Vorlesungsmaterial von Prof. Dr. Horst Völz

Speicher-Elektronik

Grundlage ist vor allem das Buch (weitere Literatur dort und am Ende)

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007, ist u.a. auch vollständig auf der CD enthalten:

Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007

Der Inhalt wurde z. T. gekürzt, auf den neuesten Stand gebracht und die Bilder farbig umgesetzt

Bei ***Angabe der Quelle*** ist das Material zum **privaten Gebrauch** voll nutzbar
Bei **kommerzieller Nutzung** bzw. in Publikationen usw. ist eine Abstimmung mit mir notwendig
Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder *.cdr Version 12 verfügbar

Email: hvoelz(at)fpk.cs.tu-berlin.de bzw. h.voelz(at)online.de
Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08
Wegen Spam (at) statt @

Material wurde ***heruntergeladen*** von aes.cs.tu-berlin.de/voelz

Aufgaben der Speicher-Elektronik

Noch immer wird das zu Speichernde ***letztlich als elektrischer* Wert, Signal** (= allgemeine Begriffe s. u.) übermittelt
Nur ***langfristig*** sind vielleicht optische oder quantenphysikalische Varianten möglich
Die Speicherelektronik hat daher folgende ***Aufgaben zu bewältigen***

- Bei der ***Aufzeichnung*** sind elektrische Werte, Signale in Speicherzustände zu überführen
- Während der ***Speicherzeit*** müssen in einigen Fällen die entsprechende Zustände aufrecht erhalten
- Bei der ***Wiedergabe*** müssen aus den Speicherzuständen wieder nutzbare elektrische Werte, Signale erzeugt werden

Speichern erfordert daher meist (elektrische) Umwandlungen der Werte

Begriffe zu Wert und Signal

Definitionsähnlicher Versuch

A. Ohne zeitliche Änderung, aber teilweise ortsabhängig

einzeln	mehrere	Zusammenfassung	Eigenschaft
Wert	***Werte***	Tabelle	numerisch
(Datum)	Daten	Tabelle	numerisch, verbal (formelhaft, bildhaft usw.)
Buchstabe	Wort	Text (Buch usw.)	zum Lesen bestimmt
Symbol, Zeichen	Symbole, Zeichen	z. B. Formel, Schaltbild, Diagramm	Hinweis auf etwas Anderes
Ton, Laut	Töne	Sprache, Musik, Klang, Geräusch	akustisch wahrnehmbar, *jedoch meist zeitlich*
Pixel	Bild	Bildersammlung (Album)	optisch wahrnehmbar und interpretierbar
(Pixel)	Objekt (Gestalt)	Gebilde, z. B. Landschaft, Ausstellung	3D-wahrnehmbar, -erfahrbar

B. Mit zeitlicher Änderung

einzeln	mit Zeit
Wert (Datum, Pixel usw.)	***Signal*** (Ablauf usw.)
Ton, Laut (akustisch)	z. B. Sprache, Musik, Geräusch
Bild (optisch)	z. B. Film, Video
Objekt (räumlich)	Geschehen (z. B. Theater)

Allgemeine Erklärung

Im Weiteren meist nur folgende Begriffe benutzt:

- ***Wert*** (Werte) gemäß x (oder andere Buchstaben) sowie $f(x)$
- ***Signal*** (Signale) gemäß $f(t)$ und $f(x, t)$, sie sind besonders für den Aufzeichnungs- und Wiedergabevorgang entscheidend
- Beim ***Ort*** wird meist maximal ***3-D*** zugelassen

Bei der Speicherung kann meist vom ***Sinn*** oder ***Inhalt*** der Werte, Signale abgesehen werden
Vor allem bestimmt die ***Quelle*** (Sender) was ein Wert, Signal sein soll. Absicht der Quelle ist es, etwas zu bewirken
Aber der ***Empfänger*** entscheidet, wie der Wert, das Signal zu interpretieren ist

Definition für Signale

A. treten als Funktion der Zeit *f*(*t*) auf

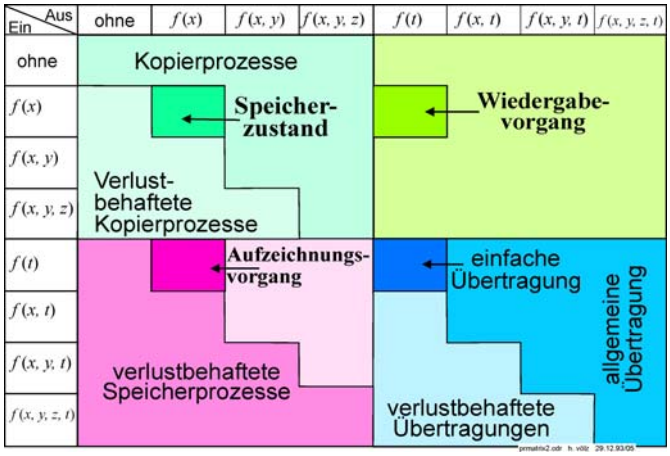
- einzelnes Ereignis, z. B. Auslöse-Impuls
- beginnen und hören irgendwann auf, z. B. bei Blocküberträgung
- kontinuierlicher Fluß (Stream), dessen Anfang, Ende nicht genau bestimmt ist, z. B. Rundfunk- und Fernsehübertragung
- existieren bei digitalen Anwendungen teilweise nur zu diskreten Abtastzeiten

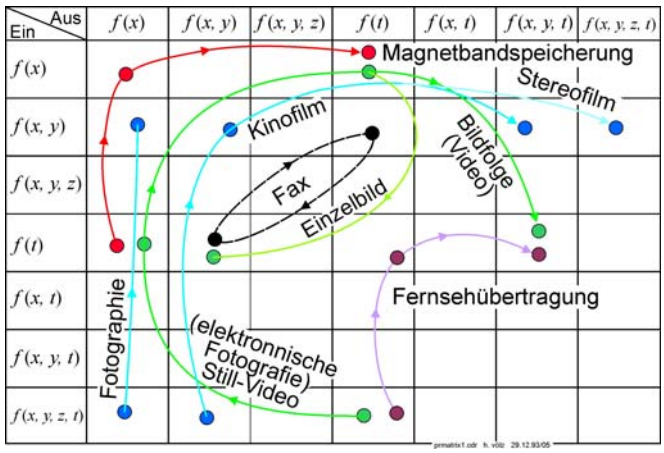
B. besitzen physikalische, mathematische Eigenschaften

z. B. als Spannung, Strom; Energie und existiren u. a. als

- Zeitlicher Verlauf $f(t)$

- Spektrum $s(f)$
- Wahrscheinlichkeiten/Häufigkeiten (bzw. ihre Dichte) $p(x)$ (Entropie)
- Korrelationen $x(\tau)$





Begriffe zu analog und digital

analog, kontinuierlich, stetig, diskret, quantisieren, digital, dual usw.

Analog, Analogie

griechisch ***logos*** Vernunft + *lateinische* ***ana*** auf, wieder, aufwärts, nach oben
lateinisch ***analogia*** mit der Vernunft übereinstimmend, Gleichmäßigkeit
Substantiv ***Analogie*** etwa: Entsprechung, Ähnlichkeit, Gleichwertigkeit, Übereinstimmung. Anwendungen u. a.
Für den **Gegensatz** zu ***analog*** existiert kein Begriff: nur ***nicht-analog!***

- ***Technik*** (nur bedingt für Signale): Systeme mit gleichem Verhalten, Funktion, z. B. Analogrechner, elektromechanische, akustische oder wärmeelektrische Analogien; z. B. Analoguhr = drehende Zeiger
- ***Biologie***/***Medizin***: analoge Organe bzgl. Morphologie/Struktur, z. B. Auge Wirbeltier, Tintenfisch und Insekt
- ***Rechtsprechung***: juristisch nicht geregelter Tatbestand auf etwa wesensgleichen bezogen; in Deutschland unzulässig
- ***Literatur*** ≈ Fabeln, Parabeln, Märchen, Gleichnis
- ***Psychologie***: Denken, MAXWELL (Wasserströmung ⇔ elektrische Felder), KEKULE (Affen ⇔ Benzol-Ring)
- ***Kybernetik*** begründet sich auf Analogien u. a. Mensch ⇔ Maschine. Achtung! harte KI mit Fehlschlüssen
- ***Bionik***: Umsetzung des Körperbaus von Delphinen zur Optimierung von Schiffsrümpfen, Lotos-Effekt usw.
- ***Platon***: menschliche Seele dreigeteilt (Vernunft, Wille, Begierden).
  Gerechter Mensch kontrolliert Begierden durch Vernunft, mit Unterstützung des Willens
  Analogie Dreiständeaufbau des Staates; erleuchteter Philosoph ⇔ Diktator regiert mittels der Krieger

kontinuierlich

lateinisch ***continens, continuus***: zusammenhängend, angrenzend an, unmittelbar folgend, ununterbrochen, jemand zunächst stehend; ***contingere***: berühren, kosten, streuen, jemandem nahe sein, beeinflussen.

Mathematik: Kontinuum der reellen Zahlen zwischen zwei Zahlen gibt es immer eine weitere
Physik*:* Kontinuumsmechanik berücksichtigt nicht die Mikrostruktur der Materie.
Signale: Möglichkeit beliebiger Zwischenwerten, bezüglich *Zeit und Amplitude* (Energie)
Umgangssprache: nicht vorhanden

Verwandt mit stetig

Deutsch: von stehen verwandt mit stet, stets. das Gegenteil von unstet.
Mathematik: spezieller als Grenzwert lim $f(x)$ für $x \to 0$
Umgangssprache: beharrlich, ununterbrochen, ständig

diskret

lateinisch ***discretion*** Unterscheidungsvermögen, Urteil und Entscheid
discretus: abgesondert, getrennt, ***discernere***: scheiden, trennen, unterscheiden, beurteilen, entscheiden

Physik Größen, die sich nur in endlichen Schrittweiten ändern.
Mathematik: etwas zerfällt oder gliedert sich in einzelne Punkte oder Elemente
Wert, Signal*:* nur endlich viele, meist genau definierte Werte
Umgangssprache (seit 16. Jh.): taktvoll, rücksichtsvoll, zurückhaltend, unauffällig, unaufdringlich, vertrauensvoll, geheim, verschwiegen.

Quant, quantisieren

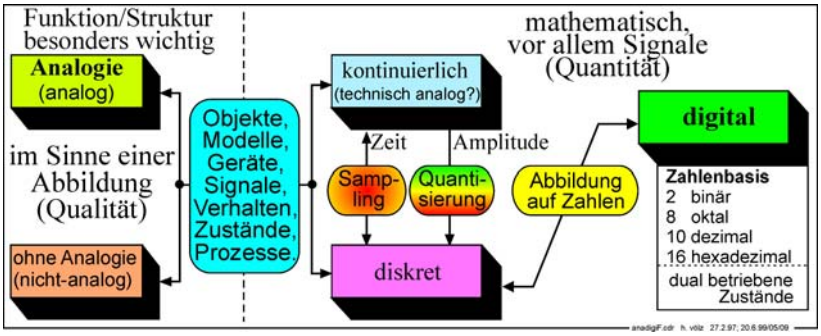
lateinisch ***quantitas*** Größe, Anzahl bzw. ***quantum*** wie viel, so viel wie, inwieweit, irgendwie. Also Menge

Physik *Quant* (kleinstmögliche Energiestufung) durch Max Planck eingeführt
Philosophie: Zusammenhang von Quantität (≈ Menge) ⇔ ***Qualität*** (≈ Güte)
Wert, Signal: Erzeugen diskreter Amplituden und Zeitpunkte (Takte)

digital

*lateinisch **digitus*** Finger

Inhaltlich: zählen, ziffernmäßig, in Zahleneinheiten angeben
Biologie: digitalis Pflanze Fingerhut
Englisch: alte Maßeinheit Fingerbreite =18,5 mm
Wert, Signal: Zahlenbasis erforderlich: *binär* 2, *oktal* 8, *dezimal* 10, *hexadezimal* 16.
Zustände dürfen etwas abweichen, viele Codierungen, z. B. dual bei zwei physikalische Zuständen; **BCD** =binär codierte Dezimalzahl.



kontinuierlich ⇔ diskret, digital

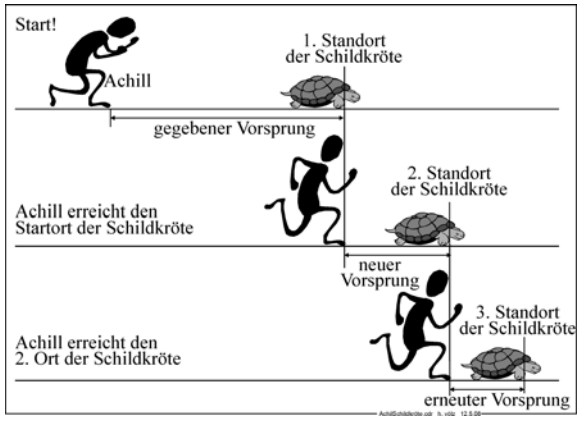
kontinuierlich	diskret - digital
Stärken, Vorteile	
• beliebig kleine (Verstärkung) und große Signale möglich • menschliche Sinne, technische Sensoren und Aktoren arbeiten so • Bei Übersteuerung setzen Verzerrungen weich ein	• Signale sind fehlerfrei zu regenerieren • verlustfreies Übertragen und Kopieren, Vervielfältigen • Verschachteln mehrerer, auch unterschiedlicher Signale • Fehlererkennung und -korrektur • Verlustfreie Komprimierung • Datenschutz (Verschlüsselung)
Schwächen, Nachteile	
Bei jeder Übertragung, Speicherung, Vervielfältigung, (Komprimierung) kommen Störungen, zumindest Rauschen hinzu	• Signale, Werte müssen eng begrenzte Pegel besitzen • müssen insbesondere hinreichend groß sein • Störendes Sampling-Rauschen • Der Takt darf bei Signalen nicht verloren gehen

Beschreibungen von Welt

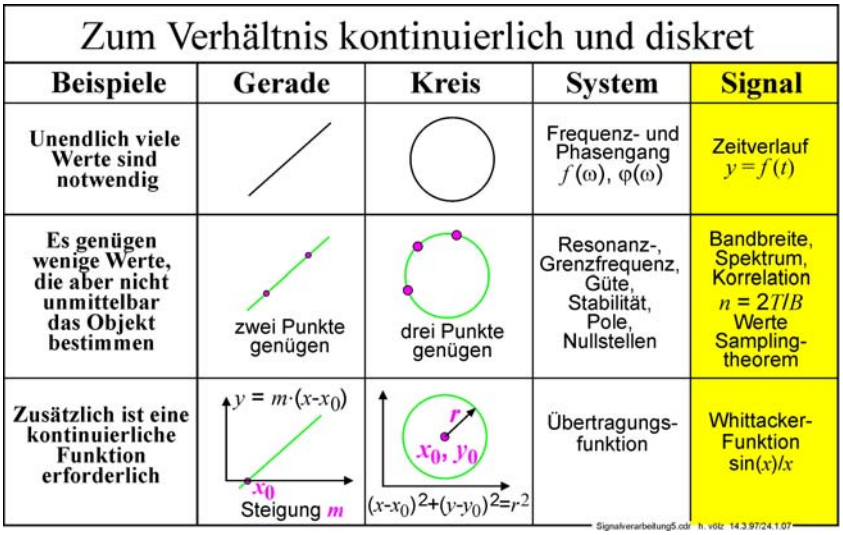
Typ	kontinuierlich	diskret
Griechen	ARISTOTELES	DEMOKRIT
Mathematik	Funktionen (unendlich)	Numerik (endlich)
Antinomien, Paradoxien	Hilbert-Hotel, grot = grün-rot Alle Raben sind schwarz	XENON (Pfeil, Wettlauf) Kretaer Lügner, GÖDEL- Unentscheidbarkeit
Methoden	Limes, Differential	Zählen, Messen
Beschreibung	Differentialgleichungen	Algorithmen, Numerik
Geräte	Analogrechner	Digital-Computer
Entsprechung	Welle	Korpuskel, Quant
Übergang	BOHR'sches Korrespondenz -Prinzip, HEISENBERG-Unbestimmheit	

Problem kontinuierlich ⇔ diskret

Tritt erstmals bei Griechen durch Paradoxien von ZENON aus Elea (335 - 264 v.Chr.) auf
Z. B. Wettlauf von Achilles mit der Schildkröte
Löste ARISTOTELES aus Stagira (384 - 322 v. Chr.) durch Einführung des Kontinuums



Diskret ermöglicht exakt*kontinuierlich* (bei passender Funktion)

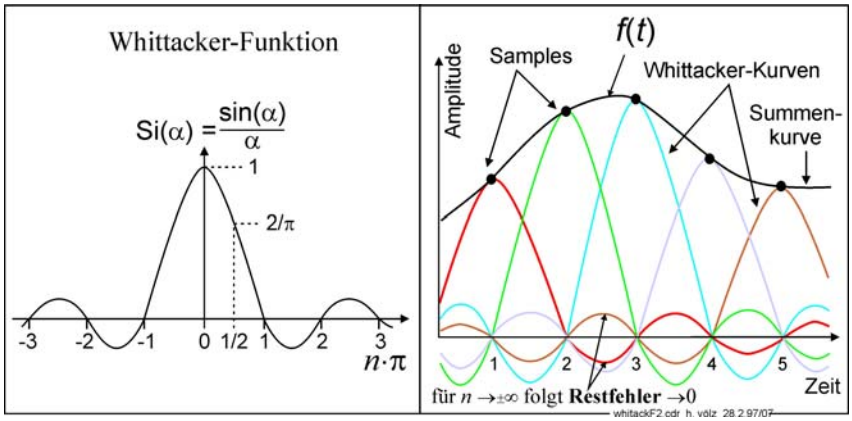


Grundlagen für Sampling-Theorem

Endlich viele Proben mit Δt (englisch **sample** Probe) sollen ein kontinuierliches Signal $f(t)$ ersetzen, beschreiben
KARL KÜPFMÜLLER (1897- 1977) Einschwingen bei Systemen etwa 1924
HARRY NYQUIST (1889 - 1976) Pulsmodulation etwa 1930
VLADIMIR ALEXANDROWITSCH KOTELNIKOW, (1908 - 2005) Abtastung 1933
CLAUDE ELWOOD SHANNON (1916 - 2001) exakt abgeleitet 1948 (1940?)
Entscheidend ist WHITTACKER-Funktion = Spaltfunktion (JOHN MACNAUGHTON WHITTAKER *1929)

$$\mathrm{Si}(\alpha) = \frac{\sin(\alpha)}{\alpha}$$

Besitzt ***Maximum*** 1 bei $\alpha = 0$, ***Nullstellen*** bei $n \cdot \pi$ mit $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots$ $\mathrm{Si}(n \cdot \alpha)$ sind Orthogonalfunktionen
Hierdurch überlagern sich die Funktionen der einzelnen Proben schrittweise zur kontinuierlichen Funktion $f(t)$
Aber erst für alle Proben $n \to \pm\infty$ strebt der ***Restfehler*** zwischen den Proben $\to 0$



Bedingungen für fehlerfrei Rückgewinnung

Theoretisch kann mit dem Sampling-Theorem jede kontinuierliche Zeitfunktion $f(t)$
aus endlich vielen Proben fehlerfrei zurück gewonnen werden
Die Wahl für den Probenabstand ΔT folgt aus der höchsten Signalfrequenz in $f(t)$ bzw. der maximalen Bandbreite B

$$\Delta T \le \frac{1}{2 \cdot B} = \text{Sampling-Theorem}$$

Zusätzlich entstehen noch Forderungen, die technisch nur näherungsweise zu erfüllen sind

1. Die ***Amplituden*** der Proben müssen ***unverändert*** (kontinuierlich) beibehalten werden
2. Die Proben müssen bei der Wiedergabe als δ-Impulse hinreichend kleiner ***Zeitdauer*** $\tau \to 0$ vorliegen
3. Die Proben müssen zum ***korrekten Zeitpunkt*** wiedergegeben werden
4. Um den ***Restfehler*** klein zuhalten müssen ***sehr viele Proben*** ($\mathrm{Si}(\alpha)$) ($n \to \pm\infty$) überlagert werden
5. Dadurch tritt für jeden Signal-Wert eine unzulässig ***große zeitliche Verzögerung*** $T \to \infty$ auf
6. Um die Summe dieser Fehler bei der Wiedergabe klein zu halten, ist ein ***ideal rechteckförmiger Tiefpass*** = FOURIER-Transformierte von $\mathrm{Si}(\alpha)$ mit der Grenzfrequenz B notwendig. Es gibt aber technisch keine idealen Tiefpässe, u. a. beachtliche Phasenfehler

Problem der Amplituden-Quantisierung

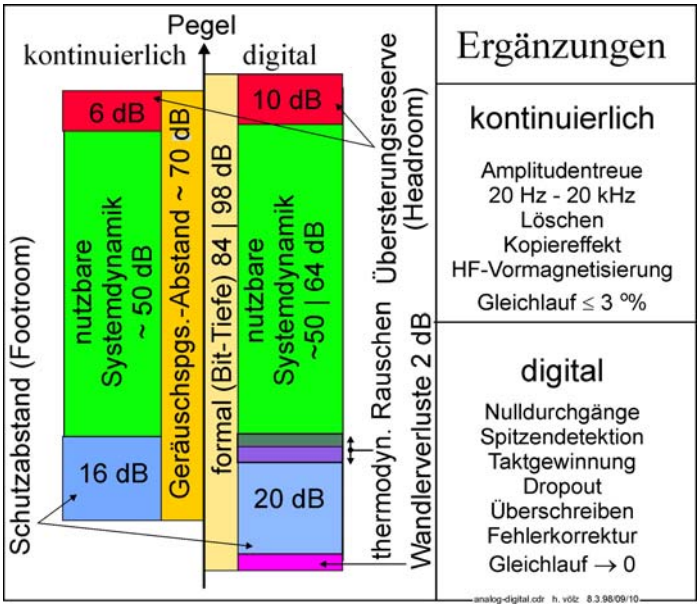
Eine digitale Signalübertragung, Speicherung verlangt ***diskrete Werte für Amplitude*** **und** ***Zeit***
Eine Rückgewinnung der kontinuierlichen Amplituden aus diskreten Werten ist aber ***bis heute nicht bekannt***
Zurzeit ***keine geeignete Funktionen*** oder ***orthogonale Funktionensysteme*** bekannt
eigentlich sollten sie jedoch existieren!
So werden immer sehr viele, oft sogar ***zu viele Amplitudenstufen*** benutzt
Dennoch verbleibt ein beachtlich störendes, z. B. akustisch ***sehr unangenehmes Sampling-Rauschen***

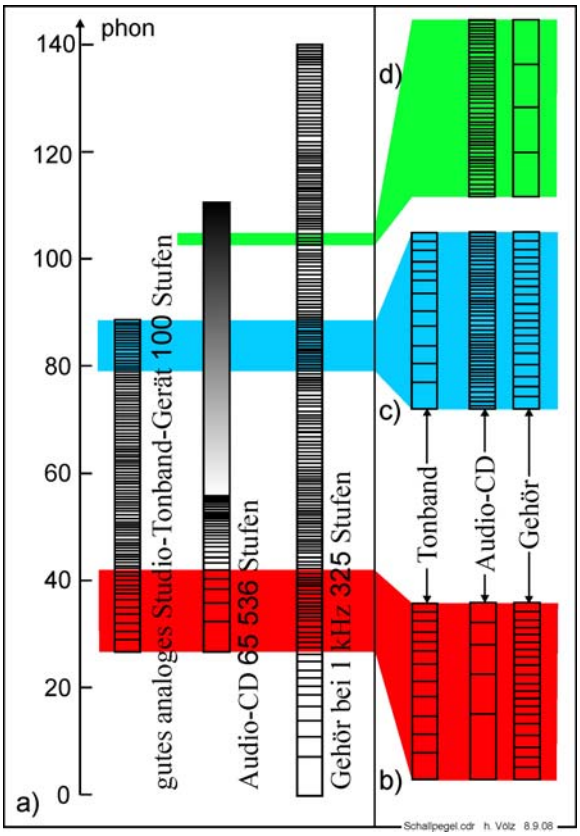
Signaldynamik für Audio

Digital nur bezüglich Verhältnis minimaler/maximaler Pegel deutlich besser (benutzt bei Werbung!)
Wichtig ist jedoch die akustisch ***nutzbare Signaldynamik,*** in beiden Fällen etwa gleich
Bei kleinen und großen Signalen müssen ***bestimmte Bereiche ausgeklammert*** werden

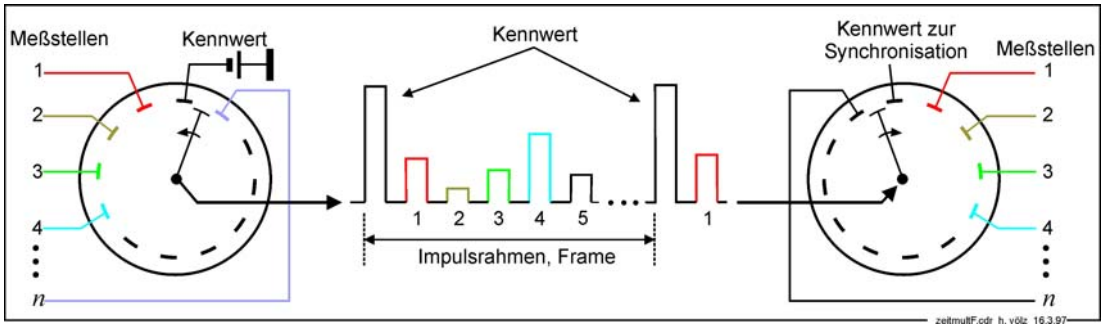
Foot-Room um Grundgeräusche , -Störungen weitgehend unhörbar zu halten
kontinuierlich ≈16 dB ausreichend
digital wegen sehr unangenehmen Sampling-Geräusch ≥20 dB
+ thermodynamisches Rauschen von ≈6 dB zur Verdeckung
+ Verluste der Analog-Digital-Wandler ≈2 dB
Head-Room gegen Übersteuerung
kontinuierlich: Übersteuerung setzen nur langsam und weich ≈6 dB genügen
digital tritt sofort hartes und sehr lautes Knacken auf → Sprung zum Wert Null. ≥10 dB erforderlich

Insgesamt *nutzbare* digitale Dynamik bestenfalls unwesentlich größer
Neudigitalisierung alter kontinuierlicher Aufnahmen auf SA-CD belegt dies
Klassische Magnetbandaufzeichnung z. T. besser als die CD-A: ***Logarithmische Amplitudenstufen ⇔ lineare AD-Wandler***
Dies beweisen die ***SD-CD*** von originalen Magnetbändern

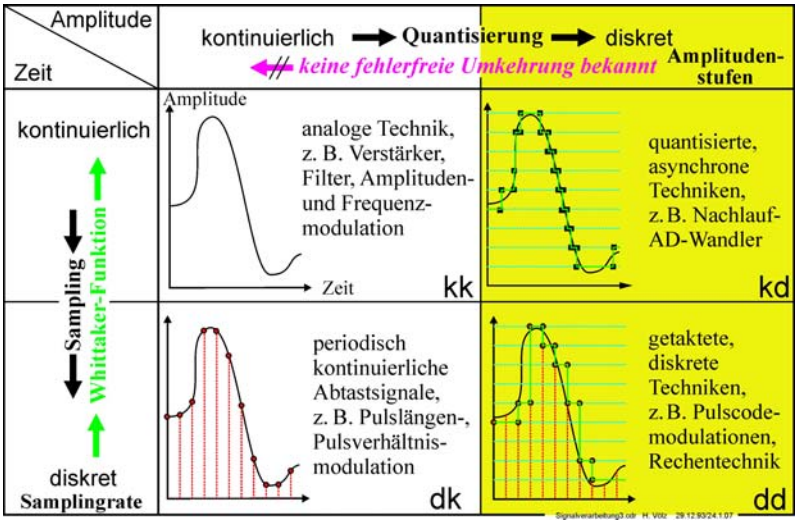




Der zweite, echte Vorteil der Digitaltechnik



Schematische Schlussfolgerung



Zusammenhang mit HEISENBERG-Unschärfe

Entsprechend der Quantentheorie sind zwei konjugierte Größen z.B. Zeit t und Energie E gleichzeitig nur bedingt genau zu bestimmen
Mit der ***Planck***-Konstanten h gilt für die Fehler die HEISENBERG-Unschärfe

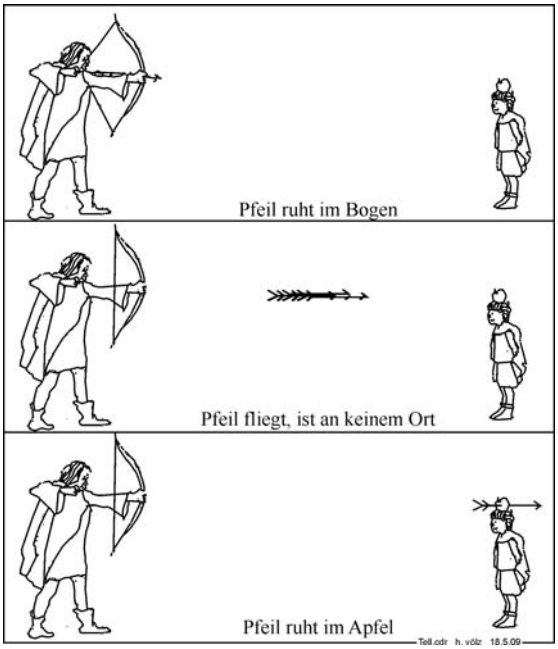
$$\Delta t \cdot \Delta E = h/2.$$

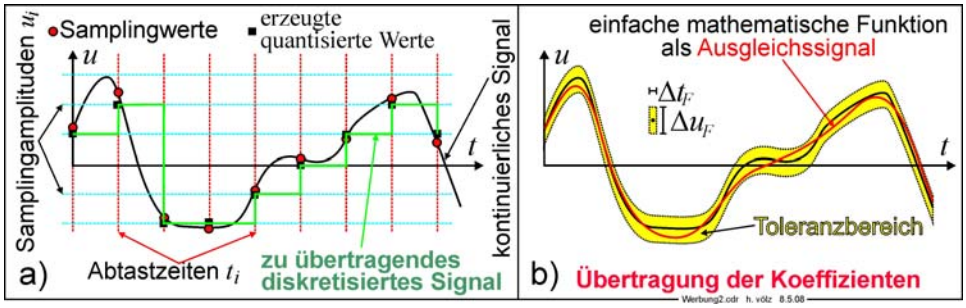
Beispielsweise sei ein Photon (Lichtquant) der Frequenz ν gewählt

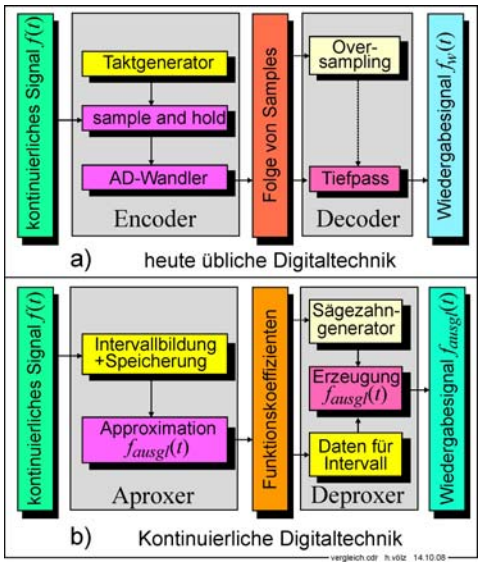
$$\Delta E = h \cdot \nu.$$

Durch Einsetzen folgt das Sampling-Theorem ($\nu = f = 1/B$)
Hierdurch wird deutlich, dass ***Amplitude*** (=Energie) ***und Zeit*** nicht gleichzeitig exakt wiedergebbar sind
Es ist also sinnvoll ***für beide*** angemessene (z. B. unhörbare) ***Abweichungen zuzulassen***
Dies ermöglicht eine total ***neue Digitalisierung ⇒ Kontinuierliche Digitaltechnik***

Anschauliche Unschärfe bereits bei ZENON







Besonderheiten der Kontinuierlichen Digitaltechnik

Vorteile von kontinuierlich und diskret werden verknüpft, ohne dass wesentliche Nachteile auftreten
Fast alle Sensoren, die menschlichen Sinne sowie Akttoren, menschliche Sprache und Handlungen ***arbeiten kontinuierlich***
Die ***digitale Speicherung*** arbeitet fehlerfrei reproduzierbar und kopierbar, ermöglicht Fehlerkorrektur und Verschachtelung
Angepasst besitzt die Kontinuierliche Digitaltechnik kontinuierlichen Ein- und Ausgang, aber digitale Speicherung, Übertragung
Zusätzlich ermöglicht sie ***hoch komprimierende Speicherung und gute Anpassung an Empfänger-Modelle***
Da sie ***technisch großes Umdenken*** verlangt, wird sie sich nur schwer und langsam behaupten und durchsetzen
Hinzu kommt, dass der ***technische Aufwand größer*** ist und noch nicht alle Probleme sehr gut gelöst sind
Es gibt auch ***noch theoretische Aufgaben***, besonders bzgl. der Approximation, daher auch wissenschaftlich interessant

Heute

- Zweimal worst case
  1. höchste Frequenz für Sampling-Rate
  2. kleinste hörbare Amplitudenstufe (n Bit)
- Übertragung der Sampling-Werte
- Tiefpass zum Unterdrücken der Signalsprünge

Kontinuierliche Digitaltechnik

- Wahl eines Zeit-Intervalls
- Anpassung des Signalverlauf durch eine möglichst einfache kontinuierliche Funktion
- Übertragung der Koeffizienten
- Erzeugung der kontinuierlichen Funktion
- Wiedergabe durch zeitlineares Signal

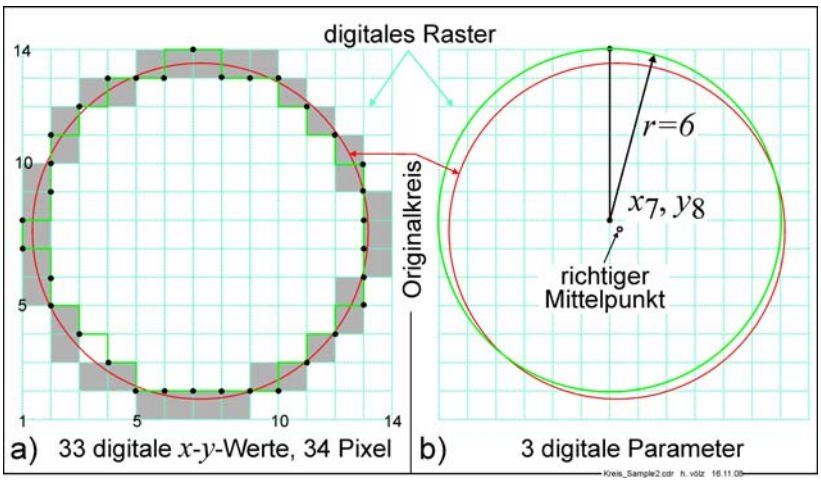
Kontinuierliche Digitaltechnik

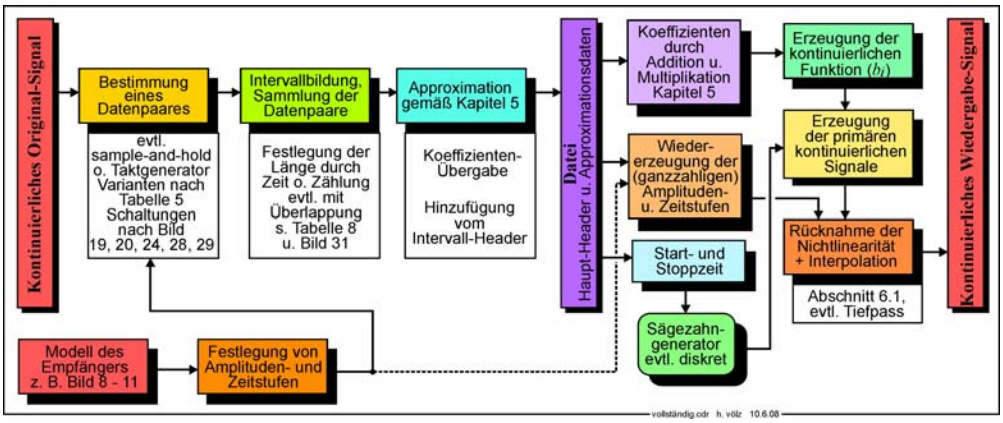
Vorteile

- Übertragung von nur sehr wenigen Koeffizienten
- Kein Sampling-Rauschen, da direkt kontinuierliches Signal
- Kein Tiefpass
- Gutes Berücksichtigen der aktuellen oberen Frequenz
- Einfaches Einbeziehen von Empfänger-Modellen

Nachteile

- erhebliches Umstellen der Digitaltechnik
- völlig neue Denkweise
- teilweise erhöhter Aufwand
- noch keine Lösung für Cuttern

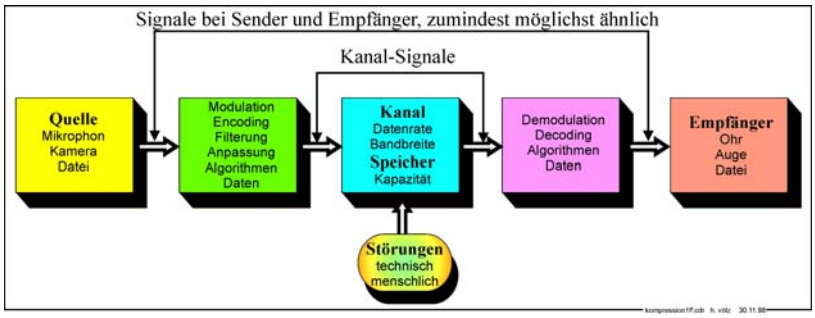




Ein-Ausgangs-Signale ⇔ Kanaleigenschaften

Eigenschaften von Sender (Quelle), Kanal (Speicher) und Empfänger (Senke) sind bei Anwendungen ***fest vorgegeben***
Deshalb ***Anpassungen*** zur bestmöglichen Übertragung, Speicherung notwendig
Erfolgt meist durch ***Modulation ⇔ Demodulation, Encoder ⇔ Decoder*** usw.
Hierbei sind auch ***Störungen*** zu beachten, die im Kanal auftreten

Nur wenige ***Speicherzellen*** (Zustände) arbeiten ***echt digital, diskret***, z. B. Flip-Flop, Lochkarten, Lochbänder, Ferritkerne und Bubbles
Speicher-Kanal kann ***unterschiedlich betrieben*** werden, z. B. direkt, gleich- oder HF-vormagnetisiert, frequenzmoduliert, impulsartig usw.
Indirekt auch durch Ein-Aus-Schalten der Energie, z.B. Laser, Nord-Süd-Magnetisierung ⇒ so ***digital*** möglich
Ähnlich muss Wiedergabe angepasst sein, doch immer ***Signale sehr klein,*** zunächst ***kontinuierliche Verstärkung*** erforderlich
In den letzten Jahren wurden hier viele wesentliche Fortschritte für Signalerkennung erreicht,

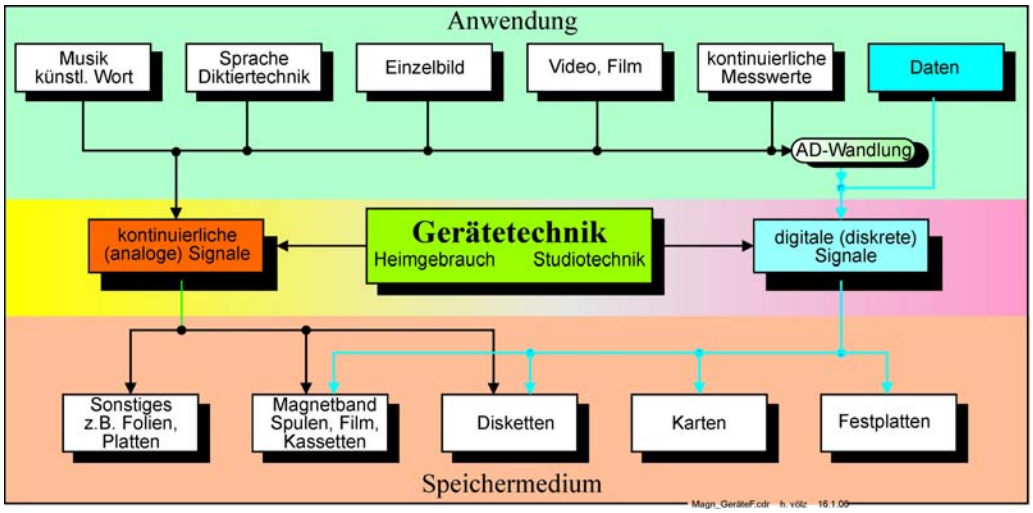


Zwei wichtige Beispiele

Magneto-motorisch: u.a. Magnetband, Festplatte und Diskette, Kanaleigenschaften sehr kompliziert,
u. a. nichtlinear, Frequenz- und Phasengang, Störabstand, störenden Amplitudenmodulation, Gleichlauffehler
Daher spezielle Verfahren für Audio-, Video- und Messtechnik sowie digitale Anwendungen
Kontinuierlich: HF-Vormagnetisierung, Dynamikregelung, Frequenz- und Impulsmodulationen
Prinzipiell ist direkte Speicherung möglich, wird aber heute nicht einmal bei Spielzeugen benutzt.

Opto-motorisch: eigentlich nur bei CD, DVD, Blu Disk und MO
Kanal einfacher, fast linearer Frequenz- und Phasengang, Problem kein Gleichpegel, evtl. Gleichlauf
Nur digital benutzt, trotzdem Speicherkanal kontinuierlich und Wiedergabe mit Verstärker
Bei Audio und Video Analog-Digital-Umwandler (ADU) erforderlich, Rückwandlung Quantisierungs-Rauschen

Bei ***allen digitalen Anwendungen***: Lauflängen-Begrenzung ⇒ spezielle Kodierung, auch Fehlerkorrektur, evtl. Impulsvorentzerrung



Magnetischer Speicherkanal

Optischer Kanal getrennt behandelt

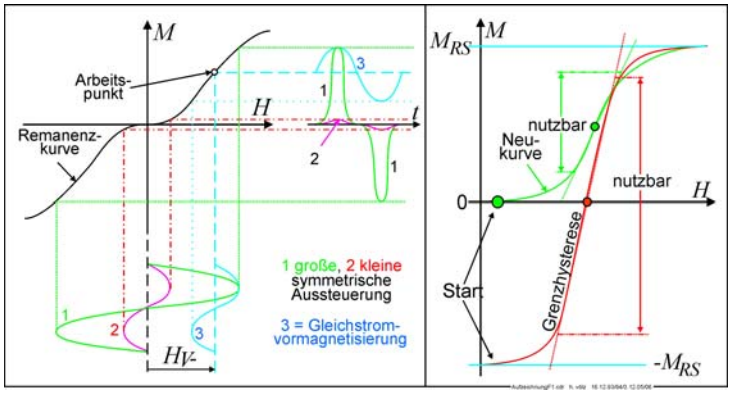
Wesentliche ***kontinuierliche Eigenschaften***

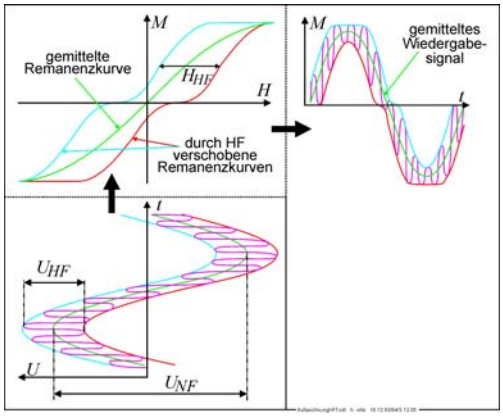
- Erreichbare obere und untere Grenzfrequenz
- Maximales Ausgangssignal als Funktion der Frequenz
- Komplexer Frequenz- und Phasengang (Aperturfehler ≈ Numerische Apertur der Optik: *lateinisch apertura* Öffnung)
- Nichtlinearität Aufzeichnung ⇒ Wiedergabe, Klirrfaktor, Interferenzen
- Rauschen als Funktion der Frequenz
- Störende Amplitudenmodulation
- Zeitfehler, Gleichlauf
- Kopiereffekt

Wesentliche ***digitale, diskrete Eigenschaften***

- Zulässige Impulsdichte bezüglich Fehlerrate
- Flankensteilheit, Peakshift, Symmetrie, Gleichdrift
- Inter-Bit-Wechselwirkung ??
- Zeitfehler, Gleichlauf
- Drop-Out, Drop-In

Übertragungskennlinie



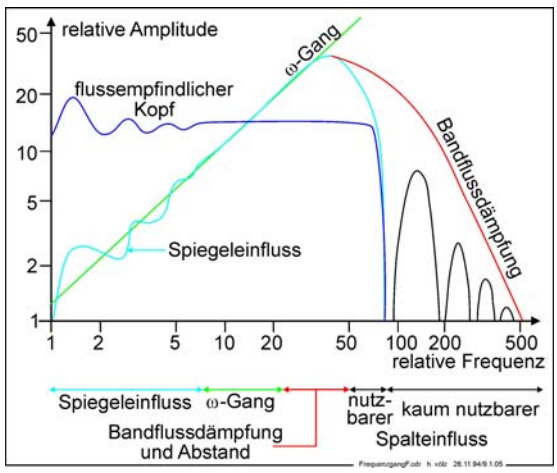


Frequenzgang

- ω-Gang (einziger Minimalphasengang) fehlt bei magnetoresitiver Wiedergabe
- Bandflussdämpfung: Schichtdicke, Senkrechtspeicherung (a)
- Abstandsdämpfung: Rauheit von Band und Kopf, bzw. fliegender Kopf (a)
- Spalteinfluss (a)
- Spaltschiefstellung (a)
- Spiegeleinfluss (a)

$$\widehat{U} \sim \omega \cdot \frac{1-e^{\frac{-2\cdot\pi\cdot d}{\lambda}}}{\frac{2\cdot\pi\cdot d}{\lambda}} \cdot e^{\frac{-2\cdot\pi\cdot a}{\lambda}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi\cdot\delta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi\cdot\delta}{\lambda}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi\cdot b\cdot\tan(\alpha)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi\cdot b\cdot\tan(\alpha)}{\lambda}} \cdot \left(1-\frac{0,2\cdot\cos\left(\frac{\pi\cdot l}{2}+\frac{1}{6}\right)}{\left(\frac{l}{\lambda}\right)^{2/3}}\right)$$

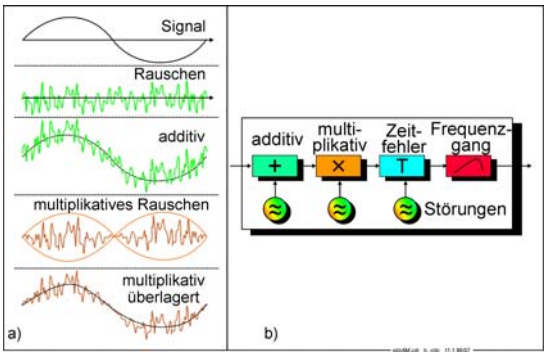
(a) = Aperturfehler sind nicht mit einfachen Filtern phasenrichtig zu linearisieren, erfordern z. B. Brückenschaltungen



Störungen beim Magnetkanals

Störungen haben generell viele Ursachen, beim Magnetkanal kommen einige hinzu
Dabei unterscheiden ***frequenz- und wellenlängen-abhängige*** (w) Einflüsse
Trennbar nur bei Aufzeichnungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten

- Thermisches ***Widerstandsrauschen*** am Eingang des ersten Verstärkers etwa linearer Frequenzgang ≈ weiß
- Eigenrauschen des ***Verstärker***s, bei tifen Frequenzen verstärktgemäß 1/*f*, bei ≈10 bis 1000 Hz
- ***Partikel-Rauschen*** durch statistische Verteilung, vollständig entmagnetisiertes Band-„Grundrauschen" (w)
- ***Vertstärkt durch Gleichfeld***, z. B. unvollständige Löschung (w)
- ***Ungleichmäßige Verteilung der Magnetpartikel*** bewirkt multiplikatives (ca. 3 - 10 %) (w)
- ***Band-Kopf-Abstand*** schwankt statistisch, wellenlängenabhängig und z.T. multiplikativ (w)
- ***Magnetisch bedingtes*** Rauschen, Magnetkopf, z. B. Wandverschiebung und Umklappem (BARKHAUSEN) (w)
- ***Kopiereffekt*** (w)
- ***Drop Out*** und ***Drop In*** (w)
- Indirekte Auswirkungen vom ***Gleichlauffehler***
- ***Linearisierung*** des komplizierten ***Frequenzganges*** bewirkt erhebliche Veränderungen (z. T. w)



Thermisches Rauschen

Widerstand R erzeugt bei absoluter Temperatur T mit BOLTZMANN-Konstante k ≈ 1,3805 10^{-23} J/K frequenzlineare Rauschleistungsdichte

$$\frac{dP}{df} = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \,.$$

Obere Frequenzgrenze ≈10^9 Hz immer höher als obere Frequenzgrenze der Magnetspeicherung
Wegen Betrachtung in logarithmischer Frequenzdarstellungen muss statt d*f*, sondern d*f* /*f* gewählt werden:

$$\frac{dP}{df \;/\; f} = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot f \,.$$

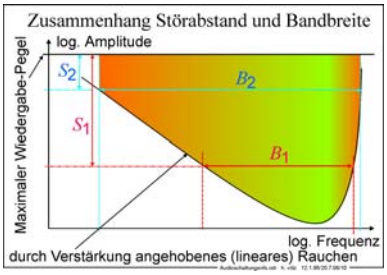
Rauschleistungsdichte nimmt dann proportional mit der Frequenz zu. Für die Rauschspannung gilt

$$U = \sqrt{P \cdot R} \,.$$

Sie steigt im logarithmischen Frequenzmaßstab (z.B. Rauschspannung je Terz) mit der $\sqrt{f}$ an

Rauschen und Störabstand

Bei Resonanz Magnetkopf ⇔ (Schalt-) Kapazität steigt Rauschspannung zusätzlich an
Der Verstärker erhöht bei tiefen Frequenzen infolge ***1/f-Rauschen*** den Störpegel
Oft muss der komplexe Frequenzgang entzerrt werden, dann steigt das wirksame Rauschen bei hohen und tiefen Frequenzen an
Hierdurch Zusammenhang Störabstand ⇔ nutzbare Bandbreite



Magnetband als Rauschquelle

Jedes ***Magnetpartikel*** bewirkt einen ***Spannungsimpuls*** im Wiedergabekopf
Magnetisches Dipolmoment Ξ eines Teilchens folgt aus Sättigungsmagnetisierung M_S, Volumen V_P und Rechteckfaktor R

$$\Xi = \frac{M_S \cdot V_P}{R}$$

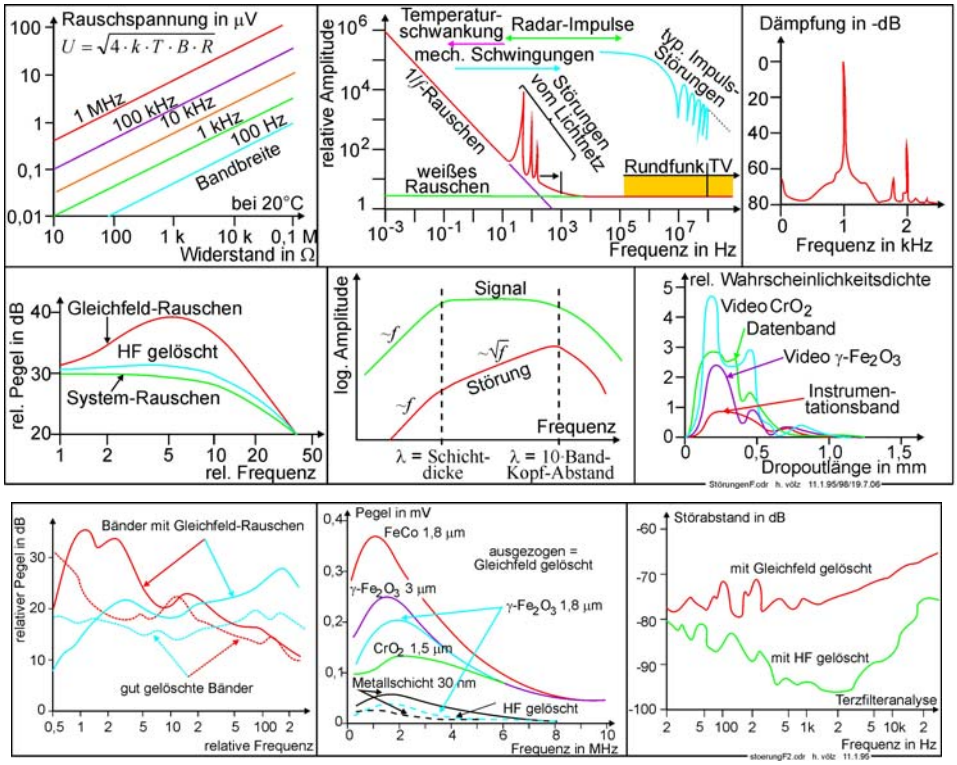
Bei ***Volumenteilchendichte n*** erzeugen Magnetkopf sie eine Rauschleistungsdichte proportional zur Bandgeschwindigkeit *v*

$$dP \sim v^2 \cdot \Xi^2 \cdot n \cdot dx \cdot dy \cdot dz \ .$$

Viele Einflussparameter u. a. ***Verteilung*** der Partikel bezüglich Größe, Koerzitivfeldstärke, Magnetisierung, Magnetisierungsrichtung und Dichte in der Magnetschicht, bewirken Rauschens in Normalverteilung
Überlagert von zusätzlichem ***1/f-Rauschen*** für Wellenlänge ca. > 10 µm
Zusätzlich noch statistisch ***schwankender Band-Kopfkontakt***, Rauheit der Bandoberfläche
Magnetschichten enthalten auch ***Fehlstellen***, fehlende Magnetpartikel, Fremdeinschlüsse, Oberflächendefekte usw.
Insgesamt Magnetbandrauschen > als Widerstands- und Verstärkerrauschen

Magnetband mit Aufzeichnung, u. a. Gleichfeld

Bei Aufzeichnung entsteht zusätzlich multiplikative Rauschen, besser zu verstehen durch Gleichfeldrauschen
Bis zu einer bestimmten Tiefe werden Magnetpartikel ausgerichtet ⇒ kollektiv gleich ausgerichtete Impulse
Anzahl der Teilchen in der Volumeneinheit streut ⇒ zusätzliche Rauschen ist proportional aufgezeichneten Gleichfeld
Erzeugt infolge der Nichtlinearität auch Seitenbänder
Z. B. bei 1-kHz-Signal Spitzen in der Umgebung von 2 und 3 kHz
Können z.T. noch mit der HF-Vormagnetisierung interferieren, z. B. Rauschspitze bei etwa 1,7 kHz
Größere Magnetpartikel enthalten auch Wände ⇒ Rauschen durch Verlagerung, Umklappen usw.
Komplexes Zusammenwirkens der vielen Rausch-Einflüsse keine befriedigende Theorie
Ansätze bei [Altrichter 1958], [Hack 1990], [Mallinson 1993], [Siakkou 1985], [Völz 1996]



Rauschen im Betrieb

Verstärkerrausch ist auch vorhanden, wenn kein Band wiedergegeben wir
Ruherauschen tritt auf, wenn ein „jungfräuliches“ bzw. ein ideal gelöschtes Band den Magnetkopf passiert
Die einzelnen spontan magnetisierten Partikel erzeugen einzelne Impulse und sind daher die Ursache
Je kleiner die Partikel, desto geringer ist dieses Rauschen. Bei guten Bändern nur wenig größer als Verstärkerrauschen
Betriebsrauschen ist größer, der Aufzeichnungskopf wird mit der HF-Vormagnetisierung betrieben
besonders groß, wenn die HF-Schwingung unsysmmetrisch, geradzahlige Harmonische enthält.
Gleichfeldrauschen hat mehrere Ursachen. z. B. wenn Wiedergabekopf magnetisiert, Magnetband eine Gleichfeldaufzeichnung besitzt
Selbst bei sehr guten Geräten sind bereits Einflüsse des Erdfeldes nachweisbar
Tritt auch auf, wenn ein Magnetband ungenügend, z.B. mit unsymmetrischer Schwingung gelöscht wurde

Kopiereffekt

Magnetbänder auf Spule oder freitragend gewickelt, Aufzeichnungen benachbarter Windungen beeinflussen sich ⇒ Kopiereffekt
In Umgebung eines lauten Signals deutlich hör-, messbar, z. B. Hörspiel Tür knallend zugeschlagen, Vor- und Nachechos
Effekt entsteht vor allem bei Partikeln mit geringer Koerzitivfeldstärke
Bessere Bandtechnologien mit engerer Verteilung der Koerzitivfeldstärke ließ Kopiereffekt geringer werden
Frequenzgang bestimmt durch Banddicke ***d*** (Unterlage plus Magnetschichtdicke d_s) und aufgezeichnete Wellenlänge λ

Für Dämpfung des *Kopiereffektes* gilt Näherung

$$\delta_k = \frac{\lambda}{\pi \cdot d_s} \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}} \ .$$

Frequenzgang besitzt ein Maximum, hängt überwiegend von der Banddicke d ab $\lambda_m = 2 \cdot \pi \cdot d$
Bei der Bandgeschwindigkeit v folgt für das Frequenzmaximum

$$f_m = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot d} .$$

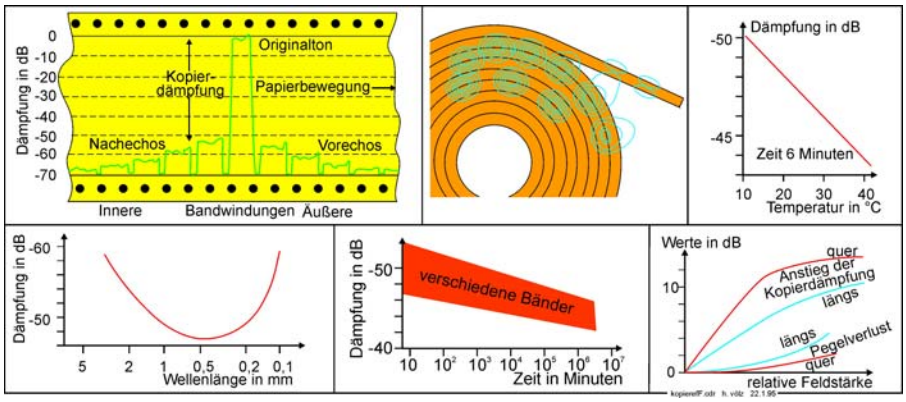
Typischen Studioband 38,1 cm/s im Bereich der höchsten Hörempfindlichkeit ≈1 kHz
Magnetfilme (70 bis 120 µm) sehr tiefe Frequenz, praktisch unhörbar
Bei der Heimtontechnik trotz dünner Bänder noch tiefer wegen geringer Geschwindigkeit
Wegen geringen Störabstand zusätzlich verdeckt

Lagerzeit und Reduzierung

Entscheidend Zeitdauer T_{Lager} der unveränderten Lagerung einer Aufzeichnung
Abschätzung mittels ***Arrhenius***-Gleichung

$$D_{kopier} \sim e^{\frac{-k \cdot T}{E_b} \cdot \frac{T_{lager}}{t_0}} .$$

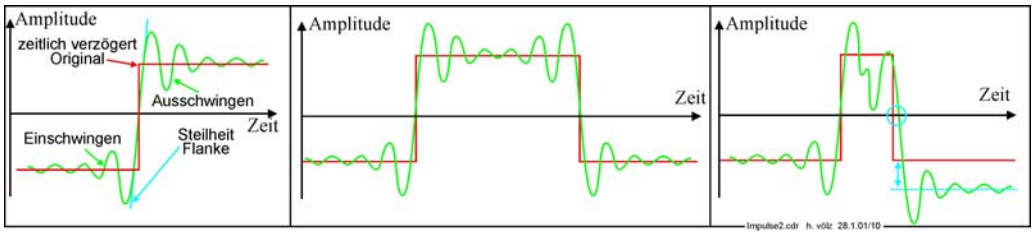
E_b = bandtypische Energieschwelle, k = BOLTZMANN-Konstante, T = absolute Temperatur, t_0 eine Bezugszeit
Kopiereffekt ≈ magnetische Nachwirkung, wird daher durch schwaches globales Magnetfeld verstärkt (Senkung von E_b)
Andererseits umso geringer, je länger die Zeit seit der letzten Löschung ist
Daher auch nachträgliche Reduzierung des Kopiereffektes möglich
Magnetband regelmäßig in Abständen von wenigen Monaten umwickeln
Insbesondere in beachtlichem Abstand vor der Wiedergabe vorgewickelt lagern, z. B. ca. 1 Tag bei 30 °C
Senkung durch geringe Magnetkopffelder beim Umwickeln, beim Abspielen vor dem Wiedergabekopf möglich
Dadurch sinkt zwar etwas der Nutzpegel, jedoch wesentlich weniger als der Kopiereffekt
Besonders wirksam ist ein magnetisches Querfeld, optimale Feldstärke ≤ 70 A/cm, möglich mit speziellem Dauermagneten



Digitale (diskrete) Speicherung

Eine digitale Quelle erzeugt *sequentielle* 01-*Folgen* aus zwei deutlich trennbaren (meist ±) Amplituden
Meist existiert ein *fester Takt*, dem die 01- bzw. 10-Übergänge (Impulse) zeitlich zugeordnet sind
Wegen endlicher Steilheit der Übergänge wird für die Zeit meist der Nulldurchgang benutzt, festgelegt
Am Kanalausgang entstehen hieraus immer kontinuierliche Signale mit folgenden Eigenschaften

- Die ***Flanke*** eines Überganges besitzt eine ***endliche Steilheit***
- Es gibt ***Ein***- und ***Ausschwingvorgänge***, welche die ***Impulsdichte*** der Speicherung begrenzen
- ***Benachbarte Flanken*** beeinflussen sich und verschieben so Spitzenwerte (peakshift) und Nulldurchgang
- Das ***Taktsignal*** ist durch Zeitfehler (Gleichlauf) und größere Lauflängen (gleich bleibende 0- oder 1-Werte) unsicher
- Es gibt eine ***Fehlerrate***, welche vor allem durch nicht erkennbare 01- bzw. 10-Übergänge bestimmt wird



Einzelimpuls

Einzelimpuls entspricht einem Flusswechsel, z. B. von Süd nach Nord
Besteht aus vielfältig beeinflussten magnetischen Komponenten in x- und y-Richtung:

- Magnetische ***Parameter der Schicht***, vor allem M_R, H_C
- ***Schichtdicke*** d
- ***Band-Kopf-Abstand*** a,
- ***Spaltweite*** des Magnetkopfes δ
- Längs- und Senkrecht-***Feld*** des ***Aufzeichnungskopfes***
- ***Wechselwirkungen*** zwischen den magnetischen ***Magnet-Partikel***

Komplexität der Zusammenhänge ermöglicht nur theoretische Näherungen
Komplexe magnetische Teilchen-Wechselwirkung verlangt zusätzlich vielstufige iterative Verfahren z. B. [Siakkou 79, 85, 90]
Vereinfachungen: nur Magnetfluss im Abstand *a* von der Oberfläche des Speichermediums

Näherung arctan (*x*)

Vereinfachung: Aufzeichnung rechteckig in *x*-Richtung
Einflüsse bewirken Abflachung und „Rundung" des remanenten Flussverlaufs ⇒ Näherung durch arctan(*x*)
Nimmt für $x \to \pm\infty$ Grenzwerte $\pm\pi/2$ an $\Rightarrow \pm M_R$
In Umgebung vom Nullpunkt Näherung durch Gerade mit Steilheit *s* gemäß Länge π, folglich Magnetisierungsverlauf

$$M(x) = \frac{2}{\pi} \cdot M_r \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{s} \cdot x\right)$$

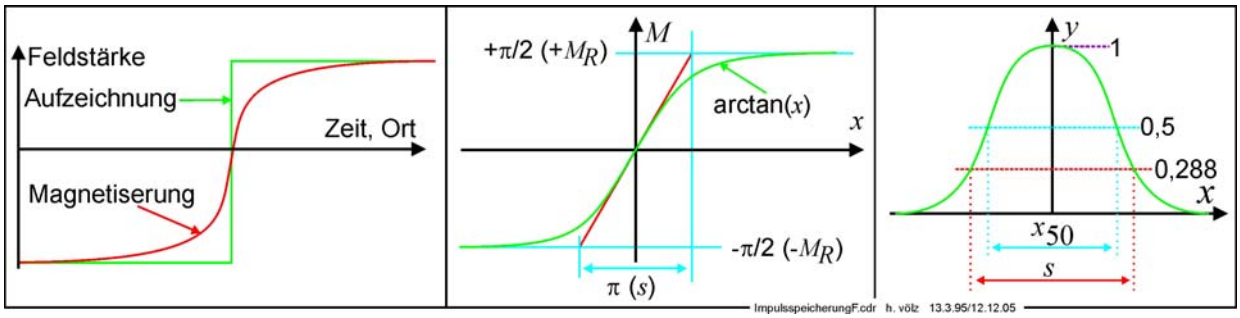
Formal einbezogen alle Dämpfungen, wie Spalt- und Spiegelfunktion, Spaltschiefstellung und Kopfverluste
Induktive Wiedergabe durch Differentiation gemäß

$$\frac{d\arctan(x)}{dx} = \frac{1}{1+x^2} \quad \text{führt zu} \quad \Rightarrow U_W \sim \frac{dM(x)}{dx} \sim \frac{1}{1+\left(\frac{\pi}{s} \cdot x\right)^2}$$

Die ***Halbwertbreite*** des zugehörigen ***Impulses*** beträgt $x_{50} = 2 \cdot \frac{s}{\pi}$

Bezüglich der geradlinig genäherten Grenzen des Aufzeichnungsimpulses ($x = s/2$) beträgt die zugehörige Impulshöhe nur noch

$$x_{s/2} = \frac{1}{1+(\pi/2)^2} \approx 0{,}288 \cdot$$



Ergänzungen

[Mallinson] ergänzt Band-Kopf-Abstand *a*, Speicher-Schichtdicke *d* und halbe Kopf-Spaltweite δ
In brauchbarer Übereinstimmung mit Messungen erhält er

$$x_{50} \approx 2 \cdot \sqrt{\left(a + \frac{s}{\pi}\right) \cdot \left(a + \frac{s}{\pi} + d\right) + \delta^2} \cdot$$

Bei geringem Kopfabstand $a \Rightarrow$ Näherung

$$x_{50} \approx 2 \cdot \left(\frac{s}{\pi} + \delta\right) \cdot$$

Impulsfolgen

Ein digitales Signal setzt sich aus Einzelimpulsen alternierender Richtung zusammen
Stark vereinfacht gilt ***Superpositionsprinzip***: Flusswechselkurven addieren sich ohne gegenseitigen Einfluss
Die einzelnen orts- (zeit-)verschobenen Einzelimpulse x_n werden alternierend mit $(-1)^n$ zusammengefasst

$$M(x) \sim \frac{2 \cdot M_r}{\pi} \sum_n (-1)^n \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{s} \cdot (x - x_n)\right).$$

Dennoch folgt: ***je näher zwei Impulse*** (kleiner Impulsabstand) zusammenrücken,

- desto ***kleiner*** wird das erreichbare ***Signal*** und
- desto ***stärker*** wird die unerwünschte ***Verschiebung der Spitzenwerte*** (***peakshift***).

Für streng periodische Impulsfolgen existiert konstanter Impulsabstand Δx, daher oben $x_n = n \cdot \Delta x$.
In der Praxis gibt es erhebliche Abweichungen. Auch bessere Ansätze bleiben ungeeignet
Experimentell ermittelte [Mallinson] für die Spannungsamplitude (*a* = Band-Kopf-Abstand. δ halbe Spaltweite):

$$|U| \sim \exp\left[-\frac{\pi}{\Delta x} \cdot \left(a + \frac{\delta}{\pi}\right)\right]$$

Zwischen minimal nutzbarer Signalbreite (Speicherdichte) x_{Abst} und Band-Kopf-Abstand *a* gilt die Näherung

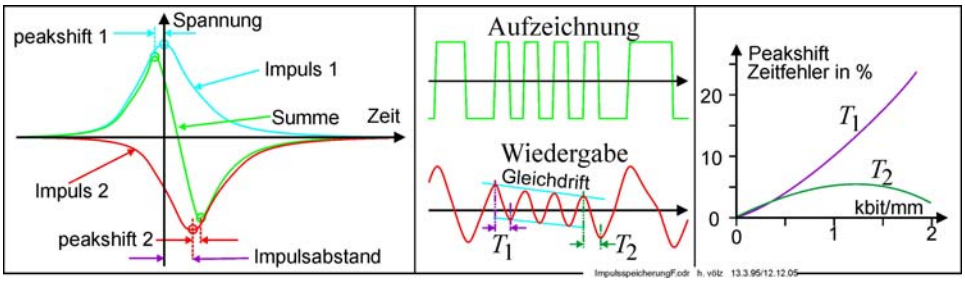
$$a \le 0{,}2 \cdot x_{Abst} \cdot$$

Kritische Muster

Für ***peakshift*** ist kein einfacher theoretischer Zusammenhang bekannt
Experimentell wird mit „kritischen“ Mustern gearbeitet = Abfolge von Impulsübergängen mit zwei unterschiedlichen Abständen
Dabei zeigt sich:

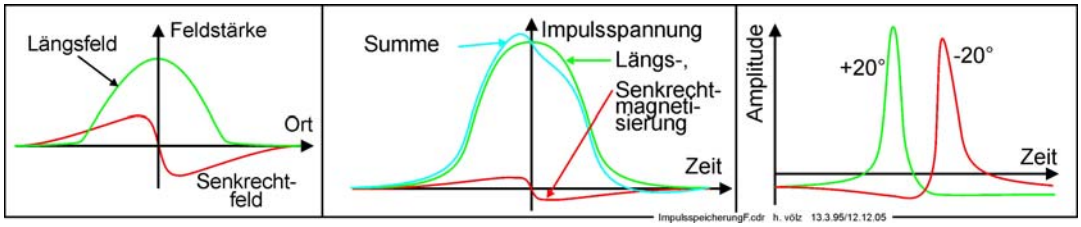
- Die ***Impulshöhe*** hängt von der Impulsdichte ab
- Teilweise erfolgt eine Verschiebung des mittleren ***Gleichwertes***
- Hierdurch verlagern sich die ursprünglichen ***Nulldurchgänge*** zu Amplitudenwerten, die deutlich von Null abweichen
- Die größte ***Spitzenwertverschiebung*** (*englisch* = peakshift) erfolgt an den Übergängen zwischen großen und kleinen Impulslängen.

Wird das kritische Muster mit unterschiedlicher Speicherdichte benutzt, ensteht typischer Verlauf für peakshift und Drift
Der erste Spitzenversatz (T_1) nimmt mit wachsender Speicherdichte zu, der zweite (T_2) durchläuft ein Maximum
Eigentlich müsste Flusswechselabstand benutzt werden, denn in der Praxis werden Codierungen benutzt mit 0,5 - 5 Bit/Flusswechsel (s. u.)
Die Grenze für Spitzenwertverschiebungen liegt bei ≤20 %



Signalverfälschungen

Der arctan-Verlauf ist nur eine einfache Näherung, wird durch zwei sich überlagernden Feldkomponenten verändert
In der Praxis liegt gemischte Längs- und Senkrecht-Aufzeichnung vor
⇒etwas unsymmetrischen Impulsen + peakshift + unterschiedlichen Flankensteilheiten des Impulses
Besonders ausgeprägt bei vakuumbeschichteten ME-Magnetbändern (metal evaporated) + Laufrichtung Band



Takt, Lauflänge, Code

Bei der digitalen Speicherung ist fast immer ein ***fester Takt*** gegeben
In digitalen Signalen können mehrere bis viel 0- bzw. 1-Werte aufeinander folgen
Während dieser Zeit fehlt der Takt, denn er wird nicht getrennt übertragen, gespeichert
Er muss daher aus 01- oder 10-Signal-Wechseln (Impulse) regeneriert werden
So entstehen ***Lauflängen*** über mehrere Takte, bei den sich das 0- bzw. 1-Signal nicht ändert
Hierdurch treten bzgl. der Wechsel ***vergrößerte Zeitfehler*** auf, sie erzwingen eine Begrenzung der Lauflängen
Dazu wurden spezielle Codierungen entwickelt (s. u.)

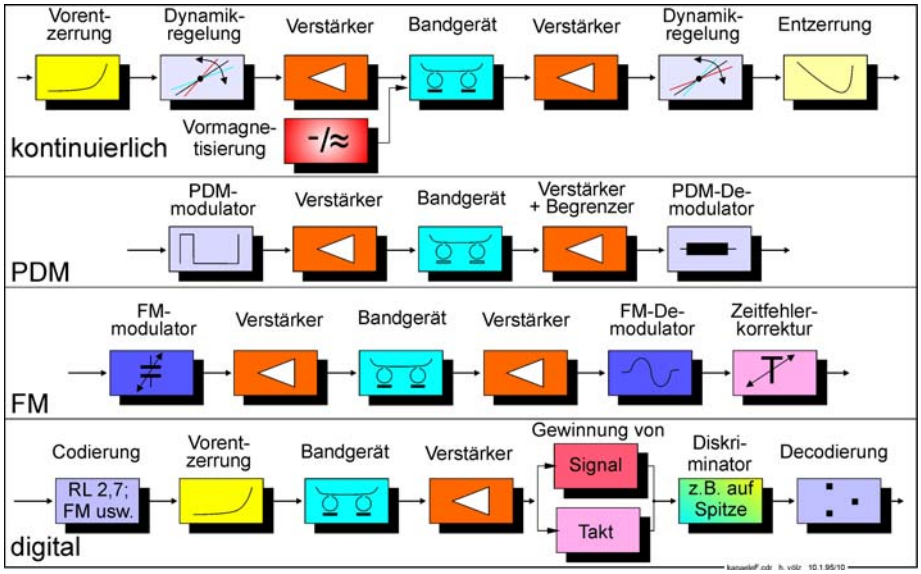
Kontinuierliche Signalspeicherung

Kontinuierliche Signalspeicherung ist, war bei **Schall-** und ***Videospeicherung*** sowie einigen ***Sonderanwendungen*** wichtig
Schallspeicherung für Musik, künstlerisches Wort, Diktiertechnik ⇒ verschiedene ***Qualitätsstufen*** Diktier, HiFi, Studio
Außerdem Speicherung von ***Tieftfrequenzen, Infra-*** und ***Ultraschall*** für **Messwert-** und ***Langzeitaufzeichnung***
Wichtig dabei u.a. Möglichkeiten der ***Frequenztransponierung*** und speziellen Modulationen
Medizin ***24-Stunden-Aufzeichnungen*** von Herzschlag oder Blutdruck
Aufzeichnungen über Monate in ***unzugänglichen oder gefährlichen Gebieten***, z. B. Tiefsee, Vulkane, radioaktive Gebiete
Fast ausschließlich ***Magnetbandspeicher, ausnahmsweise Disketten*** (Video-Floppy von Sony = Still-Video)
Fast alle Anwendungen sind heute durch digitale Techniken verdrängt, Festplatte und Halbleiterspeicher (Flash)
Dadurch neue Möglichkeiten zur Datenkompression MPEG, MP3 usw.

Hauptanwendungen kontinuierlicher Signalspeicherung

Signalart	**Schall**	**Video**	**Sonderanwendungen**
Beispiele	Musik, Sprache	Lauf-, Einzelbild	Messwert-, Langzeitspeicherung
Kennzeichen	HF-Vormagnetisierung Frequenzgang, Störabstand Dynamikregelung (z.B. Dolby)	Frequenzmodulation	Signalgenauigkeit Tiefe Frequenzen bis Gleichwerte Frequenztransponierung, PLM und PRM
Wesentliche Störungen	Rauschen Kopiereffekt, Jaulen	Nulldurchgänge Zeitfehler	Modulationsrauschen, Phasenfehler Nulldurchgänge, Gleichlauffehler

		Signalanpassungen an Kanäle			
		direkt		über Träger	
		kontinuierlich	diskret	kontinuierlich (harmonisch)	diskret (Impulse)
Signale	kontinu-ierlich	Filter Dynamikregelungen Transformationen Vocoder	Quantisierung AD-Wandlung Samplingtheorem!	AM (Rundfunk) FM (UKW, Videospeicher) Einseitenbandtechnik Restseitenband (FS) Trägerfrequenztechnik	PDM PAM PFM Meßspeicher Samplingtheorem!
	diskret	DA-Wandlung nur bedingt umkehrbar!	Fehlerkorrektur Kryptographie Redundanz-, Relevanz- änderungen	PSK FSK QAM (Modem, Satelliten)	PCM Codes (digitale Speicher, Netze)



Anpassungen für kontinuierliche Magnetspeicherung

- ***Direkt*** mit großer nichtlinearerVerzerrung
- ***Gleich- oder HF-Vormagnetisierung*** zur Reduzierung der nichtlinearen Verzerrungen
- ***Dynamikregelungen***, unterschiedlich für höhere Dynamik oder kleinere Messfehler
- ***Frequenzmoduliert***: Phasen- und Gleichlauf-Fehler wichtig, Amplitudengang und Nichtlinearität weniger wichtig
- ***Pulsmoduliert***, je nach Typ werden Amplituden-. Phasen- und/oder Gleichlauffehler deutlich reduziert; u.a. wichtig für Transponierung Tieftfrequenzen ind Ausdio-Bereich, z. B. Geologie
- ***digital,*** wird getrennt behandelt (s. u.)

Kennzeichen der Schallaufzeichnung

- ***Wichtige Kenndaten***: Frequenzbereich, Dynamik, Verzerrungen, Gleichlauffehler (Jaulen)
- ***Datenträger***, Tonband auf (freiem) Wickel (Studie), Dreizackspulen (Heimton), Kassetten (Heimton, Diktiertechnik) und Sondervarianten: z. B. Folien, Disketten (Diktiertechnik)
- ***Elektronische Schaltungen*** je nach Aufwand: Aufzeichnungs-, Wiedergabeverstärker, Vormagnetisierung, Löschgenerator, Dynamikregelung

Elektronische Schaltungen

Details u. a.: [Blaese], [Scholz 79 + 80]

Aufzeichnungs-Schaltungen meist recht einfach

Mit drei Magnetköpfen:= doppelte Weiche: HF-Sperre zum Aufzeichnungsverstärker +
einstellbarer Kondensator gegen Kurzschluss der NF-Signale und Einstellen der optimalen HF-Vormagnetisierung

Nur ***Aufzeichnungs-Wiedergabe-Kopf***: Schutz des hochempfindlichen Wiedergabeverstärkers gegenüber
sehr großen Aufzeichnungs- und HF-Signalen = „zweiseitigen" Betrieb des Kopfes mittels Umschalters
optimal Induktivität ≈1 H ⇔ für Aufzeichnungskopf ≈50 mH ⇒ Anzapfung

Wiedergabe-Schaltungen deutlich komplexer

Wiedergabekopf zur Unterdrückung von Störungen meist symmetrisch ausgeführt
Große Verstärkung = leistungsfähiger Operationsverstärker (OP) + ***Linearisierung des Frequenzganges***

1. ***nachgeschaltetes Netzwerk*** E_N: ω-Gang → RC-Glied mit Grenzfrequenz 20 bis 100 Hz
Höhenanhebung wesentlich steiler → Resonanzkreis für höchste zu übertragende Frequenz

Gefahr: OP bei mittleren Frequenzen ($\approx\lambda_1$) übersteuert wird.

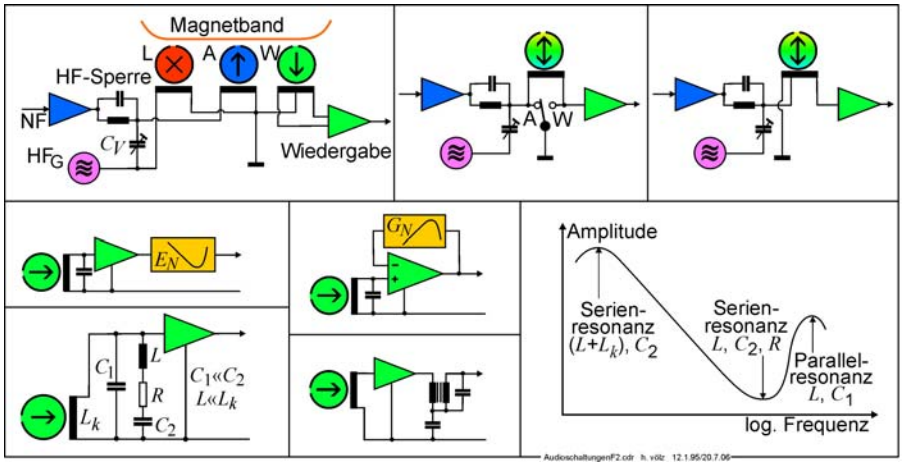
2. Netzwerk $G_N \approx 1/E_N = k(\omega)$ ***in Gegenkopplungszweig***:

$$V_g(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{V} + k(\omega)}.$$

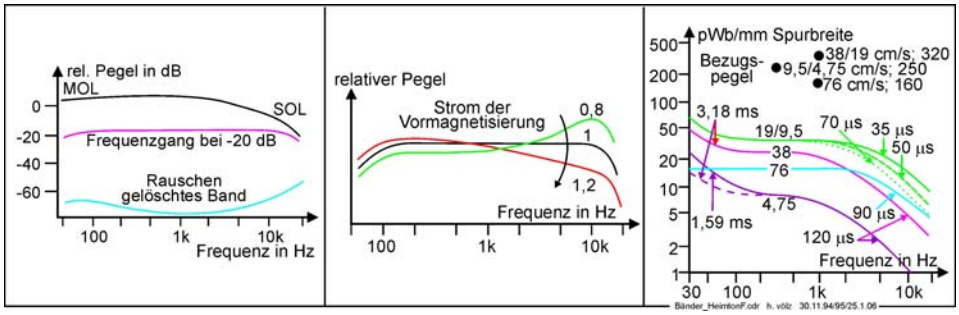
Mur für $V \to \infty$ gilt $V_g(\omega)$ und $k(\omega)$ frequenzreziprok, für endliche V zusätzlich störende Phasengänge

3. Linearisierung ***unmittelbar am Magnetkopf***:
Induktivität L_k Wiedergabekopfes + Kapazität C_1 als Schwingkreis für obere Frequenz genutzt
Reihenschaltung von (L_k + L) mit C_2 als Serienresonanz für tiefste zu übertragende Frequenz
Reziproker ω-Gang durch C_2. Zusätzlich C_2 + L + R eine Serienresonanz für λ_1-Frequenz
Theoretisch und experimentell hierbei kein schlechterer Störabstand

4. ***Gegen Phasenfehler*** (Apertur) sind Allpassglieder notwenig: enthalten u.a. Brückenschaltungen aus mehreren R, C und L
Notwendig damit z. B. Rechtecksignale richtig wiedergegeben werden
Erstmals beim Messmagnetbandgerät M 10 von Telefunken benutzt: Übertrager mit dem Kondensator

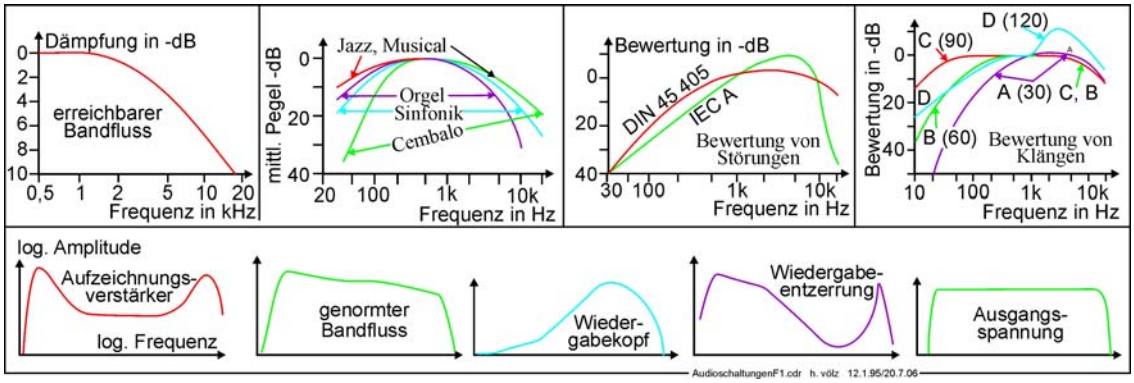


Pegelfestlegungen



Bzgl. Aussteuerbarkeit von Kassettenbändern wird der lineare Frequenzgang bei -20 dB, Rauschen dann ≈40 dB darunter
Für tiefe und mittlere Frequenzen gibt **MOL** (**m**aximum **o**utput **l**evel) den erreichbaren Höchstwert an
Für hohe Frequenzen ist der Bandfluss wegen Entmagnetisierung geringer ⇒ Wert SOL (**s**econd).

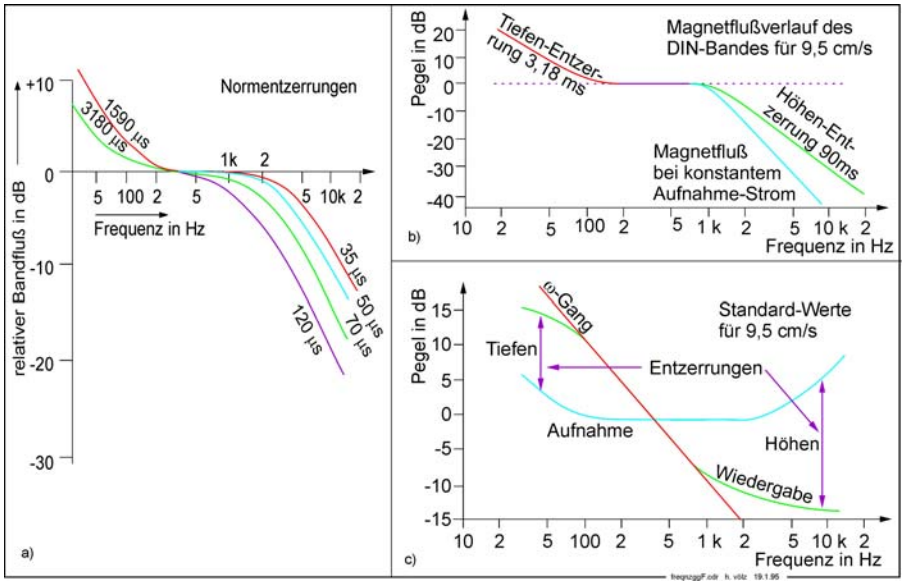
Bezüge zu Signalquellen



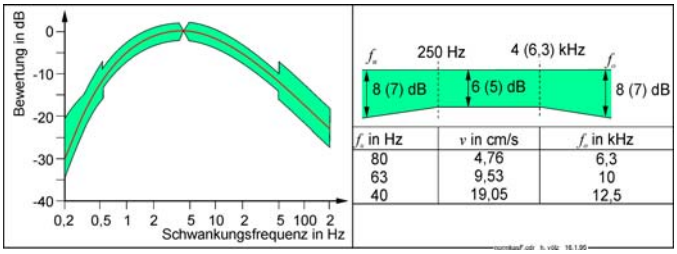
Tiefenanhebung reduziert u.a. Brummeinstreuungen, 1/*f*-Rauschen des Bandes und Störungen des schwankenden Kopfkontaktes
Höhenabsenkung muss leider wegen des dort geringen Bandflusses in Kauf genommen werden
Frequenzgangmessungen müssen etwa 10 bis 20 dB unter Vollaussteuerung erfolgen
Vorteil der Normung des Bandflusses ermöglicht Aufzeichnungs- und Wiedergabefrequenzgang getrennt einzumessen

Normen für Bezugspegel bei 1 kHz – bzw. 333 Hz bei 9,5 und 4,75 cm/s auf 1-mm-Spur umgerechnet
Zeitkonstanten bei tiefen und hohen Frequenzen

Geschwindigkeit in cm/s	Bezugspegel in pWb/mm	Zeitkonstanten Tiefen/Höhen in µs
76	160	-/35
38	320	-/35
19 Studio	320	-/70
19 Heim	320	3180/50
9,5	250	3180/90
4,75	250	1590/120

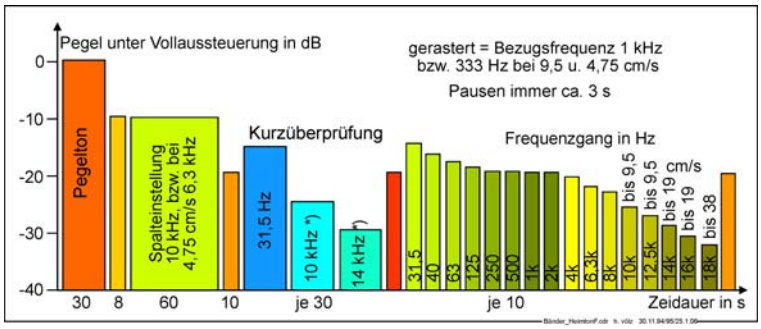


Zugelassene Toleranzen

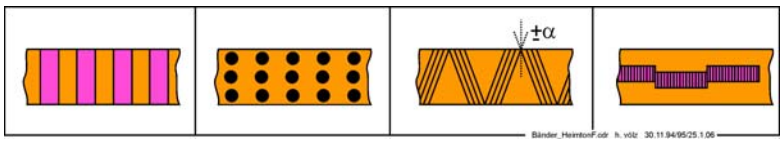


f_s in Hz	v in cm/s	f_s in kHz
80	4,76	6,3
63	9,53	10
40	19,05	12,5

Typisches Messband



Messbänder für Rauscheminderung und Kopfeinstellungen



Dynamikregelung

Magnetbandkanal ***Kenngrößen***: Störabstand S_{Band}, Grundrauschen u_R und Modulationsrauschen mit Modulationsgrad m
Je nach Anwendung vorteilhaft, Kenngrößen auf Kosten anderer zu ***ändern***; wichtig ***zwei Varianten***:
In beiden Fällen bleibt Anzahl der Amplitudenstufen – Studiogerät ≈100 – konstant

1. ***Verkleinern Modulationsrauschen = höhere Signal-, Messgenauigkeit*** → kleinerer Störabstand
   erstmalig eingesetzt, doch allgemein abgefasst [Völz 58 u. 59,]. Messgenauigkeit = 1 %, statt im direkten Kanal 5 bis 10 %
2. ***Erhöhung des Störabstand*** → größeres Modulationsrauschen Typische Dynamikregelungen, bekannt u.a. als Dolby
   Expandieren (*lateinisch* ***expandere*** auseinander spannen, ausbreiten)
   Komprimierung bzw. Kompandierung (*lateinisch* ***comprimere*** zusammendrücken, ***compactio*** Zusammenfügung)
   Größere Amplitudenstufen machen Klang „rauer, unschärfer", insgesamt subjektiv jedoch bessser

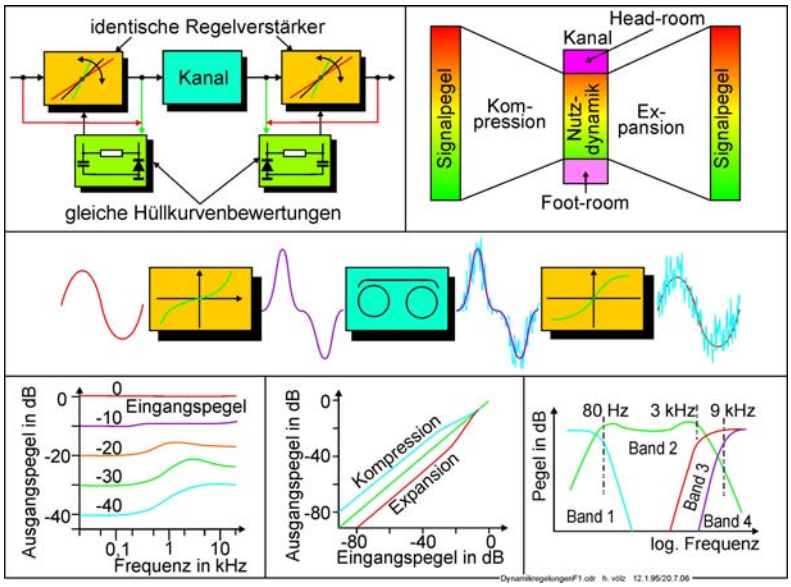
Varianten der Dynamikregelung

Zur Erhöhung der Dynamik wurden vor allem durch RAY DOLBY vorangetrieben
Gründete 1965 in England eine spezielle Firma, 1976 in die Vereinigten Staaten verlagerte
Varianten für verschiedene Anwendungen, besonders erfolgreich für den Tonfilm
Auch in der Tonstudio- und Heimtontechnik längere Zeit genutzt

Kommerziell Dolby-A-System teilt Frequenzbereich in vier Bänder auf (hoher Aufwand)
Jedes Frequenzband eigene Regelkennlinien, weniger hörbare Einschwingvorgänge, weitgehend akustisch verdeckt
Semiprofessionell Dolby-B mit „Sliding-Charakteristik", Je nach Lautstärke wird Grenzfrequenz der Dynamikregelung verschoben
Dolby-C-Verfahren: Regelung bereits bei tieferen Frequenzen ein: zwei unterschiedliche Kompander in Reihe geschaltet

Andere Firmen entwickelten ähnliche (patentfreie) Schaltungen, z. B. ***Telcom-Sytem von AEG-Telefunken***.
Es arbeitet mit logarithmischen Kennlinien ⇒ etwas vereinfachte Variante ist High-Com, 3 geregelte Verstärker

Mit Ausnahme Kinotechnik heute praktisch alle Dynamikregelungen durch digitale Techniken ersetzt

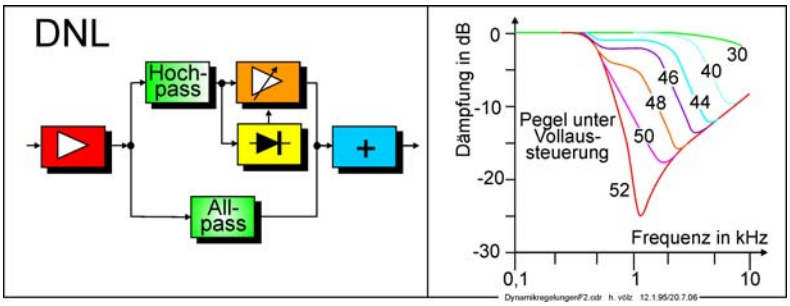


DNL (dynamic noise limiting)

Dient hauptsächlich um eine Verringerung des wirksamen Rauschens, ohne reziproke Dynamikregelung (Philips)
Zur Übertragung zwei parallele Wege

- ***Allpass*** überträgt alle Frequenzen ohne Amplitudenverluste, jedoch mit speziellen Phasenverschiebungen
- ***Hochpass*** selektiv ≈1 kHz, ***Amplitude*** hinter dem Hochpass steuert ***Verstärkungsgrad***

Beim Zusammenfügen erfolgt selektive Schwächung hoher Frequenzen entsprechend höchster Empfindlichkeit unseres Gehörs
Subjektiv: 6 dB besserer Störabstand



Videoaufzeichnung

Videosignale im Gegensatz zu Audio erheblich größere Bandbreite
Durch den automatischen Schwarz- und Weißabgleich keine Übertragung von Gleichwerten notwendig
Tiefte Frequenz = Halbbildfrequenz 24/25 Hz; höchste Frequenz Bildpunkte 3 - 10 MHz
⇒ Bandbreite ≈ 19 Oktaven, Audio nur 9 Oktaven; ω-Gang Pegel: minimal : maximal ⇒ 1 : 218 → 1 : 250 000
Das bewältigt kein Wiedergabeverstärker ⇒ modulierte Aufzeichnung Videosignale zu höheren Frequenzen verschieben

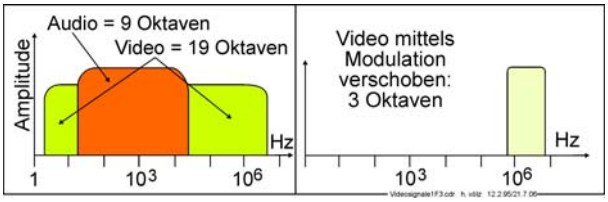
Amplitudenmodulation (AM) erzeugt immer zwei Seitenbänder

⇒ Einseitenband- oder Restseitenbandmodulation = kontinuierliche Fernsehübertragung)

- Magnetbandkanals jedoch infolge der notwendigen, beachtlichen Frequenzganglinearisierung
  ⇒ beträchtliche ***Phasenfehler stören*** erheblich bei Helldunkel-Übergängen und die Synchronisation
- Infolge ***störender Amplitudenmodulation*** zusätzlich beachtliches ***Bildrauschen***

Daher hat sich ***Frequenzmodulation*** (FM) durchgesetzt:

- Amplitudenschwankungen werden durch ***Begrenzung eliminiert***
- Typische ***Nichtlinearitäten unwirksam → Keine HF-Vormagnetisierung notwendig***
- ***Keine Linearisierung*** des Frequenzganges erforderlich
- Störungen nur durch ***Gleichlauffehler*** und ***Rauschen des Kanals***
- Leider sind Signalverhältnisse bei ***FM sehr unübersichtlich*** ⇒.getrennte Abschnitt



Modulationen, AM ⇔ FM

Einfache Annahme: Modulation erfolgt mit Signal $u(t)$, Kreisfrequenz ω_m, Amplitude u_0, Anfangsphasenwinkel φ_m :

$$u(t) = u_0 \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m).$$

Trägerfrequenz = ω_0. mit Amplitude u_T, Veranschaulichung durch Zeigerdiagramme

Amplitudenmodulation (AM)

Länge des mit ω_0 rotierenden Amplitudenvektors verändert, am Ende 2 entgegengesetzt mit ω_m rotierende Vektoren = 2 Seitenbänder

$$u(t) = u_T\left(1 + m \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m)\right) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_T).$$

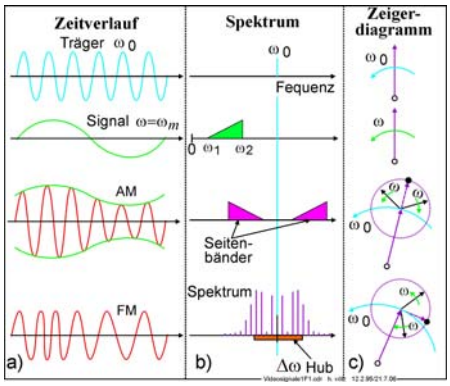
Modulationsgrad $m = u_0/u_T$; verzerrungsfrei $m \leq 100\ \%$ ⇒ Spektrum mittels Additionstheorem $2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(ß) = \cos(\alpha + ß) + \cos(\alpha - ß)$

$$\frac{u(t)}{u(T)} = \cos(\omega_0 t + \varphi_T) + \frac{m}{2}\left(\cos(\omega_0 + \omega_m) + \varphi_m\right)t + \frac{m}{2}\left(\cos(\omega_0 - \omega_m) - \varphi_m\right)t.$$

Frequenzmodulation FM

Zeigerdiagramm: gegensinnig rotierenden Vektoren stehen senkrecht zum Hauptvektor ⇒ rotiert mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit Ihre Änderung proportional zum Signal $u(t)$. Es muss ***Frequenzhub*** $\Delta\omega$ (statt m) eingeführt werden = proportional zu u_0:

$$u(t) = u_T \cdot \cos\left(\left(\omega_0 + \Delta\omega \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m)\right)t + \varphi_T\right).$$



Berechnung des Spektrums von FM

Innerhalb von cos steht wiederum cos bzw. sin. Hierfür existiert kein Additionstheorem. Einführung einer totalen Phase φ_{total}:

$$\varphi_{total} = \omega \cdot t + \varphi \quad \text{bzw.} \quad \frac{d\varphi_{total}}{dt} = \omega$$

folglich

$$\frac{d}{dt}\left(\Delta\psi \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m)\right) \sim \Delta\omega \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m)$$

Integration ergibt

$$\Delta\psi \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m) \approx \frac{\Delta\omega}{\omega_m}\sin(\omega_m t + \varphi_m)$$

Neue wichtige Kenngröße ***Modulationsindex***:

$$x = \frac{\Delta\omega}{\omega_m}$$

Übliche ***Nachrichtentechnik*** bei Vollaussteuerung $x \approx 10$ - 20. UKW-Rundfunk Hub $\Delta\omega = \pm 150$ kHz, höchste Signalfrequenz 15 kHz ***Videospeicherung*** dagegen $x \approx 1$ bzw. $\Delta\omega \approx \omega_m$. So folgt Gleichung für die Frequenzmodulation

$$u = u_T \cdot \cos\left(\omega_0 t + x \cdot \sin(\omega_m t + \varphi_m) + \varphi_T\right)$$

Fourier-Transformation für Spektrum ist möglich: mittels BESSEL-Funktionen *n*-ter Ordnung vom Argument *x*

$$\cos\left(x\cdot\sin\left(\psi\right)\right)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}J_n\left(x\right)\cdot\cos\left(n\cdot\psi\right)$$

So gilt für das Spektrum der Frequenzmodulation

$$u(t)=u_T\sum_{n=-\infty}^{+\infty}J_n\left(x\right)\cdot\cos\left(\omega_0 t+n\cdot\left(\omega_m t+\varphi_m\right)+\varphi_T\right)$$

Generell gilt die Normierung $\sum_{n=-\infty}^{+\infty}J_n^2\left(x\right)=1$

Für $x \le 1$ gilt die Reihenentwicklung $J_n\left(x\right)\approx\left(\frac{x}{2}\right)^n\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\left(-1\right)^k}{k!\left(n+k\right)!}\left(\frac{x}{2}\right)^{2k}$ mit $\sum_{n=-\infty}^{+\infty}J_n^2\left(x\right)=1$

Oft brauchbare Näherung $J_n\left(x\right)\cong\frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi\cdot n}}\cdot\left(\frac{e\cdot x}{2\cdot n}\right)^n$

Entgegen anschaulichen Erwartungen existiert das Spektrum auch weit außerhalb des Frequenzhubes
Abstand zwischen den vielen Spektrallinien ist ganzzahliges Vielfaches der Modulationsfrequenz $n\cdot\omega_m$
Energie des Spektrums muss aber dennoch begrenzt sein. Für die beiden ersten Ordnungen (Träger und ±1. Seitenband) gilt:

$$J_0\left(x\right)\approx1-\frac{x^2}{2}\quad\text{und}\quad J_1\left(x\right)\approx\frac{x}{2}\cdot\left(1-\frac{x^2}{8}\right)$$

Weniger übersichtlich sind die weiteren Seitenbänder. Doch für die Anwendung sind sie wichtig
Nützlich ist, dass für hinreichend große Argumente *x* Werte der BESSEL-Funktion exponentiell steil gegen Null streben: Abschätzung:

$$\left|J_n\left(n-1\right)\right|\le0{,}14$$

Vielfach genügen daher die Argumente, die kleiner als die Ordnung der BESSEL-Funktion sind ⇒ brauchbare Näherung für Bandbreite

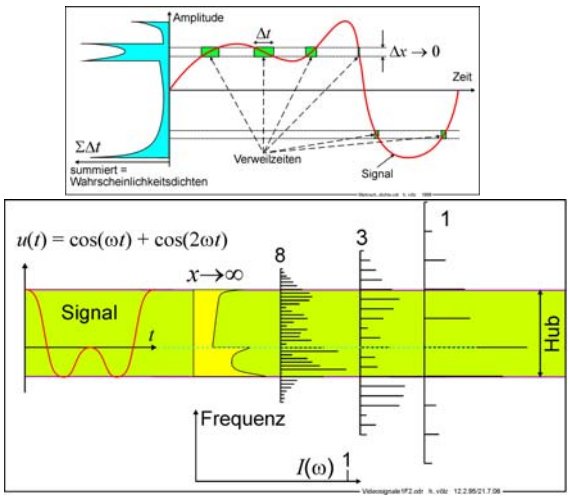
$$B\approx2\cdot\left(f_m+\Delta f\right)$$

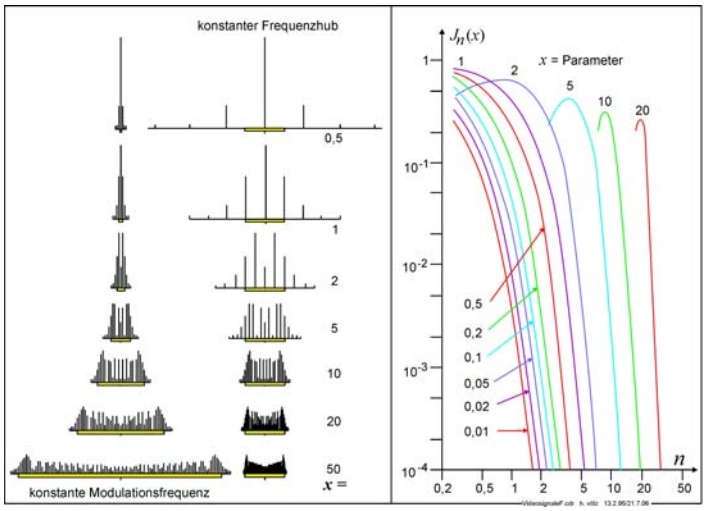
Die 2 folgt wegen des Frequenzhubes ± Δf. Abschätzung gilt für $x \le 1$

Für sehr langsame Änderungen mit $\omega_m\to0$ geht $x\to\infty$. ⇒ quasistationärer Fall
zu jedem Zeitpunkt gehört genau eine Momentanfrequenz, bestimmt durch die aktuelle Signalamplitude
Die Intensität dieser Spektral-„Linie“ entspricht der Verweildauer des Signals.
Hieraus folgt; dass im Gegensatz zur Amplitudenmodulation für eine beliebige Signalfunktion die beiden Seitenbänder nur ausnahmsweise symmetrisch zum Träger sind. Allgemein gilt

$$u(t)=u_T\sum_{n=-\infty}^{+\infty}I_n\cdot\cos\left(\omega_0 t+n\cdot\omega_m t+\varphi_n\right).$$

Allgemein entstehen Matrizengleichungen unendlicher Ordnung, deren Koeffizienten Summenprodukte von BESSEL-Funktionen sind
Daher gibt es nur Näherungslösungen [Völz 1957]





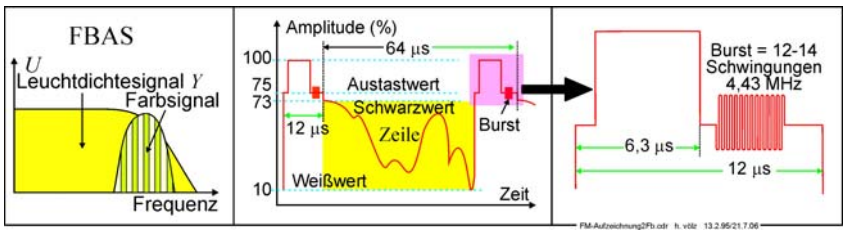
Video-Signale

Signale des Fernsehens sind genormt. In Europa überwiegend als **PAL** (phase alternated line ≈ zeilenweise Phasenveränderung)
Das Bild wird ***zeilenweise*** abgetastet und aufgebaut, Länge **64 µs**. Für Wiedergabe ist ***Synchronisation des Zeitablaufs*** notwendig
Für Helligkeitswerte Bereich von 10 % (weiß) bis 73 % (schwarz) des Maximalpegels
Die unteren 10 % garantieren einen Restträger, oberhalb 75 % liegt der Austastwert mit Spitze von 100 %
Austast- und horizontale Synchronsignal = 12 µs, sichtbarer Bereich der Zeile 52 µs
Je Sekunde 625 Zeilen mal 25 Vollbilder gleich 15 625 Zeilen = Horizontalfrequenz des Signals
Meist nur sich wenig ändernden Zeileninhalte bewirken ***kammartiges Spektrum*** in Umgebung der ganzzahligen Vielfachen von 16 625 Hz
Nach 312 bzw. 313 Zeilen erfolgt ein Zeilensprung für den Halbbildwechsel ⇒ Bildaustastsignal (Vertikal-Synchronimpuls)

benötigt mehrere unsichtbare Zeilen und besteht aus 15 Vertikalimpulsen.
Davon besitzen 5 Hauptimpulse große Länge. Sie sind von je 5 kurzen Vor- und Nachtrabanten umgeben Σ 8 Zeilen
Zusätzlich 7 dunkelgetastete Zeilen für Prüfimpulse und Sonderinformationen (Bildschirmtext usw.)
Das so zusammengesetzte Signal heißt ***BAS (Bild-Austast-Synchronsignal)***

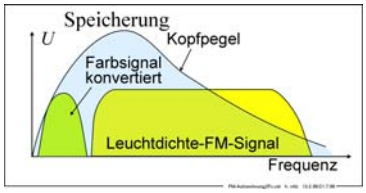
Farbfernsehen: BAS ⇒ **FBAS** (Farb-BAS)

Der **Schwarz-Weiß-Anteil** = ***Luminanz***-Signal (Helligkeits-, Leuchtdichte- oder ***Y***-Signal, *lateinisch* ***lumen*** Licht)
Farbkomponenten (*U* = Rot – *Y* und *V* = Blau – *Y*) = ***Chroma***-Signal (*griechisch* ***chromos*** Farbe)
werden phasenmoduliert in die Mitte der kammartig verteilten Helligkeitssignale eingefügt
Synchronisation ist auf Schwarzschulter ein Burst (Farbsynchronimpuls) mit 12 bis 14 Schwingungen von 4,43 MHz
Diese Frequenz darf während der ganzen Zeile nur ≤ 10^{-5} abweichen ⇒ Schwungradschaltung Mitnahmebereich ≈45 Hz



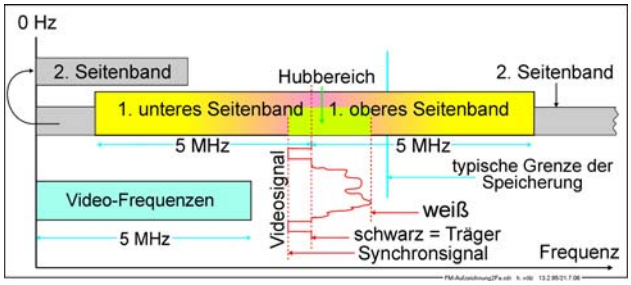
Aufbereitung zum Speichern

Das FBAS ist nicht zu speichern, Gleichlauffehler des Transportwerkes sind zu groß
Es ist Trennung von Chroma- (*C* = *U* + *V*) und Luminanz-Signal (*Y*) notwendig
Y additiv höher verschoben, damit Verhältnis aus höchster zu tiefster Frequenz deutlich kleiner wird ⇒ frequenzmoduliert aufgezeichnet
C dagegen möglichst tief – unterhalb von *Y* – amplitudenmoduliert, wirkt zugleich ähnlich wie HF-Vormagnetisierung linearisierend für *C*



Zu speicherndes Spektrum

AM-Speicherung des **C-Signals** keine Besonderheiten: rechts und links vom Träger treten die beiden Seitenbänder auf
FM-Speicherung des **Y-Signal**s dagegen viele Besonderheiten:
Quasistationär betrachtet bestimmt es Frequenzhub: untere Hubfrequenz ≈ 10 - 15 % höher als höchste Frequenz von *Y*
Notwendig weil Demodulator bei der Wiedergabe das FM-Signal vom eigentlichen (demodulierten) Signal *Y* trennen muss
⇒ *Y* und Hub nahezu gleich hohe Frequenzen ⇒Modulationsindex *x* ≈ 1
⇒ ***viele Seitenbänder ragen beidseitig weit über Hub hinaus*** und sind ***meist stark unsymmetrisch***
Besonders intensiv das erste obere und untere Seitenband
Das untere 2. Seitenband geht über 0 Hz hinaus, gelangt gespiegelt wieder in das untere 1. Seitenband
Das obere 2., 3. usw. Seitenband liegt bereits bei so hohen Frequenzen, dass es nicht mehr gespeichert werden kann
Das untere 3. Seitenband fällt teilweise auf die beiden 1. Seitenbänder
Die obere ***Frequenzgrenze der Speicherung*** trennt einen erheblichen Teil des 1. oberen Seitebandes ab
Erstaunlich ist, dass trotz allem ein brauchbares Wiedergabesignal entsteht, vgl. [Völz 1957]

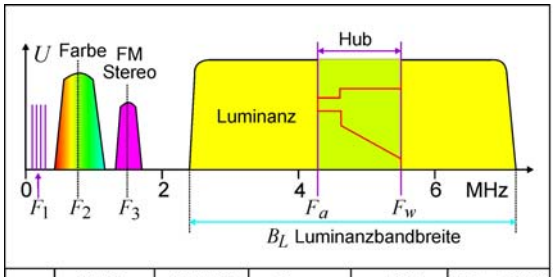


Zusätzliche Signale

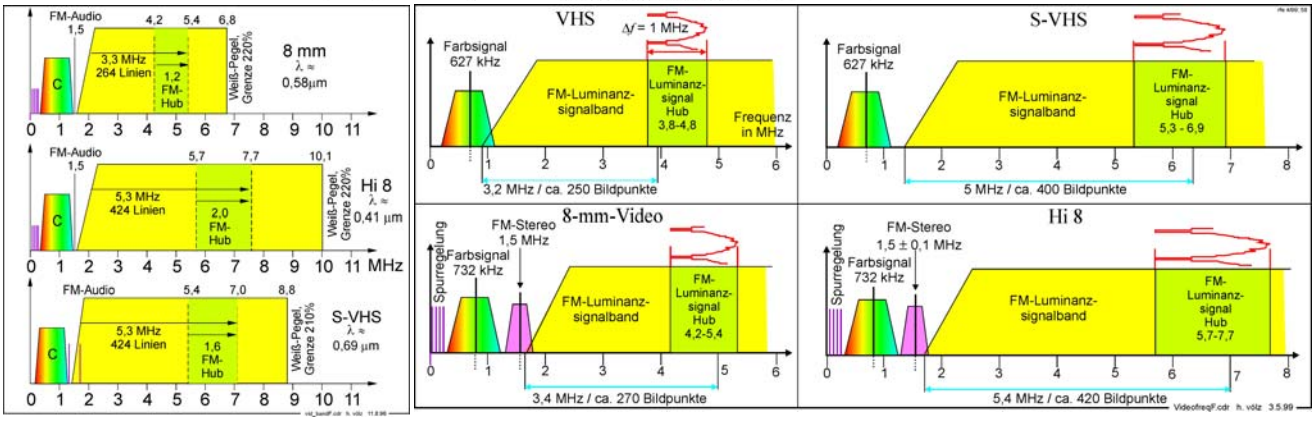
Ergänzend zu den Bildsignale sind noch zu speichern: Audio-, Spurführungs- und Sondersignale
Viele Rekorder verwenden dafür gesonderte Ton- und Kontrollspuren (*englisch* ***Cue*** Stichwort, Fingerzeig)

1983 entstand ***HiFi-FM-Ton*** (F3): Träger = 1,5 MHz + Frequenzhub ±200 kHz aufgezeichnet
Störabstand von 80 dB. UKW nur ±75 kHz, Studiotonbandgeräte erreichen 70 dB

Bei ***Schrägspurverfahren*** (Beta) muss ***Spurlage*** besonders genau eingehalten werden
Ihre aufwendigen Regelverfahren erfordern spezielle Signale im Bereich 100 bis 200 kHz (F1)
Bei ***Video 8*** = ATF (automatic track following),***Video 2000*** DTF (dynamic track following) und ***Hi 8*** VSF (video signal following)
In jeweils vier aufeinanderfolgenden Spuren wird der Reihe nach nur eine der Frequenzen aufgezeichnet
So besitzt jede Spur gegenüber den beiden benachbarten ein Frequenzabstand von 15 bzw. 47 kHz



	VHS	S-VHS	8 mm	Hi 8	Video 2000
B_L	3,2 MHz	5 MHz	3,4 MHz	5,4 MHz	4 MHz
F_a F_w	3,8 MHz 4,8 MHz	5,3 MHz 6,9 MHz	4,2 MHz 5,4 MHz	5,7 MHz 7,7 MHz	3,2 MHz 4,8 MHz
F_2	627 kHz	627 kHz	732 kHz	743 kHz	625 kHz
F_3	ohne	ohne	1,5 MHz	1,5 MHz	ohne
F_1	ohne	ohne	ATF kHz 101, 117 146. 163	VSF kHz 101, 117 146. 163	DTF kHz 102, 117, 149, 164

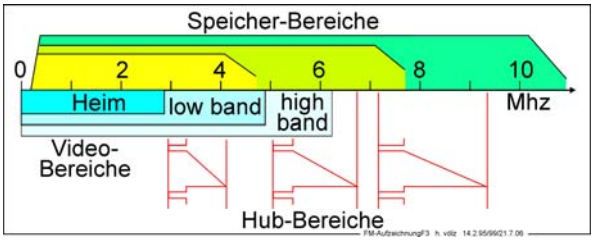


Zusammenstellung aller Signale der Videospeicherung

- ***Luminanz***-Signal (= Helligkeit = Y-Signal, Leuchtdichte) als FM in Hauptspur, mehrere MHz
- ***Chroma***-Signal (Farbartsignal, Chrominanz, U-V-Signal) als AM in Hauptspur um 0,5 MHz, wirkt zusätzlich für Y-Signal wie eine HF-Vormagnetisierung
- ***Ton***-Signal (1 bis 3 Kanäle) in zwei Varianten, teilweise gleichzeitig:
  ◊ Spur(en) am Rand mit 0,5 bis 0,7 mm Höhe
  ◊ als FM um 1 MHz in Hauptspur.
- ***Hilfssignale***
  ◊ Kontroll- bzw. Signalspur am Rand mit 0,5 bis 0,7 mm Höhe
  ◊ Hilfssignale zur Nachführung der Hauptspur um 100 kHz.

Vergleich Heim-, low- und highband-Technik (u.a. Still-Video-Floppy)

Für unterschiedliche Ansprüche gibt es mehrere Qualitäten der Videospeicherung
U. a. von Langzeitaufzeichnungen (Videoüberwachung) über Heimtechnik bis zur Studiotechnik

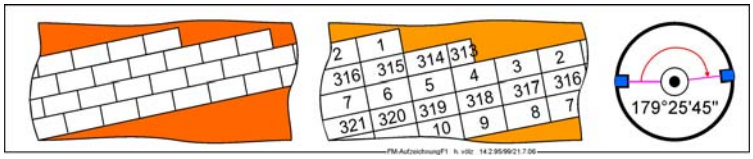


Einige Normen und Bezeichnungen (Hubgrenzen in MHz)

2-Zoll-Technik			
Low-Band Super-High-Band RCA	4,95 – 6,8 9,0 – 12	High-Band Super-High-Band Ampex	7,16 – 9,13 10,9 – 12,2
1-Zoll-Technik			
A-Format Ampex C-Format RCA, Ampex	8,64 – 11 7,16 – 8,9	B-Format BCN, Bosch	6,76 – 8,9
Umatic in ¾-Zoll-Technik			
Low-Band	3,8 – 5,4	High-Band	4,8 – 6,4

Schrägspuraufzeichnung und Chroma-Übersprechen

Es ist besonders störend, wenn die horizontalen Synchronimpulse etwa auf die Mitte der benachbarten Bildzeile fallen
Geringfügige Versetzung der beiden Videoköpfe gegenüber 180° kann eine weniger störende Lage erreicht werden
Z. B. beträgt der Winkel beim VCR 179°25'45". Die Spuren beginnen dann abwechselnd um 1,5 bzw. 3,5 Bildzeilen verzögert



Weitere Störungen

Dropout-Kompensation: In einer Laufzeitkette von 64 µs Länge wird ständig der Helligkeitswert der letzten Bildzeile gespeichert
Fällt das eigentliche Signal um mehr als 25 dB ab, wird auf diesen Inhalt umgeschaltet
Das ist rekursiv bis zu etwa 3 Zeilen möglich, danach wird das Rauschen zu stark.
Gleichlauf des Transportwerkes reicht oft trotz sehr gleichmäßig rotierenden Trommel nicht immer aus
Zusätzliche Störungen u.a.: Dehnungen des Magnetbandes, schwankender Bandzug
Am Ende der Wiedergabekette eine elektronisch arbeitende dynamische Zeitfehlerkorrektur
Bei digitalen Recordern verbesserte Möglichkeiten (s. u.)

Messmagnetbandtechnik

Vorteile des Magnetbandgerätes zur Speicherung von Messwerten

- Nutzung an gefährdeten Orten (Satelliten, Meeresgrund, Kernreaktor)
- Einsatz für unerwartete Störungen (Langzeitaufzeichnungen)
- Frequenztransponierung durch Änderung der Bandgeschwindigkeit, hörbar und Messtechnik im akustischen Bereich
- mehrfache Wiederholung der Aufzeichnung zur Auswertung nach unterschiedlichen Gesichtspunkten

Hauptprobleme

- Messgenauigkeit
- Phasenfehler und spezielles Einschwingen
- störende Amplitudenmodulation

Verbesserungen sind möglich durch:

- Reziproke ***Dynamikregelung***. (s. o.)
- Zusätzlicher, spezieller ***Pilotton*** z.B. [Völz 1958].
- ***Frequenzmodulation*** (s. o.)
- **Pulsmodulationen**, werden ***im Folgenden*** behandelt
- ***Digitale Speicherung*** (s. u.)

Pulsmodulierte Speicherung

Pulsmodulationen benutzen Rechteckschwingung mit Periodendauer T und Impulslänge $\tau < T \Rightarrow$ Gleichwert

$$u_m = u_s \cdot \frac{\tau}{T}$$

Er kann als moduliertes Signal genutzt werden $\Rightarrow$ Pulsmodulator ändert dann das Verhältnis $x = \tau/T$ proportional zum Signal
Für verschiedene Modulationen sind τ und T frei wählbar, lediglich ihr minimaler Wert ist als T_{min} durch den Speicher gegeben
Er entspricht etwa der KÜPFMÜLLER-Beziehung bzw. NYQUIST-Rate oder dem Sampling-Theorem

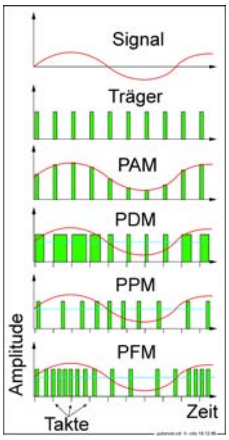
- **PFM** (**P**uls-**F**requenz-**M**odulation) $\tau \approx T_{min}$ konstant, $f = 1/T$ wird proportional zum Signal x geändert
  Anzahl erzeugter Rechteckimpulse/Zeit nimmt zu kleinen Signalwerten hin ab
  Mögliche Signalauflösung (aufzuzeichnende Frequenz) ist proportional zum gespeicherten Messwert
- **PDM** (**P**uls-**D**auer-**M**odulation, *englisch*: duration) = **PLM** (Puls-Längen-Modulation, *englisch* length) genannt
  Frequenz $f = 1/T$ = konstant, τ wird proportional zum Signal geändert
  Signalauflösung ist unabhängig von der Signalamplitude. Wegen T_{min} sind jedoch nicht beliebig kleine Messwerte erreichbar
  Magnetbandkanal kann dadurch nur unvollständig genutzt werden
- **PRM** (**p**ulse **r**atio **m**odulation) = **PVM** (Puls-Verhältnis-Modulation) ändert T und τ: $T_1 = \tau \geq T_{min}$ und $T_2 = T - \tau \geq T_{min}$
  = flexibler Kompromiss zwischen PDM und PFM. Proportionalität mit Signal unterschiedlich möglich, $\tau/T \sim$ Signal x
  Erzeugt im T_1-T_2-Diagramm eine Hyperbel, die Speicherkanal optimal ausnutzt
  Lediglich in Nähe der Pulssymmetrie (kleinen Signalamplitude) ist die Modulation nicht ganz optimal
  Nachteil betrifft die Messgenauigkeit, schwankt etwas mit der Signalamplitude, ist leider bei Signalen um Null etwas geringer
  Es ergeben sich unterschiedlich große Amplitudenstufen

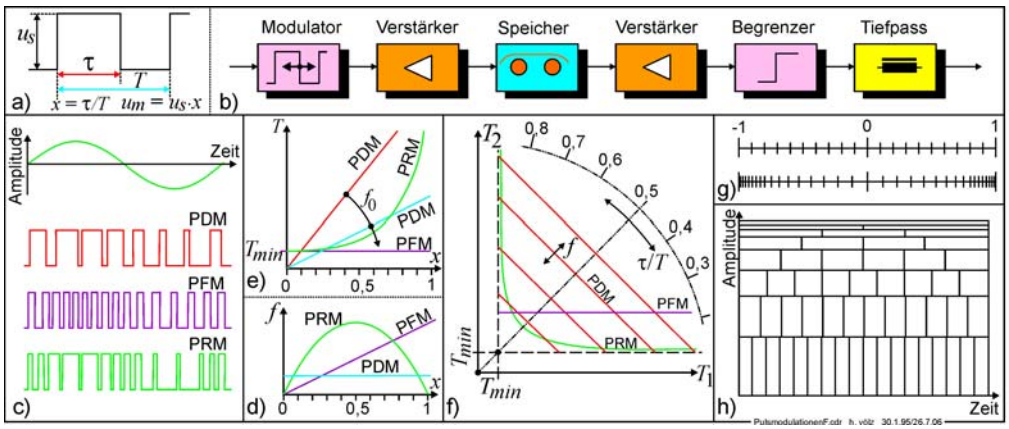
Außerdem gibt es noch PAM (Amplitude), PPM (Phase), keine Bedeutung für Speicherung.

Arbeitsweise

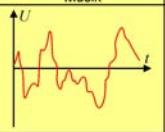
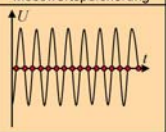
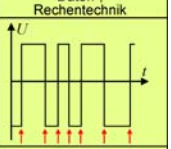
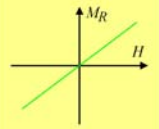
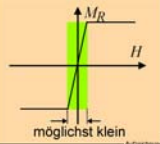
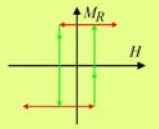
Puls-Modulatoren sind häufig spannungsgesteuerte Multivibratoren
Das von ihnen kommendes Signal wird verstärkt und ***direkt aufgezeichnet*** (Impulstechnik!), meist keine HF-Vormagnetisierung
Wiedergabesignal wird ***Frequenzgang selten linearisiert***, aber ***gut begrenzt***, entfallen alle Amplitudenschwankungen
Ähnlich FM-Aufzeichnung und digitaler Speicherung: Nulldurchgänge für aufgezeichnete Flanken benutzt
Ein Tiefpass mit Grenzfrequenz $f_{Grenz} \leq 1/T$ lässt Mittelwerte passieren und erzeugt so das originale Signal

Vorteile: langsame Gleichlauffehler mit $f_{Gl} < 1/T$ entfallen durch Mittelwertbildung bzgl. $x = \tau/T$ beim Messwert x
jede Aufzeichnung kann mit nahezu beliebiger Geschwindigkeit wiedergegeben werden ⇒ Frequenztransponierung
Möglichkeit insbesondere in Geologie (Explosionswellen) und Medizin (Langzeit-EKG- und -Blutdruckgeräte) genutzt
⇒ Schnelle Auswertung der sehr tiefen Frequenzen mit erhöhter Bandgeschwindigkeit und elektroakustischen Analysegeräten





Vergleich der drei Techniken

Verfahren	direkt kontinuierlich	frequenzmoduliert (Pulslängenmodulation)	digital
Anwendungen	Sprache, Musik	Video-, Messwertspeicherung	Daten-, Rechentechnik
typisches Signal			
Forderungen	lineare Kennlinie	Nulldurchgänge	Taktrückgewinnung, Flanken, Decodierbarkeit
Störungen	nichtlineare Verzerrungen Rauschen	Phasenfehler	Impulsverschiebungen Drop-In und -Out
optimale Speicher-funktion		 möglichst klein	

Digitale Techniken

Digitale Speicher haben ***viele Anwendungen***, ***verdrängen*** immer mehr die ***kontinuierlichen***
Kontinuierliche Signale werden dazu mit ***ADU*** (**a**nalog **d**igital **u**nit) entsprechend gewandelt
entspricht vorschalten eines Encoder und nachschalten eine Decoders (wird hier nicht behandelt)
Auf dieser Grundlage arbeiten u.a. DAT-Rekorder und die ersten Streamer (R-DAT)
Selbst die ersten CD-ROM-Player nutzten so die preiswerten CD-DA-Laufwerke
Es gibt aber auch ***direkte digitale Werte***, z. B. bei Messungen, Kunden- und Bankdaten
Hauptsächlich werden hierfür Magnetband-, Disketten-, Festplatten- und opto-motorische Speicher eingesetzt
Die ***Kontinuierliche Digitaltechnik*** nimmt eine Zwischenstellung ein

Der ***eigentliche Speicher (-Kern)arbeitet*** immer ***kontinuierlich***, allein schon wegen der kleinen Signale notwendig
Kaum eingesetzt werden Vormagnetisierung zur Linearisierung und Frequenzgang-Entzerrung
In seltenen Fällen wird eine besondere (impulsartige) Vorverzerrung des digitalen Signals benutz

Digitales Prinzip

Definitionen und Störungen

Codierung ⇒ originales ***digitales Signal*** ≠ 01- bzw. 10-***Wechsel*** der Aufzeichnung
Meist Anzahl der Flanken des digitalen Signals > Anzahl der 01- bzw. 10-Wechsel
Takt: Zeitwerte mit konstantem Abstand ΔT, nur hier sind 01- bzw. 10-Wechsel zulässig
wird nicht übertragen, gespeichert muss wieder erzeugt werden
Einzelimpuls = 01- bzw. 10-(Fluss-) Wechsel
Anzahl ***Takte*** > ***Impulse*** ⇒ ***Lauflänge*** = Anzahl der Taktsignale bei Beibehaltung von 0 bzw. 1
Fehler: Spitzenversatz (peak shift), Flankensteilheit, Impuls-Schiefe, Gleichlauffehler, Drop-In, Drop-Out
Lauflänge ist die Anzahl der Takte zwischen zwei aufeinander folgenden Wechseln
Impulsfolge = Zusammenfassung von Einzelimpulsen zu einer Struktur
können recht komplex sein. Wichtig sind minimale und maximale Lauflängen von 0 bzw. 1
Fehler: Verschiebung Nulldurchgang, Verlagerung Gleichpegel, Intersymbol-Interferenz (ISI)

Komplexes Zusammenwirken

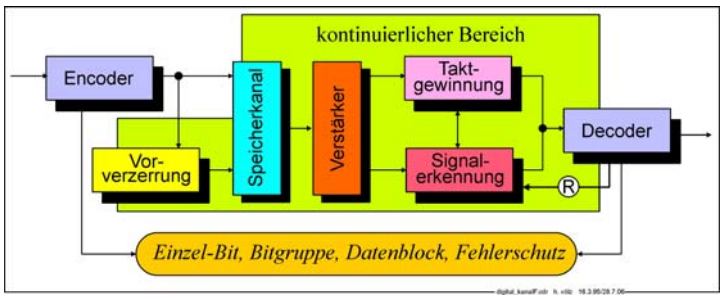
von ***Taktgewinnung*** und leistungsfähige, z. T. adaptive Signalerkennung sowie ***Decoder***,
Zusätzlich ***Fehlererkennung*** und ***-korrektur*** (EDC, ECC), später getrennt behandelt, hier formal in Encoder und Decoder einbezogen

Technische Fortschritte betreffen vor allen ***neue Signalerkennungen, Kodierungen*** und ***ECC***

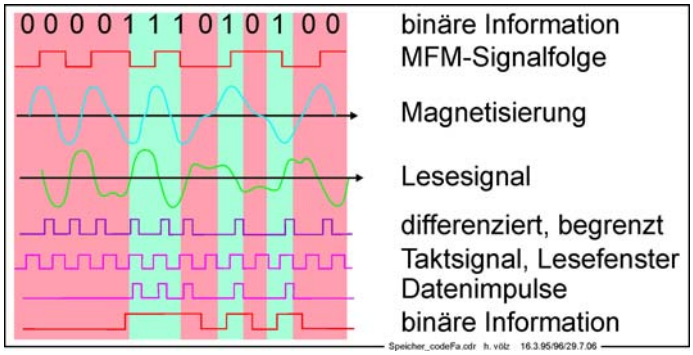
Formales Signalablauf

- ***Erkennung der Flusswechsel*** = Flanken der 01- bzw. 10-Impulse, vielfältige Schaltungen und Methoden(s. u.)
- ***Rekonstruktion des Taktes*** tolerant gegenüber Gleichlauffehlern, peakshift usw.
  erzwingt maximale Lauflangen, u.a. Anwendung von leistungsfähigen, geregelten VCO
- ***Rekonstruktion der Flusswechsel*** in Kombination mit dem Takt ⇒ Taktfehler, -verlust macht sie zumindest fehlerhaft
- ***Rückgewinnung der digitalen Signale*** (Decoder)
- ***Fehlerkorrektur***

Typische Schaltungsstruktur



Beispiel einfacher Codierung und Signalrückgewinnung



Binäre Information = Bit-Signal wird zunächst in MFM (s. u.) umgesetzt
Speicherdichte so hoch gewählt, dass bandbreitenbegrenzte Magnetisierung entsteht
Differenzierende Wirkung des Wiedergabekopfes erzeugt Lesesignal, wird auf Mäanderform begrenzt
Mittels PLL (s.u.) wird der Takt rekonstruiert ⇒ abgeleitetes Lesefenster trennt aus Mäander Datenimpulse
Rück-Codierung erzeugt etwas verzögert ursprüngliche binäre Information

Lauflänge und Zeitunsicherheit

Im binären ***Signal*** können ***viele*** 0- bzw. 1-Werte aufeinander folgen ⇔ ***gespeichert*** werden aber nur 01- bzw. 10-Änderungen
Da der ***Takt*** nicht zusätzlich gespeichert wird, muss er aus den „wenigen" Wechseln rekonstruiert werden
Alle Signale (Änderungen) sind aber durch ***Gleichlauffehler, peakshift usw.*** ungenau
Diese ***Fehler*** sind einmal annähernd ***proportional zur Lauflänge*** = Zeit zwischen zwei Wechseln
Hinzu kommen Fehler (gegenseitige Beeinflussung), wenn aufeinander folgenden Wechsel unterschiedlichen Abstand besitzen
Daher sind für Speicherkanäle eine ***minimale Lauflänge*** und ***maximale x*** bzw. ***y*** als **RLL x, y** festgelegt (**r**un **l**ength **l**imit)
Unbegrenzte Lauflängen = RLL 1, ∞, üblich sind $x = 1$ oder 2 sowie $y = 3$ bis 10
Bei Festplatten häufig RLL 2, 7 und RLL 1, 7, bei CD: RLL 2, 10

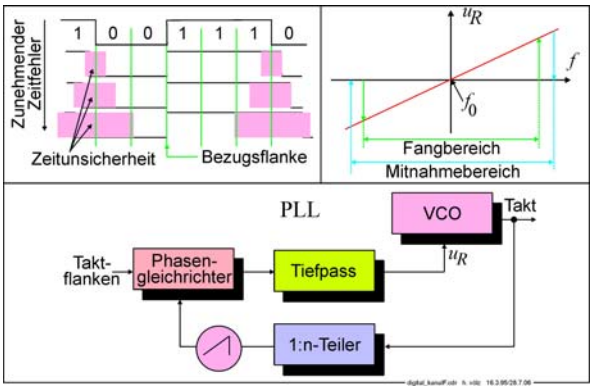
Zeitunsicherheit (*englisch* ***to jitter*** flattern, zittern bibbern, nervös sein) muss immer <±1 Takteinheit sein
Andernfalls ist der Takt nicht mehr eindeutig definiert, er kann falsch Wert rekonstruiert werden

Regenerierung des Taktes

Einfache Methode benutzt auf die Taktfrequenz fest abgestimmten Schwingkreis
Entsprechend der Lauflänge wird Resonanzfrequenz in unregelmäßigen Abständen von x bis y Perioden angestoßen
Fehlende Taktimpulse entstehen durch resonanzartiges Weiterschwingen mit sinkender Amplitude
Unsicherheit nimmt mit etwa mit größter Lauflänge y zu

PLL-Schaltungen (phase locked loop) = Phasenregelkreise ermöglichen höhere Stabilität
Ein spannungsgesteuerten Oszillator (VCO = voltage controlled oscillator) wird in seiner Frequenz f nachgeregelt
Über einen 1 : n-Teiler wird eine Sägezahnschwingung erzeugt, die einem phasenempfindlichen Gleichrichter steuert
Hinter einem Tiefpass entsteht die Regelspannung u_R, die den VCO steuert
Durch diese Regelschaltung wird mit hoher Präzision der mittlere Takt in Näher der richtigen Taktflanken gehalten
Bei der etwa linearen Regelkurve sind Mitnahme- und Haltebereich zu unterscheiden

Achtung: es gibt auch DLL-Schaltungen, welche Verzögerungen (*englisch* ***delay***) ausgleichen
Bei schnell getakteten Halbleiterspeichern ermöglichen sie exakte Zuordnung einzelner unterschiedlich verzögerten Signale zum Takt



Signal-Rückgewinnung

Zu berücksichten sind u. a.

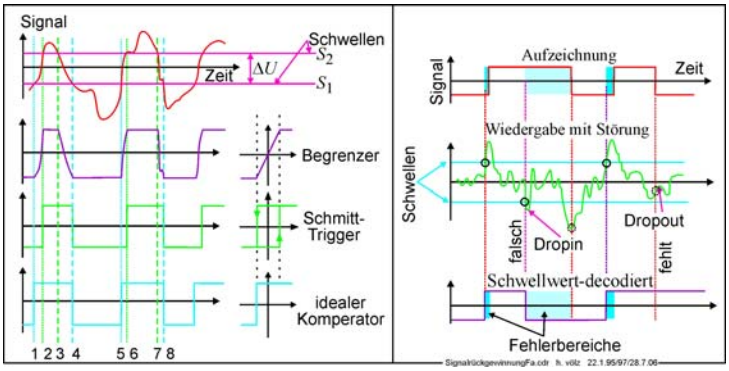
- ***Signale sehr klein***, nV- bis µV-Bereich ⇒ erster Verstärker sehr rauscharm und gut geschirmt, Impedanz-Anpassung
- ***Zeitfehler*** u. a. Gleichlauffehler, peakshift, Wechselwirkung benachbarter 01-, 10-Wechsel
- ***Zeitunsicherheit*** von Nulldurchgang oder Flanke u. a. Flankensteilheit, Signalschiefe, Gleichsignal
- ***Rauschen***, additiv und multiplikativ
- ***Drop-in*** und ***Drop-out***

Speicherkanäle werden mit ***maximal nutzbarer Speicherdichte*** (größtmöglicher Bandbreite) betrieben
Bei der Wiedergabe existiert für minimale Lauflänge neben der Grundwelle ***nur noch die 3. Harmonische***
Es entstehen relativ ***breite Wiedergabeimpulse***, die ***durch Nachbarimpulse*** zusätzlich ***verformt*** werden
Notwendig sind Schaltungen, welche Impulse schmaler machen und Einfluss von Nachbarimpulse senken

Erkennungs-Varianten

Spitzenwert (peak detection = PD), verbessert mit fortlaufend adaptierten Schwelle
Probleme fehlerverursachende Dropins und Dropouts
Nulldurchgang: Wiedergabesignal zunächst differenziert ⇒ Nullstellen bei Signalextrema, dann Spitzenwertdetektor
eventuell mit Driftausgleich
leider steigt jedoch der Störpegel (Automatisch erfolgt Differenzierung bei induktiven Magnetköpfen
Schwelllwert: benutzt zur Erkennung definierte Pegel für Über- und Unterschreiten
Flankenerkennung wird kaum benutzt

Begrenzer, SCHMITT-Triger oder Komperator



Verbesserte Signalerkennungen

Verfahren bei ***Aufzeichnung*** erlangten keine Bedeutung

- ***Vorverzerrung*** des Aufzeichnungssignals mit zusätzlichen Impulseinbrüchen
  Sie bewirken kleine negative Impulse, welche den Wiedergabeimpuls schmaler machen
  Nachteilig: bei der Aufzeichnung tritt zwischendurch nicht Sättigung auf und Wiedergabe besitzt negatives Überschwingen
- Ähnlich wirkt ***Einfügen sehr kurzer Rechteckimpulse***

Beispiele einfache Wiedergabeverbesserungen

Aus dem Wiedergabesignal werden ***zwei unterschiedliche Signale*** abgeleitet und im ***Differenzverstärker*** subtrahiert
Signal über Laufzeitglied mit Phasenkorrektur verzögert wird vom schwach gedämpften Originalsignal subtrahiert
Impuls wird deutlich schmaler, zeigt aber beidseitig negatives Überschwingen

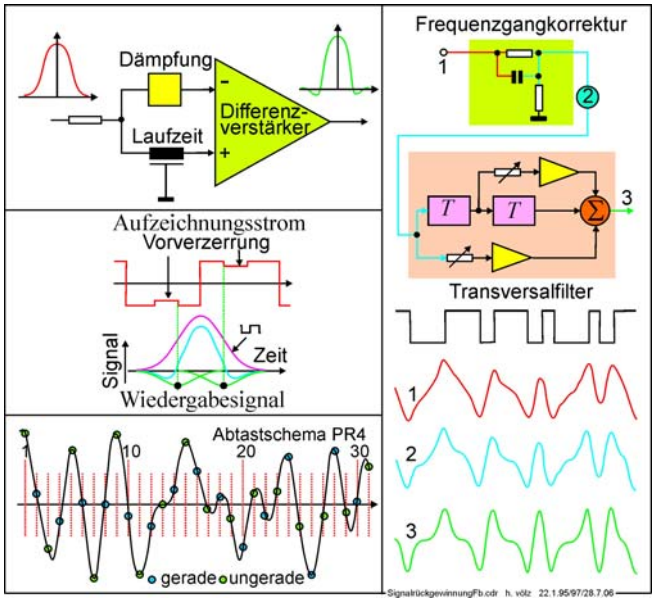
Transversalfilter: mit RC-Glied erfolgt eine geringe Frequenzgangentzerrung
Zwei Laufzeitglieder bilden drei zeitlich versetzte Signale gebildet
Richtig eingestellte bewertete Summierung erzeugt ein erheblich verbessertes Wiedergabesignal

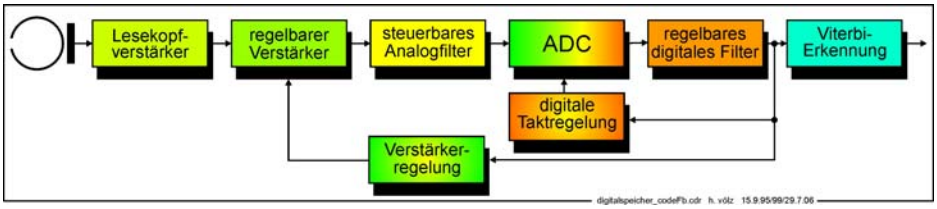
Weiterentwicklung benutzen spezielle ***Optimalfilter*** (matched filter) ≈ adaptive Suchfilter, z.B. [Siakkou 1985]

Komplex Wiedergabeverbesserungen

Ab 80er Jahre **FIR**-Verfahren (**f**inite **i**mpulse **r**esponse; *englisch **finite*** teilweise, begrenzt, ***response*** Antwort, Reaktion)
Wenig später **PR**-Verfahren eingeführt (**p**artial **r**esponse *englisch **partial*** teilweise)
Bei MO-Speichern **PRED**-Verfahren (**p**artial **r**esponse **e**dge **d**etection)
Tasten, wie z. B. das PR4, das Signal ***mit der doppelten Taktrate ab***
geradzahlige und ungeradzahlige Abtastwerte werden in zwei getrennten Kanälen aufbereitet
Durch komplexen Vergleich wird aus beiden das endgültige Signal konstruiert

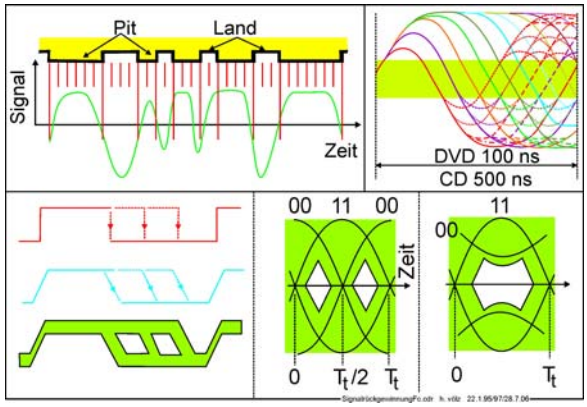
1990 IBM für Festplatten **PRML** (**p**artial **r**esponse **m**aximum **l**ikelihood; *englisch **likelihood*** Wahrscheinlichkeit)
Es wird nach der wahrscheinlichsten Signalkombination gesucht, erstmalig dabei genutzt dabei VITERBI-Decoder
Algorithmus bereits 1967 von ANDREW J. VITERBI (*1935) zur Decodierung von Faltungs-Codes (*englisch **trellis***) entworfen
Heute PRML Standardverfahren, hierfür erhielten 2005 HISASHI KOBAYASHI (*1938), FRANÇOIS DOLIVO (*1946) und EVANGELOS ELEFTHERIOU (*1959) Auszeichnung der Eduard-Rhein-Stiftung
Preis meist jährlich zu Ehren von EDUARD RUDOLPH RHEIN (1900 – 1993) Erfinder RHEINsche Füllschrift Schallplatten vergeben





Augendiagramm

Ermöglicht Überprüfung der Grenzen der Erkennung
Alle zugelassenen Lauflängen werden einbezogen, Oszilloskop wird immer auf die ersten Taktflanken synchronisiert
Störungen bewirken Ungenauigkeit und erzeugen für das auf den Takt synchronisierte Signal die Flächen
Verbleibende Fenster bestimmen den Entscheidungsraum für die Erkennungselektronik
Länge des Auges bestimmt Sicherheit gegen ***Gleichlauf, peakshift usw***.
Höhe des Auges Sicherheit gegenüber ***Amplitudenschwankungen***
Auch Einzelereignisse, wie ***Drop-In, Drop-Out und Taktverlust*** sind meist gut sichtbar
Signalbeispiele für CD bzw. DVD, Augenfenster für Miller- und GCR 4/5-Code



Daten-Codierung

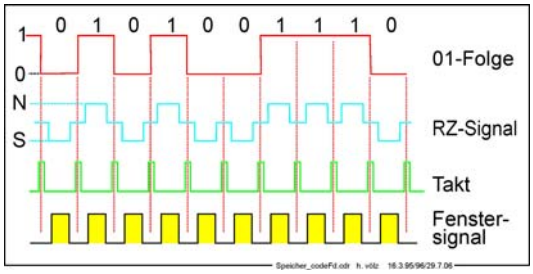
Digitale ***Daten*** x_D sind eine beliebige ***Abfolge von*** 0 und 1.
Da der ***Takt nicht gespeichert*** bzw. übertragen wird, sind nur bestimmte ***Lauflängen (RLL)*** zulässig
Dies verlangt ***Codierung*** $x_D \rightarrow x_C$. Im Laufe der Entwicklung sind viele Verfahren entstanden, letztlich auch mit EDC und ECC
Sie sind immer durch fortlaufend abwechselnde 01- und 10-***Flanken = Flusswechsel*** gekennzeichnet
Der Kanal, Speicher bestimmt dabei einen minimaler und ein Maximaler Flanken-, Flusswechselabstand (Fehlerrate!)
Sie sind also für die En- und Decodierung fest vorgegeben
Charakteristisch für alle Codes ist das statistisch gemittelte Verhältnis: ***Code-Rate*** (-Effezienz) = C_R = Flusswechsel/Daten-Bit
Es kann kleiner und größer 1 sein, durch die technische Entwicklung wurden immer ***leistungsfähigere Codes*** $C_R < 1$ gefunden
Typische Werte liegen heute bei 0,3 bis 0,8
Zuweilen werden dazu ***n aufeinander folgende*** Bits zu einem ***Wort*** zusammengefasst
Dann müssen fortlaufend *n* Bit zwischengespeichert sein ⇒ Verzögerung der Übertragung, Speicherung um *n* Bit

Teilweise, insbesondere in Nachrichtenübertragung, werden auch Signale mit ***k Amplitudenstufen*** benutzt
Sie entsprechen $m = \mathrm{ld}(k)$ Bit bzw. Flusswechselstufen ⇒ $m_X k_Y$-Codes.
x und *y* entsprechen der Code-Basis: B = binär, T = ternär, Q = quaternär usw. ***Überblick*** bis etwa 1990 [Bluschke]
Neuere Codes sind **Faltungs-Codes (trellis)**, z: B. [Friedrichs]
Für die Erzeugung der Codes zwei Varianten: ***Tabellentechnik*** und ***algorithmische Generierung***

Bemerkung: Vielfach wird bei der Codierung von *1* gesprochen, wenn Signalwechsel erfolgt: sowohl $0 \rightarrow 1$ als auch $1 \rightarrow 0$
Eine *0* liegt dann vor, wenn innerhalb eines Taktes kein Wechsel erfolgt
Verwirrend sind folglich „0“ und „1“ bei Bit-Daten und nach der Codierung unterschiedlich definiert

Von RZ ⇒ NRZ

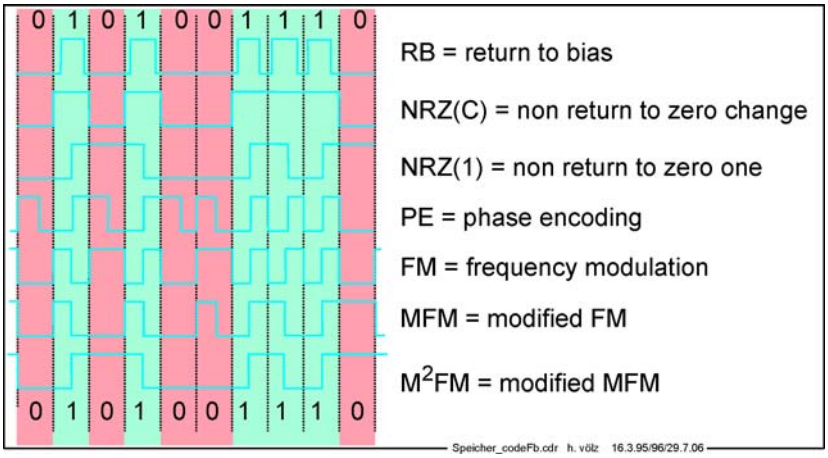
Eine Magnetschicht kann grundsätzlich drei Zustände annehmen: N = Nord-, U = Un- und S = Süd-magnetisiert
In Anfängen um 1950 genutzt = ***RZ-Speicherung*** (*englisch **r**eturn to **z**ero*, Rückkehr zu Null) ⇒ 1 = N und 0 = S
Zwischen den Impulsen Abschnitte ohne Magnetisierung = U, ⇒ daher 2 Flusswechsel/Bit ⇒ ***sehr geringe Speicherdichte***
Weiterer Nachteil: Wiedergabesignal über mehrere Bit meist nicht gleichstromfrei ⇒ störende Nullpunktverschiebungen
Indirekt durch generierten Takt mit daraus abgeleiteten Fenstersignalen vermeiden
Vorteil: keine Forderungen an die Lauflänge RLL 1; ∞
Sehr bald Übergang zu NRZ (**n**on RZ) nur N und S = Ein Wert als bias = zero definiert
*Englisch **to bias*** beeinflussen, vorspannen, vorbelasten, ***zero*** Null)



Historische NRZ-Codes

Letzte Spalte = Anzahl der benötigten Flusswechsel, vereinfacht sind 01- bzw. 10-Flusswechsel als Takt- bzw. Daten-Bit bezeichnet.

RB	**R**eturn to **b**ias	Bei 1 setze einen Rechteckimpuls in die Bit-Zelle.	10
NRZ-C	**N**on **r**eturn to **z**ero; **c**hange	Bei $0 \rightarrow 1$ setze 1 zu Beginn der Bit-Zelle. Bei $1 \rightarrow 0$ setze 0 zu Beginn der Bit-Zelle.	6
NRZ-1	**N**on **r**eturn to **z**ero; one.	Bei 1 schreibe Flusswechsel mitten in die Bit-Zelle.	5
PE	**P**hase **e**ncoding = Richtungstaktschrift	Schreibe in die Mitte jeder Bitzelle einen Flusswechsel. Füge bei einem 01- oder 10-Wechsel je einen Flusswechsel zu Beginn der Bit-Zelle hinzu.	14
FM	**F**requency **m**odulation = Manchester-Code= Bi-Phase = Frequency doubling = two frequency recording = Wechseltaktschrift	Schreibe ***Takt-Bit*** an den Anfang der Bit-Zelle. Schreibe ***Daten-Bit*** in die Mitte der Bit-Zelle.	15
MFM	**M**odified **f**requency **m**odulation = Miller Code (ARVIN MILLER)	Schreibe ***Takt-Bit*** *dann, wenn* a) kein Daten-Bit in der vorigen Bit-Zelle war ***und*** b) kein Daten-Bit in der aktuellen Bit-Zelle vorliegt. Schreibe ***Daten-Bit*** in die Mitte der Bit-Zelle.	9
MMFM $=M^2FM$	**m**odified MFM = Miller squared (JERRY MILLER)	Schreibe dann ***Takt-Bit***, *wenn* a) kein Daten-Bit vorher ***und*** b) kein Takt-Bit vorher war ***und*** c) kein Daten-Bit in die aktuelle Bit-Zelle kommt. Bei 1 schreibe ***Daten-Bit***.	5



FM wurde zunächst bei der einfachen Dichte von ***Disketten*** z. B. 5¼“ mit 360 und 3½“ mit 720 KByte benutzt
Etwa 1987 erfolgte Übergang zur doppelten Dichte = **MFM** ⇒ 1,2 (beidseitig) bzw. 1,44 MByte
Gleichlauffehler der Laufwerke musste geringer sein + PLL-Schaltung zur Taktgenerierung
MFM kann auch als Vorläufer der lauflängenbegrenzten Codierungen angesehen werden

GCR 4/5

= **g**roup **c**ode **r**ecording = gruppenkodierte Aufzeichnung.

Nahezu erster, aber zugleich besonders erfolgreicher Tabellen-Code
vervielfachte Speicherdichte auf 6250 bpi (**b**it **p**er **i**nch; ≈246 Bit/mm)

Wurde 1973 bei der klassischen digitalen Magnetbandspeicherung
auf Bändern mit 9 Spuren eingeführt (enthielt ECC)

Gemäß Tabelle: 4 Daten-Bit ⇒ 5 Kanal-Bit,
Code-Rate C_R = 0,8; Speicher-„Gedächtnis“ 4 bzw. 5 Bit lang

Beliebiges Aneinanderfügen der Kanal-Bits ergibt Lauflängen
für „0“ = 0 bis 2 (RLL 0, 2), für „1“ = 1 bis 6 (RLL 1, 6)

GCR 4/5			
Daten-Bit		Code =Kanal-Bit	
Hex	binär	Hex	binär
0	0000	19	11001
1	0001	1B	11011
2	0010	12	10010
3	0011	13	10011
4	0100	1D	11101
5	0101	15	10101
6	0110	16	10110
7	0111	17	10111
8	1000	1A	11010
9	1001	09	01001
A	1010	0A	01010
B	1011	0B	01011
C	1100	1E	11110
D	1101	0D	01101
E	1110	0E	01110
F	1111	0F	01111

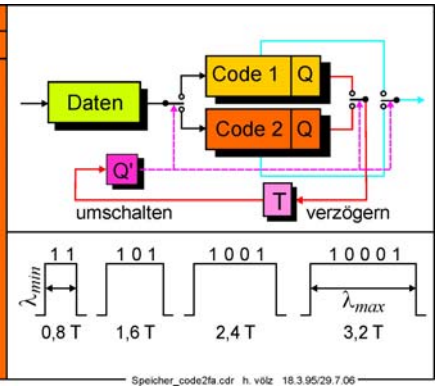
Bei CD, DVD ⇒ EFM ⇒ ETM

Zu EFM (**e**ight to **f**ourteen **m**odulation) gehört Tabelle mit 2^8 = 256 Zeilen
8 Signal-Bits werden in 14 Kanal-Bits (Code) umgewandelt, CR ≈ 0,57
Für günstige Lauflänge und Gleichstromfreiheit sind zusätzliche Bit zu Ergänzen (s. u.)

ETM (**e**ight to **t**en **m**odulation)
8 Signal-Bits werden in 10 Kanal-Bits (Code) umgewandelt = effizienter als EFM
Für günstige Lauflängen gibt es zu jedem der 256 Signalwörter zwei Kanalwörter
Zu jedem Kanalwort gehört ein zusätzliches Q-Bit
Es legt fest, aus welcher Spalte das nächste Kanalwort zu bilden ist
Tabelle enthält außerdem Gleichwert des jeweiligen Kanalwortes
Er wird im statistischen Mittel wird er auf Null gehalten
Es werden nur vier „Lauflängen“ erzeugt: mit 0,8; 1,6; 2,4 und 3,2 Takten

EFM 8/14	
Signal-Bit	Kanal-Bit = Code
00000000	01001000100000
00000001	10000100000000
00000010	10010000100000
00000011	10001000100000
00000100	01000100000000
…	…
11111011	01001000010010
11111100	01000000010010
11111101	00001000010010
11111110	00100000010010
11111111	00100000010010

Daten		Q '= -1			Q' = +1		
Hex	Binär	Code 1	DC	Q	Code 2	DC	Q
00	00000000	0101010101	0	+1	0101010101	0	−1
01	00000001	0101010111	0	−1	0101010111	0	+1
02	00000010	0101011101	0	−1	0101011101	0	+1
03	00000011	0101011111	0	+1	0101011111	0	−1
04	00000100	0101001001	0	−1	0101001001	0	+1
05	00000101	0101001011	0	+1	0101001001	0	−1
06	00000110	0101001110	0	+1	0101001110	0	−1
..	.....	.....	.	..	.....	.	..
10	00010000	1101010010	0	+1	1101010010	0	−1
11	00010001	0100010010	2	−1	1100010010	−2	−1
..	.....	.....	.	..	.....	.	..
FF	11111111	1111111111	−2	−1	1111101010	−2	−1
	Sync	1000100001	0	+1	1100010001	0	+1

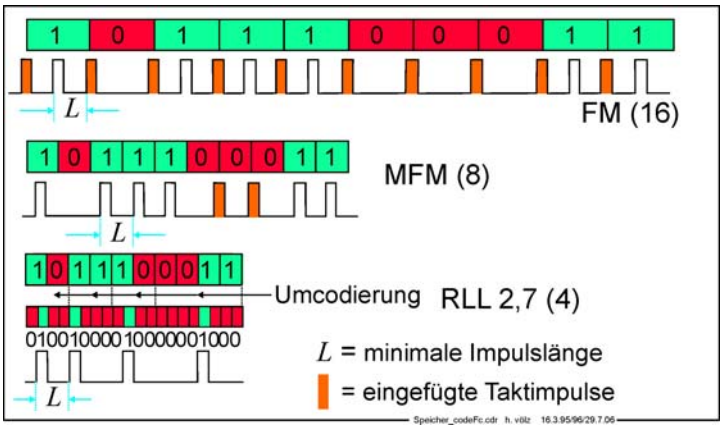


Tabellen-Codierungen für Festplatten

Unterschiedlich lange Signal-Wörter werden zu verschieden langen Kanal-Wörtern zusammengesetzt
Typisch sind RLL 2, 7 (1992) und RLL 1, 7 (1994), dennoch Code-Raten konstant: $C_R = 0{,}5$ bzw. $C_R \approx 0{,}67$
RLL 2, 7 benutzt zusätzlich Präfix-Code: kein Codewort Anfang eines anderen
Bei RLL 1, 7 wird zunächst versucht, die längeren Code-Wörter zu nutzen
Heute noch weiter verbesserte Verfahren, sind recht komplex

RLL 1, 7		RLL 2, 7	
Daten	Code	Daten	Code
00	101	10	0100
01	100	11	1000
10	001	000	000100
11	010	010	100100
0000	101000	011	001000
0001	100000	0010	00100100
1000	001000	0011	00001000
1001	010000		

Gewinn bei einer willkürlich ausgewählten Signalfolge



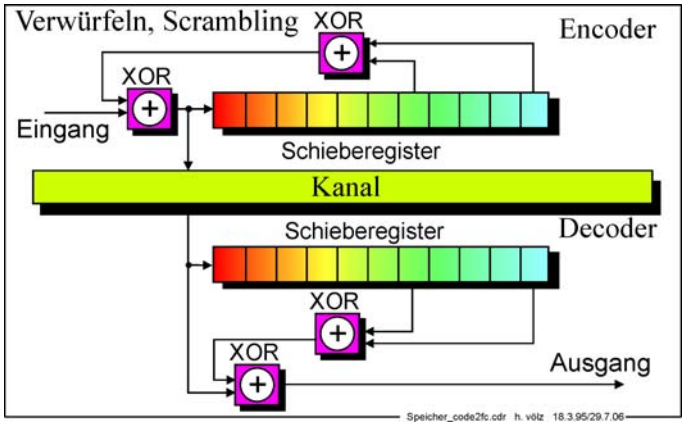
Gemittelten Werte etwa

Code	FM	MFM+ M^{2}FM+ GRC 4/5	EFM	RLL 1, 7	RLL 2,7
Bit/FW	0,5	1	1,41	1,33	2

RNRZ

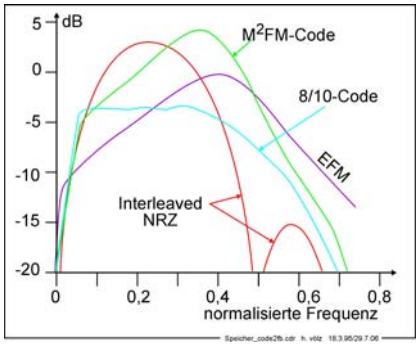
randomized NRZ = verwürfeln = scrambling

Zur Codierung und Decodierung rückgekoppelte Schieberegister (s. ECC)
Signal-Bits werden getaktet einem Schieberegister der Länge n zugeführt (üblich n =16)
Von festgelegten Stellen (verzögert) über zwei XOR (exklusiv-Oder-Gatter) mit Eingangs-Bits verknüpft
Es entsteht Bit-Folge mit weniger 01-Übergängen und begrenzte Lauflänge
Decodierung erfolgt mit einer nahezu gleichen Schaltung
Bei vielen Vorteilen ein Nachteil: es entsteht Fehlerwahrscheinlichkeit von $2^{-n} \Rightarrow \approx 10^{-5}$
Verlangt daher nachträgliche Fehlerkorrektur



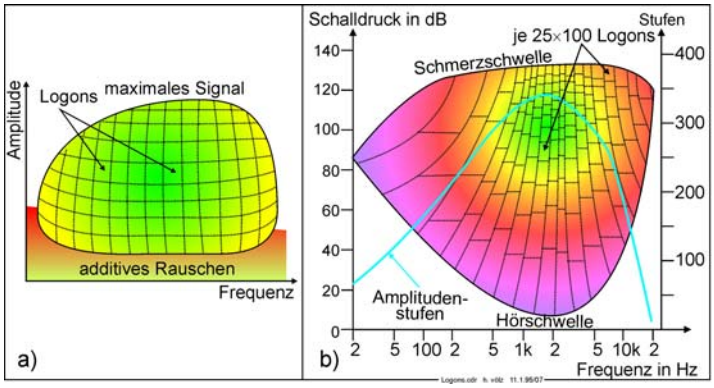
Spektraldichte

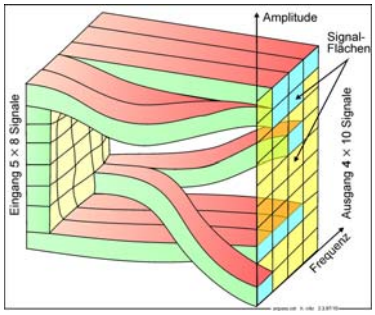
Ist nur statistisch gegeben, sollte möglicht gut dem Wiedergabe-Frequenzgang angepasst sein

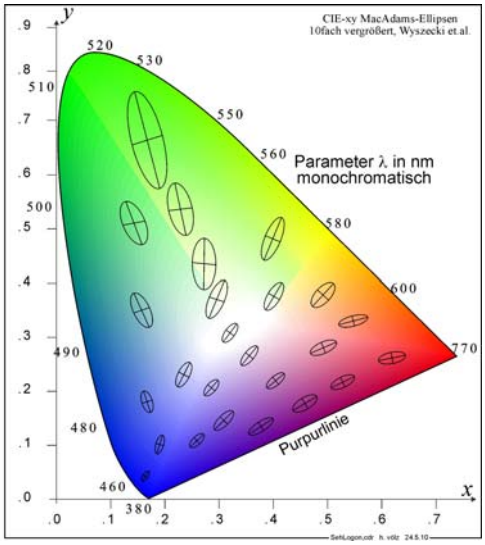


Kodierung und Signalflächen

Digitale Speicherung verlangt ***zeitliche und energetische Stufen*** ⇒ unterscheidbare Signalflächen, JACOBSON nannte sie ***logons***
Akustisch Logons z. B.: Wie viel muss ein Sinus-Ton in Lautstärke und Frequenz geändert werden damit dies ***hörbar*** ist
Gehör rund 50 000 Logons. Bild fasst jeweils 250 zusammen, höchstes Differenzierungsvermögen bei ≈1000 Hz, ≈70 Phon
Für Sehen unterscheidbaren Farben im genormten x-y-Diagramm
Solche Flächen lassen sich für alle Sinnesreize bestimmen, bzgl. der Energie sind sie ***meist logarithmisch abgestuft***
Auch für ***Speicher-Kanäle*** sind sie infolge ihrer Störungen – Rauschen, Modulationsrauschen, Gleichlauffehler usw. – herstellbar
Kodierung entspricht dann einer ***Abbildung*** zwischen den Signalflächen der Sinnesorgane auf denen des Kanals







Literatur

Altrichter, E.: Das Magnetband. Verlag Technik, Berlin 1958
Blaese, U.: Magnetische Schallspeichertechnik. Amateurreihe electronika Nr. 219/220 Militärverlag, Berlin 1984
Bluschke, A.: Digitale Leitungs - und Aufzeichnungscode, VDE - Verlag, Berlin 1992
Friedrichs, B.: Kanalcodierung - Grundlagen und Anwendungen in modernen Kommunikationssystemen. Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 1996
Hack, J.: Magnetische Informationsspeicher in der Daten-, Audio- und Videotechnik. Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1990
Mallinson, J. C.: The foundations of magnetic recording. 2. Aufl. Academic Press, Boston u.a. 1993
Scholz, C., Pohl, J.: Schaltungstechnik in Kassettenrecordern. Verlag Technik, Berlin 1980
Scholz, C.: Handbuch der Magnetbandspeichertechnik. Verlag Technik, Berlin 1979
Siakkou, M.: Digitale Bild- und Tonspeicherung. Verlag Technik Berlin 1985
Siakkou, M.: Magnetband-und Plattenspeichertechnik. Verlag der Technik, Berlin 1990
Siakkou, M.: Physik der Informationsspeicher. Akademie Verlag, Berlin 1979
Völz, H.: Informationsspeicher, Grundlagen - Funktionen - Geräte. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 1996
Völz, H.: Beitrag zur reziproken Dynamikregelung. Hochfrequenztechnik u. Elektroakustik 67 (1958) 2, 87 - 94
Völz, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Magnetbandaufzeichnung für Messzwecke. Nachrichtentechnik 9 (1959) 8, 376-379
Völz, H.: Eine erweiterte Klirrfaktortheorie der Frequenzmodulation bei kleinen Modulationsindizes. Dissertation Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald 1957.
* Berechnung des Frequenzmodulationsinhaltes eines Spektrums mit Matrizengleichungen. msr 7 (1964) 5, S. 198 - 202
* Zur Symmetrie eines frequenzmodulierten Spektrums. Nachrichtentechnik 14 (1964) 9, S. 340 - 344