen Format; unter der Voraussetzung wenigstens, dass die analogen Schnittstellen sorgfältig entwickelt werden. So kann das Rauschen 90 dB tiefer liegen als der maximale Signalpegel. Die Signaldynamik liegt auch bei 90 dB und ist damit weit besser als bei heutigen Bandmaschinen. Die Bandbreite des Audio-PCM-Kanals für professionelle Zwecke erstreckt sich von 0 Hz bis 20 kHz, und eine exakte Phasenkompensation bis 15 kHz ist möglich, falls erwünscht. Schliesslich garantiert die Audio-PCM-Technik grundsätzlich die gleiche Abtastrate bei Ein- und Ausgang und ist somit

Im Vergleich zur analogen Technik, wird die Audio-PCM-Technik Audiokanäle von grösserer und besser beherrschter Bandbreite anbieten, mit einem fast vernachlässigbaren Rauschpegel, einer stark vergrösserten Dynamik und ohne Tonhöenschwankungen.

---

Die Qualität der Audio-PCM-Signale wird direkt durch das Magnetband und die Köpfe beeinflusst. Wie schon erwähnt, arbeitet man mit hochqualitativen Bändern, die speziell für die digitale Aufzeichnung entwickelt werden müssen sowie mit Köpfen mit sehr kleinen Abmessungen. Die Auswirkungen von Abnutzung und schlechtem Bandkontakt bei einer digitalen und einer analogen Maschine sind grundsätzlich verschieden. Im digitalen Fall tritt keine Signalverschlechterung ein, solange die Fehlerrate innerhalb der Korrekturkapazität des Datensicherungsverfahrens liegt. Wird diese Grenze aber einmal überschritten, tritt unmittelbar eine massive Signalverschlechterung ein.

## Die Klangqualität von Audio-PCM

Werden digitale Tonaufzeichnungen eine bessere Klangqualität aufweisen als die bisherigen analogen? Diese entscheidende Frage wird bestimmt in naher Zukunft zu lebhaften Kontroversen Anlass geben. Wie wir alle wissen, ist eine einwandfreie Signalqualität noch lange keine Garantie für einen musikalisch befriedigenden Klang. Man muss sogar damit rechnen, dass die sehr hohe Signalqualität, die Audio-PCM eigen ist, alle anderen Unzulänglichkeiten des Aufzeichnungsprozesses stark hervorheben wird. Dazu kommt, dass die Kunst der digitalen Tonaufzeichnung noch keine Zeit gehabt hat, um sich aufgrund von Erfahrungen zu etablieren. Am Anfang soll man nicht erwarten, dass jede digitale Aufzeichnung musikalisch gleichermassen befriedigend ist, wie eine sehr gute analoge. Längerfristig hingegen wird sich weisen müssen, dass die digitale Audiotechnik eine bessere Tonaufzeichnung gewährleistet – sowohl technisch wie auch künstlerisch.

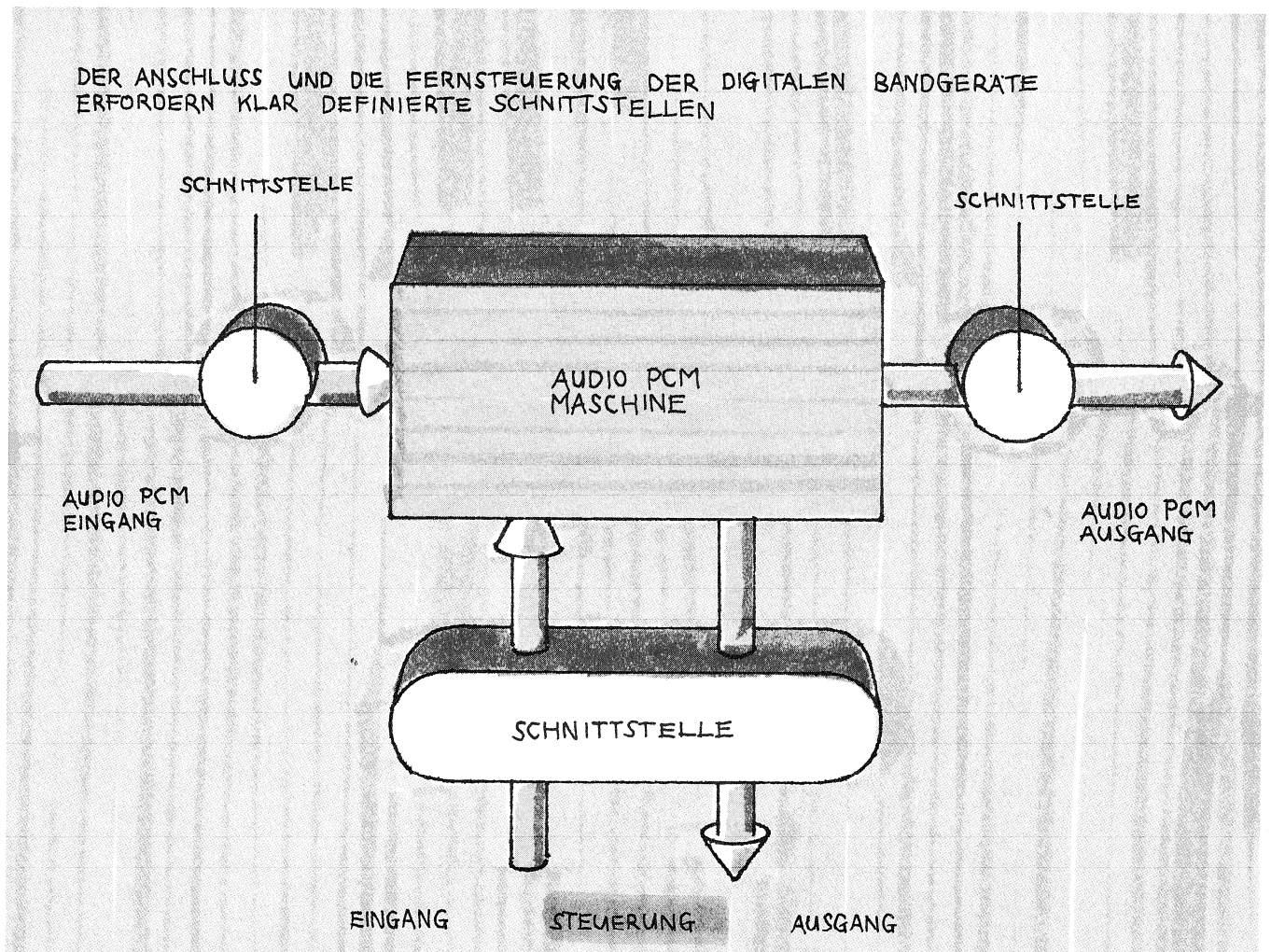
## Rund um die Audio-PCM-Bandmaschine: Digitale Peripherie

Mit Hilfe einer Audio-PCM-Bandmaschine können analoge Signale digital gespeichert werden. Je nach System ist es auch möglich, mit oder ohne Zusatzeinrichtung digital gespeichertes Material zu schneiden und weiter zu bearbeiten. Dabei ist es grundsätzlich möglich, für die Filterung und Mischung analoge Einrichtungen zu verwenden. Der wiederholte Wechsel zwischen analogem und digitalem Format verschlechtert jedoch die Signale; deshalb ist es sinnvoller eine Familie von Peripherieprodukten zu entwickeln. So werden denn auch digitale Misch-

pulte, Entzerrer, Filter und Nachhallgeräte entwickelt.

Die im heutigen Studio üblichen Bearbeitungen der Audiosignale können alle digital ausgeführt werden. In digitaler Form wird beispielsweise die Verzögerung zu einem sehr einfachen Speichervorgang. Das Filtern und Mischen von Signalen ist um einiges komplizierter und geschieht mit Hilfe arithmetischer Rechenschaltungen. Die Technik der digitalen Signalverarbeitung und -filterung hat bereits eine beträchtliche Reife

### SCHNITTSTELLEN FÜR TON- UND STEUERSIGNALE



---

## Zeitcode und Editing

erreicht und erfordert nur mehr einen vertretbaren Aufwand.

Andererseits besteht das grundsätzliche Problem der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Einrichtungen in digitaler Technik, somit zwischen den digitalen Geräten und dem Anwender. Eine wichtige Aufgabe der Normierung wird darin bestehen, die Charakteristiken eines Datenbus für den Anschluss und die Fernsteuerung von Audio-PCM-Maschinen zu definieren. Nur mit einer solchen klaren Definition wird es möglich sein, effizient arbeitende Studios in digitaler Technik einzurichten.

Selbstverständlich ist es möglich, neben den Audio-PCM-Signalen zusätzliche digitale Informationen auf dem Band zu speichern. Ein Zeitcode kann und soll dem Audiosignal hinzugefügt werden. Daneben lassen sich Markierungen zur Vereinfachung des Editiervorganges sowie Mixdown-Informationen auf das Band schreiben, ohne dass die gesamte Bandbreite oder Datenrate wesentlich gesteigert werden muss.

Auf dem professionellen Gebiet ist die Forderung nach einem bequemen Bandschnitt ohne Signalfehler und ohne Störgeräusch naheliegend. Das digitale Format der Signale und die verwendete Codespreizung erschweren jedoch das Schneiden von Programmen im Vergleich zur Analogtechnik. Das Schneiden von Bändern beeinträchtigt beispielsweise die synchrone Detektion der Signale; die damit verbundenen Fehler stellen hohe Ansprüche an das Datensicherungsverfahren und die Fehleraustastung.

Beim heutigen Stand der Technik scheint es, dass einfache Schneidtechniken nur durch einen sehr grossen Aufwand an Elektronik erkaufte werden können. Bisher ist kein System bekannt, das ein ähnlich bequemes Editieren erlauben würde, wie es in der konventionellen Technik üblich ist. Eine allfällige Norm für Audio-PCM-Studiomaschinen wird den Editiervorgang im Studio direkt beeinflussen.

## Umsetzung der Abtastrate

---

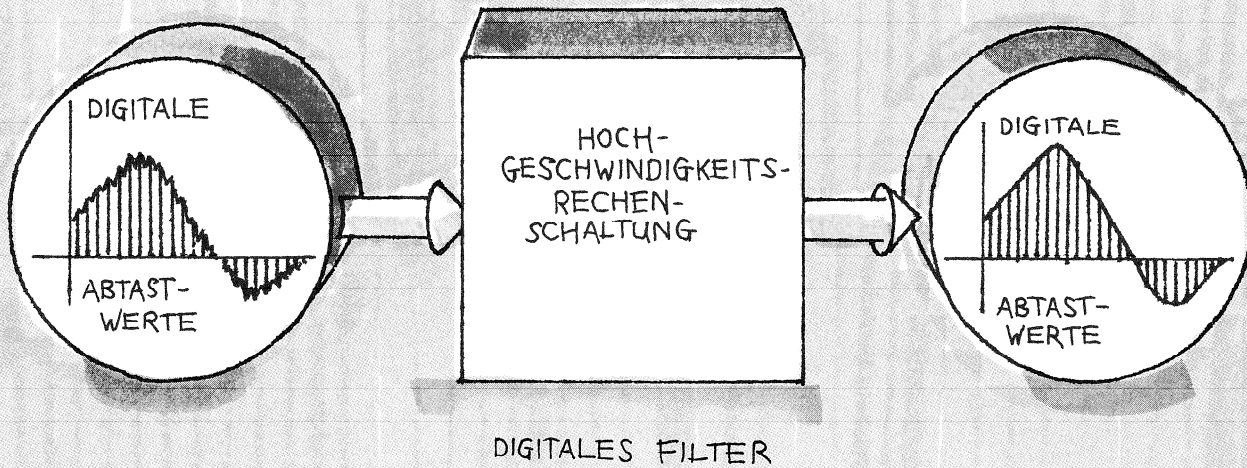
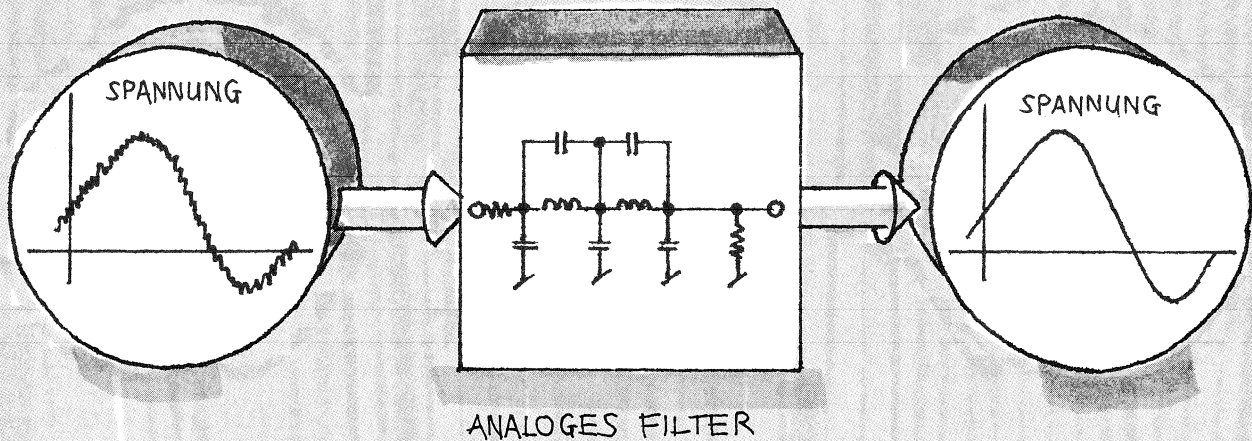
Es steht fast ausser Zweifel, dass man in Zukunft mit wenigstens zwei Abtastraten für Audio-PCM-Signale arbeiten wird: mit ca. 50 kHz in der professionellen Technik und mit ca. 44 kHz im Bereich der Unterhaltungselektronik. Eine Änderung der Abtastrate eines digitalen Signales ohne gleichzeitige Beeinflussung der Tonhöhe ist möglich, wenn auch nur mit Hilfe einer aufwendigen digitalen Filterung. Der Filter zur Umsetzung der Abtastrate arbeitet bei der kleinsten gemeinsamen Mehrfachfrequenz der beiden Abtastraten. Diese Art der Umsetzung ist deshalb wesentlich leichter durchzuführen, wenn die zwei Abtastraten in einem einfachen Verhältnis zueinander liegen. Ein Verhältnis von 8:7 zwischen den Abtastraten für professionelle Geräte und für Consumergeräte, wie es von einem namhaften Hersteller vorgeschlagen wurde, ist durchaus realisierbar.

Bei zwei Abtastraten die nahe beieinander liegen, sind die Verhältnisse wesentlich ungünstiger. Diese Situation könnte besonders dann auftreten, wenn keine Einigung bei der Normierung der Abtastrate erzielt werden kann. In diesem Fall würde die Anpassung zwischen verschiedenen Audio-PCM-Systemen zu einer kostspieligen Angelegenheit werden.



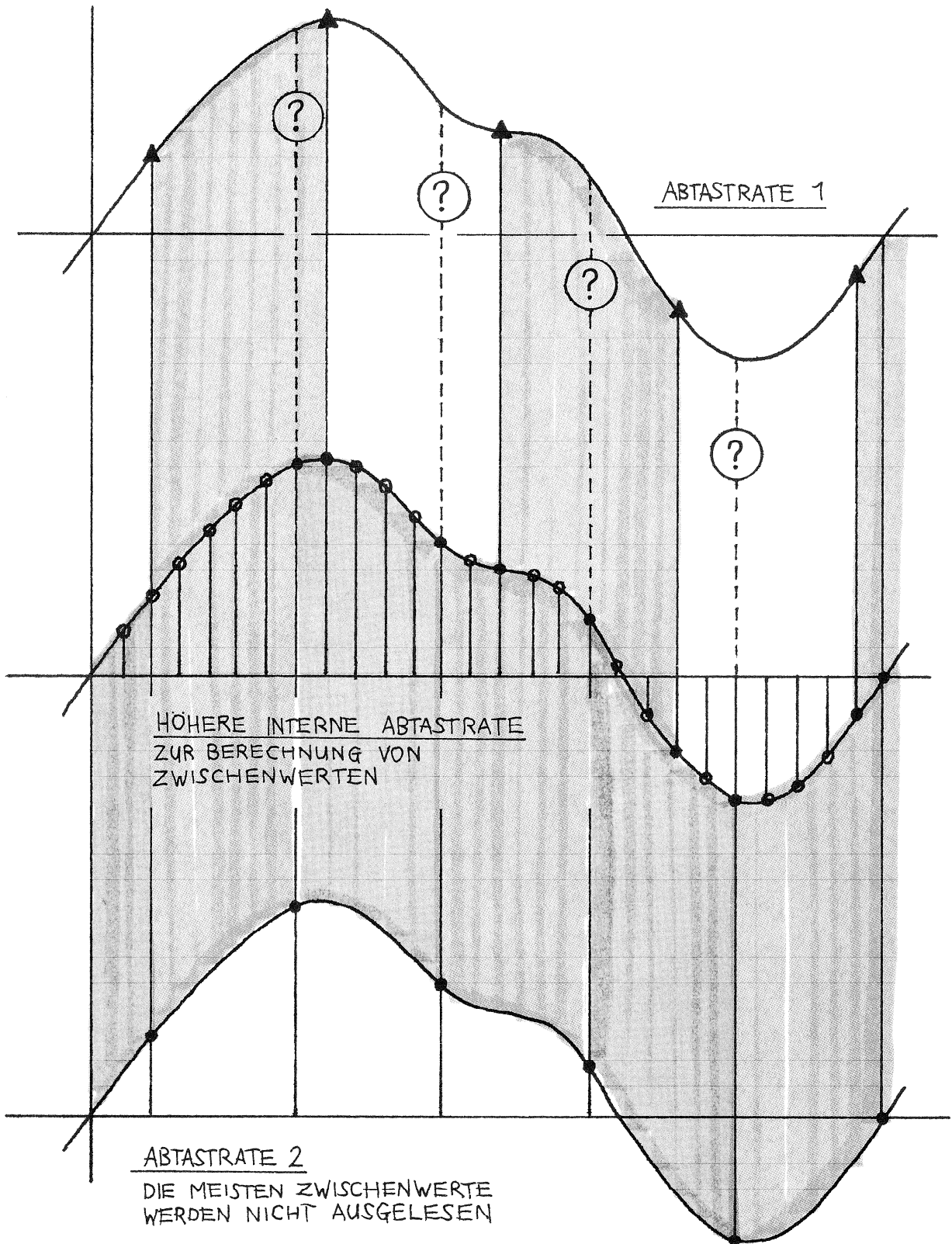
# DIGITALE UND ANALOGE FILTERUNG

DIE FILTERUNG DER DIGITALEN AUDIOSIGNALE  
ERFOLGT MIT RECHENSCHALTUNGEN



# UMSETZUNG DER ABTASTRATE

DIE UMSETZUNG DER ABTASTRATE ERFORDERT EINE KOMPLEXE UND AUFWENDIGE VERARBEITUNG MIT HILFE DIGITALER FILTER



## Die Arbeit mit digitalen Geräten

---

Mit der digitalen Bandmaschine und ihrer Peripherie werden zum ersten Mal digitale Systeme sehr hoher Komplexität in den Tonstudios auftreten. Es wird nützlich und auch erwünscht sein, aus jenen Erfahrungen zu lernen, die auf anderen Gebieten gemacht werden mussten, als digitale Maschinen die analoge Technik verdrängten.

Die Systemdokumentation wird problematischer sein. Ebenso die Fehlersuche, der Service und die Reparaturen. Es ist auch kaum wahrscheinlich, dass die Zuverlässigkeit der derzeitigen Studiomaschinen durch die Einführung der PCM-Technik verbessert wird. Ebenso soll man auch nicht erwarten, dass die Betriebskosten dank der Einführung von Audio-PCM sofort sinken. Dazu wird es wohl noch einige Jahre Erfahrung brauchen.

Viele Arbeitsgänge werden bestimmt vereinfacht, einige werden sogar verschwinden. In einer Audio-PCM-Maschine gibt es nur sehr wenige Schaltungen, die eine periodische Justierung brauchen. Im Normalfall sind keine Justierungen notwendig. Wie alle Anwender digitaler Elektronik, werden auch die Studioleute den Umgang mit Maschinen lernen müssen, die entweder einwandfrei oder überhaupt nicht arbeiten. Langfristig gesehen arbeiten digitale Systeme zweifellos deutlich wirtschaftlicher und deutlich zuverlässiger. Wie die Erfahrung auf anderen Gebieten zeigt, braucht es aber viel Zeit, bis diese Vorteile in Erscheinung treten.

# DIE FRAGE DER NORMIERUNG

Analoge Aufzeichnungsgeräte sind relativ einfach und wurden zudem langsam entwickelt. Folglich kam es kaum zu Konflikten bei der Normierung. Anders bei Audio-PCM: die digitale Technik hat sich zur Überraschung vieler Beobachter ausserordentlich schnell entwickelt und die ersten Produkte werden bestimmt auf den Markt gebracht, bevor die Normierung abgeschlossen ist. Es stellt sich nun die Frage, ob ein Fehlen von Normen für den potentiellen Anwender von Belang ist.

Welche Punkte sollen Gegenstand einer Norm werden? Grundsätzlich braucht es sicher verschiedene, wenn auch koordinierte Sätze von Vorschriften für PCM-Plattenspieler, PCM-Recorder auf VTR-Basis für professionelle Geräte und für Geräte im Unterhaltungsbereich und schliesslich für PCM-Bandmaschinen mit stationären Köpfen. Aufeinander abgestimmte Normen werden dafür sorgen, dass PCM-Programme bequem und mit geringem Aufwand von einem Medium ins andere überführt werden können.

Weshalb eine Normierung? Denken wir an eine Mehrkanalaufzeichnung auf einer PCM-Bandmaschine mit stationären Köpfen (es kann sich auch um mehrere handeln). Nehmen wir an, die Signale werden heruntergemischt und auf einem professionellen VTR-Recorder gespeichert. Daraus werden Audio-PCM-Platten gepresst. Die VTR-Mastercassette wird auf Consumerformat kopiert. Denken wir auch an eine digitale Übertragung zwischen den einzelnen Studios über das digitale Telefonnetz der nahen Zukunft. Ergänzen wir das Beispiel, indem auch auf fremden Maschinen aufgezeichnetes Material miteinbezogen wird. Eine Vielzahl von

Schnittstellen, Umsetzungen und Punkten, die dringend einer Normierung bedürfen, werden hier aufgezeigt.

Wie weit sollen die neuen Normen gehen? Selbstverständlich ist es immer möglich, zwischen beliebigen Formaten hin- und herzuwechseln, solange der Aufwand beliebig sein darf. Man muss dazu lediglich in der Lage sein, die gespeicherten Signale in irgendeiner Form zu lesen. Das Problem der Normierung darf aber nicht verniedlicht werden; eine praxisferne Norm würde sehr viel Geld kosten.

Falls zwei verschiedene Bandmaschinen nicht mit dem gleichen Bandformat und der gleichen Kanalcodierung arbeiten, wird es nie zu einem Bandaustausch kommen. Die Computerleute haben diese Erfahrung machen müssen. Auf der Ebene des Bandformates und der Kanalcodierung sind Normen eine unbedingte Notwendigkeit.

Falls sie nicht mit dem gleichen Format der Datensicherung arbeiten, werden Bandmaschinen unter Umständen die Signale lesen jedoch nicht in Musik umsetzen können. Vom Standpunkt des Schutzes gegen unbefugtes Kopieren betrachtet, ist dies sogar ein Vorteil. Berechtigtes Kopieren von Programmen aber verlangt eine Normierung des Datensicherungsverfahrens.

Falls zwei Systeme nicht mit der gleichen Abtastrate arbeiten, wird eine Umsetzung notwendig. Je mehr Abtastraten vorhanden sind und je näher diese beieinander liegen, desto aufwendiger muss das Umsetzungsfilter sein. Für alle professionellen Anwendungen braucht man nur eine einzige Abtastrate.

Selbstverständlich sollen die zwischen verschiedenen Audio-PCM-Maschinen auszutauschenden Signale immer im gleichen Format erscheinen. Es bedarf der Definition einer Schnittstelle für die digitale Audiotechnik. Dazu gehört ein Audio-PCM-SignalfORMAT sowie die Definition der Kontrollinformationen für den Anschluss und die Fernsteuerung von Systemen. Im Idealfall auch die Definition von Steckern, Signalpegeln, Zeitdiagrammen, usw.

Bleibt zu erwähnen, dass digitale Systeme generell wesentlich anfälliger sind auf elektromagnetische Interferenz als analoge Geräte. Sie produzieren selber auch wesentlich stärkere Störungen. Die Verbindungen zwischen Audio-PCM-Maschinen werden mit Hochfrequenzkabeln hergestellt, und es werden Signale bei sehr hohen Taktfrequenzen übertragen. Auch hier braucht es Normen in bezug auf die elektromagnetische Verträglichkeit digitaler Audiogeräte. So beispielsweise eine obere Grenze für das Erzeugen

von Störungen und eine Mindestgrenze für die Störfestigkeit. In der Computer- und Fernmeldetechnik geht man heute zwangsweise durch den gleichen Prozess der Normierung. Die Einführung der Digitaltechnik war der wichtigste Anlass dazu.

Wird es Normen geben? Wir hoffen es. Wie wird es zu Normen kommen? Vielleicht aufgrund eines allgemeinen Konvents, obwohl wir dies bezweifeln. Sollte die Normierung zu langsam voranschreiten, wäre es unter Umständen ratsam, sich bereits vorher den Vorschlägen eines grösseren Herstellers von Audio-PCM anzuschliessen.