Vorlesungsmaterial
Prof. Dr. Horst Völz

Transportwerke

Dieses Material beruht u.a. auf dem Buch

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007

Es ist u.a. auch vollständig **auf der CD enthalten:**

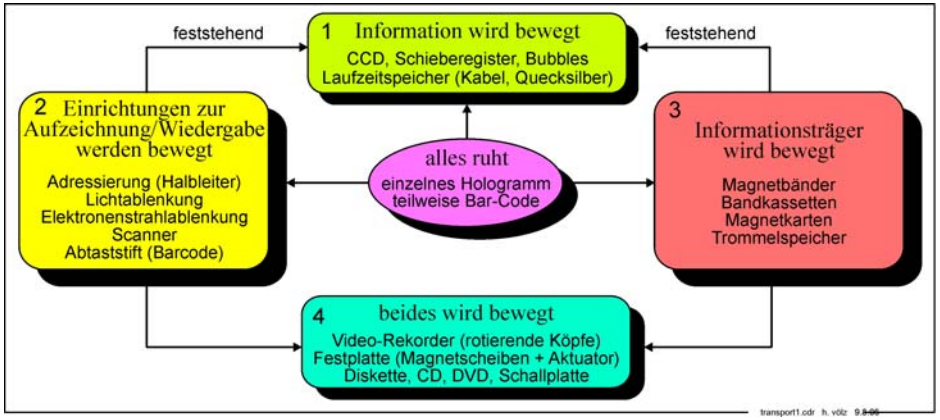
Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Datenspeicher von der Steinzeit bis ins 21. Jahrhundert. Digitale Bibliothek Bd. 159, Berlin 2007

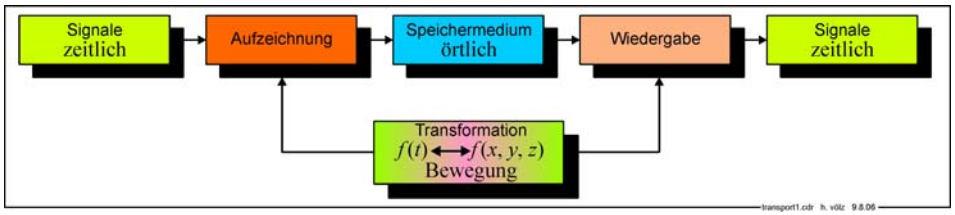
Der Inhalt wurde gekürzt, auf den neuesten Stand gebracht und die Bilder farbig umgesetzt

Dieses Material wurde herunterladbar von: aes.cs.tu-berlin.de/voelz

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

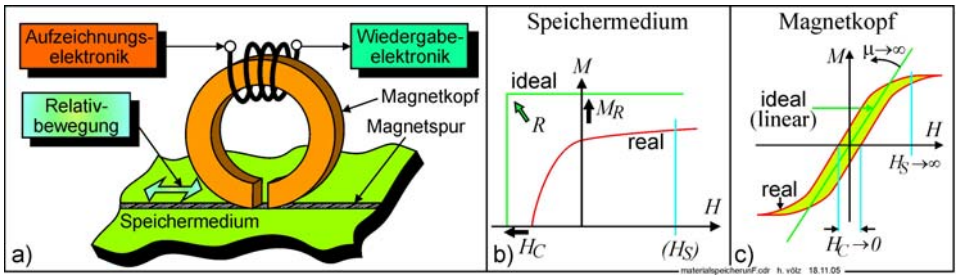
Informationsspeicherung und Bewegung





Mechanischer Transport

Magnetische und optische Speicher benötigen fast immer Transportwerke
Ausnahme *Bild* →Holographie, ***Magnetismus*** bewegte Wände oder Bubble
→ historische Speicher (Information direkt bewegt)

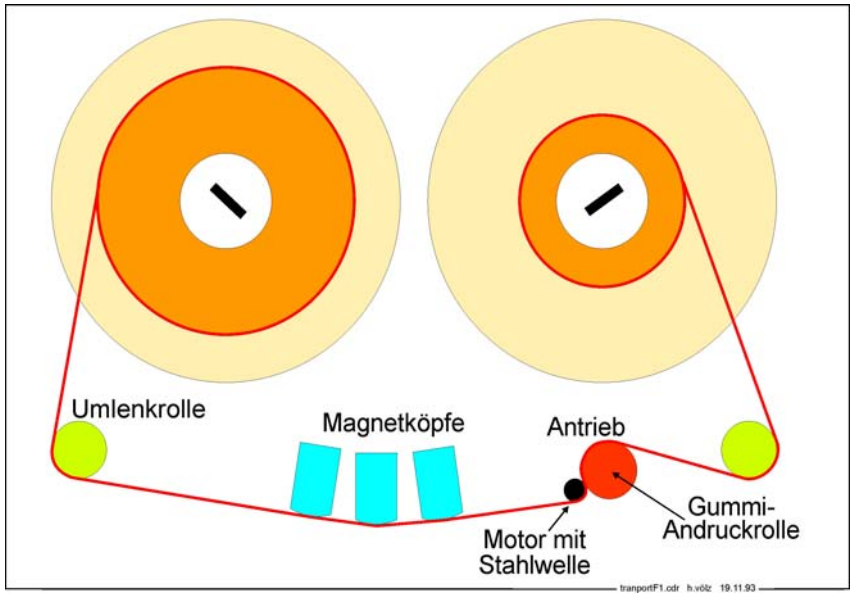


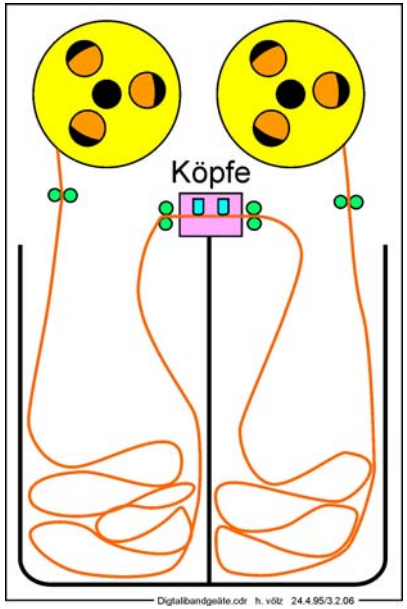
Details für optische im dortigen Kapitel

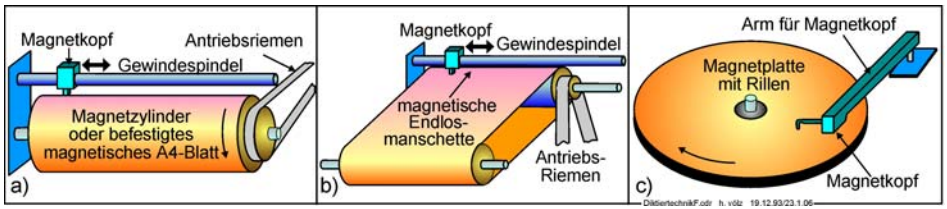
Aufgabe eines Transportwerkes

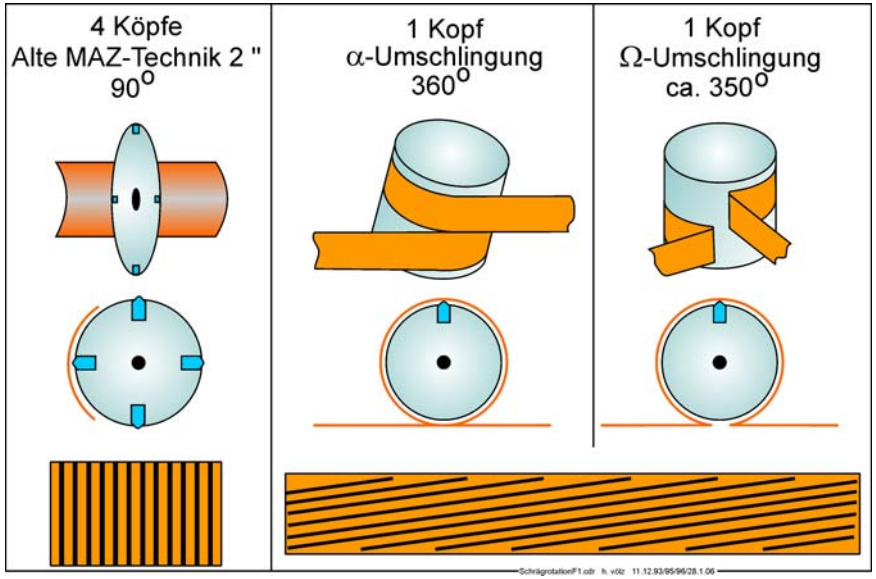
Nicht alle der folgenden Forderungen müssen bei einem Gerät usw. erfüllt sein

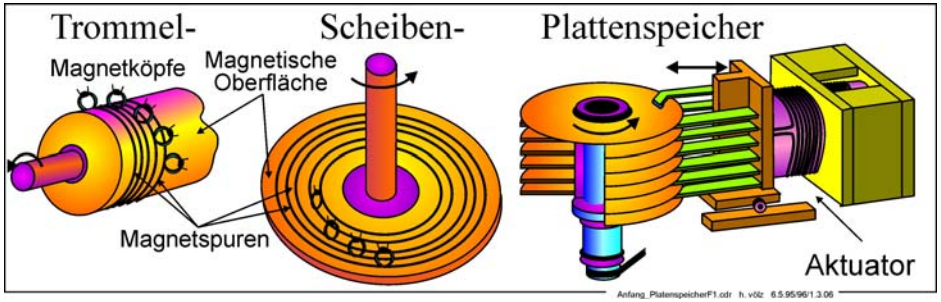
- Möglichst konstante ***Relativbewegung*** zwischen Band und Kopf erzeugen
  Bewegung von Band und/oder Kopf
  In Sonderfällen Steuerung von Geschwindigkeit oder Drehzahl
  bzw. bzgl. Synchronisation Bild ⇔ Ton oder Takt
- Stabiler ***Kontakt zwischen Band und Kopf*** bzw. bei Festplatten usw. definierter geringer Abstand
- ***Konstanter Bandzug***, ***optimale Umschlingung*** des Kopfes
- Exakte **Führung** des Magnetkopfes bezüglich der Spur, evtl. mehrdimensionale Justage des Kopfes
- Genaues ***Wiederfinden und Einhalten der Spur***, teilweise komplexe Regelungs- und Servotechnik
- Schneller und zuverlässiger **Zugriff** zu ausgewählten Daten (Positionen)
  dafür existieren Lösungen mit ***Start-Stopp-Technik*** (Rechentechnik)
- ***Lagerung, Archivierung und automatischer Zugriff*** auf die Informationsträger
  fester Bandwickel, Ein- und Ausfädeln bei Spulen, Tapewechsler, Jukeboxen usw.

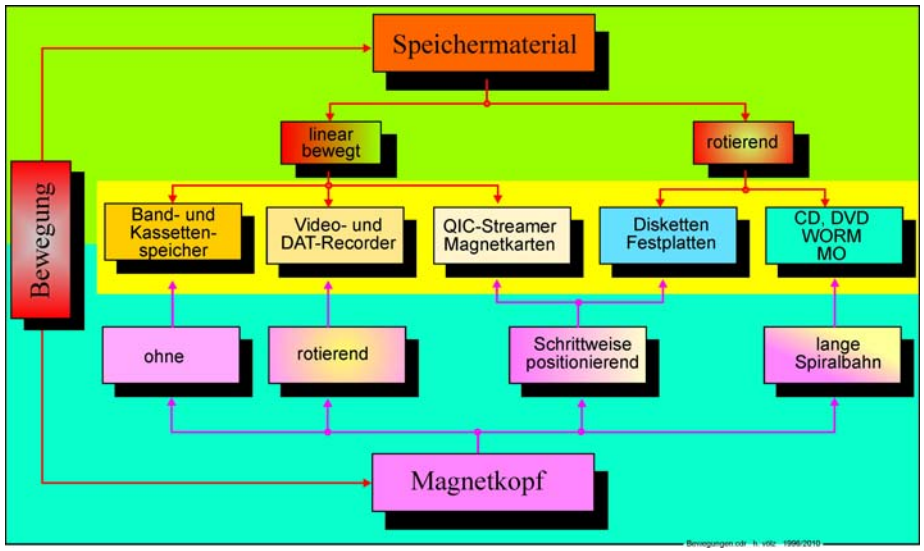












Informationsträger	Bewegung	Kopf
Band	Linear, längs evtl. mehrere Spuren	fest evtl. Fahrstuhl schräg oder quer rotiernd evtl. mehrere Köpfe
Karte	Linear, längs evtl. mehrere Spuren evtl. Karte gekrümmt	fest evtl. Fahrstuhl evtl. rotierend evtl. mehrere Köpfe
Platte Folie	rotierend viele Radialspuren zylindrisch oder spiralförmig evtl verschiedene Sektorlängen	Kopfzustellung (Aktuater) fliegend oder in Kontakt selten mehrere Köpfe
Trommel	rotierend viele feste Spuren	fest je Spur ein Kopf
nur Information	Bewegung der magnetischen Strukturen	komplexe Aufzeichnungs- Wiedergabeeinrichtung

Erzeugung der Bewegung

Bewegung muss ***Reibung überwinden*** und benötigt daher ***Energie***

Ganz früh wurde ***Wasserkraft*** benutzt, z. B. Wasserorgeln der Frühgeschichte oder Antike

Die ***Schwerkraft*** wurde und wird z. B. bei Uhren benutzt

Ab dem Mittelalter wurde ***Federkraft*** benutzt, z. B. Aufziehen bei Plattenspielern

Selten ***Pneumatik*** (Luftdruck), bei heutigen Speichern Sonderanwendungen, s. digitale Speicher

Heute praktisch nur ***elektrische Energie*** in Betracht, Ausnahme smartcards, per Hand „durchgezogen“

Fast ausschließlich wird sogar ***magnetische Anziehungskraft*** benutzt

Sehr selten elektrische oder magnetische ***Piezoeffekte*** oder ***elektrostatische Effekte*** zur Anwendung
Daher ihre Grundlagen im Folgenden nicht dargestellt

Ein Problem vieler Speicher ist die ***extreme Kleinheit*** der Antriebe

Trotz sonst abgeschlossener Technikentwicklung noch ***Neuerungen*** u. a. Mikroaktoren zu erwarten

Magnetische Antriebs-, Bewegungstechniken

Linear-Antriebe heißen oft ***Aktuatoren*** (*lateinisch* ***actuare*** sich betätigen)

Rotations-Antriebe = vorwiegend ***Motoren*** (*lateinisch* ***motor*** Beweger, ***movere*** bewegen)

Hub-, Zug- und Topfmagnete

H = erregendes magnetisches Feld, B = auftretende magnetische Flussdichte, V Volumen des Feldes
Magnetische Energie

$$W_{magn} = \int_0^V \int_0^B H \cdot \mathrm{d}B \cdot \mathrm{d}V$$

Energie überwiegend im Luftraum. Kraft F des Feldes versucht den Luftspalt δ zu verkleinern

$$F = \frac{\mathrm{d}W_{mech}}{\mathrm{d}s}$$

Mit Luftspalt-Querschnitt A gilt folgt die Tragkraft des

$$F_{Trag} = \frac{1}{2} B \cdot H \cdot A \quad \text{bzw.} \quad F_{Trag} = B^2 \cdot \frac{A}{2 \cdot \mu_m}.$$

Zweiter Ausdruck gilt für die über den gesamten Kreis gemittelte Permeabilität μ_m,
Abstand δ nur indirekt über μ_m und Rückwirkung auf B und H gemäß $B = \mu_m \cdot H$
Rechnung bereitet wegen der Hysterese und der Entmagnetisierung Schwierigkeiten
Elektrische Analogie gibt Hinweise

$$W_{mech} = \int F \cdot \mathrm{d}x \quad \text{bzw.} \quad W_{elektr} = \int U \cdot I \cdot \mathrm{d}t.$$

Weg-Kraft-Kennlinien sind meist stark nichtlinear, können über Kernformen verändert werden

Spaltbegrenzung gegen „Kleben“ oft notwendig

Spulenantrieb

Auf ***Leiter*** mit elektrischen Strom I, Länge l im homogenen Magnetfeld B wirkt die **Kraft** $F = B \cdot I \cdot l$.

Bei ***Spule*** mit n Windungen ist $n \cdot I$ statt I zu wählen

Bilden Leiter und B-Linien einen Winkel ß, so wird die Kraft verringert $F = B \cdot I \cdot l \sin(\beta)$.

Typisch ist dynamischer ***Lautsprecher ≈ voice coil*** (*voice* Sprache, Stimme; *coil* Spule, Rolle, Wicklung)

Varianten ***kurze ⇔ lange (Tauch-) Spule*** (Vergleich Spaltlänge) ⇒ Kraft F unabhängig vom Ort

Bei ***Aktuatoren der Festplatten*** hat sich nur die kurze Variante bewährt

Kurzschlusswindung aus Kupfer kann zur Dämpfung gegenüber Überschwingen herangezogen werden

Auch ***gebogene Konstruktionen*** ⇒ Übergang zum ***Drehspul***-Prinzip, Drehwinkel < 360° ⇒ Motor

Hinweis: künftige reibungsfreie Lager

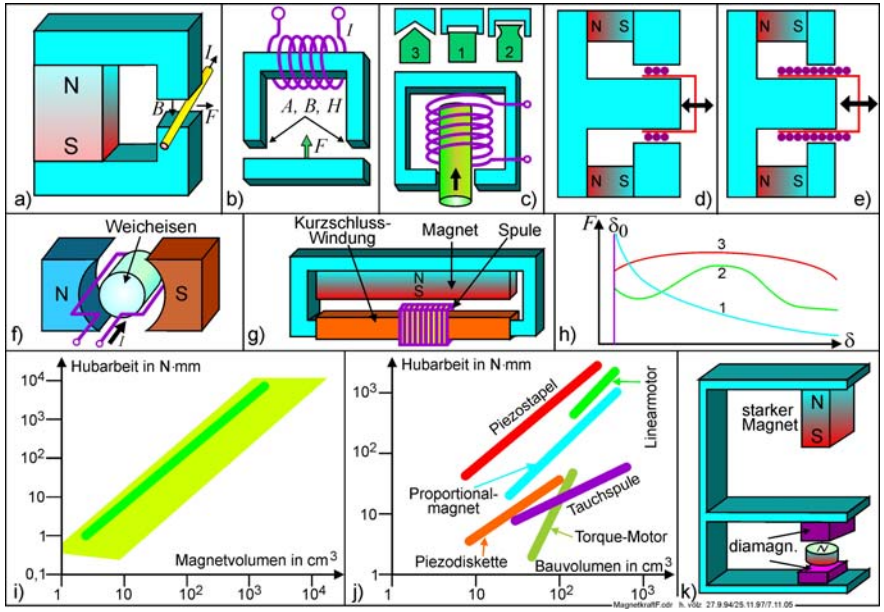
Magnetische Kräfte bewirken entweder ***Anziehung oder Abstoßung***

Nur mit großem Regelaufwand ist reibungsfreie Bewegung zu erreichen (***Magnetschwebebahn***)

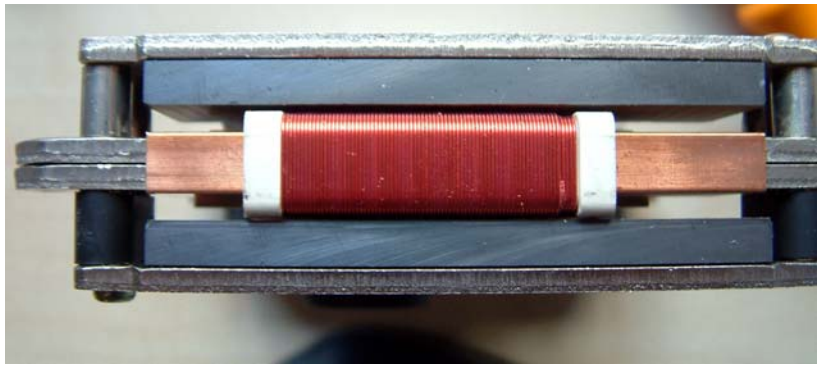
Kombination: Dauermagnet und diamagnetisches Material: erst in letzten Jahren gelungen

Magneten und Magnetmaterial in der Schwebe zu halten
(z.B. Spektrum der Wissenschaft, 2005, H. 2, S. 70 ff.)

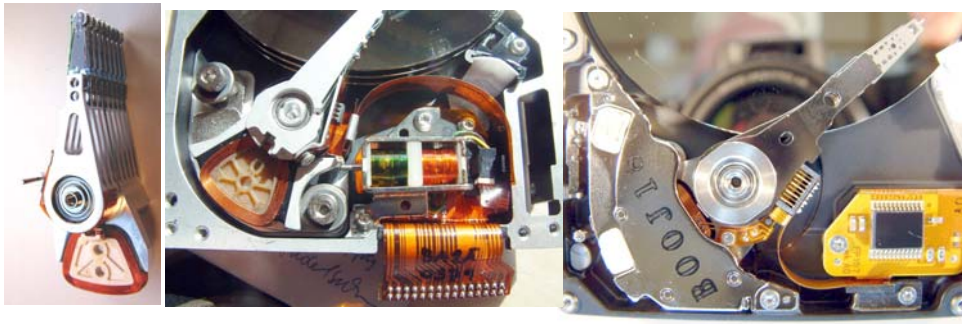
Eine Weiterentwicklung könnte zu reibungsfreien Lagern der Speichertechnik ermöglichen



Aus einem MO-Laufwerk



Bei Festplatten



Einteilung der Antriebe: Aktoren ⇔ Motoren

Bewegungsart	Linear-Antrieb	Rotations-Antrieb
Diskret	***Hubmagnet*** meist 2 Stellungen Weg-Kraft-Verlauf	***Schrittmotor*** Polzahl
Kontinuierlich	***Voice coil*** ≈ Lautsprecher auch gebogene Ausführung ***Drehspule*** Länge der Schwingspule	***Motor*** in vielen Varianten Drehzahl = Funktion von Energiezufuhr (Spannung) und Last Besonderheit ***Synchronmotor***

Überblick zu Elektro-Motoren

1821 MICHAEL FARADAY (1791 – 1867) erkennt das Grundprinzip des Motors

1834 MORITZ HERRMANN VON JACOBY (1801 – 1874) erster funktionierender Motor, Batterie betrieben

1887 NIKOLA TESLA (1856 – 1943) entwickelt die Idee des Drehstrommotors

1889 MICHAEL DOLIVO-DOBROWSKY (1862 – 1919) ersten brauchbaren Dreiphasenmotor = Käfigläufer

Heute Vielzahl von Elektromotoren, Hauptgruppen:
Gleich-, Wechsel- Drehstrommotoren sowie Synchron- und Schrittmotoren

Ursprünglich große Leistungen ***kW bis MW*** für Werkstätten, später Fahrstühle, Kräne usw.

Bald Motoren im ***Haushalt*** (Staubsauger, Küchenmaschinen) und Kleinanwendungen ***10 – 100 W***

Insbesondere ***Speichertechnik*** erzwang ***Kleinstmotoren <1 W***, dann auch in ***Uhren*** usw. benutzt wurden

Zunächst Probleme mit ***Wirkungsgrad***, Lösungen vor allem durch ***mikroelektronische Steuerung***

In den 50er Jahren waren im typischen Haushalt maximal 10 Motoren vorhanden, heute um 100

Gleichstrom-Motoren 1

Ursprung ist der ***3T-Anker-Motor*** (*griechisch* ***ágkyra*** Gebogenes, Gekrümmtes)
Über den ***Kommutator mit „Bürste“*** erfolgt die Stromzuführung, zu jeweils zwei Spulen
lateinisch ***commutatus*** Umwandlung (= Stromwender“)
Der herumgelegte Magnet besitzt zwei Magnetpole

Heutige Gleichstrommotoren haben ***mindestens acht Pole*** für besseren ***Rundlauf***

Für leistungsstarke Motoren ist der äußere Magnet durch elektrische Feld-Erregung ersetzt
Reihen- und Parallelschaltung (Hauptschlussmotor) zu unterscheiden

Hauptschlussmotor kann mit Gleich- und Wechselstrom betrieben werden = ***Universalmotor***

Nachdem preiswert leistungsstarke ***Dauermagnete*** existierten, bei Kleinmotoren für Felderregung

Später entstanden ***eisenlose*** Anker, wie Scheiben- und Glockenanker mit ***geringer Trägheit***

Der Glockenanker ermöglich sehr „***dünne“ Motoren mit hoher Drehzahl***.
Breits 1999: Maxon ∅ = 6 mm, 100 000 UpM. Bei 1,2 W Wirkungsgrad 90 %. 2006 ∅ <2 mm

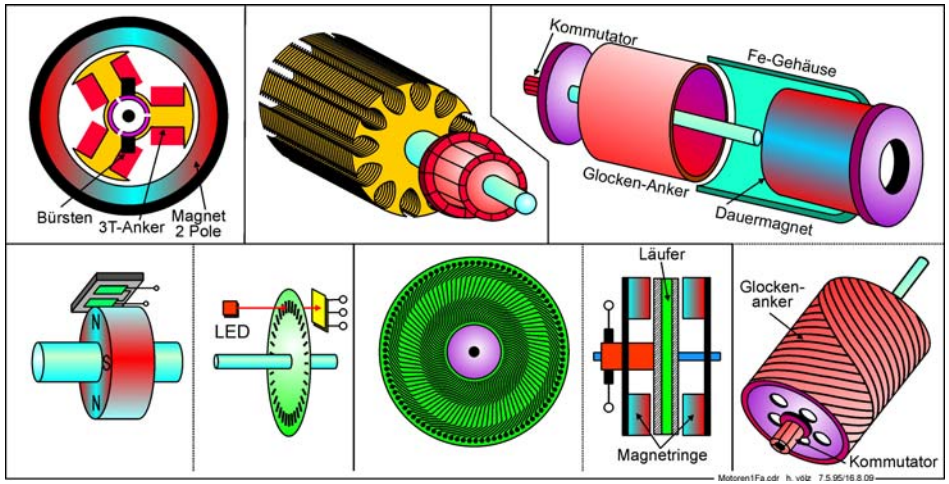
Gleichstrom-Motoren 2

Bei ***Kleinmotoren EC-Motor*** (**e**lectronic **c**ommunicated)
= verschleißender Kommutator elektronisch nachgebildet
jeweilige Position des Ankers optoelektronisch oder per HALL-Element abgefragt
Gemäß Ergebnis wird richtige Wicklung ***elektronisch gesteuert*** mit Strom versorgt

Bei extrem kleinen Motoren sind keine Hallgeneratoren unterzubringen.
Dann **Gegen-EMK** (**e**lektro**m**otorisch induzierte **K**raft, eigentlich Spannung) genutzt
Führt allerdings zu einem schlechten Anlaufverhalten.

Drehzahlkennlinien $\omega(M, U)$ hängt ab von Drehmoment M, Betriebsspannung U und Schaltung (s. u.)
Für Speicher wird eine ***konstante oder gesteuerte*** Drehzahl gefordert
Spezielle ***Regelungen und Steuerungen*** erforderlich, vorwiegend elektronisch

Details + Literatur, u.a. Wirkungsgrad, Skalierung, Steinlager, Ölfilm, gedruckte Anker, Bürsten
[Völz: Handbuch 3]



Wechsel- und Drehstrom-Motoren

Wechselstrom mit zwei oder mehr phasenverschobenen äußeren Feldern erzeugt ***Drehfeld***
Darin ***rotiert ein Eisenanker*** mit etwas geringerer Drehzahl
⇒ ***Asynchronmotor*** mit funktionsbedingtem ***Schlupf***
bewirkt Ummagnetisierung, Hysterese und Wirbelstrom
existiert Arbeitpunkt mit ***maximalem Drehmoment***,
oberhalb Schlupf geringer, unterhalb Wirkungsgrad

3-phasiger Drehstrom → ***Drehstrommotor*** mit 3 um 180° versetzten Stator-Wicklungen
für Leistungsanwendungen üblich, aber kaum bei Speichergeräten (elektronisch erzeugt)

„Üblicher" Wechselstrom nur eine Spannung, zweite Phase mit ***Kondensator*** in Hilfswicklung erzeugt
Motoren bei größeren Studiogeräten benutzt.
Für ***Bandwickel-Antrieb*** ist fallende Kraftkennlinie bei steigender Last zur Stabilisierung des Bandzuges nützlich
Hier verhalten sich Drehzahl und Drehmoment ≈ reziprok: Bandwickeldurchmesser ⇔ Drehzahl

Andere Möglichkeiten für die zweite Phase nutzen
Hysterese-, Reluktanz- und Spaltmotoren, z. B. mit ***Kurzschlusswindung***

Synchron-Motoren

Der Eisenanker besitzt ***periodisch magnetisierten Dauermagneten***
Dadurch dreht er sich exakt im Takt des Drehfeldes, Im Normalbetrieb existiert ***kein Schlupf***
Durch ***zu hohe Last*** gerät er außer Takt, *ruckelt* oder *bleibt stehen*
Er ist für ***frequenzkonstante Antriebe*** auch in Speichergeräten wichtig
Dann werden fast immer die ***Spannungen*** für das Drehfeld ***elektronisch erzeugt***
So ist ein großer Regelbereich mit genauer Drehzahlvorgabe möglich

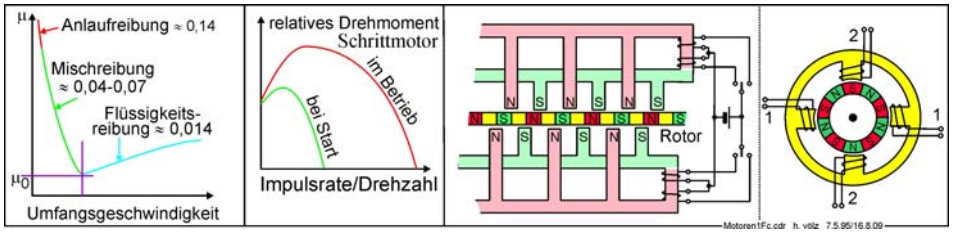
Schritt-Motoren

englisch ***torque motor***

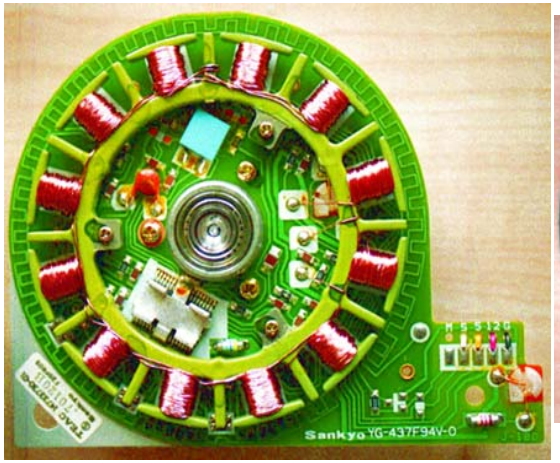
Ähneln Synchronmotoren, werden jedoch mit ***Stromimpulsen*** statt Wechselstrom betrieben
Mit jedem Impuls schalten sie um einen Magnetpol des Ankers weiter.
So sind sowohl extrem ***großer Drehzahlbereich*** als auch ***definierte Winkelschritte*** zu realisieren
Ab einer gewissen Drehzahl läuft der Anker infolge seiner ***Trägheit „rund"***
evtl. zusätzliche Schwungscheiben
Dazu auch Rotor nach Außen verlagert ⇒ ***Außen- ⇔ Innenpolmaschinen***

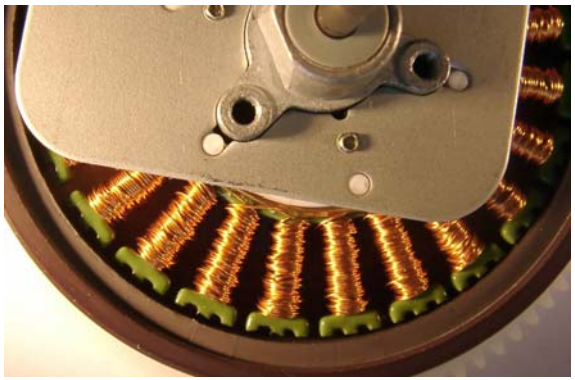
Es sind ***Anlauf- und Betriebsverhalten*** zu unterscheiden

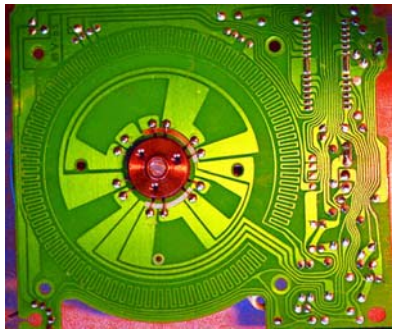
Es gibt Motoren mit bis zu ***300 Polpaaren***.



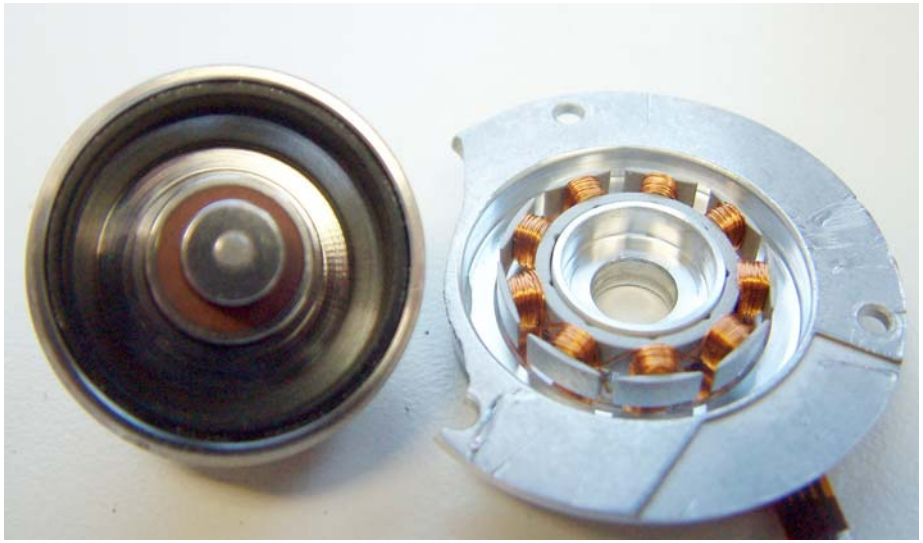
Floppy







Video



Ergänzungen 1

Magnetfeld der Motoren darf ***nicht Speichermedium beeinflussen***

Insbesondere für ***Disketten-*** und ***Festplattenlaufwerke*** daher besondere Abtriebe

Zunächst ***Riemenantrieb***, Motor hinreichend weit entfernt

Außenpol-Prinzip ermöglicht erstmalig Direktantrieb möglich
⇒ einfache Bauweise ohne Elastizitäten, Lose, Umkehrspiele
geringe Trägheit, Geräusche, Verschleiß, bessere Regelung

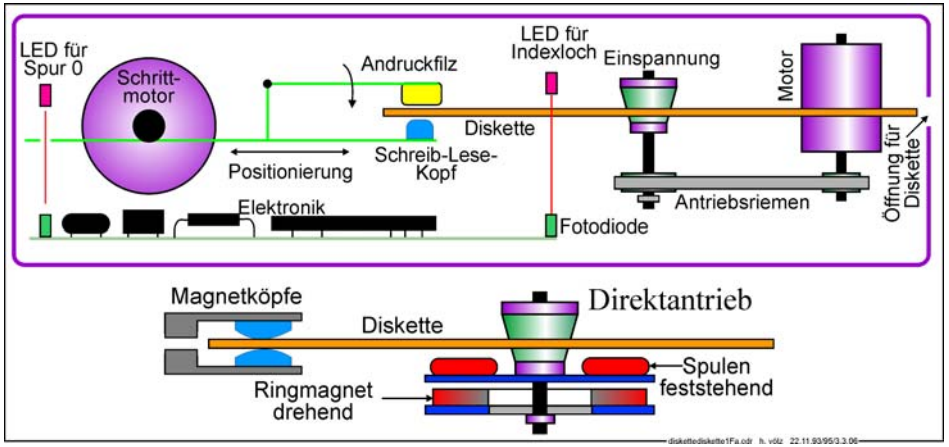
Später Motor sogar ***ins Innere des Plattenstapels*** verlegt werden
⇒ kompakter Aufbau ⇒hohe Speicherkapazität
Aber Gefahr von Unwucht bei Motor, Nabe, Scheiben, Spacer und Befestigungselementen
⇒ mechanische Schwingungen → hörbares Pfeifen

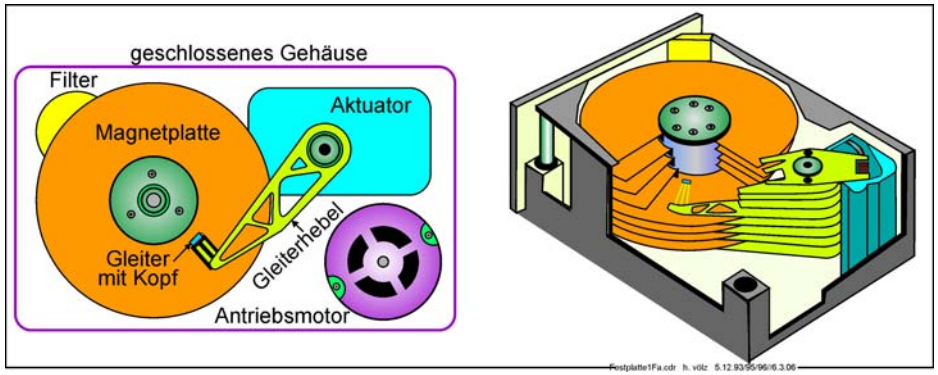
Notwendig: perfekte Fertigung, bessere Kugellager
schließlich Balancier-Einheit mit automatischem Verlagern der Kugeln

Heute Kugellager (= Wälzlagertechnik) so gut, dass ***kaum Verschleiß*** auftritt

Gleit- bzw. Sinterlager: geräuscharm, schwingungsfrei, zuverlässig
gute Ableitung der Reibungswärme (einfache Festplatten)

Toleranzen der Lagerung durch ***Verschleiß*** ≤ 0,25 µm





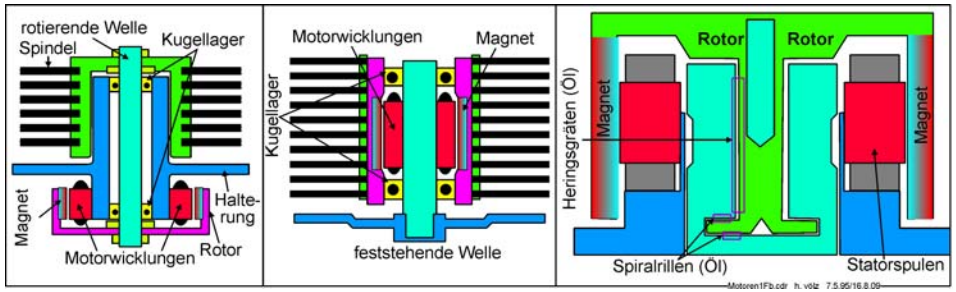
Ergänzungen 2

Erste ***Ölfilmlager*** seit etwa 2002 von IBM

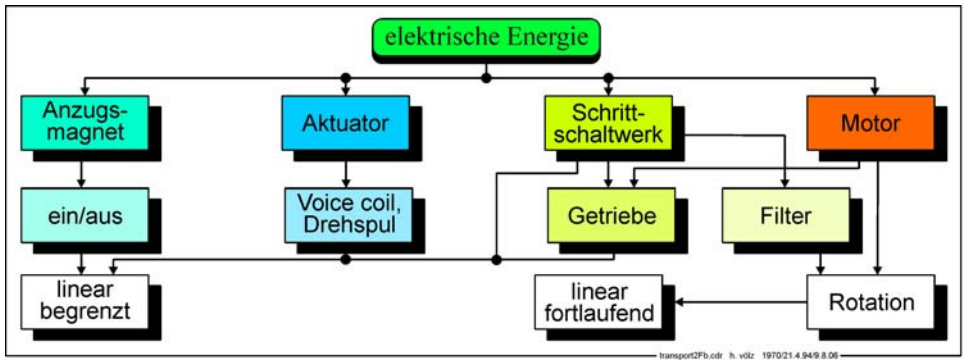
Noch besser sind zukünftige Luft- und Flüssigkeitslagern

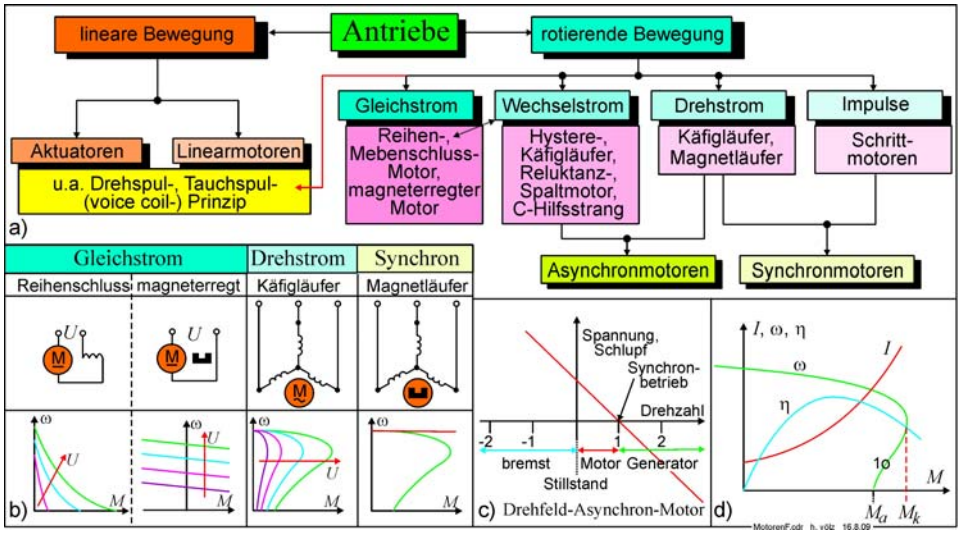
Hydrodynamische Lager bzw. FDB (**f**luid **d**ynamic **b**earing)
selbst bei 15 000 UpM kaum wahrnehmbare Geräusche
Nur sehr wenig bewegte Teile, größere Kontaktfläche
weniger schockunempfindlich ⇒ höhere Zuverlässigkeit

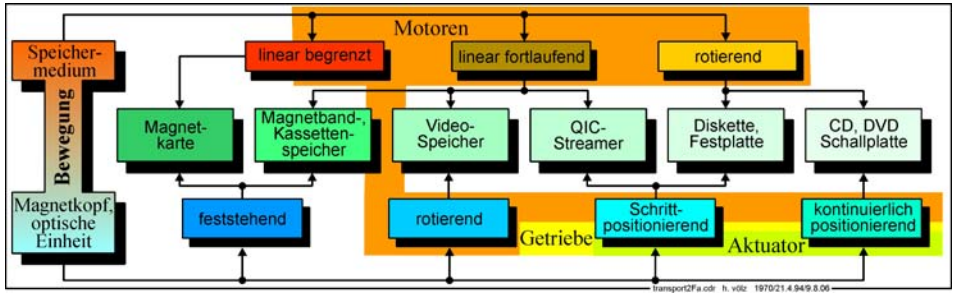
2006 Sony und ADDA Variante ***ohne mechanisch aneinander reibende Teile***
Welle läuft schwimmend auf einer sehr dünnen Ölschicht
größeres Lagerspiel, komplett mit Öl ausgefüllt ⇒ kein Verschleiß
Ölschicht rotiert mit einer mit dem Nabendurchmesser abnehmenden Strömungsgeschwindigkeit
Dazu Führungszylinder mit zwei „Heringsgrätenfurchen“ ≈ 5 µm tiefe Strukturen
Öl passend aufgeschwemmt, Inkompressibilität des Öls macht Lager sehr schockunempfindlich.



Zusammenfassung Antrieb







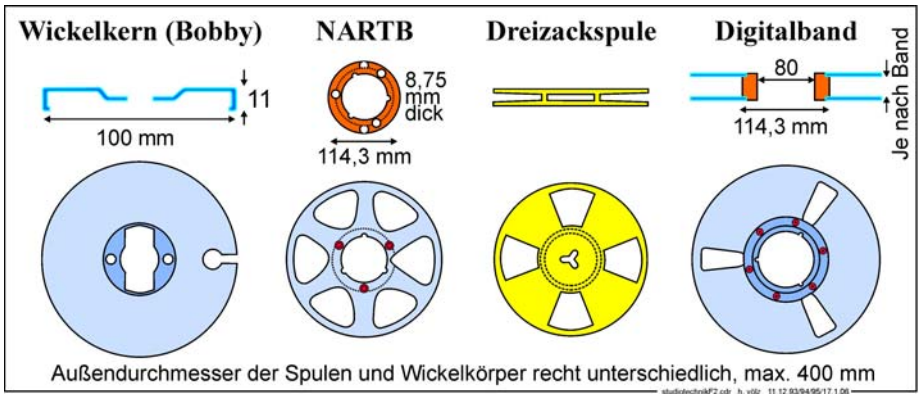
Lagerung der Medien

Lagerung bzw. Archivierung von Speichermedien
Schutz gegenüber äußeren Einflüssen und Austauschbarkeit beim Gerät:

- Band freitragend auf einem ***Wickelkern (Bobby)***, alte „deutsche“ Rundfunktechnik erstaunlich bis 300 mm stabil! Probleme: herausragende Bandkanten, richtiger Wickelzug (s. u.)
- Band auf ***Spule*** gewickelt, mehrere Spulenarten genormt, bessere Stabilität, Schutz der Bandkanten wegen hohem Trägheitsmoment „durchbrochen“
- Band in ***Kassette***, vielfältige Konstruktionen, CC, Video, Rechentechnik Noch besser als Spule, großes Volumen!
- ***Cartridges, Hüllen*** usw. für Disketten, Blu Disk, Wechselplatten, MO-Medien usw.
- ***Festplatten*** fest eingebaut im Gehäuse
- CD früher in ***Caddies***, heute wie DVD usw. außer Verpackung kein zusätzlicher Schutz
- ***Magnetkarten***, insbesondere Smartcards werden oft ohne zusätzlichen Schutz aufbewahrt

Wichtige Spulentypen

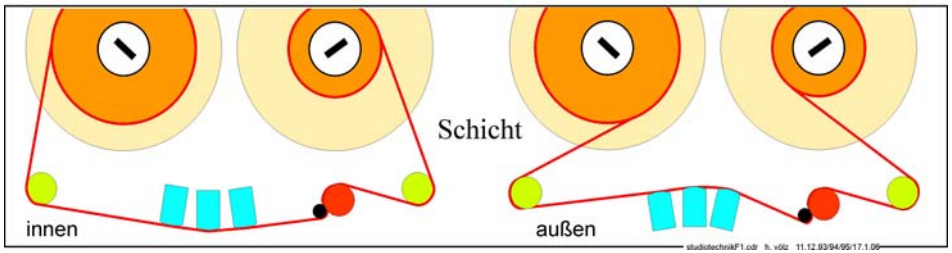
- ***Dreizackspule*** Ursprung vom Schmalfilm
  mehrere Außen-/Innen-∅: 75/45, 100/45, 127/45, 147/60, 178/60, 220/70 und 250/70 mm
  Masse 60 - 150 g, Größe und Anzahl der Aussparungen unterschiedlich, z.T. firmenspezifisch
- ***NAB-*** bzw. ***NARTB****-Spule* Ursprung Audiotechnik, zuweilen auch im Videobereich
  Außen-∅: 203, 229 und 267 mm, verschieden breite Magnetbänder
  (**N**ational **A**ssociation of **B**roadcasters (USA); **R**adio, **T**elevision)
- ***Digitalband****spule* für historische, große Magnetbandgeräten der Rechentechnik
  zur Datensicherheit nur relativ kleine Aussparungen
  ermöglichen gerade noch Überblick zum aktuellen Wickelradius
  für Bandgeräte mit Bandpuffer ist trotz schnellem Starten und Stoppen Trägheit weniger wichtig
  Aufsetzbaren ***Schreibschutzring***.



Magnetschicht innen oder außen

Magnetschicht ***innen***: besser für ihren Schutz; Drehung gegen Uhrzeiger
gute Kontrolle von Köpfen und Abschliff

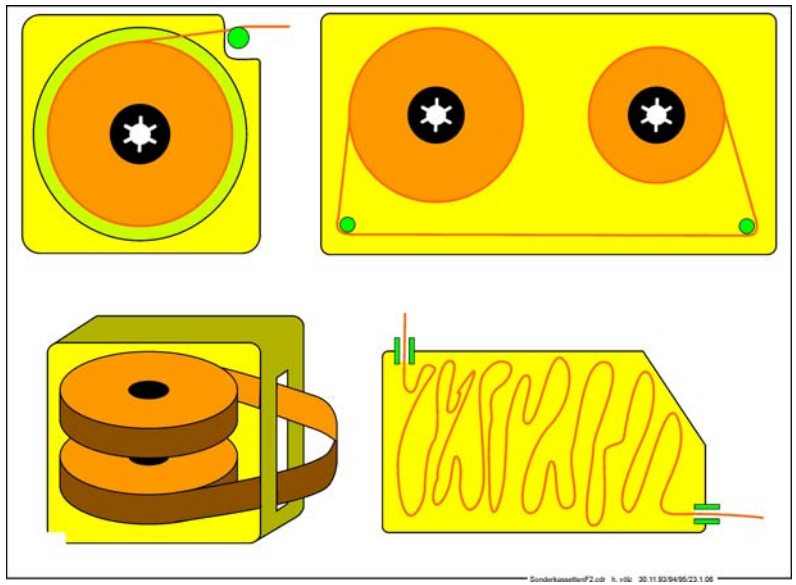
Außen: beide Bandwickel drehen sich im Uhrzeigersinn, leichtere Justage der Köpfe

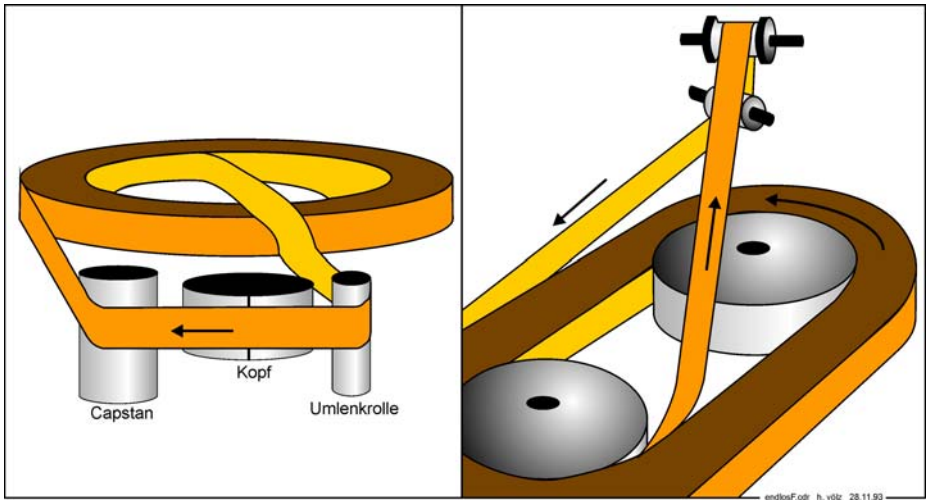


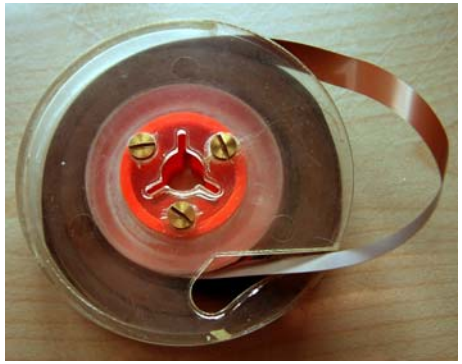
Bandkassetten

Bequeme ***Handhabung*** und guter ***Schutz*** für ***Bandkanten***, gegen ***Staub*** und ***Berührung***
Automatischer Austausch bei ***Bandarchiven*** möglich ⇒ Jukebox
Drei Grundprinzipien:

- ***Einspulenkassette*** für Bandwechsel vollständiges Rückspulen notwendig
  → Gefahr Stromausfall und Havarie
  Automatisierung fordert ***Einfädeltechnik***
  Vorteil: relativ klein und einfach
- ***Zweispulenkassette*** sehr häufig, mehrfach genormt
  z. B. Compakt-Casette (**CC),** Mikro-, Videokassette und digitale Cartridges
  Kann in jeder Stellung gewechselt werden
  Ausnahme rotierende Köpfe bei Video und R-DAT: komplizierte Einfädelung
  Nachteile: relativ hoher Preis und großes Archivierungsvolumen.
- ***Endloskassetten*** nur für Sonderzwecke: Band-Anfang und -Ende verklebt
  Vorteil: sehr einfache Transportwerke, da keine Ab- und Aufwickelung
  Wiederholungen (Ansagedienste, Schulungen)
  Meist Einspulenvariante, selten zwei Spulen Bandlänge maximal 200 m
- ***Wilder Wickel***:= Sonderform der Endloskassette







Capstan-System 1

Englisch ***Capstan*** aus der ***Seefahrt*** = Ankerwinde, Spill. Andere Varianten s. u.

Die lineare Band-Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit: heute überwiegend Capstan-System

Geschwindigkeit durch rotierende, hochpolierte (unmagnetische V2A) ***Stahlwelle*** (= Capstan) bestimmt
muss mit konstanter Rotationsfrequenz sehr gut rund laufen, darf u. a. nicht schlagen
Zur Mitnahme wird Band mit hohem Druck P_a durch ***Andruckrolle*** dagegen gepresst
Sie enthält *metallischen Kern* (meist Al), *Gummi vulkanisiert* ist, Oberfläche ist *gut rund geschliffen*
Höhe *h* ist meist größer als die Breite *b* des Bandes

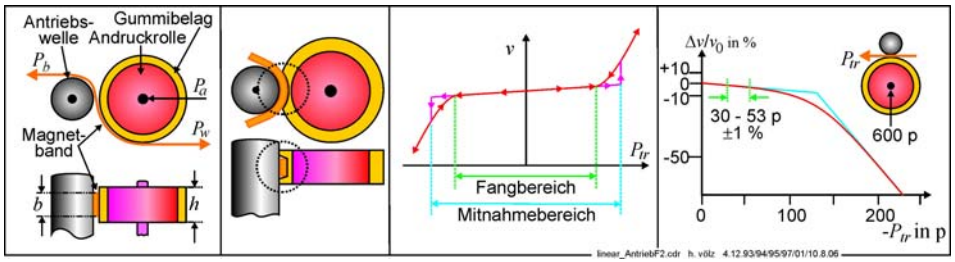
Andruck bewirkt mit Rotation ***fortlaufende Verformungen***
⇒ Umfangsgeschwindigkeit in Capstan-Nähe lokal unterschiedlich
Andruckrolle ***radiert*** daher etwas ***auf dem Band*** ⇒ Schichtseite sollte zum Capstan zeigen

Band wird doppelt angetrieben:

1. ***direkt*** vom Capstan
2. ***indirekt***: Capstan → Andruckrolle außerhalb des Bandbereiches → rückwärts auf das Band.

Zwei Bandzüge: rechts vom Antrieb P_r und links P_l

Antriebssystem (Capstan, Band, Andruckrolle) muss ***Differenz*** $P_{tr} = P_r - P_l$ ***aufbringen***
Entsteht ***Fang- und Mitnahmebereich*** des Antriebssystems, einschließlich Hysterese
Auch im Mitnahmebereich Abweichung $\Delta v/v_0$, bestimmt zulässige Toleranz von P_{tr}



Zur Reibung

Erste inhaltliche Beschreibung durch LEONARDO DA VINCI (1452 – 1519), stand in seinem Notizblock 1699 erst durch GUILLAUME AMONTONS (1663 – 1705) publiziert

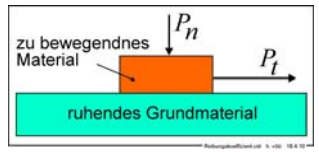
GOTTFRIED WILHELM FREIHERR VON LEIBNIZ (1646 – 1716)
unterscheidet rollende und gleitende Reibung

1785 CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB (1736 – 1806)
stellt wichtige Formeln auf (Coulombsche Gesetze)

Im 20. Jh. Sir WILLIAM HARDY:
eine einzige molekulare Lage Schmiermitteln reduziert Reibung bei Metall sehr stark

ARNOLD JOHANNES WILHELM SOMMERFELD (1868 – 1951) erklärt mit Quantentheorie Reibung [Müser]

Reibungskoeffizient μ



Betrifft Materialpaarungen
mit Druck P_n in Normalenrichtung aufeinander gepresst
und in Tangentialrichtung mit P_t gegeneinander gezogen werden

Für den ***Quotienten*** $\mu = P_t/P_n$ sind zwei Fälle zu unterscheiden

1. ***Haftreibung*** μ_h: P_t darf bis $P_{t,\,max}$ erhöht werden, noch keine Bewegung
2. ***Gleitreibung*** μ_r: ist für einen großen Geschwindigkeitsbereich konstant und unabhängig von der Reibungsfläche

Fast immer gilt $\mu_r < \mu_h$, = Ursache für Mitnahme-, Fangbereich (Versuch Lineal!)

Neben Materialpaarung haben auch Eigenschaften der Oberflächen
sowie Gleit- (Öl) und Haftmittel (Kolophonium) Einfluss

Daher sind Messungen meist nur mit erheblicher Unsicherheit durchführbar

Richtwerte

für einige in der Magnetspeichertechnik wichtige Materialpaarungen

	Stahl	Aluminium	Messing	Glas, Keramik	Gummi
Magnetband	0,13 - 0,19	0,23	0,2 - 0,25	0,24 - 0,4	0,5 - 1,3
Gummi	0,37 - 0,6	0,7 - 0,9			

Capstan-System-Berechnung 1

Haft- und Gleitreibung bewirken zwei typische Fälle,
wenn bei laufendem System das ***Band gewaltsam festgehalten*** wird:

- ***Andruckrolle rotiert*** weiter mit dem Capstan (***indirekter Antrieb*** ①)
  ⇒ System Capstan-Andruckrolle so fest gekoppelt, dass ein dazwischen ruhendes Band sich nicht auswirkt
  ⇒ Band wird vorwiegend von der Andruckrolle angetrieben.
- ***Andruckrolle ruht*** mit dem Band trotz rotierenden Capstan (***direkter Antrieb*** ②)
  ⇒ Kopplung Band-Andruckrolle ist fester als die Capstan-Andruckrolle
  ⇒ Band wird also überwiegend vom Capstan angetrieben, ergibt meist besseren Gleichlauf.

Andruckkraft P_a: Capstan → Band $\quad P_{ab} = \frac{b}{h} \cdot P_a$

zur Andruckrolle dagegen $\quad P_{ar} = \frac{h-b}{h} \cdot P_a$

Reibungskoeffizienten: μ_{bc} Band ⇔ Capstan, μ_{br} Band ⇔ Andruckrolle; μ_{rc} Rolle ⇔ Capstan

Capstan-System-Berechnung 2

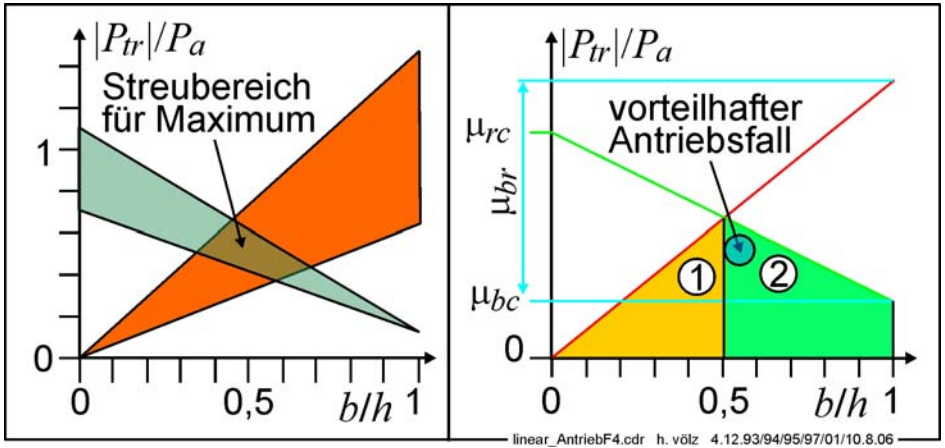
Für ***indirekten Antrieb*** ① gilt $P_{ab} \cdot \mu_{bc} < P_{ac} \cdot \mu_{rc}$; mit den Teildrücken folgt $\mu_{br} < \frac{h-b}{b} \cdot \mu_{rc}$
wird immer durch größere Höhe *h* der Andruckrolle erreicht

Für Mitnahme- bzw. Fangbereich gilt $|P_{tr}| < P_a \cdot \frac{b}{h}(\mu_{br} - \mu_{bw})$

Für ***direkten Antrieb*** ② gilt $\mu_{br} > \frac{h-b}{b} \cdot \mu_{rc}$ hier folgt $|P_{tr}| < P_a \cdot \left(\mu_{rc} - \frac{b}{h}(\mu_{rc} - \mu_{bc})\right)$

Meist gilt $\mu_{rc} > \mu_{bc} \Rightarrow$ ***brauchbarer Bandzug*** nimmt mit wachsender Höhe der Rolle ab
Maximal ist er an der Grenze zwischen beiden Fällen
Andruckrolle muss dafür ***so breit sein***,
dass einerseits der Mitnahmebereich noch hinreichend groß ist
aber anderseits der Bandtransport vom Capstan aus erfolgt②

Für Anwendungen muss Rollenhöhe ***≈1,4- bis 1,7-Fache*** der Breite des Magnetbandes sein



Störungen für Bandgeschwindigkeit

Antriebssystem bewirkt auch Störungen, betreffen vor allem ***Bandgeschwindigkeit*** und ***Bandführung***
Sind auf ***beiden Seiten*** des Antriebssystems ***unterschiedlich***
Entscheidend wo das Band auf- bzw. abläuft

Seite ***Capstan*** weniger Fehler
Andruckrolle dynamische Verformungen und Haft-Gleitverhalten des Gummibelages

Exakte Bandgeschwindigkeit ***nur vor Magnetköpfen*** erforderlich
Da Antriebssystem meist hinter Magnetköpfen ⇒
Magnetband läuft am Capstan auf, umschlingt ihn und erreicht dann die Andruckrolle
Band verlässt Antriebssystem von Andruckrolle, Störungen nicht an Magnetköpfen nicht

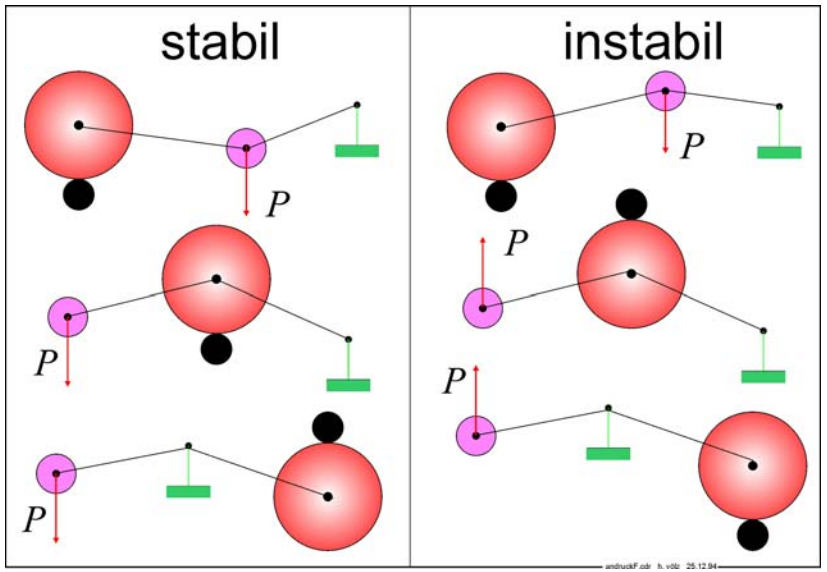
Antriebssystem nur optimal, wenn ***Achsen von Capstan und Andruckrolle exakt parallel*** ausgerichtet
Bei notwendigem ***Andruck ≈1 kp*** kaum zu erfüllen, Lager- und Hebelteile werden verformt

Drei Bezugspunkte: Lager, Angriffspunkt der Druck/Zug-Kraft und Andruckrolle ***günstig wählen***

1. In einer ***Ebene senkrecht*** zur Rotationsachse

2. ***Kräfte*** müssen ***so wirken***, dass Lage der Andruckrolle sich gut stabilisiert

3. Alle Kraftpunkte ***in Höhe der Magnetköpfe***



Fehlstellungen

Winklig drückt Gummibelag an einem Ende zusammen

⇒ Druck auf Band nimmt nach einer Seite
Magnetband ***wandert dorthin aus***; bis Band Ende der Andruckrolle erreicht
Kraft $P_S \sim P_a \cdot \tan(\vartheta)$ muss durch Bandführung aufgehoben werden
beansprucht Kante des Magnetbandes
Schmale Andruckrollen zeigen diesen ***Treibriemeneffekt*** weniger deutlich

Windschief weniger störend, höchster Druck genau in der Mitte entsteht

Wirkung ähnlich einer ***balligen Rolle***, Band wird zur Mitte geführt, aber ***Band-Dehnung*** unterschiedlich
⇒ höherer ***Bandschlupf*** ≈ höhere Steilheit der Antriebskurve im Mitnahmebereich

Brauchbare ***Prüfmethode*** für Justage

zwischen Rolle und Capstan (darf nicht rotieren) ***Kohle- + weißes Papier*** legen

Insgesamt

sehr enge Toleranzen und ursprünglich äußerst formstabile Ausführungen
später leichte, selbstjustierende Variante

Automatische Justage

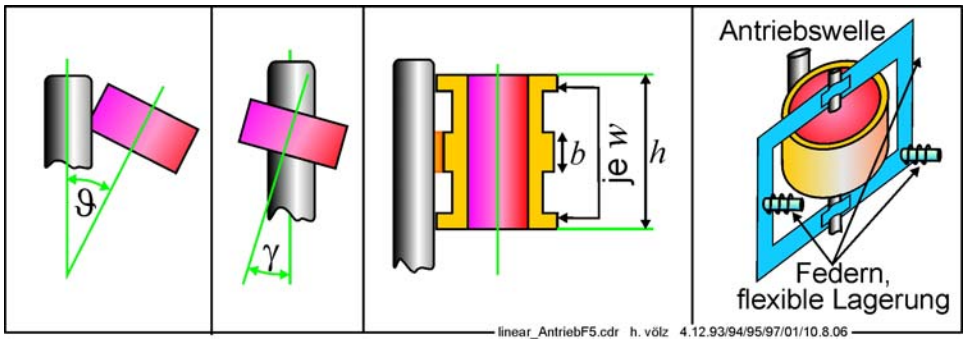
Bei voll kardanischer Aufhängung stellt sich infolge der genannten Kräfte
die Andruckrolle von selbst exakt parallel zum Capstan

Richtmoment gegen winklige Abweichung $M_W \sim P_a \cdot h$

Richtmoment gegen schiefwinklige (Durchmesser D) $M_S \sim P_a \cdot \frac{h^3 \cdot \sin(\gamma)}{D}$

Maximale Ausnutzung der Effekte führt zur ***geteilten Andruckrolle*** [Völz59]

In der Praxis hat sich die ***einfache, flexible Aufhängung durchgesetzt***
konstruktiv muss sie nur gegen Windschiefe justiert werden



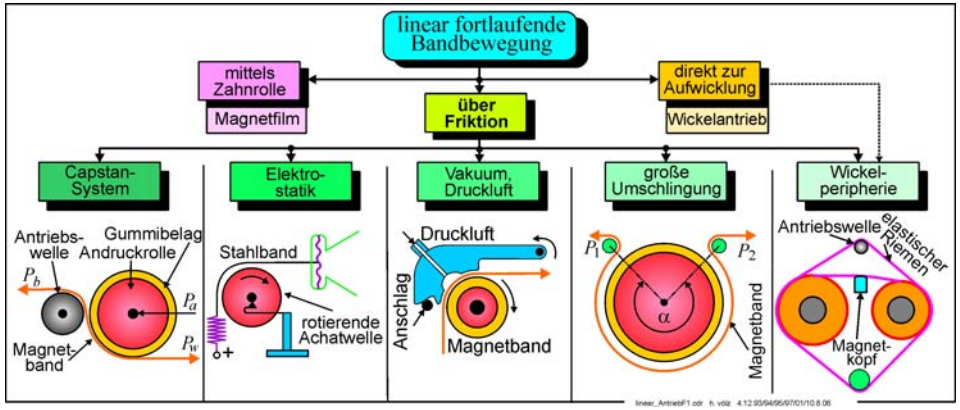
Andere Bandantriebe

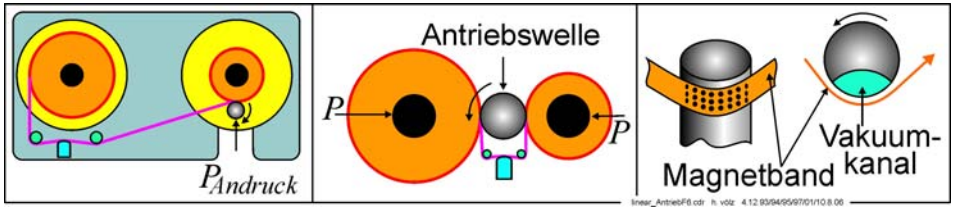
Sonderfall Zahnrolle für Magnetfilm greift direkt in die Perforation

Alle weiteren Abtriebe nutzen wie Capstan-System ***Friktion*** (*lateinisch* ***frictio*** das Reiben)
Allerdings nach ***verschiedenen physikalischen Gesetzen bzw. Anordnungen***

- ***Direkter Bandantrieb*** wirkt direkt auf äußeren Rand der Aufwickelspule ein, Abwandlung: beiden Bandwickel beweglich gelagert, wurde für sehr hohe Bandgeschwindigkeiten von der BASF erprobt
- Das ***Vakuum- bzw. Luftdruck-Verfahren*** zeitweilig bei Digitalbandgeräten benutzt
  Capstan hohl und zum Band hin mit Löchern versehen. Im Innern ruhender Vakuumkanal
  wirkt Vakuum bzw. Druck nur auf Band ein
  Zum Bandeinlegen wird der „Schuh“ zurück geklappt
- Großer ***Umschlingungswinkel*** eines „Capstan“ mit großem Durchmesser
- ***JOHNSON-RAHBECK-Effekt*** wurde wohl nie benutzt, aber mehrfach diskutiert
  früher bei Lautsprechern verwendet
- ***Endloser elastischer Riemen*** greift um die beiden Wickel und treibt sie so an
  Schichtseite vom Band wird ausschließlich vom Magnetkopf berührt
  Weiterentwicklung führte zur ***digitalen Cartridge*** (Streamer)

Außerdem ***komplexe Antriebe***, z.B. mit zwei Capstan-Systemen





Große Umschlingung

Umschlingung von gummibelegter Antriebsrolle mit großem Durchmesser *mit großem Winkel* α genutzt bei ersten Heimtongeräten, z. B. als Aufsatz zu Plattenspielern

Radientoleranz des Gummis hat geringe Auswirkung

Reibung nimmt exponentiell mit dem Winkel zu ~ $e^{\mu\alpha}$
μ = Reibungskoeffizient Gummibelag ⇔ Band, P_1 und P_2 Bandzüge, Mitnahme erfolgt:

$$P_2 \;/\; P_1 \le e^{\mu\cdot\alpha} \quad \text{bei} \quad P_1 < P_2$$

⇒ ***Mitnahmebereich***

$$P_2 \cdot e^{-\mu\cdot\alpha} \le P_1 \le P_2 \cdot e^{\mu\cdot\alpha}$$

Mittlerer Bandzug P_m und maximale Differenz ΔP fordern Umschlingungswinkel

$$\alpha \ge \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\Delta P}{P_m} + 1\right).$$

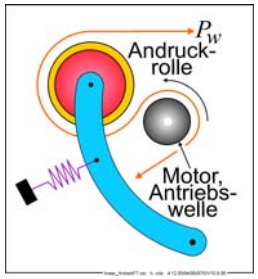
Selbstanziehende Rolle

Ältere Bandgeräte nutzten Wickelzug mit Hebel zur Andruckerzeugung
P_w = Bandzug, erzeugt Andruck

$$P_a = P_w \cdot \frac{r_a + r_w}{\left(r_a + r_w\right)^2 - a^2}$$

r_a = Radius Andruckrolle, r_w = Capstan, a = Achsenabstand beider

Bei Bandriss hört Antrieb des Bandes auf
nachteilig im Studiobetrieb, sonst „Papierkorbbetrieb“



Doppelantrieb und Closed-loop

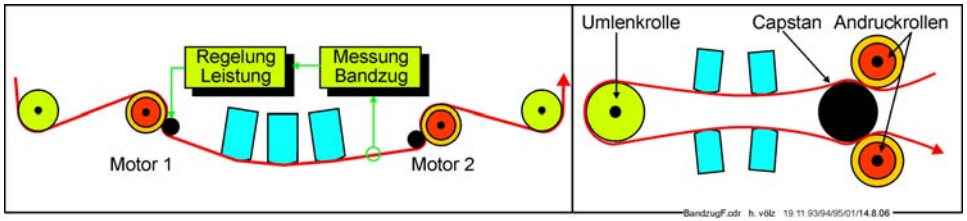
Standardlösung Anfang der 30er Jahre = Dreimotoren-Antrieb immer noch meist benutzt
Hinzugekommen zwei etwas abweichende Varianten

Doppelantriebssystem = Viermotoren- Laufwerk mit 2. Capstan-System an Abwickelseite

1. Entkopplung des Kopfbereichs von Zufälligkeiten der Abwickelseite, Band läuft hier vom Capstan ab
2. Ermöglicht konstanten Bandzug erzeugt unabhängig von Wickelradien

Zweites Capstan-System bestimmt Bandgeschwindigkeit, erstes Bandzug über Regelung

Closed loop (englisch geschlossenen Schleife), ähnlich, vor allem bei Messwertspeichern eingesetzt
Bandzug wird durch unterschiedlichen Andruck der Andruckrollen erzeugt



Bandzug

Bandzug ebenfalls wichtiger Parameter der magnetomotorischen Speicherung:
Folgende ***Bandzüge sind zu unterscheiden***

- Am ***Abwickelteller***, beeinflusst bzw. bestimmt den Band-Kopf-Kontakt
  + Stabilität des Bandvorrats (Abwickelung)
- Umgebung der ***Köpfe*** bestimmt Band-Kopf-Kontakt und Führung des Bandes
  insbesondere vor den Köpfen
  + Frequenz eventueller ***Bandlängsschwingungen*** (Geigensaite!)
- Zugdifferenz am ***Capstansystem*** beeinflusst Bandgeschwindigkeit über vorhandenen Schlupf
- Am ***Aufwickelteller*** bestimmt Qualität des aufgewickelten Bandes***, Stabilität des Wickels***

Daher sind für Bandzug ***Mess-, Einstell- und Regelungstechniken*** erforderlich

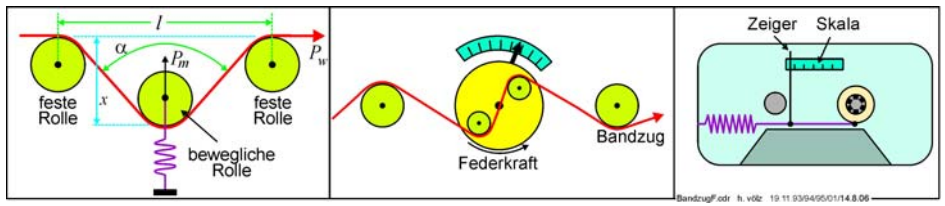
Bandzugswaagen

Bei laufendem Band ist der Bandzug nur indirekt messbar, deshalb spezielle Einrichtunge
müssen so ***klein*** sein, dass sie an jeder Stelle des Bandlaufs manuell eingefügt werden können
Eigenresonanz muss so hoch liegen, dass auch schnelle Bandzugsschwankungen erfasst werden

Es existieren u. a. folgende ***Varianten***:

- Meist Auslenkung einer ***beweglichen Rolle*** zwischen zwei festen Rollen
- ***Drehbarer Teller*** mit 2 Rollen, ist z. B. bei Studiogeräten eingebaut, wirkt zusätzlich als Filter, Bandlänge ändert sich!
- Bei Kassetten wird einfach Aufwickelzug

Bewegung von Rolle oder Teller wird auf Drehkondensator oder induktiven Sensor übertragen und meist elektrisch linearisiert



Berechnung bewegliche Rolle

Für Winkel α gilt

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)=\frac{l}{2\cdot x}$$

Auf bewegliche Rolle wirkt die Kraft

$$P_m = 2\cdot P_w\cdot\cos\frac{\alpha}{2}=4\cdot P_w\cdot\frac{x}{\sqrt{l^2+4\cdot x^2}}\,.$$

Die Feder mit der Konstante D bewirkt eine Ruheauslenkung x_0 zur Gleichgewichtslage

$$P_m = D\cdot\left(x_0-x\right)=4\cdot P_w\cdot\frac{x}{\sqrt{l^2+4\cdot x^2}}$$

Mit der relativen Auslenkung $\Delta x = x_0 - x$ gilt für Zusammenhang von Auslenkung und Bandzug

$$P_w=\frac{D\cdot\Delta x}{4\cdot\left(x_0-\Delta x\right)}\cdot\sqrt{l^2+4\cdot\left(x_0-\Delta x\right)^2}$$

Ein linearer Zusammenhang fordert $\Delta x \ll x_0$ gelten $\Rightarrow$ kleine Auslenkung

Abwickelzug

- Mit Abwickelzug wird Stabilität des Wickelvorrats erhalten
  + ganz oder teilweise der Zug vor den Köpfen erzeugt
- Einfache Methoden bremsen mit ***konstanter Kraft*** die Abwicklung ⇒ störender Radiuseinfluss
- Bei Spulengeräten kann ***Gewicht der Spule*** die Bremse steuern
  nur Standgeräten möglich, erzeugt leidlich konstanten Abwickelzug
- Speziellen ***Synchronmotoren*** ermöglichen ***geschwindigkeitsabhängiges*** Bremsen
- Möglichkeit = zusätzliche Klemmung (Bremsung) der Umlenkrolle

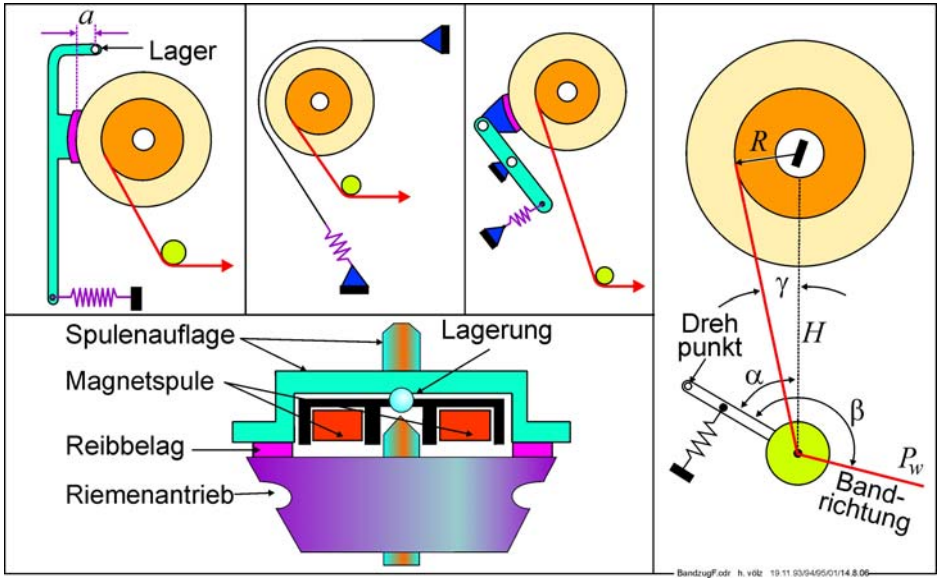
- Erfolgreich angewendet wurde Steuerung (Störwertaufschaltung) über ***bewegliche Umlenkrolle***
  Beweglich gelagerte Rolle erfasst als **Störwertaufschaltung den Radius des Bandwickels**
  Die auslenkenden Kraft der Umlenkrolle hängt von den Winkeln α, β und γ sowie Bandzug P_w ab

$$P_m = P_w \cdot \left(\sin(\beta) + \sin(\alpha - \gamma)\right).$$

  Dabei gilt sin(γ) = *R*/*H* und es folgt

$$P_m = P_w \cdot \left(\sin(\beta) + \sqrt{1 - \frac{R^2}{H^2}} \cdot \sin(\alpha) - \frac{R}{H} \cdot \cos(\alpha)\right).$$

Für α = 0 kann Auslenkung der Rolle unmittelbar die Motorenergie z.B. über Kohledruckregler steuern



Stabiler Bandwickel

Gegensatz zur Abwickelseite, dort konstanter Bandzug wegen ***Kopfkontakt*** s. u.

Konstanter Aufwickelzug macht Wickel innen fest und außen locker ⇒ kein stabiler Bandwickel!

Tangentialer Bandzug P_T muss deshalb mit Wickelradius *R* geändert werden

bewirkt ***radialen Druck*** P_{RW} = ***Lagenpressung***, besonders stark für untere Wicklungen $P_{RW} = \frac{P_T^2}{2 \cdot R}$

P_{RW} ***so groß***, dass ausreichender Zusammenhalt entsteht

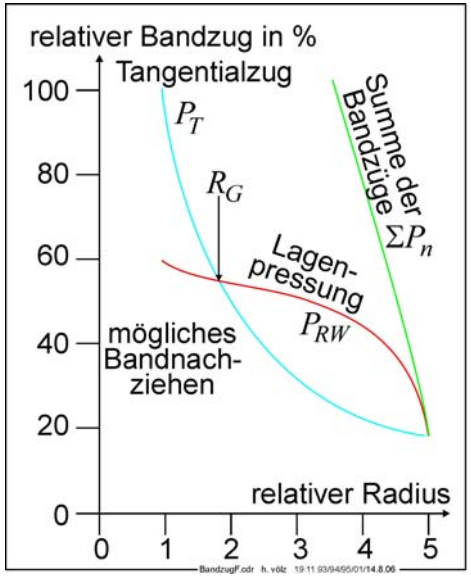
P_{RW} ***so klein***, dass keine ***Störungen*** und Beschädigungen des Bands auftreten (Lagenpressung)

Störungen durch Lagenpressung:

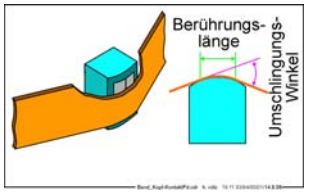
- Drückt ***Staubteilchen*** in die Magnetschicht ⇒ Drop out
- Drückt ***Unregelmäßigkeiten des Wickelkerns*** (u. a. Einlegeschlitz in das Magnetband) ein ⇒ ***Vor- und Nachspannband***
- Verformt Band elastisch, macht es dünner ⇒ verkürzt Länge/Radius ⇒ verkleinert P_T → kann negativ werden ⇒ ***„Sprossenbildungen“*** = *„Löcher“* im Bandwickel: extrem Band knickt rückwärtig
- Veränderung von Tangential- zu Radialzug kann ***„Nachziehen“*** des Wickels bewirken
  = Windungen gleiten gegeneinander ⇒ Beschädigungen der Schichtoberfläche möglich
- ***Nachziehen im Betrieb*** an Auf- + Abwickelseite
  feststellbar bei relativ lockeren Wickel: Spule festhalten, ziehen am Bandende
  ⇒ Windungen gleiten gegeneinander

Wickelzug etwa reziprok zum Radius halten werden ⇒ konstantes Drehmoment mittels Rutschkupplung

Aber Lagenpressung verstärkt sich additiv nach innen
Berechnung kompliziert, keine exakte Lösung bekannt, nur Experimente
Wo ***Lagenpressung = Bandzug*** ist → ***Grenzradius*** R_G, darunter Gefahr des Nachziehens



Band-Kopf-Kontakt



Einwandfreie Aufzeichnung und Wiedergabe ***fordert***
guten stabilen ***Kontakt*** Magnetband und -kopf in ***Spaltnähe***

Druck zum Kopf = ***Andruck P_K*** optimal ≈20 p
größer zuviel ***Abrieb***, kleiner instabiler ***Kontakt***, bestimmt auch

Bestimmt durch Bandzug P_B, Unschlingungswinkel α (5 bis 20 Grad)
Breite b des Bandes und Kopfradius r

$$P_K = \frac{2 \cdot P_B \cdot \sin(\alpha/2)}{b \cdot r \cdot \alpha}$$ für kleine Winkel folgt $P_K \approx \frac{P_B}{b \cdot r}$.

Band muss Kopfspiegel in bestimmter Länge berühren und
Sich allmählich etwa tangential vom Kopf entfernen (Frequenzgang!)
⇒ zylindrische oder parabolische Spiegelformen
Kopfspalt etwa in der Mitte vom Spiegel und Bandkontakt

Abschliff verändert Spiegelform

Kopfjustage

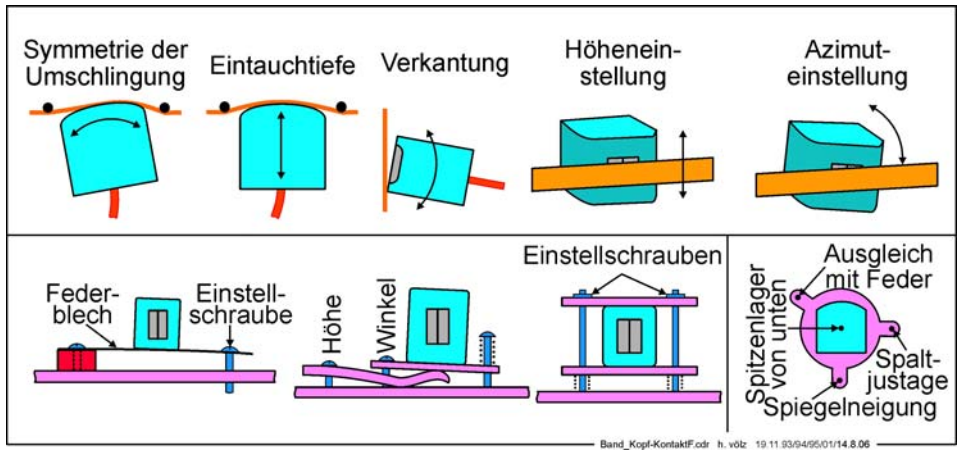
5 Freiheitsgrade daher kompliziert

- ***Symmetrie*** der Umschlingung damit maximaler Bandandruck beim Spalt auftritt
- ***Eintauchtiefe*** erzeugt den optimalen Umschlingungswinkel und bestimmt die Berührungslänge
- ***Verkantung*** des Kopfes bewirkt nur einem Spaltende optimalen Band-Kopf-Kontakt + einseitigen Abschliff, geringe Standzeit
- ***Höheneinstellung*** damit Bandbreite und Spalthöhe zur Deckung kommen, Überspreuchen bei Mehrspursystemen
- ***Spaltschiefstellung*** (Azimut, Fehlwinkel) führt zu beträchtlichen Höhenverlusten (Frequenzgang!)

Für diese Justagen existieren viele ***konstruktive Varianten***,
jedoch keine perfekte Lösung, meist ***ökonomisches Optimum***

Dann nur einige Freiheitsgrade einstellbar, anderen durch enge Fertigungstoleranzen festgelegt

Zusätzlich zu berücksichtigen, wie häufig ein ***Kopf ausgetauscht werden muss***



Bandführung 1

Magnetband besitzt Fehler, wie ***Säbelförmigkeit, Querkrümmung, Breitenschwankungen***
+ nicht völlig glatte, gerade ***Bandkanten***
Muss die Bandführung berücksichtigen und möglicht gut kompensieren

Welligkeit kann u. a. durch ***teilweise leicht verdreht*** kompensiert werden

Viele konstruktive Lösungen

meist ***mehrere Führungsstellen mit Führungsbolzen***, ∅ ≈1 cm
eng tolerierte Führungshöhe zwingt Band in die richtige Höhe
+ bewirkt günstigen Umschlingungswinkel

Führungsfläche sowohl ***zylindrisch*** (links) als auch ***ballig***

zuweilen zusätzlich ***federndes Segment*** (obere Bandkante)

Sonderfälle auch kleine ***Rollen***, geringere Bandreibung (Beschädigung der Schicht)
Probleme unrunde Rollen und Schrägstellung

Studiogeräte mehrere große Umlenkrollen ∅ 3 bis 5 cm, für Start unten schräge Auflauffläche

Zur Führung an den drei Köpfen auch einseitige Kantenführung auf eine ***Dreipunktführung*** erweitert
⇒ beiden äußeren Bolzen führen die obere Bandkante und der mittlere die untere

Bandführung 2

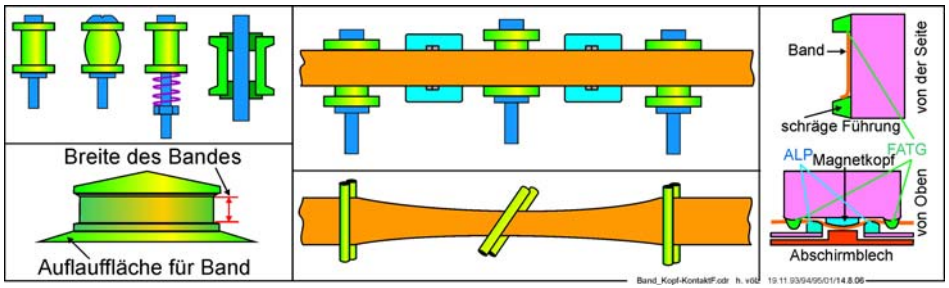
Neue Führung mit **DCC** (**d**igital **c**ompact **c**assette, s. u.):
Oberkante des Bandes wird mit FATG (fixed azimuth tape guide) Bezug
ALP (azimuth locking pin) bewirkt optimalen Umschlingungswinkel
Erhöhung Steifigkeit des Bandes durch Verkrümmen der unteren Bandkante schräge Bandführung

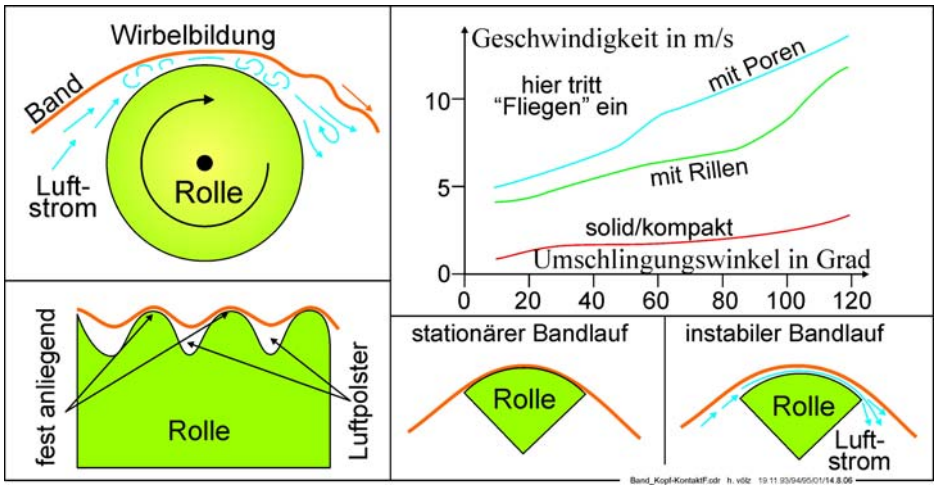
LTO-Geräte mehrere Hundert Spuren erfordern extrem hochwertige Bandführungen
z. B. dynamisch mit Luftdruck

Bei ***hoher Bandgeschwindigkeit*** wird vom Band Luft mitgeführt
gelangt dabei zwischen Rolle und Band
Bei sehr hoher Geschwindigkeit können sich sogar schädliche ***Wirbel*** ausbilden

Besondere Oberflächen notwendig, u.a. ***Rollen mit Rillen*** versehen
Gefahr Band-Verformung ⇒ ***feine Poren*** (raue Oberfläche)

Poren können auch bei Köpfen nützlich sein





Spuranordnung auf Band - Kopfbewegung

Nur Überblick, Details bei einzelnen Geräten

- Magnetband und -karten ⇔ rotierende Medien
- Ein- ⇔ Mehrspurkopf (Einzelkopf ⇔ Kopfpaar)
- Kopf feststehend ⇔ Kopffahrstuhl ⇔ rotierende Köpfe
- Audio- (analog ⇔ digital) ⇔ Messwert- ⇔ Video- ⇔ Datenspeicher

Bei vielen Spuren sehr genaue ***Justage*** der Köpfe bzgl. ***Bandkante***
bzw. Aufzeichnung ⇒ Wiedergabe erforderlich
Dann wirken sich viele Toleranzen aus (s. Köpfe)
⇒ Übergang zur ***Regelung*** notwendig: Wiedergabe folgt Aufzeichnung

Bei QIC-Streamern usw. ***Fahrstuhl mit Bandvor- und -rücklauf***

Bandlängsschwingungen 1

Magnetband unter Bandzug verhält sich wie eine eingespannte Saite
Es können stick-slip-Schwingungen (Gleit-, Haftreibung) angeregt werden
englich ***stick*** heften, kleben, ***slip*** schüpfen rutschen

Effekt kann durch ***Beschichtung*** von Bändern, Köpfen und Bolzen reduziert werden (Seife Geige!)

Resonanzfrequenz bestimmt der dynamische Elastizitätsmodul E_D
ableitbar aus statischen Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν

$$E_D = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu)\cdot(1-2\cdot\nu)}$$

Materialdichte ρ bestimmt ***Fortpflanzungsgeschwindigkeit*** der Elastizitätswellen im Band

$$c_L = \sqrt{\frac{E_D}{\rho}}$$

Beträgt ≈ 2 km/s, sehr groß gegenüber Transportgeschwindigkeit des Bandes
Bandtransport daher keinen Einfluss auf Resonanz

Bandlängsschwingungen 2

Anregung durch alle Reibungselemente z. B. Köpfe und Führungsbolzen
Einspannpunkte Führungsrollen mit Abstand l ⇒ Frequenz $f = c_L/(2\cdot l)$

Typischen Studiogeräte $l \approx 40$ cm ⇒ Störfrequenz ≈ 3 kHz
Maximum genau vor den Magnetköpfen ⇒ Gleichlauffehler

Oberhalb Bandgeschwindigkeit v_{gr} ist Haftreibung μ_h unwirksam → Störung bleibt aus

$$v_{gr} \geq \frac{P \cdot \left(e^{\mu_h \cdot \gamma} - e^{\mu_G \cdot \gamma}\right)}{E \cdot b \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{E_D}{\rho}} \ .$$

γ = Umschlingungswinkel des erregende Elements (Kopf, Bolzen usw.)
P = Bandzug, b = Breite und d = Dicke des Bandes

Bei $\gamma = 100°$ Umschlingung, $P = 100$ p Bandzug und üblichem Tonband $v_{gr} \approx 20$ cm/s
⇒Störungen vor allem bei Heimtongeräten vorhanden

Gleichlauffehler

v_A Geschwindigkeit bei Aufzeichnung, v_W bei Wiedergabe
v_S Sollwert für beide, Δv momentane Änderung der Geschwindigkeit

v_A bzw. v_W weichen von v_S durch mehrere ***Ursachen*** ab
Bandzug, Lagerfehler, Unrundheiten von Capstan, schlechter Rundlauf der Motoren, Andruckrollen usw. Bandlängsschwingung

Auswirkungen unterschiedlich:

- $\Delta v = 0$; $v_A = v_W \neq v_S$: Abweichungen in Tonhöhe + Wiedergabezeit ***bei anderen Geräten***
  kleine Abweichungen z.B. bei *musikalischen Werken* sowohl Tempo als auch Tonart(transponiert)
  größere Abweichungen ändern auch Frequenzgang
- $\Delta v = 0$; $v_A \neq v_W$: bereits bei Wiedergabe auf ***demselben Gerät*** Tonhöhe und Wiedergabezeit verändert
- $\Delta v \neq 0$ ⇒ ***Gleichlauffehler***: bei Schall u. a. als Jaulen, Rauheit der Töne, bei Bildern als wechselnde Verzerrungen; Bildstand
  Kenngrößen sind relative Amplitude (akustisch $\approx {}^{o}/_{oo}$; TV $\approx 10^{-6}$) und Spektrum der Schwankungen

Unzulänglichkeiten des Capstan

Unrund: Sollradius r_m; wirksamer Radius r_w ergibt Abweichung ε(φ) als Funktion des Winkels φ
Umfangsgeschwindigkeit dort wo das Band den Capstan erreicht bzw. verlässt

$$v(\varphi) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_m \left(1 + \frac{\varepsilon(\varphi)}{r_m}\right)$$

Relative Fehler gegenüber v_S als Mittelwert- oder Spitzenwert (je nach Anwendung)
aus Anteil $A = \varepsilon / r_m$

Schlag = Verlagerung des Drehpunktes
= Abweichung der Drehachse um ε gegenüber dem Mittelpunkt bewirkt, aktueller Drehwinkel α

$$r_w = \varepsilon \cdot \cos(\alpha) + \sqrt{r_m^2 - \varepsilon^2 \cdot \left(1 + \cos^2(\alpha)\right)},$$

wegen $\varepsilon \ll r_m$ gilt

$$r_w = r_m \cdot \left(1 + A \cdot \cos(\alpha)\right)$$

Es tritt nahezu harmonische Störung der Geschwindigkeit mit der Rotationsfrequenz des Capstan auf

Abweichungen bewirken ***störende Frequenzmodulation*** der gespeicherten, wiedergegebenen Signale, Berechnung ist sehr kompliziert

Auswirkungen Aufzeichnung ⇔ Wiedergabe

Zusätzlich unübersichtlich, da Gleichlaufstörungen unkorreliert bei Aufzeichnung und Wiedergabe
Zusammenhang von Wiedergabe- und Aufzeichnungszeit t_W bzw. t_A

$$t_W = \frac{v_A(t_A)}{v_W(t_W)} \cdot t_A$$

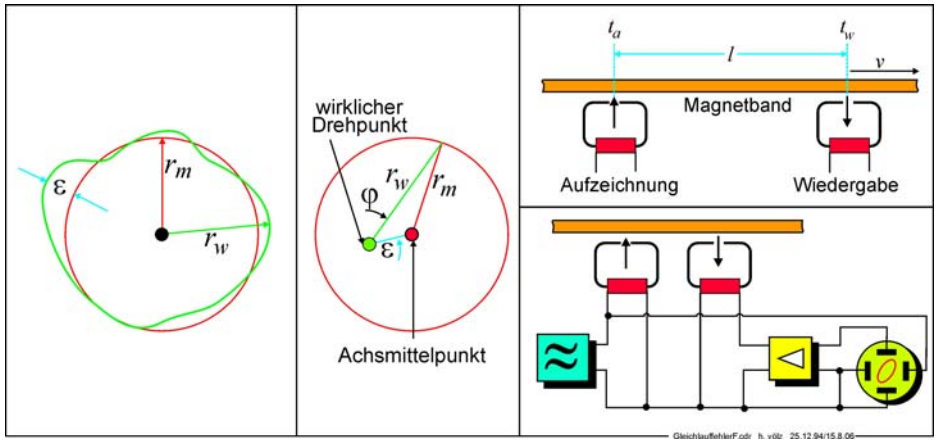
Einfacher Fall: v_A nur mit Kreisfrequenz ω_A und relativen Faktor A_A gestört:

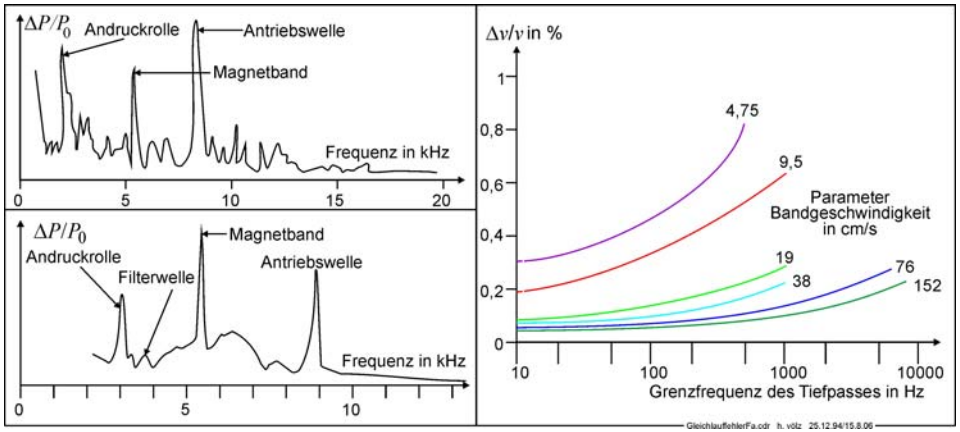
$$v_A = v_{A0}\left(1 + A_A \cdot \cos\left(\omega_A \cdot t + \varphi_A\right)\right)$$

Entsprechender Ansatz für Wiedergabegeschwindigkeit ergibt

$$t_W = \frac{v_{A0}\left(1 + A_A \cdot \cos\left(\omega_A \cdot t + \varphi_A\right)\right)}{v_{W0}\left(1 + A_W \cdot \cos\left(\omega_W \cdot t + \varphi_W\right)\right)} \cdot t_A$$

Fehler ***addieren*** sich eher ***vektoriell*** als sich irgendwie zu kompensieren
Zusätzlich ***noch Weg- bzw. Zeitunterschiede*** von Aufzeichnung, Wiedergabe + andere Störungen
Es gibt ***erhebliche Mess-Probleme***, Richtwerte mit ***Oszilloskop*** sichtbar machen
Meist Wirkung der Störungen aus ***Bandzugs- oder Bandgeschwindigkeits-Messungen*** abgeleitet





Mechanische Analogien

Rechentechnische Simulation der Störungen ist alternativer und anschaulicher Weg z. B. [Reichardt]

Bei Transportwerken sind erschwerend ***gleichzeitig lineare und rotierende*** Bewegungen vorhanden

Vorteilhaft: ***Drehbewegungen*** mit Winkelgeschwindigkeit Ω und Radius r
in lineare Geschwindigkeit $v = \Omega \cdot r$ ***umrechnen***

Trägheitsmoment Θ entspricht dann einer Masse m gemäß $\Theta = m \cdot r^2$,
ähnlich für ***Reibungsmitgang, Federnachgiebigkeit*** usw.

Erst danach Umrechnung der mechanischen Größen in äquivalente elektrische, K in V·s/m:

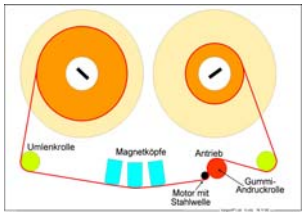
$$U = K \cdot v,\ I = \frac{1}{K} \cdot P,\ L = M \cdot m,\ C = \frac{1}{K^4} \cdot M \cdot n,\ R = K^2 \cdot h \text{ und } \omega_{mechan} = \frac{1}{K^4} \cdot M^2 \cdot \omega_{elektr}$$

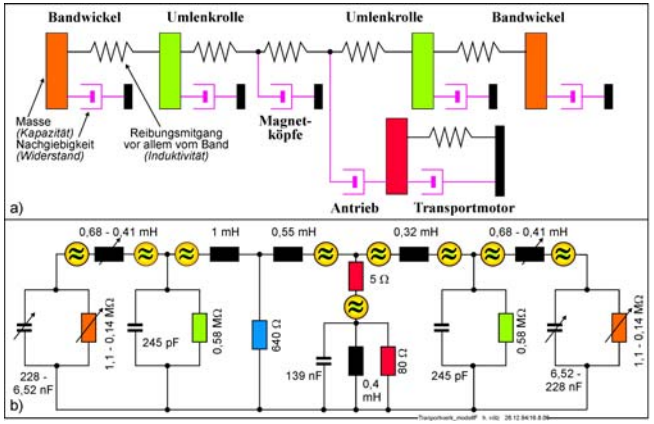
Für Modellmessungen ist ein geeigneter Frequenzbereich zu wählen
⇒ Hinweise auf Verbesserung der Konstruktion

Als frei wählbare Größen dafür meist ***Induktivitäten***, weil sie am schwierigsten herzustellen sind

Untersuchungen erfolgten z. B. für ein ***Laufwerk SJ 100 der Firma Sander und Janzen***
mit den Umrechnungen

$$M^2K^4 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ und } M = 6{,}95\ V^2s^2m^2$$





Magnetfilmtransport

Für Magnetfilme mit ***Perforation*** existieren spezielle Laufwerke
Sollgeschwindigkeit ***ohne Schlupf*** durch eine ***Zahnrolle*** bestimmt
⇒ Synchronisation mit Bildteil des Films

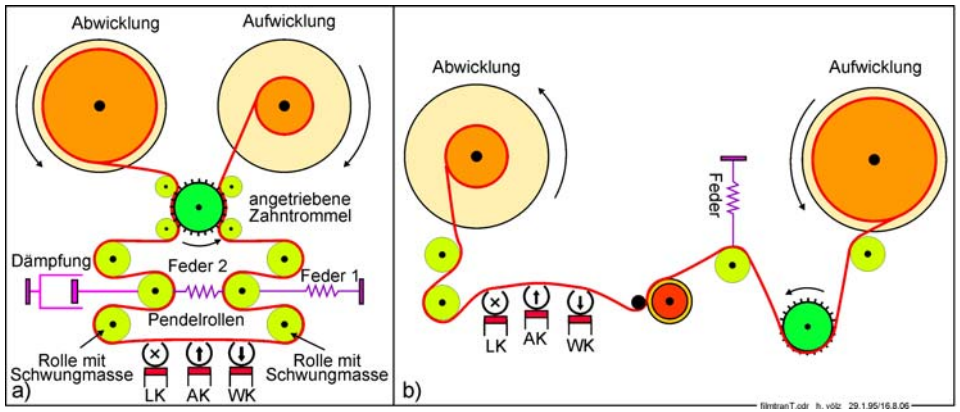
Zahnrolle bewirkt aber stark ***periodische Gleichlauffehler*** der Bildfrequenz von 24 Hz
nur Magnettonstreifen 96 Hz

Umdrehung der Zahnrolle, besonders starke Störfrequenz (meist ≈3 Hz): je Bild 4 Löcher.

Störungen müssen durch ***mechanische Filter*** weitgehend reduziert werden

Typisches Laufwerk benannt nach dänische Filmtechniker PERDERSEN und POULSEN

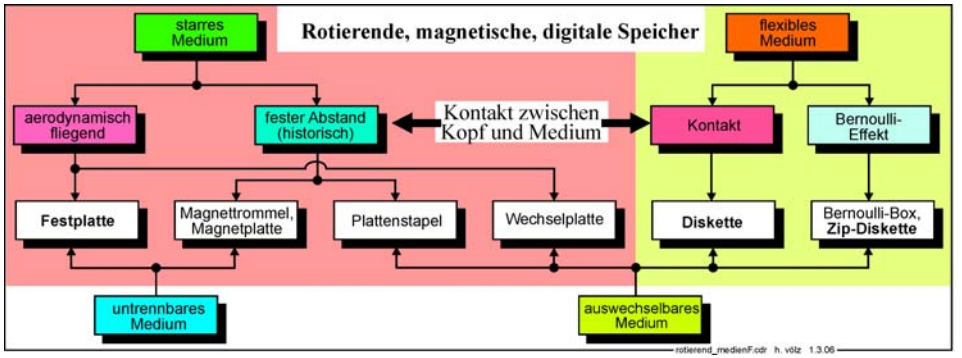
Späteres System koppelt Capstan-System mittelbar mit Zahnrolle des Bildteils



Rotierende Speichermedien

Es existiert **große Vielfalt**, folgende Klassifizierung ist sinnvoll:

- **3 Medien-Eigenschaften**:
  - **Festigkeit Medium:** ***flexible*** (Disketten) ⇔ ***starr*** (Fest-, Wechselplatten, Trommelspeicher)
  - **Verfügbarkeit Medium:**
    fest eingebaut (Trommel, Festplatte) ⇔ ***auswechselbar*** (Diskette, Wechselplatte)
  - **Medium-Kopf-Kontakt:**
    fester Abstand ⇔ ***fliegend*** (Gleiter) ⇔ ***in Kontakt*** ⇔ ***Bernoulli-Effekt***
- **2 Haupt-Baugruppen**: ***Motor*** für Rotation + ***Aktuator*** für Magnetköpfe
- **Spurenanordnung** auf Medium: ***kreis-*** ⇔ ***spiralförmig***,+ **Sektorgrößen** feste ***Länge*** ⇔ ***Winkel***
- **Zusatzeinrichtungen**: Elektronik, Gehäuse, Schutzhüllen



Aktuatoren und Spuren

Wichtig für rotierende Speicher (Disketten, Festplatten, CD usw.) ⇒ Spurführungen und -regelungen

Spursuche = Spurfinden = Latenzzeit = Latency = Drehwartezeit

- ***Einstellen*** auf die Spur
- ***Beruhigen*** in der Spur (settling-time)
- ***Sektor*** suchen/lesen.

Zeitdauer bis zum Schreiben, Lesen

- ***Eigenschaften des Aktuators***
- A***nzahl zu überspringenden Spuren*** und ***Spurdichte***

Typische Werte 1956 fast 1 s; 1964 ≈150 ms, 1970 ≈50 ms, 1985 ≈25 ms, heute ≈10 ms

Datensuche innerhalb einer Spur

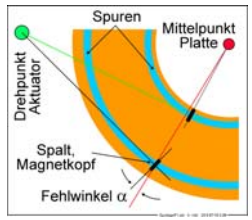
Abhängig von Drehzahl, beträgt zwischen zwei Datensektoren nur wenige µs

Forderungen an Aktuatoren

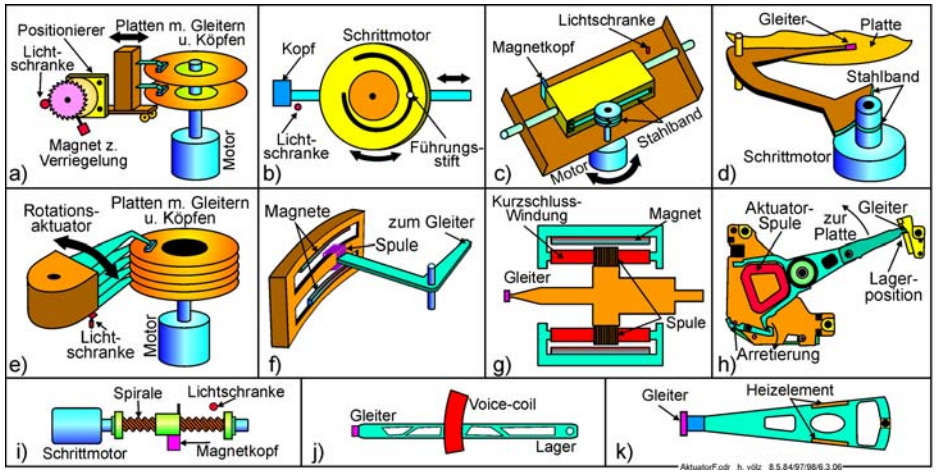
- Kurze ***Zugriffszeit*** ≈ maximale Geschwindigkeit, Hebelsystem „durchlöchern“, Achtung Resonanzen!
- Hinreichende ***Genauigkeit der Spureinhaltung*** und eventuelle Nachregelung
- ***Fehlerkompensation***, z. B., infolge von Wärmeausdehnung, Vibration, Alterung, Verschleiß

Varianten der Aktuatoren

- Kurzfristig ***hydraulisch*** bis 2 Spuren/mm, ***heute*** elektromechanisch bis ≈80 Spuren/mm = 2000 tpi
- ***Schrittschaltwerk*** einfachste Variante, u. a. bei Disketten, bis ≈5 Spuren/mm bzw. ≤ 100 Spuren
- ***Schrittmotoren*** (englisch stepper) mehr diskrete Abstufungen, steuern Köpfe mittelbar bis ≈ 20 Spuren/mm, ≈1000 Spuren, evtl. Regelmechanismen (closed ⇔ open loop system)
  ◊ ***Spiralführung*** langfristig Probleme wegen Ausschleifens der Führung
  ◊ ***Gewinde***, gute Kraftverstärkung, geringer Energieverbrauch, jedoch relativ langsam vorteilhaft für große Massen, z. B. bei optischen Laufwerken
  ◊ ***Stahlband***: Varianten *Linearführung* ⇔ *rotatorisch*
- ***Mikro-Schritte*** (Mikro-Positionierung, micro stepping) 10 bis 50 Schritte/Spur (u. a. Stahlband)
- ***Kontinuierliche Bewegung*** mit ***voice coil***
  zunächst Mikro-Schritte + optische Gitter, später embedded Service + Mess- und Regelungstechnik, zwei heiß diskutierte ***Varianten***
  ◊ ***Parallelführung***: Kopfspalt immer senkrecht zur Spur (bei Schallplatte gegen Verzerrungen), Nachteil kompliziertes Lager
  ◊ ***Rotatorisch***: Spurfehler→ Plattenrand, nur ***ein*** verschleißarmes Lager, z. T. trägheitsarmer = schneller, ermöglicht *flache Aktuator-Spulen* wichtig für *nur eine Platte, geringe Einbauhöhe,* ***heute fast nur***



◊ ***zeitweilig*** auch andere Varianten, z. B. Aktuator-Spule in Mitte zwischen Kopf und Lager



Autotuning = TCAL

In Festplatten ***Temperaturunterschiede und -schwankungen***:
Einschalten und Häufigkeit der Spurzugriffe

Abschätzung: benutztes Alu hat TK $25 \cdot 10^{-6}$/°C:
$\Delta T = 10$°C, $r = 40$ mm $\Rightarrow \Delta l \approx 10$ µm, Spurabstand heute <1 µm

Übliche Betriebstemperaturen bis 70 °C ⇒ Änderungen nach Einschalten
innerhalb Festplatte ortsabhängig

Alle Magnetköpfe auf gemeinsam bewegtem Hebelsystem
⇒ auf einzelnen Oberflächen unterschiedliche Spurabweichungen

Zeitweilig Hebelarme mit zwei Heizelementen zum individuellen „Verbiegen“
Es gab Festplatten, alle 10 Minuten Feinpositionierung = ***TCAL*** (**th**ermal **cal**ibration)
Dauerten nur wenige Umdrehungen (ca. 100 ms)
störten dennoch erheblich bei Wiedergabe größerer Dateien (z.B. Video)
Neue Regelungsmethoden (s.u. embedded service) machen das heute überflüssig

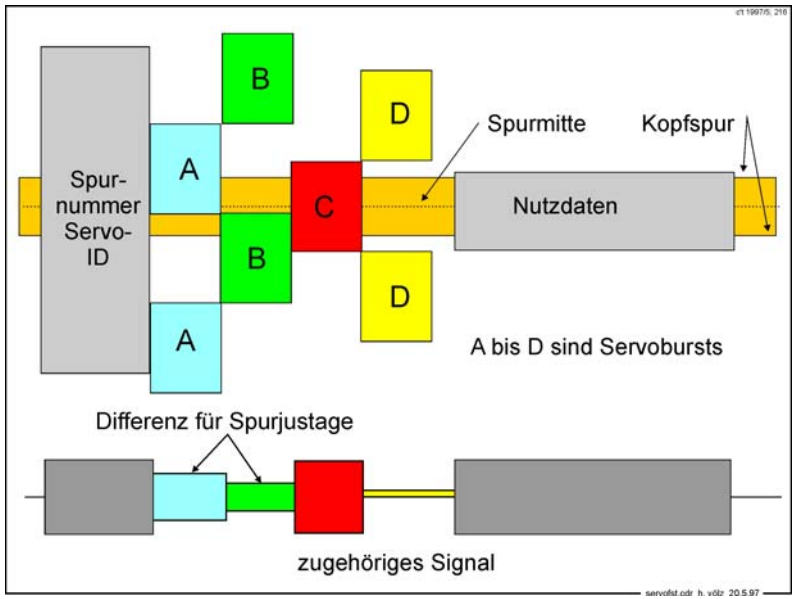
Spurführung und Nachregelung

Um 1970 „***dedicated servo***“ = Unterste Plattenfläche ausschließlich für Servo-Daten = Servo-Platte
Erhielt vor Einbau mit Spezialeinrichtung hochgenauen Daten: u.a. Zylinder-Nr. (Spur) + Sektor
Zugehöriger Servo-Kopf über Regelkreis fortlaufend auf Spurmitte gehalten
Bei nicht zu großen Temperaturdifferenzen in Festplatte, genau genug für alle anderen Oberflächen

Geringer werdende Plattenzahl = „verschwendete“ Speicherplatz ⇒ ***ESS (embedded servo system)***
Jede Datenspur, zwischen Sektoren, zusätzliche Servo-Information =Servo-Burst im ID-Feld
Gerade benutzter Kopf positioniert sich so selbst genau auf die Spur
Umschalten zu einem anderen Kopf des gleichen Zylinders nur kleine Nachkorrektur notwendig
Servo-Information muss bei Herstellung aufgezeichnet werden, daher kein hard-reset mehr zulässig

erstmals bei den Disketten erprobt: *Vorformatierung* zu Beginn jedes Sektors
So auf 5¼-Zoll-Disketten 192 bzw. 384 Spuren, 6,6 MByte, hat sich hier nicht durchsetzen können

Zeitweilig Sony und Seagate ***PERM (pre embossed rigid magnetic)*** erprobt
eingeprägte Führungsrillen ≈200 Spuren/mm



Gleiter = slider

Medium-Kopf-Abstand für ***hohe Speicherdichte → 0,***
⇔ ***fliegender Kopf*** wichtig für Lebensdauer, Zuverlässigkeit
Notwendig ***Gleiter,*** weil Köpfe sehr klein und immer kleiner wurden
Je kleiner, desto ***weniger träge Masse*** für Steuerung und weniger Gefahr bei ***Head-crash***

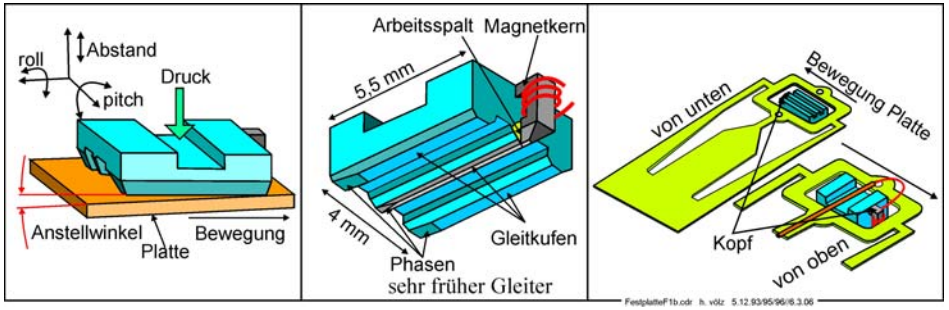
Bei RAMAC-Speicher Flughöhe 30 µm, erste Wechselplatten ≈5 µm, heute ≈10 nm

≈1985 Gleiter: 4×3,3×0,86 mm^3. ⇒ **Gedankenmodell** 10 000-fach ⇒ ***70-m-langen Jumbo-Jet***
Magnetkopf fliegt in 3 mm Abstand über Betonpiste mit 100 km/s ≈ 300-fache Schallgeschwindigkeit

Heute Gleiter viel kleiner ⇒ relativ 100-fach schneller und 10-fach tiefer

Gleiter bei ***drei Bewegungsrichtungen*** stabil den kleinen Abstand halten, ***kardanisch*** aufgehängt

Unter den Kufen strömt Luft laminar und bewirkt ***Auftrieb***
Mittiger Druck senkt hinteren Teil ab, stellt Kopf-Abstand ein ⇒ ***Anstellwinkel*** (pitch)
Druck anfangs mehrere hundert, heute nur noch wenige p



Geschichte

Erste Gleiter aus MnFe-Ferrit mit ***3 Gleitkufen***, hergestellt durch Zerteilen großer Ferritblöcke
Am „hinteren" Ende zweite ***Ferrit-Halbkern*** mit Spule mit Glaslot gebondet → Kopfspalt

1969 DAVID THOMPSON und LUBOMYR ROMANKIW bei IBM den ***integrierten induktiven Kopf***
= WHITNEY-Kopf aus Permalloy-, Isolier- und Leitschichten, Aufdampfen, Sputtern und Ätzen

1987 Gleiter mit ***2 Kufen*** und je ein Kopf, beim IBM-Speicher 3370 erstmalig verwendet
Auf 4-Zoll-Wafer gleichzeitig mehrere tausend Köpfe erzeugt, Kontaktierungsflächen groß = Kopf
Heute 6-Zoll-Wafer ≈ 30 000 Köpfe
Produktionsdurchlauf ≈40 Tage, ohne technisch notwendige Wartezeiten 10 Tage

1990 Verkleinerung wieder 3 Kufen und nur ein Kopf: Gleitermaterial TiC/Al

1992 für Wiedergabe bei IBM ***magnetoresistives Element***

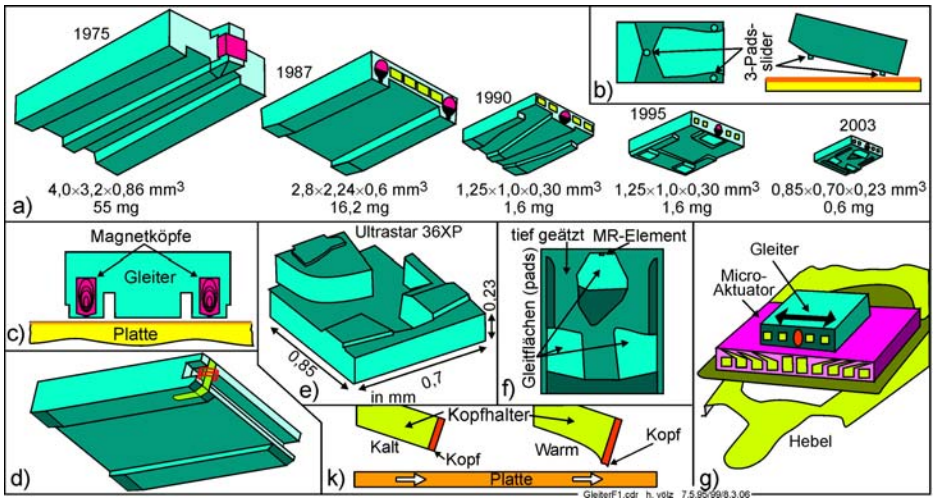
1995 erste Gleiter mit 3 erhöhten kleinen Flächen = ***3-Punkt-Auflage, 3-Pads-slider***

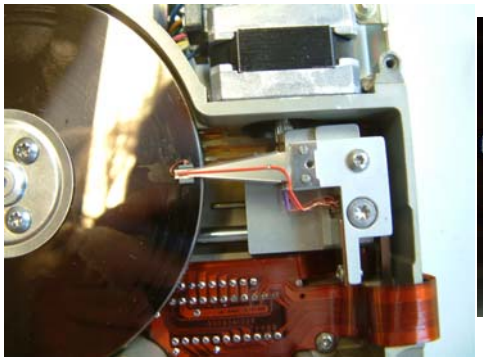
1997 ***GMR-Kopf***

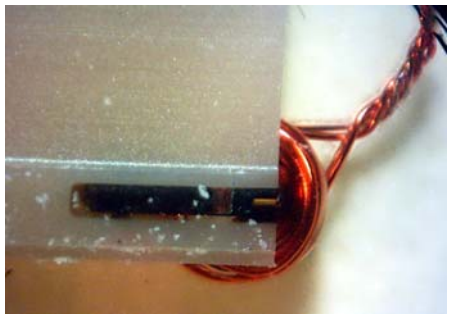
2003 erfolgreiche Versuche mit ***Senkrechtspeicherung***, kommerzielle erst 2006

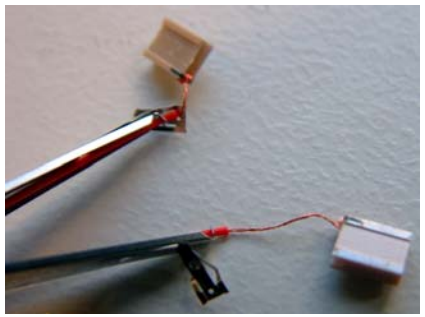
2006 Hitachi dynamische Abstandsregelung = ***Thermal Fly Height Control*** (TFC)
Heizelement verschiebt Schreib-Lese-Kopf auf dem Träger in Plattenrichtung

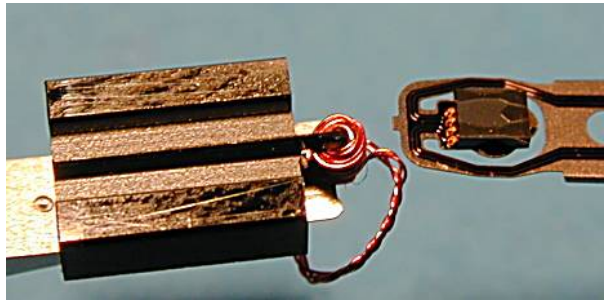
2009 zusätzlicher ***elektrostatischer Aktuator*** für Abstandsregelung

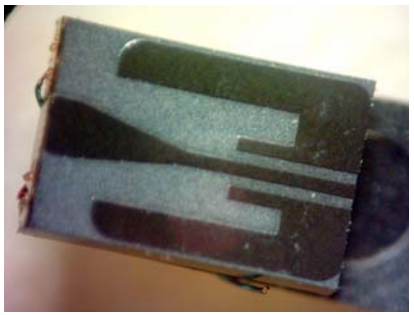


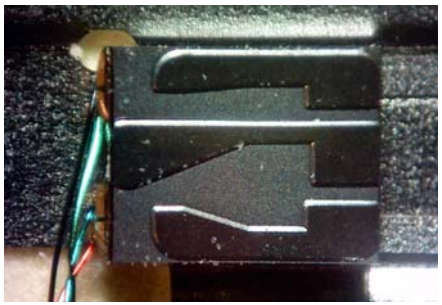


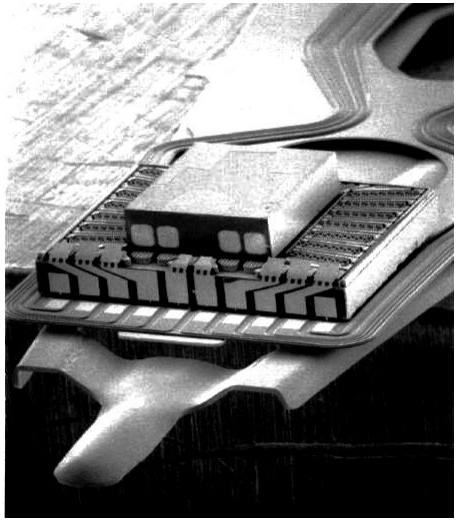


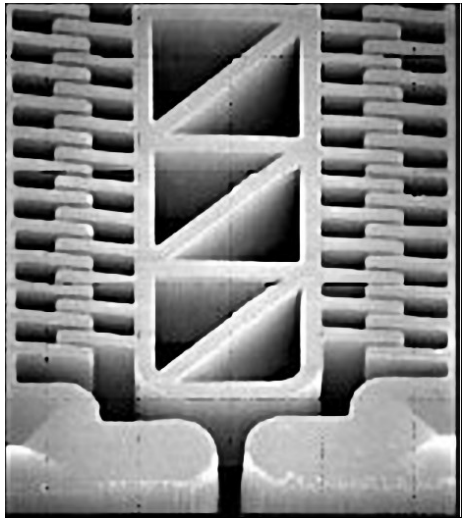


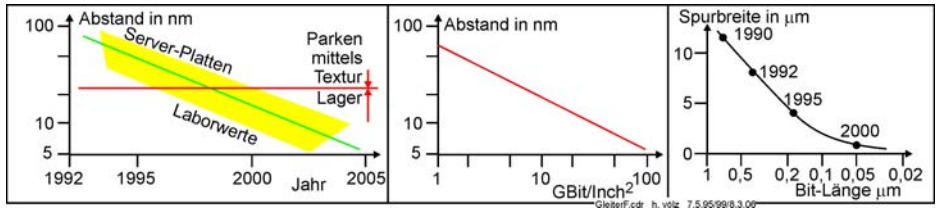












Grenzen der Aerodynamik

Ursprünglich ***aerodynamische*** Modell-***Berechnungen*** für Flugverhalten

Mittlere freie Weglänge von Luft (≈70 nm), um 2000 unterschritten heute < 10 nm
Nur noch Experimente = Betriebsgeheimnis

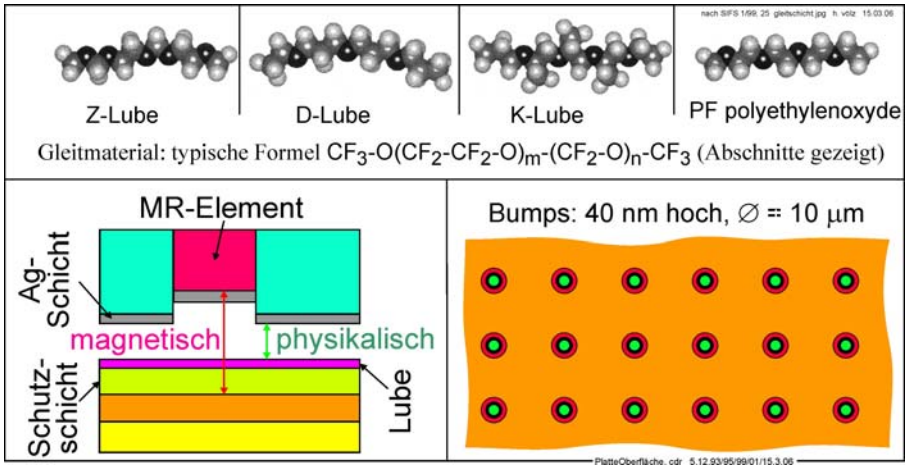
Bei sehr geringem Abstand selbst kleinste abgelöste Partikel zu Datenverlusten oder gar zur Zerstörung

Nicht extrem glatte Platte, Rautiefe <5 nm, Gefahr des Festsaugens durch Adhäsion „head sticking"
⇒ spezielle Texturierungs- und Burnish-Prozesse

Zusätzliche Gleitschicht = ***Antihaftschicht*** (antifriction bzw. lubricant coat) auf Platte
Lateinisch ***frictio*** das Reiben, ***lubricus*** schlüpfrig, *englisch* ***coating*** überziehen, vergüten, beschichten

Wissenschaft → ***Tribologie***; *griechisch* ***tríbein*** reiben, ***lógos*** Rede, Beschreibung, Wort, Vernunft
spez. Lit. für Festplatten [Nilgers]

Es gab Versuche mit ***Flüssigkeitsfilmen*** statt des Luftpolsters: ab 1990 Conner
Doch der extrem dünne Schmierfilm (≤50 nm) zerreist sehr leicht + Verschleiß der Magnetschicht



Schutz für Erschütterung und Fall

Ursprünglich wurden Köpfe auf innersten Spuren im ungenutzten Sonderbereich ***geparkt***

Probleme: dort niedrige Drehzahl, schlechter Start mit Belastung,
Abnutzung für Kopf, Gefahr bei Erschütterungen und Transport

Heute üblich Sonderlagerung, auch bei Stromausfall
Motor liefert dabei als Generator Energie = ***Autoparking***, evtl. + Kondensator

Landezone spezielle Laser-Bearbeitung mit regelmäßig angeordnete Bumps
(*englisch* ***bump*** Beule, Unebenheit)
Abstände ≈50 µm, Höhe ≈40 nm, hinreichend klein gegenüber der Gleiteroberfläche

Für transportable Platten zusätzlich ***Beschleunigungs-Sensor*** (Fall bis 100 g), erzwingt Parkhalterung

Anordnung der Spuren

Signale, Bit können auf Oberfläche einer rotierenden Scheibe ***unterschiedlich angeordnet*** werden:

- ***Kreisspuren*** = Zylinder: z. B. Festplatten, Disketten usw.
  Zugriff zu bestimmten Informationen schnell, kontinuierlich schwierig
- ***Spiralspur*** z. B. Schallplatte, CD usw. u. a vorteilhaft u.a. bei Schall, Video
  langsam für ausgewählte Information

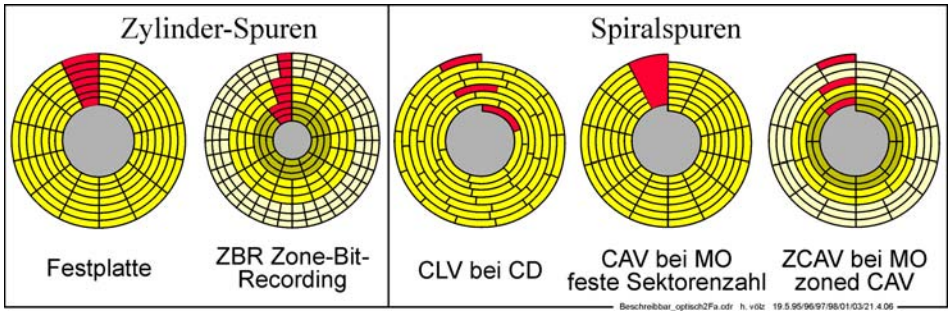
Der ***Motor kann unterschiedlich betrieben*** werden, Kriterium ***Speicherdichte***

- **CAV**: konstante Drehzahl = Winkelgeschwindigkeit (angle velocity): Außen geringere Speicherdichte als Innen
- **CLV**: Konstanten Lineargeschwindigkeit (linear velocity), Drehzahlsteuerung erforderlich

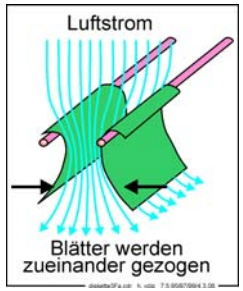
Aus den 4 Varianten lasse sich ***Kompromisse*** bei höherem ***Steueraufwand*** bilden,
deshalb erst relativ spät

Zusätzlich bei ***Video*** erwünscht: ***Standbild, Zeitlupe und Zeitraffer***

1987 Seagate für Festplatten ZBR = **z**one **b**it **r**ecording
Ähnlich bei anderen Firmen **CCS** = **c**ontinuous **c**omposite **s**ervo
Bei Spiralspuren **SS** (**s**ampled **s**ervo)
Anfang der 90er Jahre bei MO (magneto optical) **ZCAV** (**z**oned **c**onstant **a**ngular **v**elocity)



BERNOULLI-Effekt



1738 von DANIEL BERNOULLI (1700 – 1782) beschrieben
Strömt Luft zwischen zwei bewegliche Blätter hindurch,
so nähern sie sich auf einen Abstand, der mit steigendem *v* sinkt

Widerspricht der Anschauung ⇒ ***aerodynamisches Paradoxon***

Ermöglicht ***beachtliche Datensicherheit*** bei Staub und ähnlichen Störungen

BERNOULLI-Speicher 1

BERNOULLI-Prinzip: 60er Jahren Standbildspeicher beim Fernsehen, zunächst keine weitere Anwendung

1983 entwickelte und produzierte Iomega die erste sehr zuverlässige ***BERNOULLI-Box:***

Ruhend: flexible Magnetfolie (∅ 5¼ Zoll) hängt infolge der Schwerkraft leicht nach unten durch
kein Kontakt zum Magnetkopf

Rotation: Zentrifugalkraft → starr + eben ⇒ nähert sich Magnetkopf, Drehzahl 1 500 - 3 000 UpM
Zusätzlich entsteht Luftstrom vom Drehzentrum nach außen ⇒ BERNOULLI-Effekt verkleinert Abstand
⇒ ***Kopfkontakt mit Abstand*** ≈0,1 µm, Folie schmiegt sich Kopf an, ***Headcrash nicht möglich***
Gelangt ***Staubteilchen*** in Luftstrom, verbeult sich Folie, staub vom Luftstrom nach Außen mitgerissen
Im ungünstigsten Fall eine kurzzeitige Störung

Temperaturänderungen, Schock und Vibrationen usw. werden weitgehend ausgeglichen
BERNOULLI-Speicher vertragen sogar im Betrieb Beschleunigungen bis zu 1 000 g

BERNOULLI-Disketten benötigen weniger Antriebsenergie, rotieren frei, benötigen keinen Fließ
Typische Zugriffszeit 10 bis 35 ms, Kapazität 20 bis 200 MByte, Speicherdichte ≈2 MBit/cm^2

Ende der 80er Jahre neuer Versuch von Syquest für magneto-optische Speicherung
kein Erfolg ⇒ später von Iomega übernommen

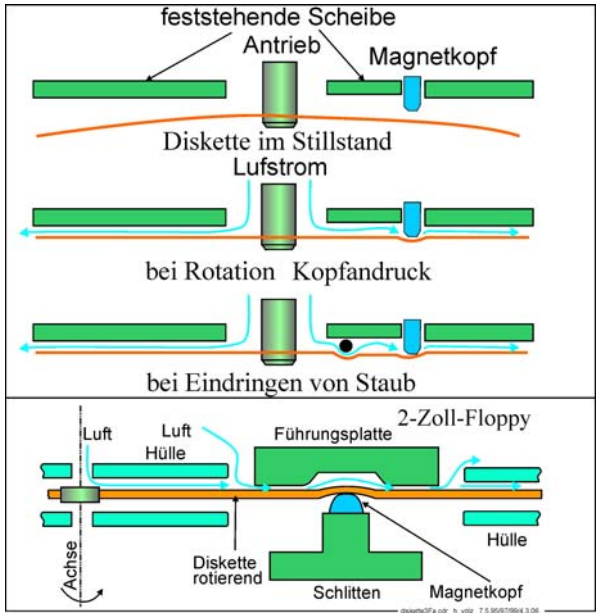
BERNOULLI-Speicher 2

Durchbruch 1995 mit **ZIP** von Iomega
nur wenig größer als übliche 3½-Zoll-Diskette, jedoch etwa doppelt so dick

Zunächst 100 MByte bereits vor 2000 verkauft 50 000 000 Stück
Zugriffszeit ≈30 ms. Datenrate bestimmt Schnittstelle:
Parallele Drucker-Schnittstelle, EIDE, SCSI und USB, erreicht bis 7,5 MBit/, weitere Details s. u.

späteren 250 MByte, schließlich JAZ-Drive mit 1 GByte (Metallplatten)

Indirekt BERNOULLI-Effekt beim ***2-Zoll-Floppy*** für Still-Video (s. u)
Hier wird die Diskette in eine Vertiefung der Führungsplatte gezogen
Krümmung bewirkt sehr guten Kopfkontakt



Zuverlässigkeit

Geschichte

Beachten: gewiss bereits auch in der ***Antike*** intuitive und erfahrene Zuverlässigkeit bei Bauten usw.
Doch erst mussten ***Wahrscheinlichkeitsrechnung*** + ***komplexe elektronische Schaltungen*** entstehen

1930	V. M. MONTSINGER erste Arbeit; Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen, 8°-Regel
1942	BUSSING theoretische Zusammenhänge zur Zuverlässigkeit: Archiv für Elektrotechnik: „Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen"
1950	Beginn experimenteller Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Bauelementen
1951	Zuverlässigkeit bei Radar-/Feuerleitgeräten USA entscheidend im Koreakrieg
1955	Zuverlässigkeit von Bauelementen mindert bei Rechnern erheblich den Betrieb
1958	Störungen im Funkverkehr durch Atomexplosionen, EMP noch nicht erkannt
1960	Zuverlässigkeit wird bei Raumfahrt wichtig
1962	8.7. Atomversuch 350 km Höhe, Stromversorgung Honolulo bricht zusammen, EMP
1978	Entdeckung der Alpha-Strahlungsfehler in DRAM, Tim May

Wichtige Begriffe

Ausfall: ≈ *Versagen*: Ende der Funktionsfähigkeit des Systems, wird erst bemerkt, wenn Teilfunktion verlangt wird
Ausfallrate: λ Anzahl der Ausfälle, Fehler je Stunde, z. T auch für 10 Jahre
Beanspruchung: u.a. durch Spannung, Leistung, Temperatur, Mechanik, Feuchte, Strahlung, Gewitter, EMP usw.
Fehler: unzulässige Abweichung des Systems von den Forderungen ≈ Ausfall ≈ Versagen
Einzelfehlerannahme: ***V***ereinfachung: es tritt jeweils nur ein Fehler auf, Rest des Systems arbeitet fehlerfrei
Fehlertoleranz: Fähigkeit des Systems, mit begrenzter Zahl fehlerhafter Subsysteme seine Funktion zu erfüllen
Es werden Redundanzen benutzt, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit eines Systems zu erhöhen
Funktionsdauer: Bzgl. zuverlässiger Funktion, u.a.: wirkliche, zu erwartende Betriebszeit und Garantie
Redundanz: Mehrfach vorhandene von Subsysteme für eine Funktion (anders bei Fehlerkorrektur s. u.)
Selbsttestbarkeit.: Fähigkeit des Systems selbst Teilfehler zu erkennen
Verlässlichkeit ≈ Vertrauen in die Leistung eines Systems
Verfügbarkeit: Wahrscheinlichkeit die Systemanforderungen zu erfüllen
Versagen = nicht vorbestimmtes, unerwünschtes Reagieren des Systems
Voralterung**:** Verfahren zur Vermeidung von Frühausfällen (s. Badewannenkurve)
Wartbarkeit: Wie gut das System zu pflegen, warten, in Betrieb zu halten ist
Zeitraffende Verfahren: Verkürzung der Messzeit, durch erhöhte Belastung, z. B. Temperatur (8°-Regel)
Zuverlässigkeit: (mehr als Qualität) Fähigkeit vorgegebenen Funktion unter Betriebsbedingungen zu erfüllen
Gemitteltes Verhältnis Dauer der Betriebsbereitschaft zur Zykluszeit aus Betriebs- und Instandsetzungsdauer
Zusätzliche Subsysteme übernehmen im Fehlerfall die Aufgabe des primären Subsystems
Zuweilen werden redundante Subsysteme auch mit benutzt → Erhöhung der Leistung des Systems
Durch Abschaltung eines fehlerhaften Subsystems wird dann lediglich die Leistung reduziert

Statistik der Ausfälle

Es gibt N_0 Elemente, z.B. Geräte, Bauelemente usw. einer Serienproduktion

Ferner statistische Ausfall- = Fehlerrate λ in 1/h (z.T. auch 10 Jahre); für sie beträgt $F_W = 1 - 1/e \approx 63\ \%$

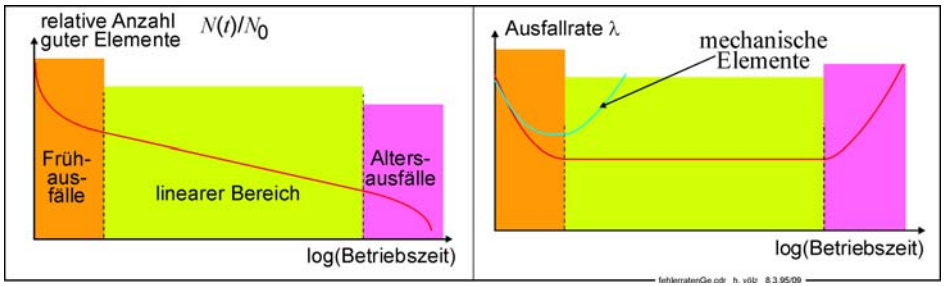
$$\lambda(t) = \frac{1}{N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt}.$$

Nach der Zeit t sind dann noch $N(t) = N_0 \cdot e^{-t \cdot \lambda}$ brauchbar

Zunächst treten ***Frühausfälle*** auf, beruhen weitgehend auf mangelhafte Herstellung oder Materialfehler
Ihnen folgt nach ≈100 - 2000 h Verlauf mit ***konstanter Neigung***, Bereich ***optimal*** für Anwendungen
Gelangen Elemente an statistische Grenze „Nutzbarkeit" wird Abfall steiler = ***Spät-, Verschleißphase***
So ergibt sich die so genannte ***Badewannenkurve***

Mechanische Bauelemente besitzen einen extrem kurze Zeit für die konstante Ausfallrate

Als ***häufige Fehlerquellen*** gelten
mangelhafte Kontakte, Lötverbindungen usw. Integrierten Schaltkreise großen Fortschritt



Wartung

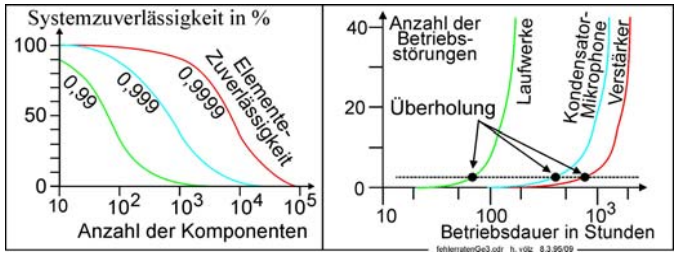
Gemessen Kurve ***kumulierter Ausfälle*** (nicht Ausfallrate) noch betriebsbereite Geräte, Bauelemente

Bei Zeit t_{50} kennt sind 50 % der Geräte ausgefallen, hiermit ***Überholungsperiode*** festgelegt

Häufiger steigern die Kosten ohne wesentlichen Gewinn an Betriebssicherheit
Seltener machen das Risiko eines Betriebsausfalls zu groß

Beispiel für Studio-Geräte der 50er Jahre, Ausfall von 0,5 % als erträglich betrachtet

Tonbandgeräte ..... alle 7 Tage
Kondensatormikrophone ... monatlich
Röhrenverstärker ..... vierteljährlich



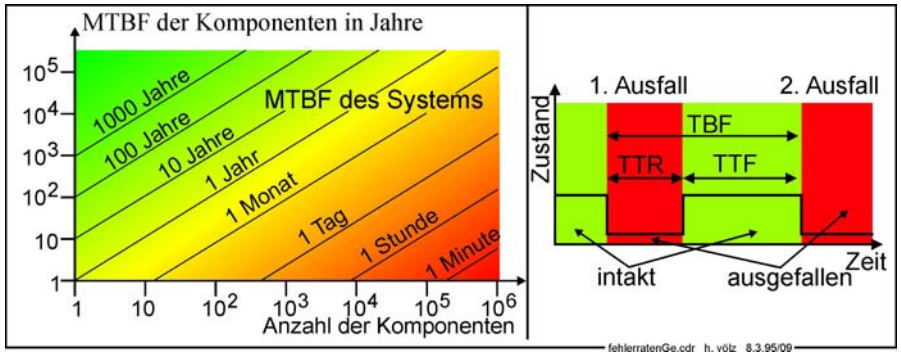
Wichtige Begriffe

MTTF mean-time to failure, gilt ohne Reparatur bis ein Fehler eintritt (= $\mathbf{1/\lambda}$)

MTBF meantime between failure, gilt mit Reparatur bis zum Eintreten des nächsten Fehlers

MTTR meantime to repair, Zeit für die Reparatur eines Fehlers

In einigen Fällen entfällt das M



8°-Regel (= 8-K)

Für gute Bauelemente dauert eine statische Untersuchung so lange, dass ihre Produktion ausgelaufen ist

Deshalb sind zeitraffende Untersuchungen unerlässlich

Erste Untersuchungen hierzu führte 1930 V. M. MONTSINGER an isolierenden Kabelpapieren durch
Danach gibt es einen exponentiellen Einfluss der Temperatur T auf die Lebensdauer t_L gemäß

$$t_L = t_0 \cdot e^{-A \cdot T}.$$

t_0 und A sind experimentelle, materialabhängige Konstanten

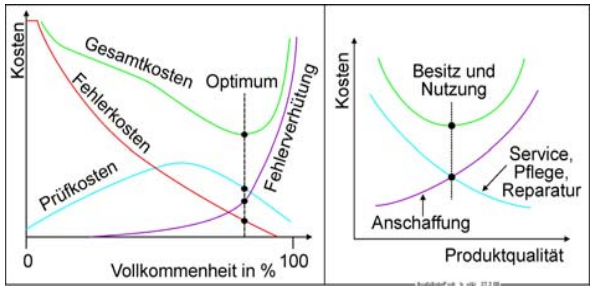
Ergebnis. Lebensdauer verkürzt sich etwa auf die Hälfte, wenn die Temperatur um 8° erhöht wird
Regel wird immer noch als Näherung benutzt

Prüfmethoden, Aufwand und Kosten

Bei der ***Herstellung von Hard- und Software*** wird die Qualität durch mehrere Einflüsse bestimmt
Fehlerverhütung bewirkt unterschiedliche Vollkommenheit und Produktqualität
Die Kosten betreffen getrennt Herstellers und Anwender

Hersteller hauptsächlich: ***Herstellungsaufwand*** + ***Prüfmethoden*** + ***Garantieleistungen***
Summe besitzt bei mittlerer ***Vollkommenheit*** ein Minimum

A***nwender*** anderes Minimum
Je höher Kosten der Anschaffung, desto geringer meist Kosten für Pflege, Service und Reparatur



Einflüsse

Bei der Entwicklung wichtig, ***möglichst früh Fehler erkennen***, je später, desto höher der Aufwand

Beispiel: defekter Transistor schlecht eingelötet → sofortige Reparatur ..... ca. 1 €
Erst bei der fertiger Platine → Fehlersuche + Reparatur ..... ca. 10 €
Im fertigen Gerät → Aufwand ..... 100 €
Beim Einsatz mit Folgeschaden vielleicht ..... 1000 €

Beispiel: Montage elektronischer Geräte: 100 000 Operationen ***mittlere Fehlerzahlen***
Vergessen, eine Komponente zu montieren..... 3
Zwei Drähte vertauscht 60
Eine Komponente mit Lötkolben beschädigt..... 100

Richtwerte für Optimum bei
50 % für Fehlerverhütung (Planung)
40 % für Prüfung, Testung
10 % für Fehlersuche und -behebung

Software fast immer weitaus komplexer als ***Hardware***systeme
⇒ erweiterte Funktionalität und erhöhte Komplexität → geringere Zuverlässigkeit.

Fehlertoleranz

Wichtige Gründe, u. a.:

- **Extreme Bedingungen:** z. B. schlechte Belüftung, hohe Temperatur und Feuchtigkeit, instabile Stromversorgung, elektromagnetische Interferenzen
- ***Unerfahrene Benutzer***: Immer mehr Menschen haben Umgang mit neuen und komplexen Systemen
- ***Große Folgekosten***: Ausfall der Netzstromes, Nachrichtenverbindungen, Versorgung jeglicher Art

***Beginn* fehlertoleranter (**Computer-) Systeme:
Militär, Raumfahrt, Industrie, Kommunikation, Bankwesen

Notwendigkeit (große Gefahren): Atomkraftwerke, Raketen, Medizinische Anlagen,
Flugleit- und Steuerungssysteme, Raumfahrt
Aber auch Telefon, Transport, Logistik, Buchungs- und Transaktionssysteme

Anforderungen: Datenintegrität, Funktionskontinuität, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Lebensdauer, Instandhaltung

Nachteile: Immense Kosten bei der Herstellung, Anschaffung und Wartung solcher Systeme

Beispieldaten

Verfügbarkeits-Ebene	Verfügbarkeit	Ungefähre Ausfallzeit
Durchgehende Verfügbarkeit	99,999% bis 99,9995%	2,628 bis 5,256 min. / Jahr.
Kommerzielle Fehlertoleranz	99,99% bis 99,995%	26,28 bis 52,56 min. / Jahr.
Fehler beständig	99,99%	52,56 min. / Jahr.
Hoch-Verfügbarkeit	99,9%	8,76 St. / Jahr.

Reserve-Elemente

Kalte Reserve

n Elemente benötigt ein System ***zum Betrieb***, betr. bei Speicher nur für Geräte-Austausch
m Elemente werden ***in Reserve*** zum Austausch bereit gehalten
p ist die ***Wahrscheinlichkeit*** für den ***Ausfall*** eines Elements
Die gesuchte ***Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall*** beträgt dann

$$p_{tot} = \sum_{i=1}^{m} \binom{m+n}{n+1} \cdot p^{n+i} \cdot (1-p)^{m-i}$$

Beispiel: $p = 0{,}9$; $n = 4$; ohne Reserve gilt dann nur noch $p^4 = 0{,}6561$
1 Reserve-Element $p_{sicher} \approx 0{,}9185$, **2** Reserveelemente $p_{sicher} \approx 0{,}9841$
Im Beispiel bringt 1 Reserve-Element den besten Gewinn,

Für Reservereifen bei Auto liegt p_{sicher} noch viel näher an 1

Wichtig ist immer die **schnelle Reparatur**. Bedingt zusätzliche Verlustzeiten

Heiße Reserve

Alle Elemente zugleich im Betrieb, erhöht eventuell die Leistung
Sinkt dann bei einem Ausfall nur ab, z. B. Doppelreifen
Besonderheit RAID-System mit hot plotting = Austausch im laufenden Betrieb

Literatur

Böhm, W.: Elektrische Antriebe. 5. Aufl. Vogel, Würzburg 2002

Kagan, B. M.; Adasko, W. I.; Pure, R.R.: Magnetomotorische Speicher für elektronische Datenverarbeitungsanlage. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig KG, Leipzig 1973

Kallenbach, E.; u.a.: Elektromagnete. Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung, 2. Aufl. Teubner, Stuttgart - Leipzig - Wiesbaden 2003

Manz, F.: Videorecordertechnik. 5. Aufl. Vogel-Verlag, Würzburg 1991

Meier, O. W.: Ähnlichkeitsbetrachtungen zum Bau von Kleinstmotoren für Tonlaufwerke. Technische Mitteilungen des BRF 5 (1961) H. 4, S. 198 - 201

Müser, M. H.: „Der mikroskopische Ursprung der Reibung“. Physik-Journal **2**(2003) H. 9, S. 43 ff.

Neumann, W.: Digitalbandspeicher. Als Band IV von „Grundlagen der Magnetischen Signalspeicherung“. Akademie-Verlag, Berlin 1968

Neumann, W.: Konstruktive Varianten des Magnetbandgerätes mit Endloswickel. Feingerätetechnik 32 (83) H. 6 S. 258 – 264

Nilgers, H.; Neuhäuser, M. u.a. „Mikro- und Nanotribologie in der modernen Speichertechnik**“.** Mat.-wiss. u. Werkstofftech. **31** (2000), 652 - 654 (nanotribologie.pdf)

Reichardt, W.: Grundlagen der Elektroakustik. Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.G.,vielen Auflagen, z.B. Leipzig 1954/58

Schelenz, J., Schult, U.: Kleinmotoren. In H. Völz: „Grundlagen der magnetischen Signalspeicherung“. Akademie Verlag, Berlin 1975

Scholz, C.: Handbuch der Magnetbandspeichertechnik. Verlag Technik, Berlin 1979

Stölting, H.-D., Kallenbach, E.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe, 2. Aufl., Hanser, München - Wien, 2002

Völz, H.: Das Antriebssystem bei Magnetbandgeräten. Nachrichtentechnik 9 (1959) 12, 537-543

Völz, H.: Grundlagen der Transportwerke. In Grundlagen der magnetischen Signalspeicherung, Bd. 2. Akademie-Verlag Berlin 1970, S.47 - 129

Völz, H.: Informationsspeicher, Grundlagen - Funktionen - Geräte. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim 1996