

Vorlesungsmaterial von Prof. Dr. Horst Völz

Magnetmaterial

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. 2000x3000 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

Werkstoffe allgemein

Werkstoffe werden aus **Rohstoffen** gewonnen

Sie dienen der **Herstellung von** Halbfabrikaten, Werkstücken, Bauteilen und Fertigerzeugnissen

Magnetische Werkstoffe kommen in den üblichen Lehrbüchern so gut wie nicht vor

Meist erfolgt die **Einteilung**: Metall, anorganisch, organisch, Kunststoff und Verbundstoff

Anorganischen zweigeteilt Isolatoren (z. B.: Glas, Keramik, Beton, Zement, Mörtel) und Halbleiter

Zuweilen wird der Begriff **Naturstoffe** benutzt, der dann organische Stoffe einbezieht, hierzu gehören:

1. mineralische Stoffe, wie Marmor, Granit, Sandstein, Sand, Kies, Saphir, Glimmer und Diamant
2. organische Stoffe, wie Holz, Kautschuk, Naturfasern und Papier

Nicht selten gilt als besondere Werkstoffklasse: **organische und Kunststoffe**, wie die Polymere

Verbundwerkstoffe meist gesondert hervorgehoben, wenn mit ihnen besondere Eigenschaften erreicht werden

Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik

Übliche Einteilung: Metall (leitend), Halbleiter, Isolator, zuweilen sehr kurz magnetische Werkstoffe

Magnetische Werkstoffe

Existieren bei: **metallisch**, **anorganisch** (hauptsächlich oxydisch) und **Verbundstoffe**

In den letzten Jahren sind schwach magnetische **organische** Stoffe bekannt geworden

Meist werden nur höher permeable ferro-, ferri- und antiferro-magnetische Stoffe berücksichtigt

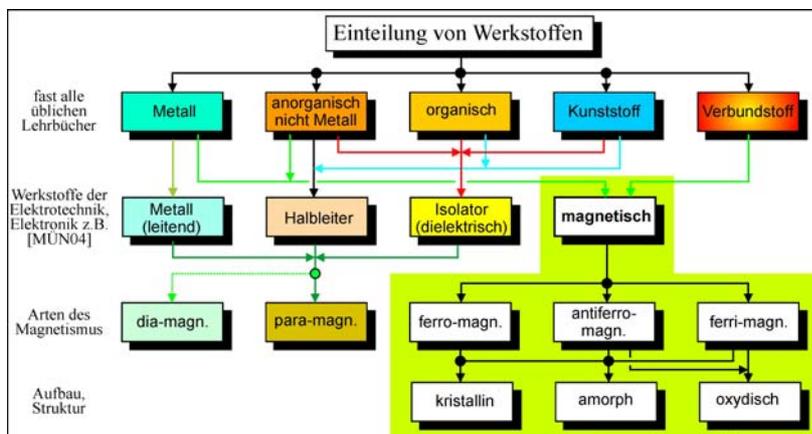
Eine **technisch-technologisch** wichtige Einteilung ist:

Metallkristallin: wie Fe, FeSi-, FeNi-, FeCo-, FeAl-, FeAlSi-Legierungen und Kohlenstoffstähle

Amorph: unter teilweisen Zusatz von Glasbildnern, entstehen durch extrem schnelle Abkühlung $\geq 10^6$ K/s.

Oxydisch: vor allem Ferrite und Granate.

Einkristall: schwierig herzustellen, Sondertechnologien



Drei Anwendungsgebiete

Sie sind hauptsächlich durch die jeweilige Anwendung mit den dazugehörigen Daten gekennzeichnet

1. Speichermaterial

- **hohe Remanenz** $M_R \approx 1 \text{ T}$, damit eine ausreichendes Wiedergabesignal entsteht
- **mittlere Sättigungs-, Koerzitivfeldstärke** (H_S, H_C) um 200 Oe, größere Werte erschweren Aufzeichnung und Löschen, kleiner bedeuten geringe Stabilität der Aufzeichnung (Umweg Lasererhitzung bei MO)
- **großer Rechteckfaktor** $R \rightarrow 1$ für eine stabile Aufzeichnung

2. weichmagnetische Material

Wichtig für **Transformatoren, Übertrager, Drosseln, Abschirmungen und Magnetköpfe**

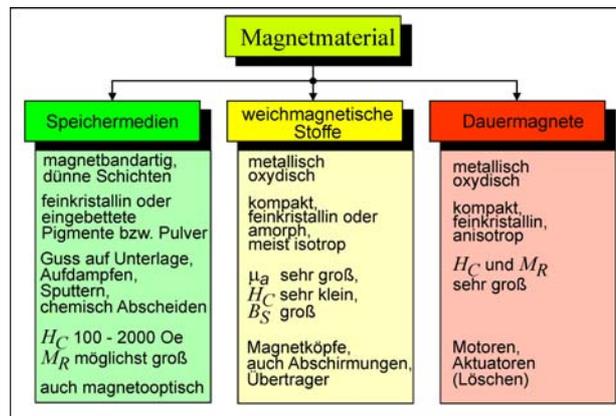
hohe Anfangspermeabilität μ_a wichtig, bestimmt (Analogie Leitfähigkeit) u.a. den Wirkungsgrad bei Magnetköpfen
geringe Wirbelstromverluste \approx geringe **elektrische Leitfähigkeit** und **kleine Koerzitivfeldstärke** ($T_C!$ beim Löschen)
 Für **Magnetköpfe**: zusätzlich erhebliche **mechanische Härte** (Abrieb), **hohe Sättigungsinduktion**, **kleine Remanenz**

Daten z. T. widersprüchlich, daher Kompromiss notwendig

3. Dauermagnete

Wichtig für **Motoren, Aktuatoren** usw. ähneln teilweise Speichermedien

Extrem **hohes Energieprodukt** \approx sehr **hohe Koerzitivfeldstärke**



Herstellung - Technologien

Die folgende Klassifizierung ist leider nicht ganz einheitlich, da so vielfältige Daten erreichbar sind
 Ferner Schwerpunkt Speicher berücksichtigt

kompaktes Material

Schmelzen, Warm-, Kaltverformung, thermische Behandlung mit/ohne Magnetfeld, z. T. spezielle Gasatmosphäre.

Ausgangsmaterial für Magnetkopfkerne, Trafokerne, Motoren usw.

Senkung von Wirbelstrom: gestanzte **Bleche**, elektrisch isoliert zu Kernpaketen geschichtet

Zuweilen auch **Einkristalle** nach verschiedenen Technologien

Gusswerkstoffe

Schmelzen, Formguss, Abkühlung, thermische Behandlung, Magnetisierung

Feingießen ermöglicht Einsparen von Prozessstufen; Meist für FeAl-, FeSi-, FeCo-, FeAlSi- und FeCrAl-Legierungen.

Sinterwerkstoffe

Schmelzen, Pulverisieren, direkte Synthese von Oxydpulver \rightarrow Pressen, Sintern, thermische Behandlung, Magnetisieren

Fordert gute Maßhaltigkeit; typisch geringe Wirbelstromverluste, meist für FeNi-, FeSi-, Fe- und FeCo-Materialien.

Pulververbundstoffe

Pulverherstellung, Einbettung in Matrix, meist Kunststoff, Duroplast oder Siliconharz = 10 - 60 % Volumenanteil

Formgebung, Erstarrten, Bearbeitung und Zuschchnitt u.a. gepresste Pulvermagnete mit geringen Wirbelstromverlust

Spezifischer Widerstand 10^6 bis $10^8 \mu\Omega\text{-cm}$, statt sonst 10 bis 50 $\mu\Omega\text{-cm}$

amorphe Metalle - metallische Gläser

Direkt aus der Schmelze durch extrem schnelle Abkühlung um 10^6 K/s , Hohe Permeabilität, sehr hart, meist dünne Folien

dünne Schichten

Aufdampfen/Sputtern kompakten Materials oder chemisches bzw. stromfreies Abscheiden aus flüssiger Phase auf Unterlage

vorwiegend als Speichermaterial, z.B. Festplatten und integrierte Magnetköpfe

Magnetbänder

Herstellung der Magnetpartikel, Einbettung in zähflüssige Matrix, Gießen auf Kunststoffband mit/ohne Magnetfeld

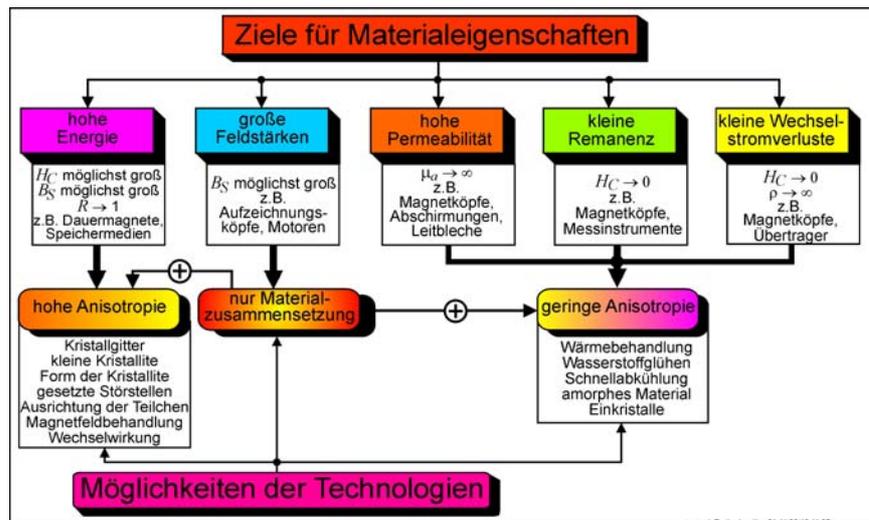
Trocknen, Nachbehandlung, seit ca. 10 Jahren auch durch Aufdampfen, Sputtern

Ziele und Möglichkeiten

Es gibt also **unterschiedliche Wünsche** für die Daten magnetischen Materials

Sie werden durch eine Vielzahl von **typischen Technologien** meist als Kompromiss oder Optimum erreicht

Besonders wichtig sind zwei Möglichkeiten: **Materialzusammensetzung** und Stärke der **Anisotropie**
 Ausführliche Beschreibungen erfolgen später bei einzelnen Werkstoffgruppen



Dauermagnete

Wichtig für Motoren, Antriebe, Lautsprecher, Aktoren usw., genutzt wird die in ihnen **gespeicherte Energie**
Notwendig hohe Koerzitivfeldstärke H_C und Remanenz M_R , teilweise rechteckförmige Hysterese

Gilt ähnlich für Speichermedien, dann ist aber Ummagnetisierung wichtig

Großes M_S vor allem Materialzusammensetzung $\Leftrightarrow M_R, H_C$, **Rechteckigkeit** vorwiegend durch Technologie

Korrosionsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit, Festigkeit, geringe Herstellungskosten

Für spezielle Anwendungen auch hohe CURIE-Temperatur T_C

Bei Haftmagneten oder Abdichtungen: Magnete in Kunststoffe/Elastomere eingebettet

Mit Polyamiden (Nylon) dann Spritzgussverfahren möglich \rightarrow gummiartiges Magnetmaterial

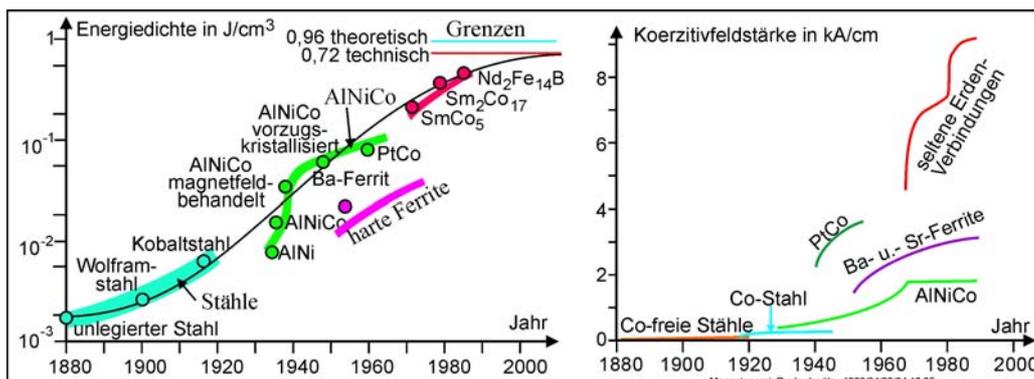
Kalandern ermöglicht Folien \rightarrow Stanzen, Schneiden für gewünschte Formen

Bedeutung der Anisotropie

Material besteht meist vorwiegend aus kleine Körnern, Kristalliten \rightarrow magnetische (Ein-) Bereiche

Große einachsige Form-Anisotropie erwünscht \rightarrow absichtliche Defekte, Gefügestörungen und Ausscheidungen

Ausrichtung der Formanisotropie durch Magnetfeldbehandlung



Historische Entwicklung

Ende 19. Jh. entstanden martensitischen Magnetstähle

Martensit instabile Phase durch Abschrecken von Mischkristalle = Lösung von Eisencarbid in Eisen, $C \leq 2,04\%$
 Mechanisch und magnetisch härter als sonst vorhandener Austenit (Sir W. CH. ROBERTS-AUSTEN; 1843 – 1902)

1915 Kobalt-Stähle = Stahlmagnete mit Co-Einlagerungskristalle auf Zwischengitterplätzen

1932 MISHIMA AINiCo-Stähle

C-freies Eisen mit $\approx 13\%$ Al, 22% Ni, 42% Co, 10% Ti und 6% Cu, z. T. Zusätze, z. B. Si oder Cr
 Beginn Gießen oder Sintern unter Schutzgas, kleine Formteile auch durch Pressen und Sintern (preiswerter)

Nach Formgebung \rightarrow Glühen: homogenes Gefüge (= homogenisieren)

Definiertes Abkühlen erzeugt isotropes Material \Rightarrow Anisotropie erfordert Magnetfeldbehandlung ≈ 200 kA/m

Es entstehen Einbereichsteilchen $\varnothing \approx 10 \text{ nm}$, 10 - 15-Mal größere Länge, liegen in schwach magnetischer NiAl-Matrix
 Abschließend Magnetisierung \Rightarrow Polstruktur der Magnete, auch viele Pole, z.B. bei Synchronmotoren
 AlNiCo-Magnete nur ein mittleres Energieprodukt, wegen Nickel recht teuer, daher heute wenig im Gebrauch

1950 Hartmagnetische Ferrite

Ersten Verbindung von Philips entwickelte „Ferroxdure“: $\text{BeFe}_{12}\text{O}_{19}$ (Problem in Jena)

Heute: $\text{MO} \cdot (4,5 - 6,5) \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, **M**: Barium, Strontium, Kobalt, Blei oder Mischung daraus

Meist hexagonale Struktur, während weichmagnetische meist kubisch sind

Unter den verschiedenen Varianten sind die Ba-Ferrite besonders preiswert

Herstellung beginnt: Erzeugung Hartferritpulver, z.B. aus einer Mischung von BaCO_3 oder SrCO_3 und Fe_2O_3

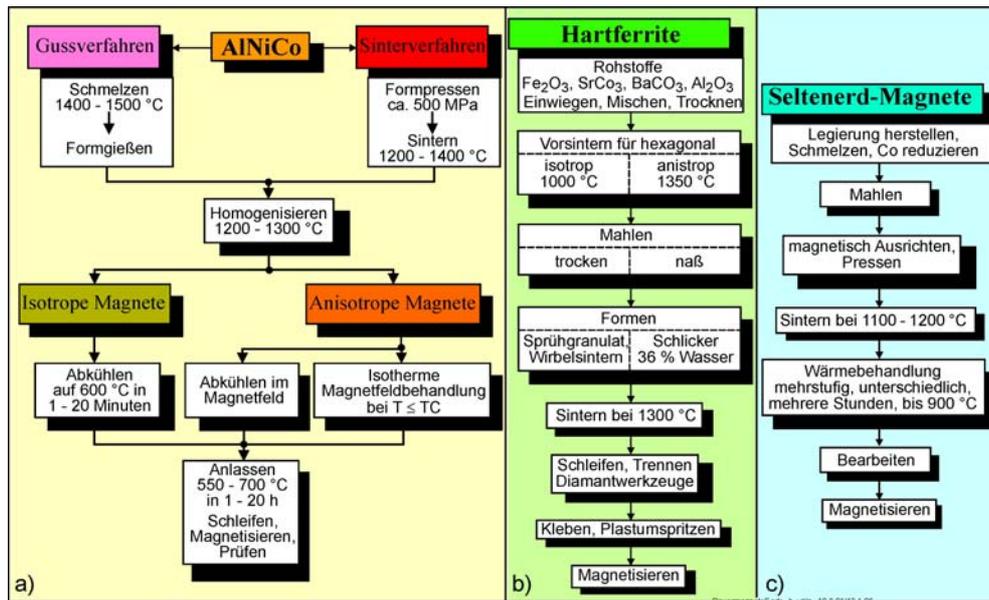
$\approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ Vorsintern (= Kalzinieren) \Rightarrow unter Luftzutritt $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ oder $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ mit CO_2 -Abgas

Mahlen zu Körnern $\varnothing \approx 0,5 - 1 \text{ } \mu\text{m}$ (Einbereichsteilchen), weitgehend isotrop, Abschluss Sintern, Magnetisieren

Ende 70er Jahre Seltenerd-Legierungen

z.B. Sm (Samarium), Nd (Neodym), u.a. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Nd, SmCo_5 , Sm_2U_{17} (Ü = Übergangsmetall)

Legierung, Mahlen, magnetisch ausrichten, Pressen, Sintern, mehrstufige Wärmebehandlung, Bearbeiten, Magnetisieren



Weichmagnetisches Material

3 Einteilungen mit Unterklassen

Chemisch: 1. *metallisch*, u.a. Fe, Ni, Co); 2. *oxydisch* meist Keramik, u.a. Ferrite, Granate

Physikalisch: 1. *kristallin*; 2. *amorph*: Schnellabkühlung; 3. *Pulver* in Matrix eingebettet; Einbereichsteilchen, HF-Eisen

Gestalt: 1. *kompakt/massiv*: Gießen, Walzen, Pressen, Spritzen; 2. *dünne Schicht*: Aufdampfen, chemisches Abscheiden

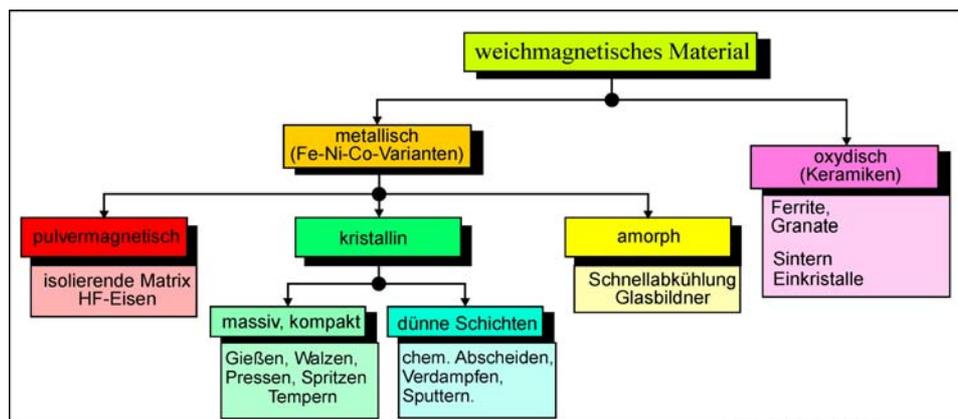
Amorphe Materialien entstanden erst 1960

Theoretische und experimentelle Gründe

Atome und Moleküle besitzen nur eine kristalline Nahordnung = kollektiver Magnetismus

Es fehlt aber Fernordnung, die Wärme ermöglicht

Ähnlich mit pulvermagnetischen Stoffen, es fehlt aber räumliche Trennung zwischen den Teilchen



Geschichte

Dauermagnete auch natürlichem Vorkommen, mindestens seit der Antike bekannt, Kompassnadel
Weichmagnetisches Material wird erst durch Anwendungen notwendig, z. B.:

- **Elektromagnet** ab 1823 durch WILLIAM STURGEON (1782 – 1850).
- **Relais** ab 1835 u.a. von JOSEPH HENRY (1797 – 1878), SAMUEL FINLEY BREESE MORSE (1791 – 1872) und CHARLES WHEATSTONE (1802 – 1875).
- **Motor** 1821 Idee von MICHAEL FARADAY (1791 – 1867), Ausführung 1825 von WILLIAM STURGEON und 1834 von MORITZ HERMANN VON JACOBI (1801 – 1874)
- **Dynamo** 1831 Idee von MICHAEL FARADAY, Ausführungen 1832 von HIPPOLYTE PIXII (1808 – 1835) und 1866 von ERNST WERNER VON SIEMENS (1816 – 1892).
- **Telefon** ab 1858 durch **Philipp Reis** (1834 – 1874)

Zunächst nur **kompaktes Eisen**

1880 **Hysterese** entdeckt EMIL GABRIEL WARBURG (1846 – 1931)

Wirbelstrom entdeckt, Zeitpunkt nicht zu ergründen

ab \approx 1880 Dynamobleche bei **Wechselstromtransformatoren** wegen **Wirbelstromverluste**

1909 Patent von HILPERT um Ferrite für HF-Spulen einzusetzen

1915 erste Spulen mit Eisenpulverkern (Ferrum reducium)

1922 Normal in einer Induktivitäts-Messbrücke von Siemens & Halske

1922 Siemens PUPIN-Spulen (bessere Qualität Telegraphen-/Telefonleitungen, MIHAJLO IDVORSKI PUPIN (1854 – 1935)

1925 Rundfunkempfänger mit Spulen, Kern sehr dünne, emaillierte Eisendrähte

1927 HANS VOGT (1890 – 1979) für Tonfilm Material Ferrocart (Firma Vogt & Co)

1930 Sendust in Japan Fe Si_{9,6} Al_{5,4} entdeckt, sehr viel später technisch benutzt

1932 Pulverkerne aus „Ferrocart“ von Firma JULIUS KARL GÖRLER produziert

1933 Siemens & Halske „Sirufer“, Steatit-Magnesia AG (Dralowid) „Draloperm“

Carbonyl-Eisenpulver von BASF (**B**adische **A**nilin- und **S**oda-**F**abriken) Ludwigshafen, später Magnetband

1960 Beginn der Nutzung von Ferrit

Pulvermagnetstoffe

Teilchengröße bestimmt wesentlich magnetische Eigenschaften, insbesondere H_C = Koerzitivfeldstärke

Es gibt kritische Größe mit Maximum (bei Fe 25 - 30 nm) \rightarrow **Einbereichsteilchen**, drunter Superparamagnetismus

Maximales H_C z.T. ausreichend für **Dauermagnete**, Steigerung durch Form-Anisotropie = ESD (elongated single domain)

Kleines H_C durch „Weichglühen“ \rightarrow isotropes Material mit extrem wenigen Fehlstellen

Herstellung magnetisches Pulver

- Historisch kugelförmiges **Carbonyleisen** aus Gasphase Fe(CO)₅ (Pentacarbonyl)
Technologie bestimmt Reinheit, Korngröße und Härte des Pulvers; üblich: $\varnothing = 1 - 10 \mu\text{m}$; $\approx 10 \mu\Omega\text{-cm}$
- **Elektrolytische Abscheidung** auf polierten **Stahlkathoden** \rightarrow Fe-Schichten $d = 3 - 6 \text{ mm}$
werden abgezogen und zerkleinert; Mahlen des spröden Materials erzeugt gewünschte Korngröße
- **Elektrolytische Abscheidung in Quecksilberelektrode** \rightarrow direkt Einbereichsteilchen mit großer Form-Anisotropie für Dauermagnete
- Aus **übersättigten Lösung** Fällung der Teilchen
- Zunächst Eisenoxypulver, das dann bei $\approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$ im **Wasserstoffstrom** zu **Eisen reduziert** wird

Herstellung Kerne usw.

Metallpulver \Rightarrow Pressmasse erzeugt mittels Mahlen, Mischen, Granulieren, Filtern und Sprühtrocknen

Partikel trennen und in **Matrix betten**; ähnlich wie beim Magnetband (s. d.), jedoch andere Forderungen

Senkung von **Wirbelstrom** \Rightarrow hoher elektrischer Widerstand: $10^6 - 10^{10} \mu\Omega\text{-cm}$ (kompakt sonst 10 - 50 $\mu\Omega\text{-cm}$)

Teilchen **stabil** bezüglich Formgebung durch Spritzen, Pressen, Sintern usw. sowie Nachbearbeitung, Zuschnitt

Beim **Sintern** eng toleriertes Glühregime notwendig, Volumen schrumpft mehrere %

Zusätzliche Verdichtungen durch **isostatisches Pressen** möglich (wichtig für Magnetköpfe)

Typische **Bindemittel**: Polymere, Kunstharze, Duroplaste, Siliconharze usw. (30er Jahre Bakelit und später Trolitul)

Früher Masse aus Pulver und Bindemittel in **dünnere Schicht auf Papierfolien**, aufeinander geschichtet und zusammengepresst

Heute fast ausschließlich **direkt in Formen** gespritzt, gepresst und/oder gesintert

Je nach angestrebtem μ und M_S ist **magnetischer Anteil** in der Masse unterschiedlich

Insbesondere hohe Energiedichte (Dauermagnete) erfordert großen Füllfaktor

Feines Eisenpulver ist stark pyrophor (entzündet sich durch Luftsauerstoff) \Rightarrow **Schutzatmosphäre** notwendig

Metallisch-kristallines Material

Griechisch **kryos** Eiskälte, Frost und **krystallos** Eis, Bergkristall

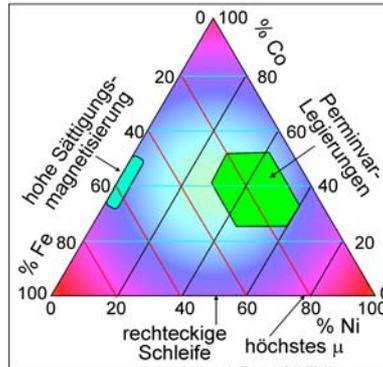
1. **Dünne Schichten** nicht als Halbfabrik auf Vorrat hergestellt, aber Nachbehandlung möglich, \Rightarrow s. Magnetbänder

2. **Kompaktes Material**

Hier nur kompaktes, magnetisch **weiches Material** (= kleines H_C) → kleine Anisotropie, **groß** M_S und μ
 Dafür wichtig **Sputtern** und **Aufdampfen**, seltener mit **Abscheiden**; ermöglichen gute **Maßhaltigkeit**
 Mit Schichtdicke wächst $M_S \Leftrightarrow$ dünn → kleine **Wirbelstromverluste**
 Stoffe: Fe, Ni, Co + sowie Legierungen, u.a. FeNi, FeSi und FeCo, auch FeC-, FeAl-, FeSi-, FeAlSi- und FeCrAl-Legierungen

Vier Legierungsgebiete bei FeNiCo

1. großes μ_a , 2. großes M_S , 3. rechteckige Schleife (Fe₅₀Ni₅₀: Ferritkernspeicher), 4. Perminvar (ungewöhnlicher Hysterese)

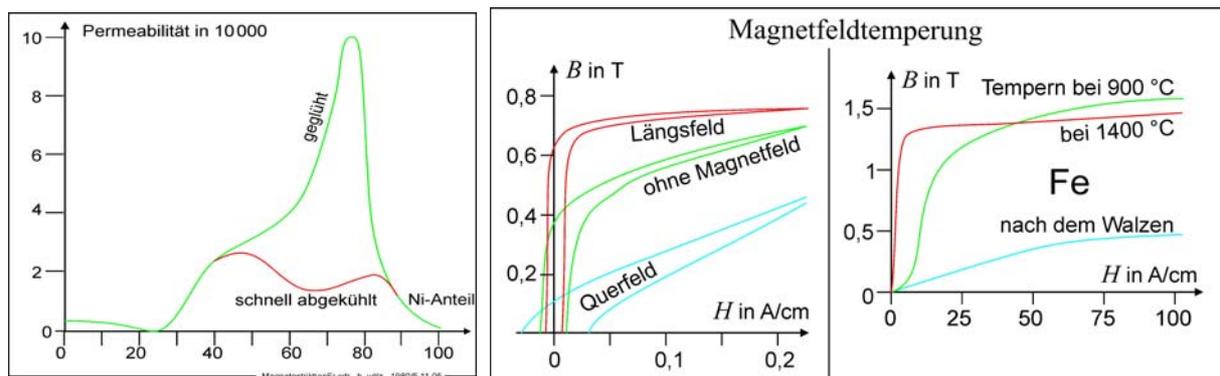


Höchste Anfangspermeabilität

Maximum bei Fe₂₀Ni₈₀, jedoch wegen hohen Ni-Gehalt sehr teuer.
 Name **Permalloy** ursprünglich für Fe₂₂Ni₇₈ reserviert; heute für alle Verbindungen mit 40 bis 100 % Ni
 Meist **zweite, niedrigere Maximum** ≈ 50 % Ni (s. Daten Fe-Ni-Achse auch bei Magnetostriktion)

Großes μ_a muss durch **nachträgliches Glühen** erzeugt werden
 Beseitigt die vielen Störstellen vom z.B. beim Walzen der Bänder, die H_C vergrößern und Anisotropie erzeugen
 Meist 900 - 950 °C für 1 h unter Schutzatmosphäre (oft H₂ explosionsgeschützte Öfen), vielfach Wirbelstromerhitzung
 Danach langsam mit etwa 100 K/h abkühlen → erneut auf 600 °C erwärmen
 Schließlich mit ≈1500 K/min auf Kupferplatte abkühlen
 Hohes μ_a geht bei mechanischen Beanspruchungen, Bearbeitungen wieder teilweise verloren
 Daher werden endgültig geformte, bearbeitete Materialien (u.a. geklebte Blechpakete) **geglüht**
 Nachbearbeitungen (z.B. Magnetköpfe) müssen mit größter Sorgfalt erfolgen
 Glühen (keine Anisotropie) und Magnetfeldbehandlung (Anisotropie) ändern sich auch B_S und Hysterese-Schleife

Fe-Ni-Co-Legierungen besitzen niedrigen ohmschen Widerstand, nickelarme (35 – 40 % Ni) etwas höher
 Senkung **Wirbelstromverluste**: Zusätze Mo, Cr oder MoCu, ermöglichen teilweise auch μ_a bis zu $\approx 10^5$.
 1931 **Mu-Metall** als Weiterentwicklung von Permalloy, später **Supermalloy** Ni₇₉Fe₁₅Mo₅Mn₀₅; **≈Molybdän-Permalloy**

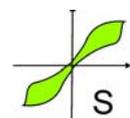


Höchste Sättigungsflussdichte

Fe hat höchste von 2,16 T (=Vs/m²); wird durch Zusatz von Co noch etwas gesteigert, Maximum ≈35 % Co mit 2,5 T
 Weiter betragen $T_C \approx 400$ °C und $H_C \approx 0,16$ bis 0,40 A/m. Der elektrische Widerstand ist mit 65 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ etwa viermal so hoch wie bei Permalloy.

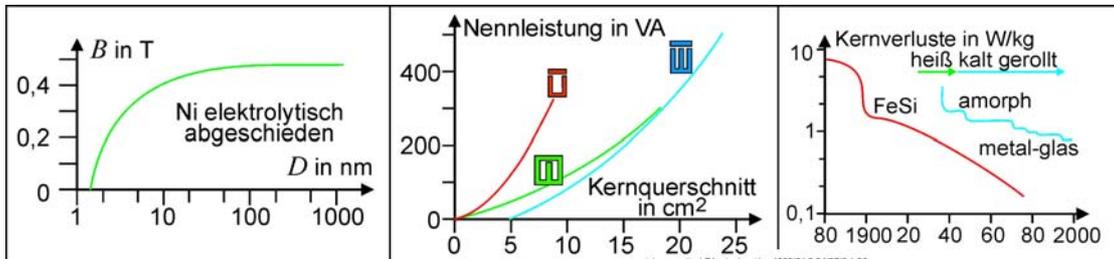
Perminvar

Ungewöhnliche Hysterese-Kurve, dadurch geringe Ummagnetisierungsverluste
 Geringe Magnetostriktion ⇒ entfällt störendes Brummen von Transformatoren



Sendust

1932 Japanischer Metallurge H. MASOMUTO fand es in Nähe des japanischen Ortes Sen; *englisch* Sendust = Staub aus Sen
 1997 technologisch hergestellt für Magnetköpfe: $\text{FeAl}_{0,62}\text{Si}_{5,38}$
 Groß: Abriebfestigkeit (Härte) und M_s ; klein: H_C , Magnetostriktion. Leitfähigkeit; μ_a 25 - 250
 Pulver bei 80 °C gewalzt → Flocken $\approx 25 \mu\text{m}$ dick, $\varnothing \approx 100 \mu\text{m}$ besitzen
 ⇒ zu Massekernen heiß verpresst, dann gesintert bei 400 – 500 °C, Druck $\approx 500 \text{ kg/cm}^2$ (hohe Dichte, 0,1 % Poren)
 Formgebung durch speziellen Schleuderguss.
 Sprödigkeit ermöglicht leichtes Zerkleinern, Präzise Bearbeitung nur mit Diamantwerkzeugen



Herstellung von Halbfabrikaten

Werden wegen vielfältiger Anwendungen und Bauformen zunächst (auf Vorrat) hergestellt

- **Form-, Massivteile** (kompakt): in Formen Gießen heiß-flüssiges Material oder Sintern und Pressen von Metallpulver.
- **Bleche und Bänder:** Schmieden, Ziehen, Walzen, Kalt-, Warmverformung von kompaktem Material (s. Goss)
- **Sonderformen:** Drähte, Abschirmschläuche, gitterförmige Netze usw.
- Für **Speichertechnik** haben Halbfabrikate **kaum Bedeutung**, evtl. breite Folien ⇒ Ausstanzen von Floppy

Goss-Verfahren

Patent von N. P. GOSS: vorwiegend Fe mit 3 % Si; 2,4 mm dickes Blech (möglich 0,7 bis 4,5 % Si)

Wird bei 800 bis 950 °C geglüht ⇒ Oberfläche durch Beizen oder Sandstrahlen entzundert

Gewalzt auf 0,75 mm ⇒ kurze Glühung 875 bis 1025 °C ⇒ zweites Walzen auf Endmaß von 0,35 mm

In reinen, trockenen H_2 Schlussglühung bei 1000 – 1200 °C, bewirkt Rekristallisation mit typischer **Goss-Textur**
 würfelförmige, kristalline, ausgerichtete Mikrobereiche = anisotrope Orientierung
 Walzrichtung: großes μ_a , kleine Hysterese- und Wirbelstromverluste, $M_s \approx 1,9 \text{ T}$

Allgemein: **Anlassglühung** meist zu Beginn und nach bestimmtem Zeitregime aufweisen
 Auch unter H_2 -Atmosphäre in explosionsgeschützten Öfen, Häusern

Varianten: Zulegieren von 35 – 50 % Co steigt M_s bis 2,4 T = teures Material, nur Sonderanwendungen

Anmerkungen: Textur (*lateinisch textura* Gewebe)

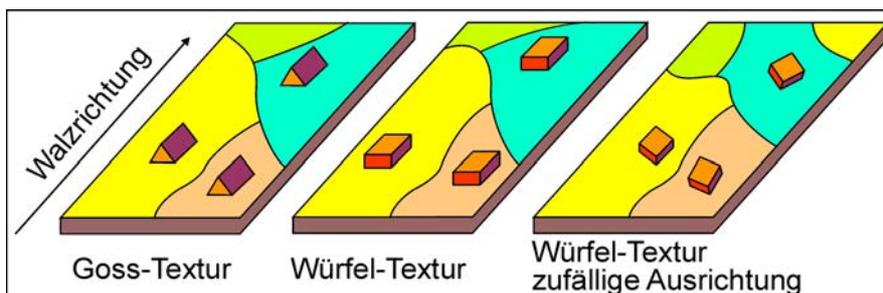
Metallkunde = erzwungene Vorzugsorientierung sonst ungeordneter Kristallite. Erfolgt u. a. beim Drahtziehen, Blechwalzen und Erstarren von Schmelzen

Kristallographie = Gesamtheit der Orientierungen der Kristallite eines vielkristallinen Festkörpers

Abweichend davon **Gefüge** = an Schliften mikroskopisch erkennbare Feinstruktur = regellos angeordnete Kristallite, z. B. Globulite, Dendriten und Sphärolithe

Daten von Goss-Blechen

Eigenschaft	Walzrichtung	Querrichtung
Maximalpermeabilität	5500	8000
Koerzitivfeldstärke in A/m	6,5	22
Remanenz in T (=Vs/m ²)	1	0,18
Flussdichte bei 160 A/m in T	2	1
Verluste in W/kg	0,88	2,2



Frequenzgrenze und Wirbelstrom

Magnetisches Wechselfeld bewirkt in jedem durch Selbstinduktion einen Wirbelstrom

Er bewirkt Verluste und erzeugt (unerwünschte) Wärme

Sie ist bei Spulen, Transformatoren, Magnetköpfen usw. störend

Wird bei Induktionsöfen, Wirbelstrombremsen, Messgeräten (z. B. Wechselstromzähler), Prüf- und Messmethoden genutzt

Für μ_a tritt durch Wirbelstrom Grenzfrequenz f_w auf, der Abfall erfolgt mit $1/\sqrt{f}$

Im magnetischen Material fließen Wirbelströme senkrecht zur Magnetisierung = Richtung Blechdicke

Mit dem spezifischen Widerstand ρ gilt

$$f_w = \frac{4 \cdot \rho}{\pi \cdot \mu_a \cdot d^2}$$

Höchste benutzte Frequenz bestimmt so die zulässige Blechdicke d

Deshalb Transformatoren, Spulenkern, Kerne der Magnetköpfe usw. vielen dünnen, voneinander isolierte Bleche

Skineffekt - Eindringtiefe

Ein äußeres Magnetfeld dringt bei hohen Frequenzen (>10 MHz) nicht mehr tief in einen Leiter ein

Der elektrische Strom fließt hauptsächlich an der Oberfläche = Skin-Effekt (*englisch skin* Haut, Fell)

Rechnung ist kompliziert, erfordert auch Bessel-Funktion vorkommt

Für einen Draht-Radius R , Stromdichte i gilt mit Konstanten i_0 und für den Radius r

$$i(r) = -i_0 \cdot e^{-c \cdot [1 - (r/R)^4]}$$

Bei der **Eindringtiefe** δ ist die Stromdichte auf $1/10$ abgefallen, sie bestimmt u. a. optimale Dicke einer Abschirmung

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad \text{bzw. als Größengleichung} \quad \frac{\delta}{\text{mm}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{\rho / \mu \Omega \cdot \text{cm}}{\mu_r \cdot f / \text{Hz}}}$$

Materialeigenschaften von Blechen, auch bei Abschirmungen.

Werkstoff	ρ [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	μ_r	δ [m] bei 50 Hz	δ [mm] bei 100 kHz
Ni ₅₀ Fe ₅₀	45	5000	0,7	0,015
Ni ₇₆ FeMoCu	55	30000	0,3	0,007
Co ₅₀ Fe ₄₈ V ₂	35	1000	1,3	0,03
Stahlblech, verzinkt	10	250	1,4	0,045
Co ₆₆ Fe ₄ MoSiB, amorph	130	10000	0,6	0,015

Amorphes Material

Griechisch *morphe* Form, äußere Gestalt, Ansehen; *a-* ohne

Amorphe Materialien sind, wie z.B. Glas lange bekannt

Zustand = makroskopische Isotropie mit kristalliner Nahordnung ohne Fernordnung \Rightarrow keine Kristallachsen und Anisotropie

Beugungsuntersuchungen mit Röntgen-, Neutronen- oder Elektronenstrahlen liefern keine scharfen Reflexe wie bei Kristallen

Amorphe Festkörper sind thermodynamisch metastabil \rightarrow Erwärmen Nähe Schmelzpunkt, langsames Abkühlen \rightarrow kristallin

Anwendungen: Ovonic-RAM und wiederbeschreibbare CD, DVD, Blu Disc

Erst 1960 zeigte A. I. GUBANOW theoretisch ist amorpher Magnetismus möglich

Ab 1977 werden amorphe Magnetmaterialien hergestellt, notwendig **extrem schnelle Abkühlung 10^3 bis 10^{10} ; 10^{14} K/s**

Flüssig auf tiefgekühlte Trommeln, Phasenumwandlungen, Entmischungen (= Seigerungen) beim Erstarren unterdrückt

Hinzufügen von „Füllmaterial“ (Glasbildner, Matrix) \Rightarrow nur sehr kleine, voneinander getrennte (magnetische) Kristallite

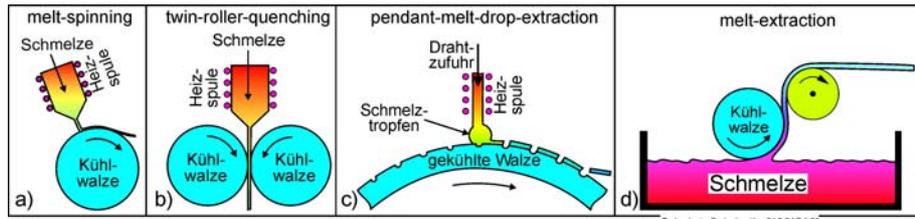
Magnetisches Materialien nur ≈ 80 Volumen-Prozent.

Vier Verfahren

- **Melt-spinning** (*englisch* \approx Schmelze + Spinnen) flüssige Material aus Flachdüse auf rotierenden, gekühlten Kupferzylinder;
- ca. 3000 UpM und Umfangsgeschwindigkeiten von 10 bis 100 m/s \rightarrow . Bänder: 10 bis 100 μm dick, bis zu 5 cm Breite
- **Twin roller quenching** (zwei Rollen + abschrecken) flüssige Material zwischen zwei rotierende, gekühlte Walzen gepresst
beidseitig glatte Oberflächen, Material verdichtet. Abstand der Kühltrommeln bestimmt Schichtdicke
- **Pendant-melt-drop-extraction** (hängende Schmelze + tropfender Auszug) = PMDE erzeugt Kurzfasern
- **Melt-extraction** Material in geheizten Tiegel flüssig und erstarrt an rotierenden Kühlwalze, wird mitgerissen

Inzwischen auch nanokristalline und spezielle feinstrukturierte Schichten

Z.T. Selbstorganisation bei der Herstellung. Extrem kleine Kristallite nur z. T. superparamagnetisch



Heute sehr viele **Anwendungen und Materialien**

Meist $T_{70...85}M_{15...30}$, T = Übergangsmetall, wie Fe, Co, Ni, Cr und M ein Metalloid (Glasbildner) wie B, P, C, und Si
 Z. B. $(FeCo)_{80}M_{20}$, $(CoNi)_{80}M_{20}$, $(FeCo)_{80-x}T_xP_{10}B_{10}$; spezieller $Fe_{80}B_{20}$, $Fe_{70}P_{20}C_{10}$, $Co_{58}Ni_{10}Fe_5(Si, B)_{27}$
 Mit weiteren Elementen: $Fe_{39}Ni_{39}(Mo, Si, B)_{22}$, $Fe_{95}Au_5$, $Fe_{40}Mo_{40}B_{20}$, $Bi_2Fe_4O_9$, CoP, CoFe, CoZr, CoNbZr und FeZr
 Oft auch seltene Erden, wie Hf, Sm, Gd, Tb und/oder Nb: TbFe, SmCo₅, Nd-Fe-B, GdCo usw.
 Auch Verbindungen mit F und Cl: z.B. FeF_2 , $FeCl_2$

Spezielle Zusammensetzungen ermöglichen, **sonst kaum oder gar nicht erreichbare Eigenschaften**, z. B.:

- **magnetisch:** hohes μ_a , kleines H_C , keine Anisotropie, geringe Verluste, vorgegebene Hysterese-Schleife
- **mechanisch:** hohe Härte und Zugfestigkeit, kleiner Elastizitäts-Modul, Biegewechselfestigkeit
- **elektrisch:** hoher spezifischer Widerstand, nur wenig von der Temperatur abhängig
- **chemisch:** günstiges Korrosionsverhalten.

Etwa 1980 Label gegen den Ladendiebstahl: amorphe Bänder 3 bis 10 cm lang, 2 mm breit und 0,2 mm dick
 Werden durch eine impulsartige elektromagnetische Welle von etwa 60 kHz in Resonanz angeregt
 Infolge Magnetostraktion strahlen sie anschließend die doppelte Frequenz ab, wird durch große Spulen an Ausgängen erfasst

Oxydisches Magnetmaterial (Ferrit)

Begriff nicht ganz korrekt: Auch Magnetmaterial, das Sauerstoff enthält und hier nicht eingeordnet wird (z. B. amorphes)
 Historisch bedingt = Stoffe \approx Keramiken: durch Sintern und Brennen hergestellt
 Oxydisches Magnetmaterial vorwiegend schwarz \Rightarrow „schwarze Keramik“

1897 CH. E. GUILLAUME (1861 - 1938) Patent NiFe-Legierung „Invar“ mit niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und besseren magnetischen Eigenschaften als Ni und Fe.

Er stellte außerdem fest, dass Metalllegierungen (heutige Ferrite) sehr gute magnetische Eigenschaften besitzen

1909 verwendet HILPERT Bezeichnung **Ferrit** (*lateinisch ferrum* Eisen), untersuchte Eignung für Hochfrequenzspulen, drei Patenten für Spulenkern

Ab 1930 in der Industrie umfangreiche Untersuchungen und Entwicklungen \Rightarrow technischer Ferrite mit Spinell-Struktur

In der Natur Ferrite vor allem als Magneteisenstein $FeO \cdot Fe_2O_3$

Erste technische Ferrite ersetzen FeO durch gleichwertiges Metalloxyd, wie MnO, ZnO, MgO, CuO, CoO oder NiO

Zweiter Weltkrieg verzögerte praktischen Einsatz

1947 Firma Hescho „Manifer“ = erster brauchbarer Kernwerkstoff auf Ferritbasis heraus, dann Philips „Ferroxcube“ (bereits 1941 vorhanden), Siemens „Sirufer“, Vogt & Co. „Ferrocarit“ und Dralowid „Keraperm“

Drei **wichtige Eigenschaften:** hoher **elektrischer Widerstand**, $\rho = 10^4$ bis $10^{12} \Omega \cdot cm$ \rightarrow kaum Wirbelstromverluste, hohe **Korrosionsbeständigkeit** und hohe **Anfangspermeabilität** bis zu $\mu_a = 15\,000$

Varianten

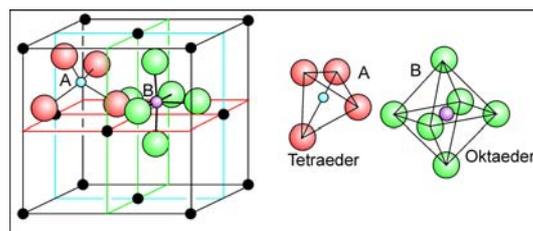
Flächenzentrierte kubische Ferrite

Spinell-Struktur (Ferrit-Spinelle, Spinell-Ferrite) und **weichmagnetisch**

Zusammensetzung $MO \cdot Fe_2O_3$, M zweiwertiges Metall-Ion, wie Fe, Mn, Ni, Zn usw.

A, B meist entgegengesetzten Spin. 2-wertige Fe zuweilen (teilweise) ersetzt durch 3-wertiges Cr

Magnetit für Speicherung $Fe_2O \cdot Fe_2O_3 = Fe_3O_4 \Rightarrow Fe^{2+}$ und Fe^{3+} an den getrennten Plätzen



Mn-Zn-Ferrite ($Fe_2O_3/ZnO/MnO$): $M_S \approx 0,7$ T; $f_g \approx 1$ MHz, auch höheren Leistungen

Ni-Zn-Ferrite ($Fe_2O_3/ZnO/NiO$) Anwendungen $f_g \approx 1$ GHz mit $\mu_a \approx 10^3$

Mg-Mn-Ferrite ($Fe_2O_3/MgO/MnO$): hoher spezifischer Widerstand, z. T. rechteckige Hysterese-Kurve

Hexagonalen Ferrite

überwiegend $MO \cdot 6 \cdot Fe_2O_3$; M meist Ba, Sr oder Pb bzw. eine Mischung aus ihnen, meist **hartmagnetisch**,
Typisch $BaFe_{12}O_{19} = BaO \cdot 6 Fe_2O_3$ für Magnetbänder und Disketten

Spezielle Ferrite

rechteckige Hysteresis-Kurve: $Mg_{0,45}Mn^{2+}_{0,55}Mn^{3+}_{0,23}Fe_{1,77}O_4$ für Kernspeicher und Transfluxoren

Magnetostruktive Ferrite sind für Sonderanwendungen

Granate $3Y_2O_3 \cdot 5X_2O_3$, Y = Yttrium oder ein Selenerdmetall z.B. Gd, Sm, Tb, Dy und X für Fe, Al oder Ga

Nur mit Fe magnetisch, $5 \cdot Fe_2O_3 \cdot 3 Y_2O_3$, oder $Me_3Fe_5O_{12}$, z.B. Yttrium-Eisen-Granat (YIG = yttrium iron garnet),

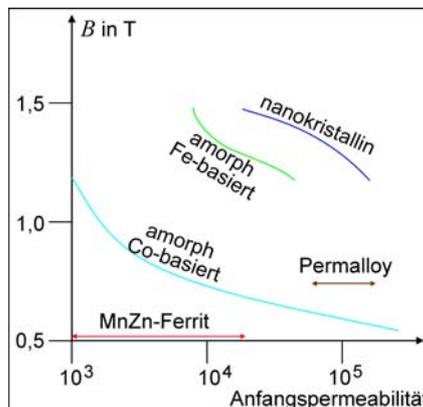
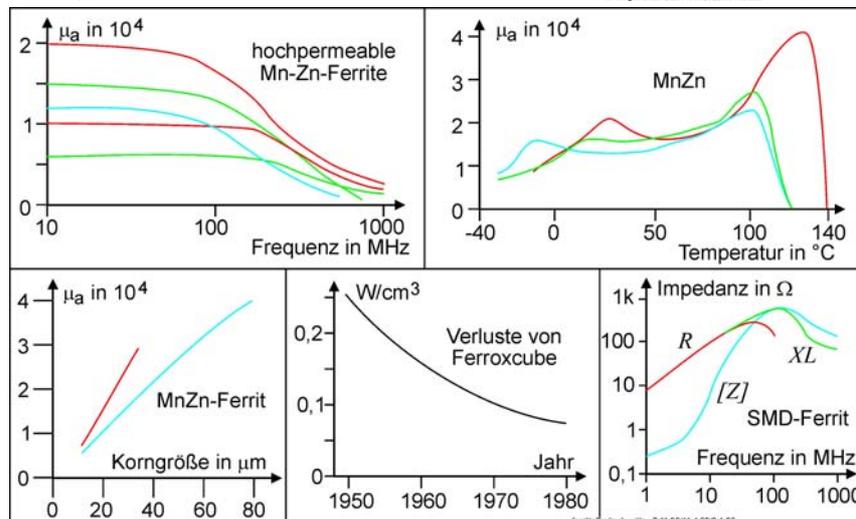
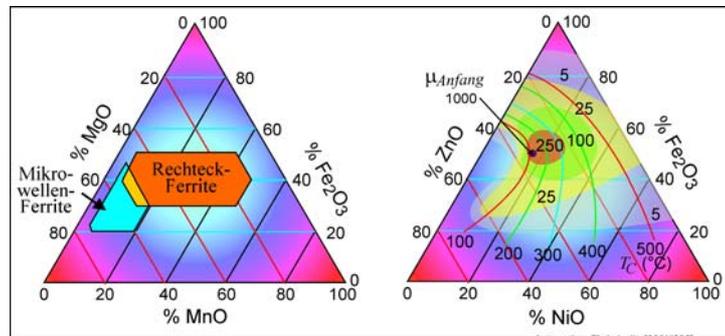
wichtig auch für **Mikrowellen**; auch für Blasenspeicher = **Bubbles** genutzt

Einkristalle aus GGG (Gadolinium-Gallium-Granat) $Gd_3Ga_2(Al_3O_{12})$

YAG (Yttrium-Aluminium-Granat) gemäß $Y_3Al_2(AlO_4)_3$ **Laser**-Kristalle wichtig

Anmerkung Granat (lateinisch *granum* Korn zu (*lapis*) *granatus* kornförmiger Edelstein) heute vielfältig angewendet.

- Hartes, stark glänzendes, meist braunrotes Mineral (beliebter Schmuckstein)
- Garnele (flämisch grenat), die u.a. im Nordatlantik vorkommt.
- In Österreich umgangssprachlich für einen Falschspieler.
- Vielzahl von (synthetischen) Silikat-Mineralen mit der Summenformel $X^{+2}_3Y^{+3}_2(SiO_4)_3$.
ferrimagnetisch, X^{+2} Metall-Kationen, wie Ca, Mg, Fe^{2+} oder Mn, Y^{+3} 3-wertiges, wie Al, Fe^{3+} , Ti, V oder Cr
kristallisieren meist kubisch und sind recht hart (6 bis 7,5) → Schleif- u. Poliermittel



Einige *technisch genutzte kubische Ferrite*. Der Barium-Ferrit besitzt eine hexagonale Struktur.

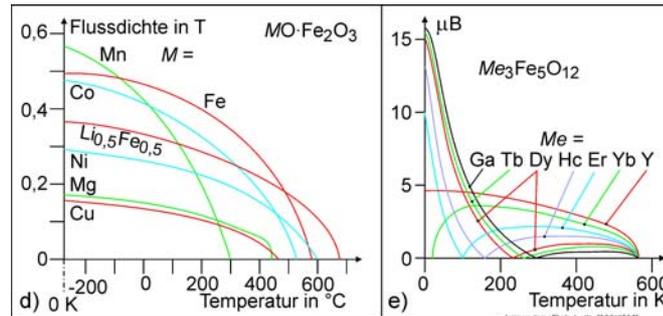
Ferrit	magnetische Flussdichte (T)	Curie-Temperatur (°C)	spezifischer Widerstand (Ω.cm)
FeO·Fe ₂ O ₃	0,05 - 0,6	578 - 570	10 ³
MnO·Fe ₂ O ₃	0,03 - 0,6	210 - 300	10 ⁴
NiO·Fe ₂ O ₃	0,03 - 0,35	590 - 585	10 ⁴
CuO·Fe ₂ O ₃	0,03	455	
MgO·Fe ₂ O ₃	0,015	310	
BaO·6·Fe ₂ O ₃	0,41	450	

Besonderheit Seltenen Erden

= Erdmetalle = Lanthanoiden besitzen vielfach zwei typische Temperaturen

Bei tiefen Temperaturen sind sie ferromagnetisch, ab T_1 antiferromagnetisch, ab T_2 paramagnetisch

Wird zuweilen auch *Metamagnetismus* genannt, auch bei Verbindungen, wie MnAs, MnBi, MnAu₂, FeCl₂ und CoCl₂



Typische Temperaturen einiger Seltenen Erden

Stoff	T_1 in K	T_2 in K
Erbium	85	179
Dysprosium	20	133
Holmium	20	85
Thullium	22	60
Terbium	219	230

Grenzfrequenz Ferrite

Bei *Ferriten*, *Sendust* usw. ist ρ sehr klein, daher bestimmen nicht Wirbelströme die höchste Frequenz.

Es tritt aber ein gyromagnetisches Moment γ (kreiselmagnetischer Resonanzeffekt, Spin-Relaxation) auf:

$$\gamma = M / \zeta.$$

M = magnetische Moment, ζ = mechanischer Drehimpuls (Abfall nicht mit $1/f$), sondern gemäß

$$f_p = -0,1 \cdot \gamma \cdot B_S \cdot \mu_a.$$

Materialdicke nicht enthalten. Näherungsweise gilt für die meisten magnetischen Stoffe: $\gamma \approx -210$ in kHz·A/m

Bei 100 MHz $\rightarrow \mu_a = 100$ und bei 10 GHz $\rightarrow \approx 1$ erreicht

Bei *MnZn-Ferriten* zusätzlich Volumenresonanz in der Nähe der Grenzfrequenz $\rightarrow \mu_a$ steigt wieder etwas an

Ursache: Wechselwirkung zwischen der Permeabilität μ_a und $\epsilon_a \approx 50\,000$

$$f_r = \frac{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{d \cdot \sqrt{\mu_a \cdot \epsilon_a}}.$$

Technologischer Ablauf

Pulverherstellung

- Aus kompaktem Material mittels Mahlen, Mischen, Granulieren, Filtern und Sprühtrocknen erzeugt
- Mischungen aus Oxyden oder Carbonaten, z.B. NiO + Fe₂O₃ NiFe₂O₄ bei 1 200 - 1 400 °C) reaktiv aufbereitet, zerkleinert und fein gemahlen

Formbare Masse durch Zugabe von Flüssigkeit

Gießen: flüssiges Material wird in vorbereitete Formen gegossen oder mit Druck *gespritzt*

Speziell Schleudergussverfahren Schwerkraft durch Beschleunigung zusätzlich verstärkt dichteres Material

Pressen: zähflüssige Masse aus Metallpulvern, organischen Bindemitteln und einer Flüssigkeitszugabe (Strang- oder Magnetfeldpressen)

Sintern bei 1 000 bis 1 400 °C, eng tolerierten Glühregime, genau definierter Sauerstoffpartialdruck

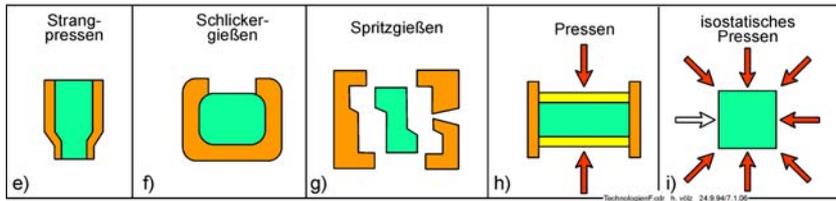
Material schrumpft um 12 bis 18 %, dennoch gute Maßhaltigkeit möglich

Endbearbeitungen für optimale Oberflächen, Passungen oder genaue Formtoleranzen

Porenarm und Dichte $\approx 99,8\%$. z. B. Magnetkopfmaterial aus Mn-Zn- und Ni-Zn-Ferriten

\Rightarrow **Heißpressen**, lang andauerndes autoklaveninternes und uniaxiales **Textur-Sintern** oder **isostatisches Pressen**

Einkristallzüchtung nach dem BRIDGMAN-Verfahren für hochwertige Magnetköpfe, Mn-Zn-Ferrite



Speichermaterial, -medien

Es gab und gibt eine Vielzahl magnetischer Speicher. Sie sind immer und auch heute noch wesentlich

Durch die Hysterese entfällt die Energiezufuhr im Speicherzustand

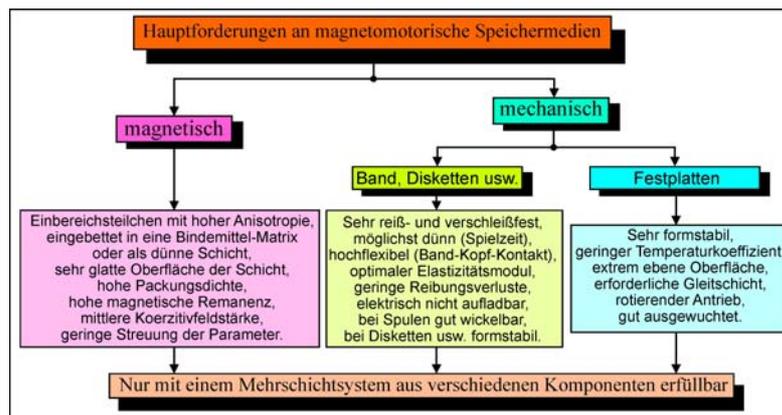
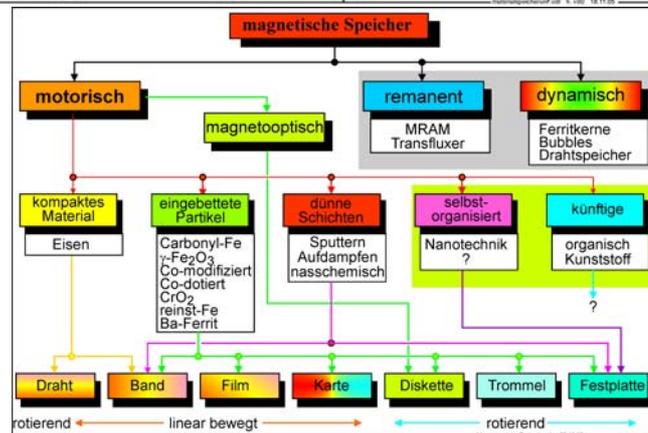
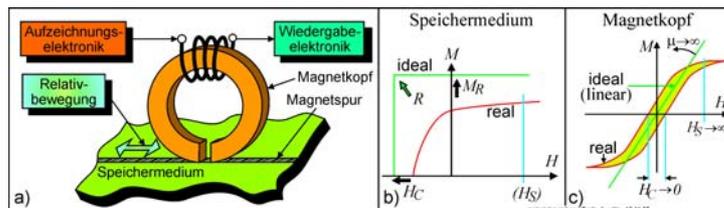
Fast ausschließlich liegt *magnetomotorische* Speicherung in vielen Varianten vor

Komponenten, ebenfalls fast ausschließlich magnetisch:

- 1) bewegtes flächiges **hartmagnetisches Speichermaterial**
Varianten: **kompakt** (Draht), **Partikel**, **Dünne Schichten** (aufgedampft); (Zukunft?)
zusätzliche Forderung: **mechanisch hinreichend stabil** für Bewegung
- 2) **weichmagnetische Magnetköpfe**, eventuell zusätzlich bewegt
- 3) **Antriebe**: Motoren und Aktoren (hart- und weichmagnetisch)

Wichtig sind Magnet-Bänder, -Karten, -Filme, Trommelspeicher, Disketten, Festplatten und magnetooptische Speicher für Daten-, Audio- und Videospeicherung

Ausnahmen waren nur Kernspeicher (70er), Bubbles (80er) und künftig könnten es MRAM sein



Geschichte

Beginn

1888 OBERLIN SMITH (1840 – 1926) Technisch nicht realisiert: kompakte Eisenspäne in **Baumwollfäden**

1898 VALDEMAR POULSEN (1869 - 1942) **kompakte Eisendrähte**. zunächst $\varnothing \approx 2$ mm, schrittweise $\rightarrow 80 \mu\text{m}$

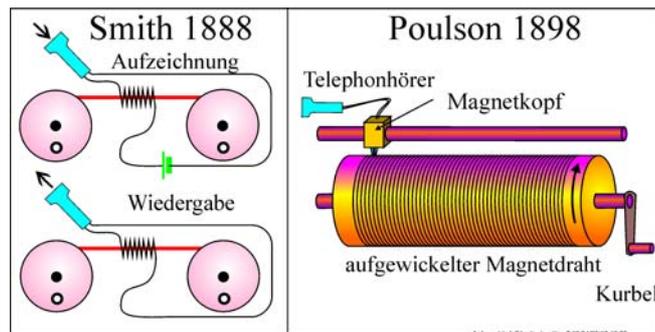
1900 Weltausstellung Paris: Grand Prix

ab 1930 Drahttongeräte breiter Einsatz in Diktieretechnik, wichtig Röhrenverstärker

später in Sendeanstalten des Rundfunks. Im Heimbereich bis in die 50er Jahre

Sonderanwendungen wesentlich länger. Kleinheit für Spionage, Feuerfestigkeit Havarierecorder, Luftfahrt

Kompaktes Band CURT STILLE (1873 – 1957), nur geringe Anwendungsbreite.



Magnetband

20.12.1927 U.S. Patent 1 653 467 JOSEPH. A. O'NEAL „Record for Reproducing Sound Tones and Action“

1927 Realisierung durch FRITZ PFLEUMER (1897 - 1945), ohne Kenntnis von O'NEAL

31.12.1928 PFLEUMER DRP 500 900 „Lautschrifträger“ (Deutsches Reichspatent).

Breite 8 mm bis 5 cm, z. T. sogar erwähnt, er sei von üblichen Konfetti-Schlangen ausgegangen

Stahlstaub mit handelsüblichem Klebstoff befestigt, erfolgreiche Demonstration vor Journalisten (Cuttern)

300 m, 20 Minuten, Bandgeschwindigkeit bei 50 cm/s; 300 m Rolle $\approx 1,50$ Mark, gleichlanger Draht ≈ 250 Mark

Herbst 1930 verhandelte PFLEUMER mit AEG Übernahme der Schutzrechte: Vertrag vom 28.12.1932

1935 Entwicklung begonnen, 6,5 mm Breite, 30 μm dicke Unterlage aus Acetylzellulose

20 μm Magnetschicht Carbonyleisen in Nitrozellulose eingebettet

1935 Berliner Funkausstellung 3-Motoren-Technik und SCHÜLLER-Magnetkopf „Magnetophon“, 76 cm/s, 50 bis 10 000 Hz

Bereits 1935 verkaufte IG Farbenwerk Ludwigshafen (heute Badische Anilin- und Soda-Fabrik = BASF) 50 000 m „Tonband“.

20.12.1936 bewirkt Siemens & Halske Reichsgerichtsentscheidung zur Nichtigkeit des Patents, Details [Thiele]

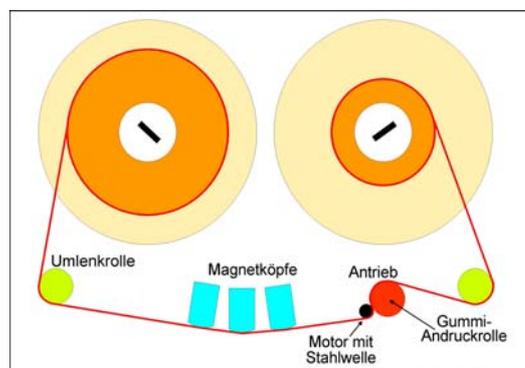
1940 HF-Vormagnetisierung durch BRAUNMÜHL und WEBER

ab 1950 Heimtonbandgeräte, Computeranwendungen

1964 Idee zum Metalldünschichtband in der DDR

1976 erster Einsatz in Kosmospeichern (DDR)

1995 kommerzielle Nutzung bei Videorecordern Typ VCR



Trommeln, Disketten und Platten

1933 G. TAUSCHEK Patent für einen elektromagnetischen Trommelspeicher an

1943 DIRKS Patent für Magnettrommelspeicher

1945 ECKERT und MAUCHLY EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) mit Trommeln/Scheiben

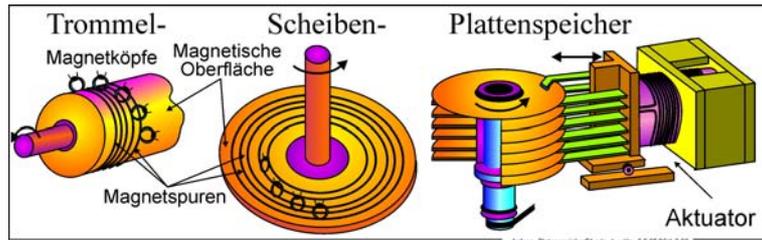
1945 GERHARD DIRKS baut Magnettrommel- und Magnetplatten-Speicher

1947 H. BILLING und A. D. BOOTH konzipieren unabhängig Magnettrommelspeicher

bis in 60er Jahre Trommelspeicher im Einsatz

- 1957 IBM liefert RAMAC (Random access method of accounting and control) mit Plattenspeicher IBM 350 5 MByte
- 1961 Wechsellattenspeicher mit aerodynamisch gelagertem Kopf, IBM
- 1971 IBM: Dünnfilntechnologie für Plattenspeicher
- 1973 IBM Festsplattenspeicher „Winchester“ 3340
- 1979 Integrierte Magnetköpfe bei IBM im 3370
- 1991 IBM MR-Magnetköpfe für Festplatten
- 1997 GMR-Köpfe

- 1960 AL SHUGART Aufzeichnung auf magnetisch beschichteten Scheiben, Vorläufer vom Floppy
- 1967 IBM 8-Zoll-Floppy
- 1972 5,25-Zoll-Diskette
- 1982 Beginn 3,25-Zoll-Diskette vor

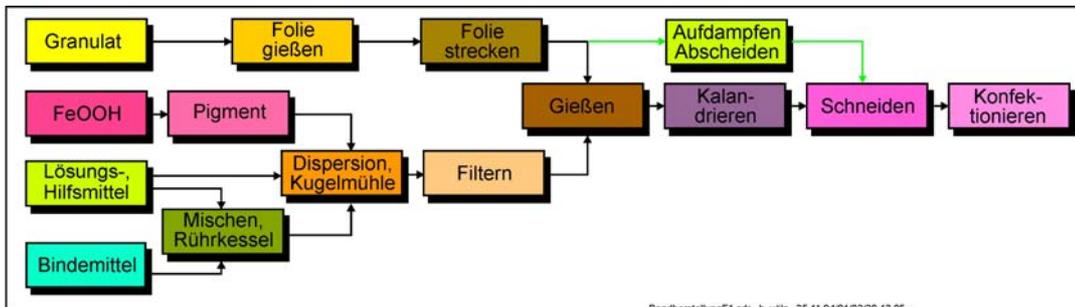


Magnetband

Magnetbänder müssen vor allem magnetischen und mechanischen Forderungen genügen. Mechanische werden vor allem durch die Unterlage, **magnetische** durch die Magnetschicht erfüllt **Zusätzliche** Forderungen erfordern weitere Komponenten, u.a. Gleit-, Schutz-, Haft- und Elastizitäts-**Schichten**
 In der Anfangszeit existierte zeitweilig kompaktes „**Masse-Band**“ → Magnetteilchen gleichmäßig in Unterlage eingebettet
 Probleme: geringe magnetische Packungsdichte und mechanischen Reißfestigkeit wird nicht weiter behandelt

Am wichtigsten immer noch **Partikel-Band** (*lateinisch particula* Teilchen)
 Spezielle **Magnetteilchen = Partikel** in Bindemittel (-Matrix) werden eingebettet auf Unterlage gebracht
 Ähnlichkeit zur Farbstoffindustrie Partikel = **Pigmente** (*lateinisch pigmentum* Färbestoff; Würze)
 Missverständlich ist Bezeichnung **Magnetit** für die Magnetpartikel

Sondertechnologie metallisches **Dünnschichtband** (s. u.)
 Neu **Senkrechtspeicherschichten**, Künftig evtl.: **Nanotechnologien** und **selbstorganisierter Schichtaufbau** (Festplatten)



Unterlage, Folie

Ursprünglich kompakte Fe-Legierungen: POULSEN verwendete ab 1898 gezogene Drähte
 Zwischenzeitlich um 1920 vor allem durch STILLE auch gewalzte Bänder
 PFLEUMER benutzte erstmalig eine Unterlage, auf der die Eisenteilchen mit Klebstoff auf Papier befestigt wurden

1. Ab 1935 kommerzielle Herstellung von Magnetband Kunststofffolien
AC-Folien (Azetatcellulose) in der Bandfabrik gegossen, getrocknet und unmittelbar danach beschichtet = Acetat der Zellulose (T-Cellit) mit ca. 60 % Essigsäure, hinreichende Flexibilität durch 10 bis 20 % Weichmacher
2. Ab 1944 **PVC** (Polyvinylchlorid): Folien wurden in Kalandern aus PVC-Pulver unter Druck und Wärme hergestellt
 Gefahr, Löcher in Folie ⇒ magnetischen Partikel in das Pulver einmischen ⇒ **Masseband** = Füllfaktor 5 - 10 %
 Mechanische Eigenschaften z. T. verbessert durch Verstrecken
3. Weiterentwicklungen: Polyimid, Polycarbonat, Polysulfon, Polyethylenaphthalat, verschiedene Copolyestermischungen
4. Endgültig bis heute **Polyester** (Polyethylenterephthalat (**PETP**, Kurzform **PET**), nur sehr selten Ausnahmen
 Firmenbezeichnung u.a. USA Mylar und Deutschland Hostaphan
5. **Trommeln, Festplatten:** Spezial-Aluminium, später Spezialglas
6. Sehr viele **Sonderausführungen**, Pappe, Karton, dicke Plaste: z. B. smartcards (u.a. Kredit-, Master-, Krankenkassen-, Einlass- und Hotelzimmerkarten), für programmierbare Taschenrechner, Rückseite von Sparbüchern, Folien mit Rillenführung, Material zum Aufkaschieren oder Rückseite mit Haftkleber

Herstellung der Polyester-Folie

Ausgangsstoff = weißes, kristallines Pulver aus Dimethylterephthalat und farblose Flüssigkeit Ethylenglykol
 ⇒ Umesterung verbindet zu Diglykolyterephthalat ⇒ im Vakuum Polykondensation zu PET
 ⇒ Handel = Granulat $\approx 50 \text{ mm}^3$, für Magnetbänder Molekulargewicht $\approx 20\,000$
 PET ist bis $\approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$ amorph, glasartig durchsichtig. $>150 \text{ }^\circ\text{C}$ weiß, kristallin, $>255 \text{ }^\circ\text{C}$ flüssig

Herstellung = komplexer, mehrstufiger Chargenprozess, erfolgt deshalb meist in darauf spezialisierten Firmen
 Typische Breite im m-, Länge im km-Bereich

1. **Trocknung** des Granulats, 2. **Schmelzen** des Polymers, 3. **Filtration** der Schmelze,
4. Formen der Schmelze mittels **Breitschlitzdüse (extrudieren)**, 5. **Längs- und/oder Querstreckung** der Folie,
6. **Thermofixierung**, 7. **Abkühlung und Aufwicklung** der Folie. 8. **Prüfungen** u.a. auf Kratzfestigkeit, Abriebfestigkeit, Oberflächenstörungen, Rauigkeit, Zugfestigkeit, Elastizität, Wickel­eigenschaften, Homogenität, Dickengleichmäßigkeit, Reibung, Oberflächenwiderstand, Haftfestigkeit für Magnetschicht.

Streckung für Magnetbänder besonders wichtig

Unverstreckte Folie **dehnt sich irreversibel** auf die fast dreifache Länge und zerreißt erst danach

Magnetband → Veränderung des **Zeitmaßstabes** Aufzeichnung ⇔ Wiedergabe + Gleichlaufschwankungen

Evtl. sogar **Verkräuselung** des Bandes → Aufnahme unbrauchbar

Besser: bei zu hohen Belastungen sofort zerreißen ⇒ anschließend fast ohne hörbare Störung wieder zusammenkleben

Bei AC-Folie automatisch erfüllt (15 bis 35 % Reißdehnung), bei Polyesterfolie spezielle Streckung erforderlich ($\approx 1 : 4$)

Kann **isotrop** (gleich stark längs und quer) oder **anisotrop** (bevorzugt in einer Richtung) erfolgen

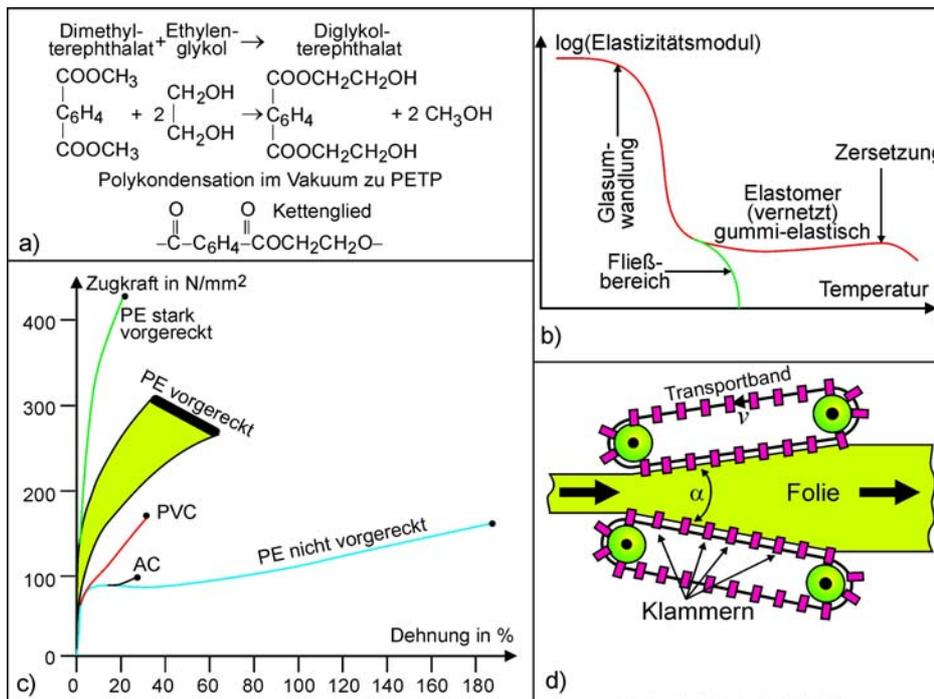
Meist in **Längsrichtung** bessere Eigenschaften erwünscht ⇒ längst verstrecken

Video, R-DAT usw. (rotierender Kopf) ⇒ Querrichtung den Vorrang

Disketten wegen allseitig wirkende Zentrifugalkraft ⇒ gute Isotropie erwünscht

Vielfach Streckung in verschiedene Richtungen in aufeinander folgende Stufen

Speziellen Maschinen auch in einem Vorgang erreichbar (Anstellwinkel $\alpha + \nu$ bestimmen Anisotropie)



Typische Kennwerte von Polyester-Folien; für Magnetband z. T. deutlich höhere Forderungen gestellt.

Eigenschaft	Wert
Reißfestigkeit	$> 200 \text{ N/mm}^2$
Fließgrenze	$> 120 \text{ N/mm}^2$
Reißdehnung	$< 100 \%$
Rauheit	$< 200 \text{ nm}$
Fehlerspitzenhöhe	$< 1 \text{ } \mu\text{m}$
Temperaturkoeffizient $\Delta l/l$	$2 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$
Feuchteffizient $\Delta l/l$	$10^{-5}/\%$ relative Feuchte
Elastische Dehnung bei 100 N/mm^2 , 15 Minuten	$< 0,4 \%$
Plastische Dehnung bei 100 N/mm^2 , 15 Minuten	$< 0,05 \%$

Zusatzforderungen für Magnetband

Extrem hohe **Glattheit** der Oberfläche, Rautiefe $r_a \leq 10$ nm

Z. T. auf beiden **Seiten unterschiedlich**: Begussseite sehr glatt. Rückseite: Wickeleigenschaften \rightarrow Rautiefe $\approx 0,2$ μm

Sehr selten **Spieker** (Höcker) bis zu $0,1$ μm , Gefahr von Dropouts

Gleichmäßige **Dicke** und hohe **Formstabilität**

Z. T. daher **Sondertechnologien**: u.a. durch Zugabe von definierten Füllstoffen und doppeltem Extrudern

Vielfalt der Folienparameter, u.a. Dicke und Breite: Magnetbänder (Audio, Video, Daten); Magnetfilme, Disketten usw.

Magnetpartikel

Partikel vorwiegend aus Verbindungen mit **Eisen**

althochdeutsch **isarn** festes Metall; lateinisch **Ferrum**, Chemisches Symbol Fe

Eisen als Rohstoff

Erde ≈ 40 % aus Eisen; **Erdkern** ≈ 90 %, in zugänglicher **Erdrinde** ≈ 5 %, nach O, Si und Al = 4-häufigstes Element

Selten kommt es **gediegen** (chemisch ungebunden) vor: in Eisenmeteoriten, manchmal in Basalten \rightarrow meist Legierung Ni

Wichtigste **mineralische Vorkommen**: Magnetisenstein = Magnetit = $\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,

Roteisenstein = Hämatit = Fe_2O_3 , Brauneisenstein = $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$, Siderit = Spateisenstein = FeCO_3 ,

Magnetkies = Pyrrhotin = FeS und Magnetkies = Pyrit = FeS_2 .

Reines Fe oder **Legierungen** (u.a. Stahl) wichtiger Werk-, Baustoff z.B. Stahlbauten, Stahlbeton, Autokarosserien, Gefäße usw.

Oxyd Fe_2O_3 (Rost) Poliermittel (z.B. in der Optik) und als Farbpigment

Lebenswichtig als Spurenelement, roten Blutfarbstoff (Hämoglobin = zentrales Atom); viele Enzymen des Stoffwechsels

gesamte Fe-Menge je Mensch ≈ 5 g \rightarrow täglich ≈ 15 mg mit Nahrung, mehr bei Blutverlusten und Schwangerschaft

Für **Magnetismus** ist Fe praktisch unentbehrlich, Menge im Vergleich mit anderen Anwendungen vernachlässigbar

Daher kaum in Werkstoffbüchern. Es muss aber es speziell aufbereitet werden

Magnetische Partikel, Pigmente

Wichtige Forderungen

- **Hohes Ausgangssignal** \approx großen **Signal-Stör-Abstand** \Rightarrow möglichst viele Partikel im Volumen
Auch Speicherung kurzer Wellenlängen erforderlich: Kenngrößen sind
Partikel/ cm^3 , spezifische Oberfläche m^2/g , Verhältnis Oberfläche/Teilchengröße
Nach Beguss Schichtoberfläche reich an magnetischem Pigment und hochgradig poliert ist (Band-Kopf-Kontakt)
- **Hohe Packungsdichte** \rightarrow Partikel **klein** und **frei von sterischen Behinderungen**, wie Dendriten und Versetzungen
Vermindert für Bindemittelmatrix, Bandherstellung Bedarf an Lösungs-, Netz- und Bindemitteln.
- **Schaltfeldverteilung**: individuelles H_C , \approx Größe, Form der Teilchen, darf nur wenig streuen
Gute Orientierung (Summen-Anisotropie) für geringe Verluste, scharfe Übergangszonen, geringe Peakshift und geringen Kopiereffekt
Geringe Wechselwirkungsfelder innerhalb der Partikelagglomerate, günstiges Rauschspektrum mit geringer Amplitude
- Wichtig sind **nadelförmige Partikel** \Rightarrow große Form-Anisotropie mit etwa 1 : 10 mit μm -Länge

Grundsätzliche Herstellung

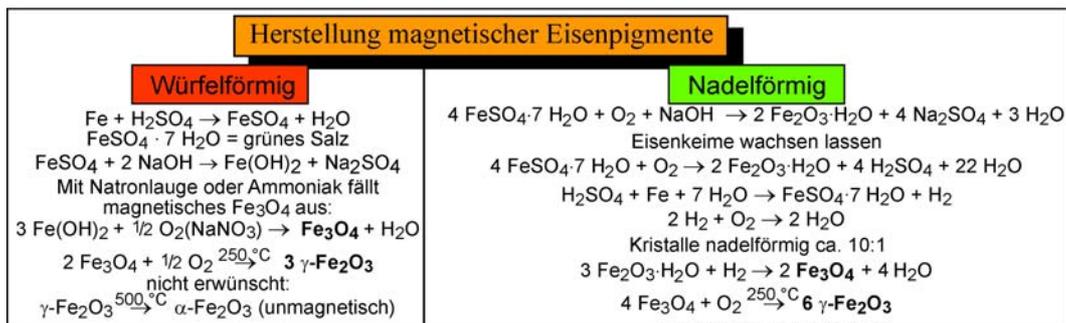
Gebräuchlichste Verbindungen mit guten magnetischen Eigenschaften sind $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ und Fe_3O_4

Ausgangssubstanzen der Natur u.a. vor Goethit = $\alpha(\text{FeO})\text{OH}$ und Lepidokrokit = $\gamma(\text{FeO})\text{OH}$

Werden in der Lack- und Farbstoffindustrie in großem Umfang eingesetzt

Für magnetische Anwendungen Reinheit viel zu gering, außerdem in der Natur nicht nadelförmig

Daher Herstellung aus anderen eisenhaltigen Pigmenten, meist FeSO_4 , zuweilen auch FeCl_2

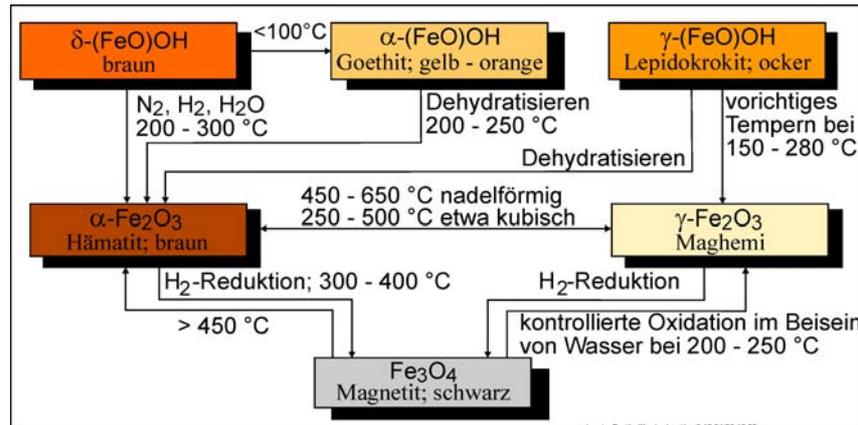


Fast alle heutigen Pigmente beginnen mit unterschiedlichen Ausgangsprodukten

Und führen zunächst zu einer der 3 Modifikationen der vorwiegend gelben Oxohydroxyde $\text{FeO}(\text{OH})$:

Goethit = $\alpha\text{-FeOOH}$, Lepidokrokit = $\gamma\text{-FeOOH}$ und Akaganait = $\beta\text{-FeOOH}$

Sie besitzen dann im Gegensatz zu den natürlichen Vorkommen bereits die gewünschte Nadelform und Größe



Partikel-Arten

Historisch wichtig reines $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

„Klassischer“ Prozess dem FeOOH werden viele Fe^{2+} -Ionen hinzugefügt

Entstehende Teilchen besitzen spezifische Oberfläche von 50 - 70 m^2/g

Die folgende Umwandlung zum $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ spaltet 10 Gewichts-Prozente als H_2O ab \rightarrow längliche Mikroporen

Bei höheren Temperaturen vergrößern sie sich zu Makroporen \rightarrow längliche Plättchen spez. Oberfläche von 20 - 38 m^2/g

Meist Oxydation nicht vollständig bis $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow$ Lösungen von $(\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3)_{1-x}(\text{Fe}_3\text{O}_4)_x$ mit höherem H_C als reines $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Hydrothermale NP-Partikel (non polar)

ab etwa 1990 durch deutlich verbesserte Prozessführung

Kontrolliert wird aus Fe^{3+} -Lösung $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gefällt, anionenfrei gewaschene Hydroxyd im Wasser aufgeschlämmt

Regulierung des Kristallwachstums wird Organophosphorsäure, Hydroxycarbonsäure oder entsprechendes Salz hinzugefügt

Entstehen längliche $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Partikel, bei pH-Wert = 10 - 11, in Autoklaven auf 100 - 200 °C erhitzt

(Metallgefäß: druckfest verschleißbar, beheizbar, meist mit Rührreinsätzen: *lateinisch clavis* Schlüssel, Riegel)

Prozessparameter bestimmen Größe und Form der Partikel, abschließend Umwandlung in $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Länge : Breite = 2:1 - 15:1, Partikel- \varnothing = 20 - 130 nm, nahezu perfekte Ellipsoide. H_C = 240 - 1 350 A/cm

Monodispers, völlig frei von Dendriten und sehr geringe Oberflächenrauigkeit

Leicht und schnell zu dispergieren \Rightarrow hohe Packungsdichte im Bindemittel

Einschleusen von Kobalt

Bessere Eigenschaften durch höheres H_C , Optimum $\approx 4\%$,

1. **volumendotierte Co-BD-Partikel (bulk dotted)**

Ausgangssubstanz Co-Ionen zugemischt, fallen gemeinsam mit Fe^{3+} -Ionen aus, ordnen sich in FeOOH-Partikel ein

2. Co-modifizierte **Co-SM-Partikel (surface modified)**: auf endgültige $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ -Partikel Co *epitaktisch* aufgewachsen

Japan: Qualitätsstufen Standard Grade (ST), High Grade (HG) und Super High Grade (SHG)

3. **Co-CD-Partikel (cobalt dotted)**: bei erhöhter Temperatur Co zum FeOOH hinzugegeben,

diffundiert in die Magnetpartikel. Eigenschaften zwischen Co-SM und Co-BD

Metall-Partikel (MP = metallische Pigmente)

Nadelförmiges FeOOH und Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) bei niedriger Temperatur bis metallisches Fe, Fe-Legierungen reduziert

Partikel sind leider stark pyrophor (oxidieren an der Luft) \rightarrow mit Schutzschichten gegen Oxydation überzogen

Auch weitere Verarbeitung erfordert Sondertechnologien, Bänder schwarz, sehr hohes $M_R \approx 1\text{ T}$, $H_C = 750 - 1\,350\text{ A/cm}$

Zunächst 8-mm-Videokassette und R-DAT, später Audiokassette = IEC-Standard IV, Mikrokassette und Streamer-Bänder

Zeitweilig CrO_2 -Bänder

1797 von LOUIS NICOLAS VAUQUELIN (1736 - 1829) entdeckt, viele farbige Verbindungen *griechisch chroma* (Haut-) Farbe

Wegen Glanz, Härte und chemischen Widerstandskraft für Oberflächenvergütungen große Bedeutung (verchromen)

1943 wurden magnetische Eigenschaften erkannt. Magnetisches Pigment nur CrO_2 , 1956 erste reine Erzeugung

Ab 1970 CrO_2 -Bänder, dunkelgraue Farbe wird oft durch Bindemittel usw. überdeckt: **Herstellung**

1. Thermische Zersetzung von Chromchlorid (technisch nicht angewendet)

2. Umwandlung von Chrom-(III)-Verbindungen

3. Hydrothermale Zersetzung (Reduktion) Cr_2O_3 , katalytisch und/oder dotierende Zusätze: Sb, Te, Ti, Sn, Ru, Fe

Festkörper-Oxydation bei Wasser-Zufuhr, 300 - 500 °C, 300 - 500 MPa \Rightarrow direkt zu CrO_2

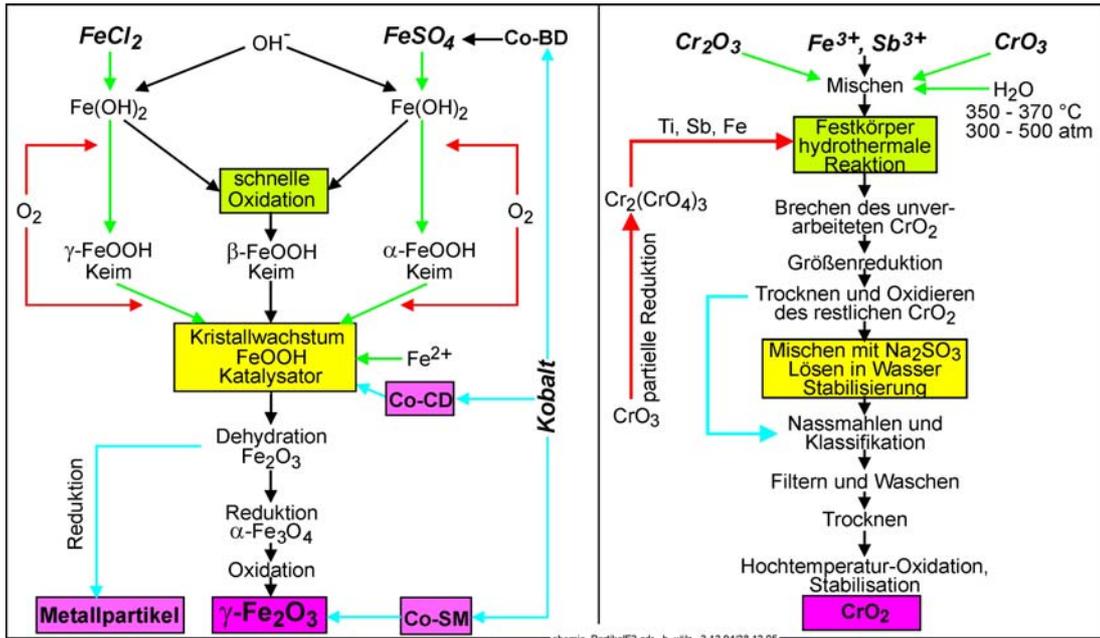
Besondere Sicherheitsmaßnahmen notwendig, daher CrO_2 langsam wieder verdrängt

Material wird mehrmals mechanisch zerkleinert \Rightarrow Filtern, Waschen, nur stäbchenförmigen Einkristalle verbleiben

Gute Geometrie, schnell und leicht zu dispergieren, hohe Packungsdichte, spezifischen Oberfläche 15 - 50 m^2/g

$M_S \approx 25\%$ höher als $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, kleines isotropes $H_C = 16 - 55\text{ A/cm}$, Nadelform $\rightarrow 80 - 120$, möglich 500 - 1000

Geringes $\rho = 0,04 - 30\ \Omega\cdot\text{m}$ \rightarrow kaum elektrische Aufladung, niedriges $T_C \approx 120\text{ °C}$ \Rightarrow Stabilität \Leftrightarrow thermische Vervielfältigung

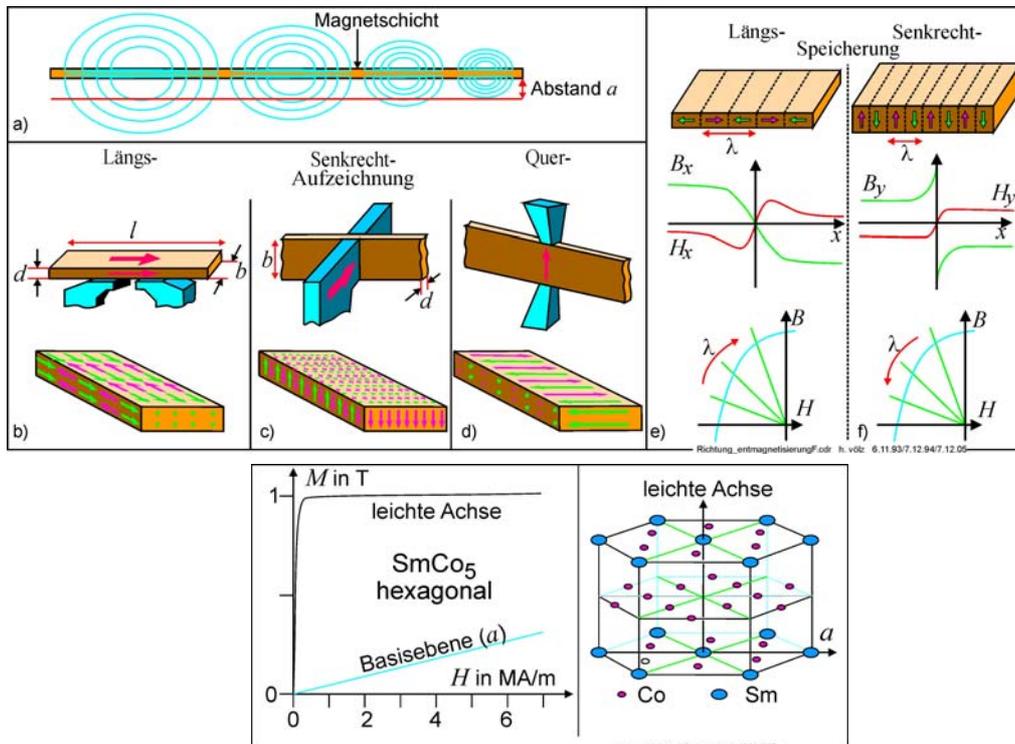


Senkrechtspeicherung

Ermöglicht wesentlich höhere Speicherdichten. Herstellung der Magnetschichten schwierig, Problem Formanisotropie
 Längliche Magnetpartikel senkrecht zur Schichtebene orientieren, ist technologisch kaum möglich

Ab den 70er Jahren umfangreiche Forschung, u. a. Japan IWASAKI großes Institut

Mitte 80er Jahre werden hexagonal einachsige Magnetmaterialien bekannt, leichte Achse senkrecht zur größten Ausdehnung
 Energie der magnetischen Anisotropie übertrifft Form-Anisotropie, z. B. SmCo_5



Barium-Ferrit

Für Magnetschichten sind jedoch angepasstes Material und entsprechende kleine Partikel notwendig

Erstes brauchbares Material war Barium-Ferrit = $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, später Mischferrite z.B. $\text{Co-Ti-BaFe}_{12}\text{O}_{19}$; $\text{Fe} \rightarrow \text{Co}$, Ti

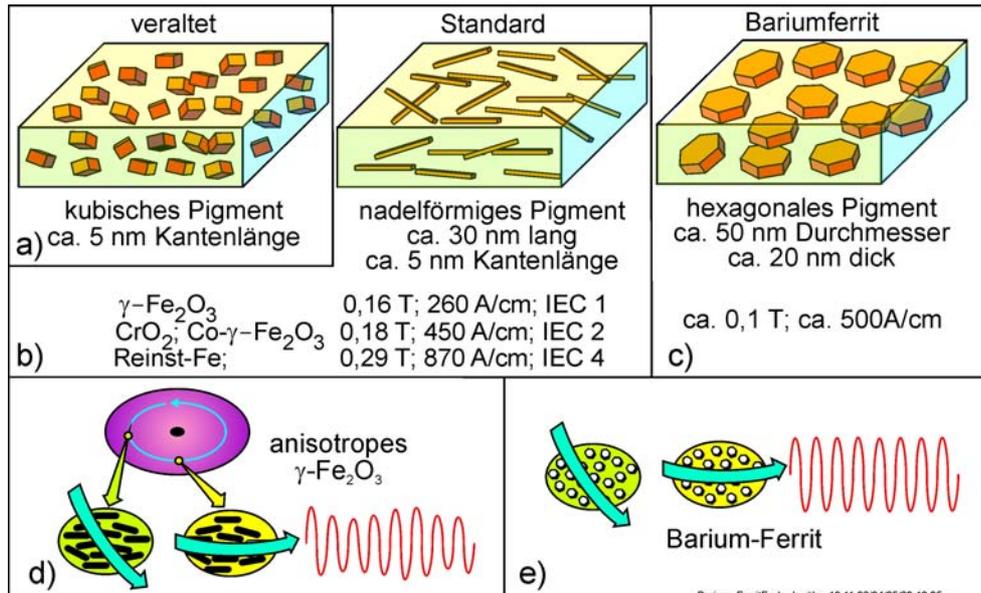
Wie amorph magnetischem Material Schnell-Abkühlung aus flüssiger Phase und Zusatz eines Glasmachers

Dann werden die dünnen hexagonalen Plättchen aus dem Festkörper herausgelöst

Prozessparameter bestimmen Teilchengröße $\approx 60 \mu\text{m}$ und Koerzitivfeldstärke, $T_C \approx 320^\circ\text{C}$

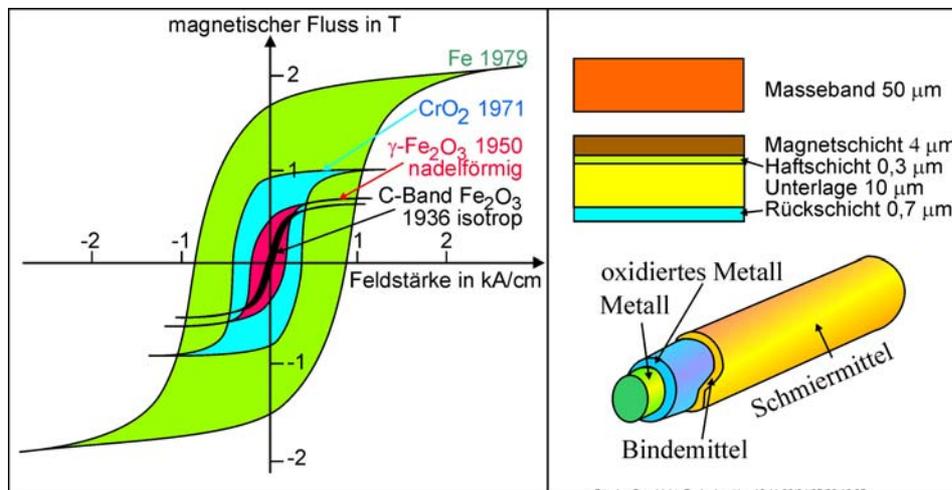
Partikel sind für übliche Bandgießmaschinen geeignet \Rightarrow Ba-Ferrit-Bänder, relativ preiswert, keine Korrosion

Erste erfolgreiche Anwendungen nicht Senkrechtspeicherung sondern Disketten \Rightarrow gleich bleibendes Signal



Geschichtlicher Rückblick

- 1927 PFLEUMER Stahlspäne
- 1932 AEG patentiert Carbonyl-Eisen-Pulver für Magnetband
- 1935 schwarze Fe_3O_4 , 1937 rötliches $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
- 1964 Idee zum Metalldünschichtband (ME) in der DDR (Details s. u.)
- 1970 CrO_2
- 1976 Modifikationen von $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ + Versuche zur Senkrechtspeicherung + ME in Kosmosspeichern (DDR)
- 1979 Reinsteisen-Pigmente
- 1985 Ba-Ferrit
- 1987 CoCr
- 1995 kommerzielle Nutzung von ME bei VCR-Videorecordern



Daten von Partikeln und Schichten

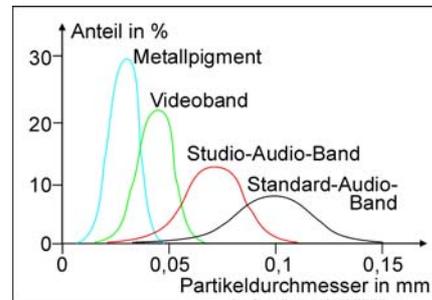
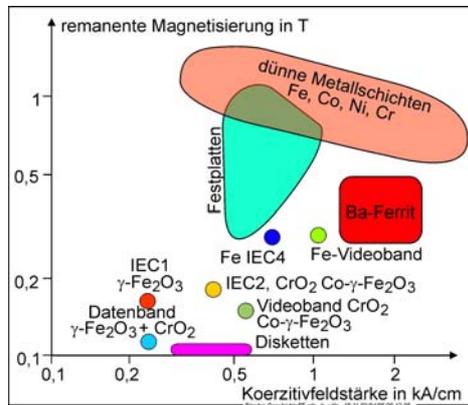
Die spezifische Pigmentoberfläche liegt immer zwischen 20 und 40 m^2/g .

Material	T_C in $^\circ\text{C}$	B_{RS} in T	H_C in kA/m
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	590 - 650	0,43	24 - 32
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, dotiert	520	0,49	32 - 56
Fe_3O_4		0,4	24 - 64
CoCr_2	120 - 130	0,48	36 - 56
Fe-Pulver	500 - 800	2,0	64 - 128
Co-Schicht/massiv	1100	1,6/1,6	24 - 96
Ni-Schicht	360	1 - 2,3	30 - 200

Daten von Magnetbändern

Die IEC sind international genormt, IEC 3 erwies sich 1970 als überflüssig

Bandtyp	Material	B_{RS} in T	H_C in A/cm	Rechteckfaktor
IEC 1	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,16	260	0,6
IEC 2	CrO_2 ; $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,18	450	0,75 - 0,9
IEC 3	$\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,22	500	0,8
IEC 4	Fe-Partikel	0,29	870	0,8
Videoband	CrO_2 ; $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,14	550	0,8
	Fe-Partikel	0,28	1100	
Datenband, Disketten	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,07 - 0,11	200 - 300	
	CrO_2	0,08	450	
	$\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,08	550	
Disketten	Ba-Ferrit	0,3	300 - 1500	0,95
Festplatten	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0,07	260	0,85
	Co	0,63	um 700	
	CoP	1,6	um 700	0,9
	CoCr	0,5 - 3,0	200 - 750	0,97
	CoFe	0,8 - 1,3	500 - 2000	0,9
	CoNi	0,7	um 750	0,9



Theoretische Betrachtungen

Fast alle Ferromagnetika sind bei ≈ 1 T gesättigt, dazu gehört inneres Feld $J_s \approx 10^6$ A/m.

In Fe sind $n \approx 10^{29}/\text{m}^3$ Atome, je Atom $J_s/n \approx 10^{-23}$ A/m²

Wert entspricht recht gut der Umlauffrequenz des Elektrons $\approx 10^{14}$ Hz mit Radius $\approx 10^{-10}$ m

Daher ist beim Ferromagnetismus ein Elektron je Atom wirksam,

Allerdings ist der Spin wichtiger als das Bahnmoment

Für $T \rightarrow 0$ Magnetisierung/Atom ganzzahliges Vielfaches des Bohrschen Magnetons μ_B

Dies ist jedoch nicht der Fall (Tabelle).

Stoff	μ_B	T_C in K
Fe	2,2	1043
Co	1,7	1404
Ni	0,6	631
Ga	7,1	289
MnBi	3,5	630

Fe_3O_4 = zwei Untereinheiten von Fe^{3+} - und Fe^{2+} -Ionen

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ tetragonale Struktur \Rightarrow Die Elementarzelle $\text{Fe}_{24}(\text{Fe}_{40})\text{O}_{96} \Rightarrow$ A-Lage = 24, B-Lage = 40 Fe^{3+} -Ionen

Heben sie sich teilweise \rightarrow Differenz 16 magnetisch wirksamen Ionen

Sind 3d-Elektronen, je Ion $5 \mu_B$, $\Sigma 80 \mu_B$ ($\mu_B = \text{BOHR'sches Magneton}$) $\rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 = 2,5 \mu_B$

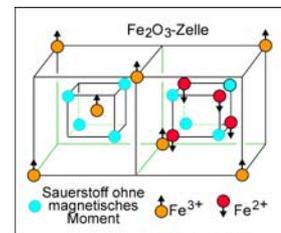
Gemessen werden $2,39 \mu_B \Rightarrow$ LOSCHMIDT-Zahl und Molmasse (160 g $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) folgt für M_S

$$2,39 \cdot 9,27 \cdot 10^{-21} \cdot 6,03 \cdot 10^{23} \approx 1,33 \text{ T}\cdot\text{cm}^3 \text{ bzw. } 0,525 \text{ T.}$$

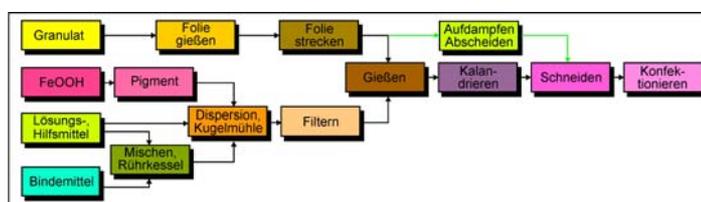
Magnetpartikel erreichen $\approx 85\%$; Vergleich reines Fe: $2,22 \mu_B$ je Atom $\rightarrow 2,2$ T

CrO_2 kristallisiert tetragonal. Ein Atom $\rightarrow 1 \mu_B \Rightarrow M_S$ zu $1,12 \text{ T}\cdot\text{cm}^3$.

$T_C = 120^\circ\text{C} \rightarrow$ Verluste bereits bei Zimmertemperatur, gemessen $\approx 80\%$, $\approx 0,6$ T.



Herstellung Magnetband



Herstellen der Emulsion = Suspension

Magnetpartikel liegen als Pulver vor und ordnen sich gemäß ihrer spontanen Magnetisierung zu Aggregaten und Agglomeraten
Für das Magnetband müssen die Teilchen jedoch alle gut voneinander isoliert sein

⇒ **Dispergierung** erfolgt mittels **Bindemittel** (zähe Flüssigkeit, Lösung), das Partikel umhüllt, voneinander trennt

Prinzip schon sehr lange in der Farben- und Lackindustrie gebräuchlich

Die magnetischen Eigenschaften der Partikel und fertiges Magnetband stellen jedoch höhere Forderungen

- Aufheben der **anziehenden magnetischen Kräfte**
- Für **hohe Sättigungsmagnetisierung** möglichst viele Partikel je Volumeneinheit
- Bei Trocknung muss **sehr glatte Oberfläche** für einen guten Bandkopfkontakt entstehen
- **Hohe Elastizität** für einwandfreien Transport
- **Geringer Abrieb**, sonst bildet störender Staub an Magnetköpfen und Führungen
- **große Haftfestigkeit** auf Unterlage, sonst könnte sich Schicht bei mechanischen Belastungen ablösen
- Unterbinden **elektrostatischer Aufladungen**, sonst entstände beim Transport elektrostatischer Bandgenerator
- Für **lange Lebensdauer resistent gegen** Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen, Umweltstoffen, Bakterien usw.

Bindemittel

Ursprüngliches Zellulosenitrate, dann Hochpolymere, z.B. Polyvinylchlorid und -Acetat sowie Vinylacetat

Endgültig thermoplastische **Polyurethan**-Elastomere mit guter Chemikalien- und Lösungsmittelbeständigkeit sowie

Abriebfestigkeit, Elastizität und Härte

Bestehen aus Hart- (Urethangruppen) und Weichsegmenten (Diisocyanate), die mittels H-Brücken zusätzlich stabilisiert sind
Anzahl der H-Brücken ermöglicht mechanischen Eigenschaften im weiten Bereich gezielt zu variieren

Z. T. mit anderen Hochpolymeren kombiniert

Möglich zusätzlich vernetzt durch Elektronenstrahlen: π -Bindungen ersetzt neue 3-dimensional vernetzte δ -Bindungen

Gekennzeichnet als EB = **e**lectronic **b**eam oder **E**lektronenstrahl vernetztes **B**indemittelsystem

Rührkessel und Kugelmühle

Magnetbandsuspension enthält neben **Bindemittel** und **magnetische Pigmente** weitere **Hilfsstoffe**:

Dispergierhilfsmittel (Salizil- oder Oleinsäure), Netzmittel, Gleitmittel, Antistatika, Ruß, abrasive, bakterizide und fungizide Stoffe und Antioxydationsmittel

Werden zunächst im **Rührkessel** homogenisiert

In **Kugelmühle** = rotierender Kessel einige Meter lang, $\varnothing \approx 1$ m: Neben Suspension **Glas-** oder **Stahlkugeln** \varnothing einige cm

Mahlprozess = bei Drehung Kugeln etwas mitgenommen und fallen ab einer Höhe wieder zurück ⇒ Dispergierung

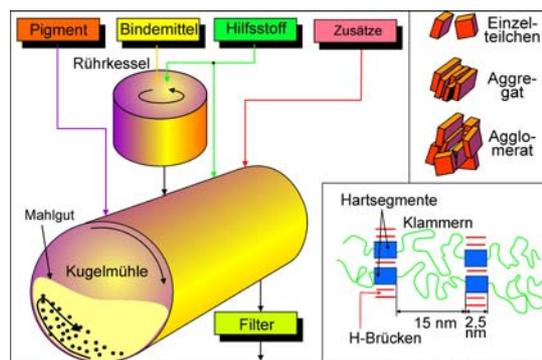
Um jedes magnetische Partikel entsteht Film des Bindemittels = Isolierung voneinander

Vorgang dauert **viele Stunden bis einige Tage**. Dennoch dürfen **keine Partikel zerstört** oder **verändert** werden

Chargenprozess = 1 Kugelmühle, fertige Emulsion wird abschließend noch **gefiltert**

Entfernt werden: Anteile $>1 \mu\text{m}$, noch vorhandene Zusammenballungen magnetischer Teilchen und Abrieb von den Kugeln

Prüfung auf Qualität, Freigabe, Schneller Verbrauch (Guss), da Emulsion schnell an Qualität verliert



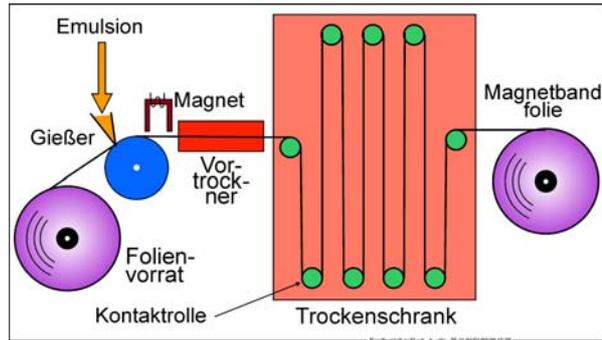
Bandguss

Emulsion wird in der Gießmaschine (>10 m lang) auf Unterlage gebracht = Chargenprozess

Gussbreite je nach Hersteller 30 cm bis 2 m, Folienlänge ca. 1 km, für Folienrolle, Emulsion neue Einstellung

Vorprüfung kurzes Band ⇒ Freigabe ⇒ Produktion einer Charge

- **Antragen** der Emulsion \approx Beguss mit Raket-, Überlauf-, Anstreich- oder Rasterwalzen-Gießer; volle Breite, $\Delta\delta < 1 \mu\text{m}$ Zähigkeit und Trockengeschwindigkeit der Emulsion streng einhalten
- **Ausrichtung** Pigmente durch Magnet, erzeugt Überstrukturen = hohe Anisotropie (Video \Leftrightarrow Audio); Faktor: 2 - 4
- **Vortrocknen** der Schicht ohne Kontakt mit Rollen usw. bei ziemlich hoher Temperatur
- vollständiges **Trocknen** im ≈ 100 m langen Weg im Trockenschrank
- **Aufwickeln** des fast „fertigen“ Magnetbandes

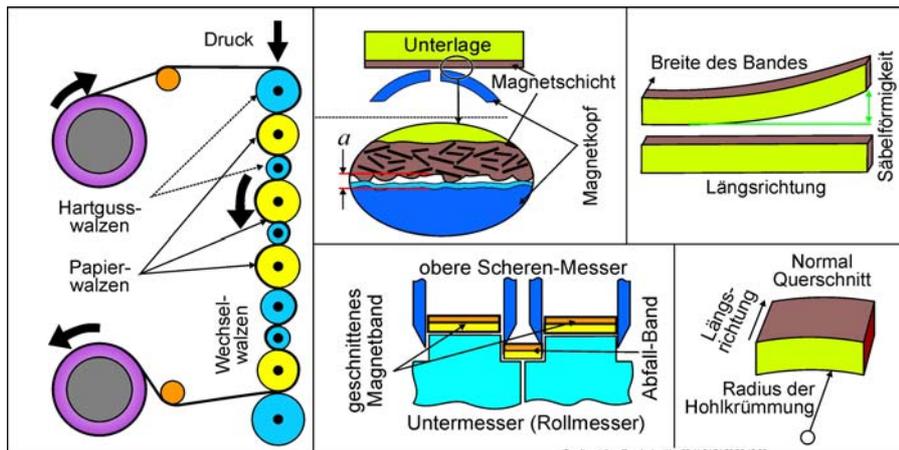


Nachbehandlung

Trotz optimaler Produktionsparameter ist Bandoberfläche immer etwas rau, vergrößert Band-Kopf-Abstand a
 Band wird kalandriert = kalandert. **Kalander** (französisch *calandre* Wäschemangel, Walzwerk, Kühlergrill)
 Mehreren Rollen mit hohem Druck aufeinander gepresst, dazwischen Band hindurchgezogen
 Es wechseln extrem glatte Stahlwalzen für Schichtseite mit relativ weichen Papierwalzen für Rückseite des Bandes
 Glättung der Oberfläche bewirkt auch Verdichtung der Magnetschicht, Packungsdichte, Magnetfluss erhöht

Magnetband auf genormte Breiten **schneiden**, gleichmäßige und extrem glatte Bandkanten, hierauf Magnet Spuren bezogen
 Rotierende, nur einseitig angeschliffene Messer + mittleres schmales Abfallband herausschneiden
 Beim Schneiden entsteht viel „Staub“, der ständig sorgfältig abgesaugt werden muss, damit er nicht in Bandwickel gelangt

Muster überprüfen für Freigabe, dann Bänder **konfektioniert**, z.B. auf Spulen gewickelt oder in Kassetten gebracht
Besondere Fehler: säbelförmig u. a. durch schlechten Schnitt, **Hohlkrümmung** u. a. durch thermische Belastung, Kalander



Dropout, Dropin

Fehler in der Magnetschicht können bei Aufzeichnung, Wiedergabe Dropouts und Dropins bewirken

Dropout = Wiedergabesignal <45 % des Normalwertes

entstehen u.a. durch fehlende magnetische Partikel in der Schicht, Fremdeinschlüsse, Ablagerungen auf der Schicht
 Einige können z.B. durch Reinigung des Bandes oder nach mehreren Banddurchläufen verschwinden
 permanente ⇔ flüchtige Dropouts

Dropins erzeugen nicht aufgezeichnet Wiedergabesignale: z. B. durch hartmagnetische Partikel

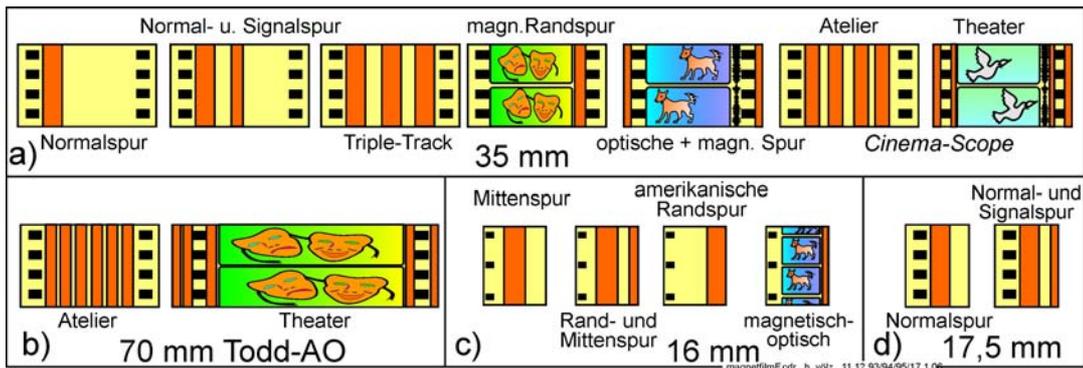
Formate, Sonderbänder und Magnetfilm

- Bänder verschiedene **Breite, Dicke, Qualität**: analoges Audio, Video (Schrägrotation) Digitaltechnik, Messbänder usw.
- **Disketten** durch Ausstanzen
- **Magnetkarten** und **Kaschierbänder**
- **Magnetfilm** gibt es in sehr vielen, davon 2 Hauptvarianten
 1. Nur für die Tonaufnahme (lippensynchron) über die Perforation, später durch spezielle Pilotspur ersetzt
 2. Als Randspur mit besserer Tonqualität als Lichttonspur (s. Tonfilm)
- **Weiß-, Farb- und Klebebänder** ohne Magnetschicht, z. B. zum Cuttern
- **Messbänder** mit speziellen (genormten) Aufzeichnungen

Komplexer Chargenprozesse ermöglicht keine gleichartigen Bänder herzustellen

Daher wird in einigen Firmen eine genau ausgemessene Charge über Jahrzehnte aufbewahrt

Sie steht ausschließlich zu **Vergleichs-** und **Bezugsmessungen** zur Verfügung und ist entsprechend teuer



Zusätzliche Schichten

Bei vielen Bandtypen werden vor, beim oder nach dem Beguss noch **zusätzliche Schichten** aufgebracht

Vor dem Beguss z.B. für **bessere Haftfestigkeit** der magnetischen Schicht

Gleit- und Schutzschichten auf Magnetschicht

Rückschicht für Transport und Wickel, Vermeidung von Elektrostatik, **Haftkleber** zum Kaschieren von Magnetkarten usw.

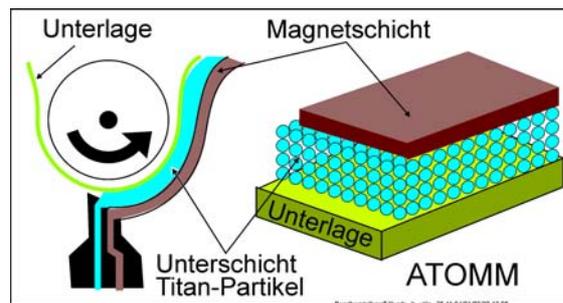
Bedrucken der Rückseite zur Kennzeichnung, für Produktionsdaten, Lokalisation (Transport) usw.

Zeitweilig gab es Bänder mit **zwei magnetische Schichten** übereinander: Eisen- und Chromdioxid

1992 führte Fujifilm z. B. **ATOMM-Technologie** (advanced super thin layer & high output metal media) ein

Aus spezieller Düse in einem Arbeitsgang werden gleichzeitig zwei Schichten gegossen (dual coating)

- extrem dünne magnetische Oberschicht ist mit 0,1 - 0,5 μm , enthält stabilisierte Metallteilchen, besitzt sehr glatte und extrem harte Oberfläche. $H_C \approx 1,2 \text{ kA/cm}$ = vorteilhaft für ein digitales Überschreiben
- Unterschicht aus feinsten, unmagnetischen Ti-Partikeln: oberflächenglättend und stoßdämpfend, enthält Reservoir für Gleitmittel (Lubricant)



Dicke δ der Magnetschicht und d_U der Unterlage

Bandtyp	δ in μm	d_U in μm
Magnetfilm	12	75
Diskette	2	75
Computerband	3 - 7	20 - 35
Video-Studio-Band	5	20
Video-Heim-Band	2 - 3	7 - 15
DAT-Band	3	9
Audio-Studio-Band	14	35
Langspielband	9	24
Doppelspielband	8	18
C-60-Band	5	12
C-90-Band	4	8
C-120-Band	3	6
Dünnschichtband	0,01 - 0,2	ca. 10

Dünne Speicherschichten

Metalldünnschichtband ME-, VE-Band, vacuum evaporated

Geschichte

In der DDR gab es häufig Engpässe für Magnetband

Prof. Dr. WALTER REICHARDT (1903 – 1985) Kammer der Technik (KdT) Leiter Arbeitskreis Elektroakustik

Organisiert daher um 1963 Dreier-Gespräch im Forschungsinstitut von Manfred von Ardenne

MANFRED BARON VON ARDENNE (1907 – 1997) und Prof. Dr. HORST VÖLZ (*1930)

Es entstand Idee aufgedampftes Metalldünnschichtband

Erste Forschungsergebnisse wurden auf internationaler Intermag-Konferenz am 20.4.66 vorgestellt
Ab 1976 flogen damit Kosmospeicher der Arbeitsgruppe Speichertechnik
Nachgewiesene Aufzeichnungsdichten von 1000 Bit/mm
Um 1980 Aufdampfanlagen Ardennes werden nach Japan geliefert, dort begannen Arbeiten bei Matsushita
1982 Matsushita „Angrom DU“ = dünne Metallschicht aufgedampft auf konventionelle Magnetpigmentschicht
1997 kommerzielles Band für Videorecorder VCR, Mini-DV mit 150 nm diamantharter C-Schutzschicht

Um 1990 wieder gefunden Patent von HANNS ARIEDTER und RUDOLF ENGEL von 1949
„Magnetischer Träger“ durch Verdampfen, Kathodenzerstäubung mit 0,2 bis 2 μm herstellen (Sound 1989, H. 9, S.87 - 99).

Heute dünne Speicherschichten in vielen Varianten, zunächst beim Magnetband, später bei Festplatten

Probleme, Möglichkeiten

Partikelband nicht dünnere Schichten als $\approx 3 \mu\text{m}$ gießen. Nachteil für kurze Wellenlängen ($\lambda < 1 \mu\text{m}$)

Ausreichendes M_s fordert kompaktes Material: Fe, Ni, Co und Legierungen

Ausreichendes H_c \rightarrow Erzeugung hoher Anisotropie durch Strukturen oder Fehlstellen

Hinreichender Festigkeit beim Kopfkontakt und Transport

Korrosion-Schutz, Oberfläche oxidiert, evtl. zusätzlich Schutzschichten (Oberfläche oxidiert)

Vorteile aufgedampfter dünner Schichten

- Aufzeichnung sehr kurzer Wellenlängen infolge sehr dünner Schicht 10 – 10 nm
- Keine Chemie, kein *störender* Schichtabrieb
- keine elektrostatische Aufladung, beidseitig leitend, da auch metallische Cu-Rückschicht
- Sehr zuverlässig überschreibbar ohne zu löschen

Chemische Herstellung

Magnetisches Material muss in einer Flüssigkeit, z. B. als Komplexsalze oder gasförmig vorliegen

Wichtig sind die Reduktion von gelösten Salzen, die elektrolytische Abscheidung und die thermische Spaltung

Zwei CVD-Verfahren (chemical vapor deposition *englisch* \approx chemischer Dampf-/Dunst-Auftrag):

Stromfreie Abscheidung: z.B. durch Übersättigung oder chemisches Ausfällen

Elektrochemischer Transport (z.B. Elektroplattieren). Häufig $T > 500^\circ\text{C}$

Ab 60er Jahre magnetisches Material (Fe, Co, Cr und Legierungen) auf kleine Glas-, Metall- oder Keramiktargets

Zunächst CoP für Festplatten, Ab 70er Jahre Versuchs-Magnetbänder mit CoP und CoNiP

Technologie erlangte trotz Einfachheit keine größere Bedeutung für Speicherung

Physikalische Herstellung

Fe, Ni, Co, Legierungen = Substrat ist Quelle, getrennt hergestellt (Vakuum), Target (*englisch* Zielscheibe) ist Band oder Platte

Zwei Verfahren = PVD-Verfahren (**physical vapour deposition**):

Vakuumbedampfung

Hoch erhitztes Substrat verdampft, schlägt sich auf gegenüberstehenden, gut gekühlten Target nieder $\approx -100^\circ\text{C}$

Erhitzen durch Stromwärme (Widerstandsheizung), Wirbelstrom (HF) oder Elektronenstrahl benutzt, $\approx 100 \text{ kV}$ $\approx 3000^\circ\text{C}$

Elektronenstrahl Vorteil: Substrat nur an Oberfläche erhitzt, komplizierte Zusammensetzungen bleiben ständig erhalten

Schrägbedampfung = Dampfstrahl Winkel α gegenüber Normale Unterlage

Material wächst dem Dampfstrahl entgegen, Erhöhungen bewirken Abschattungen

\rightarrow zäpfchenartige Kornstrukturen = **hohe Formanisotropie** = H_c , Kristallite Winkel $\beta \neq \alpha$ auf

Energie des Aufdampfmaterials bewirkt **Eindringen in Kunststoff, hohe Festigkeit** der Schicht

Sputtern (*englisch to sputter* zerstäuben) = Kathodenzerstäubung = Ionenauftrag

Geringer, fest gewählter Gasdruck (vorwiegend Argon) ermöglicht Gasentladung; Substrat = Kathode

Positive Ionen erreichen Substrat mit hoher kinetischer Energie und zerstäuben Material

Nachteil: chemisch aktiven Ionen eventuell zusätzliche Reaktionen mit Substrat-Material möglich

Licht-Spektrum ermöglicht gute Kontrolle des Prozesses, Magnetfelder ermöglichen zusätzliche Parameter

Abscheidungsrate aber nur $1/100$ bis $1/10$ der Vakuumbedampfung, deutlich langsamer Prozess

Ergänzungen

Ausgangsmaterial muss im Vakuum erschmolzen und gereinigt sein, sonst treten „Spratzer“ auf

Dampfstrahl nur **kleiner Winkelbereich nutzbar**, dennoch Beschichtungsgeschwindigkeiten ≥ 100 m/Minute

Material an Blenden lässt sich recyceln

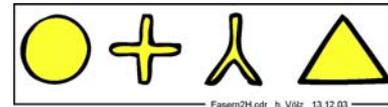
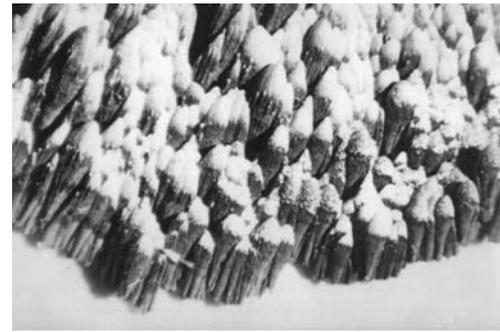
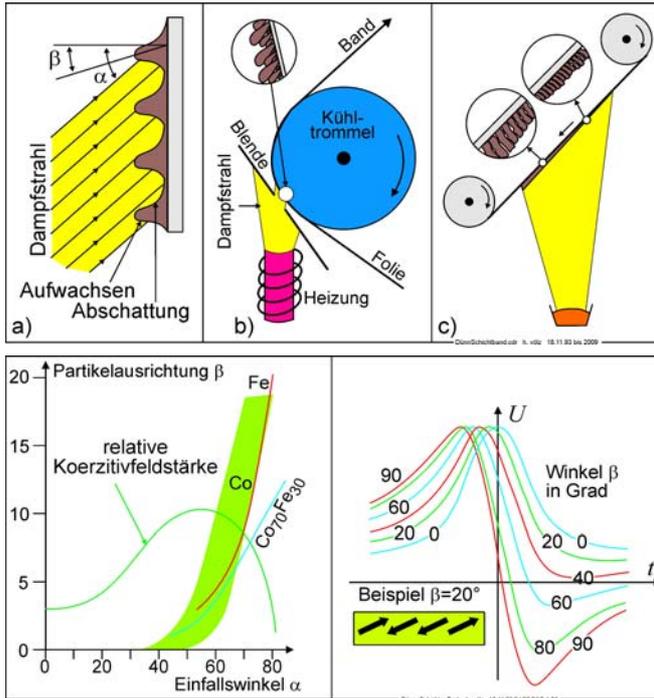
Hohe Energie bewirkt, dass sich Material fest einschmilzt, **hohe Abriebfestigkeit** selbst bei wenigen nm

Dafür Gefahr der **Hohlkrümmung**, auch Rückseite beschichten

Schräg liegende Säulen bewirken zunächst Signal-Unterschied Band „**vor-**“ oder „**rückwärts**“ benutzt wird.

Später Verfahren, dass Säulen senkrecht stehen, prinzipiell dann für **Senkrechtaufzeichnung** geeignet.

In 80er Jahren in „Arbeitsgruppe Speichertechnik“ **beschichtete Profilste** \approx Draht, durch Wende abgebrochen

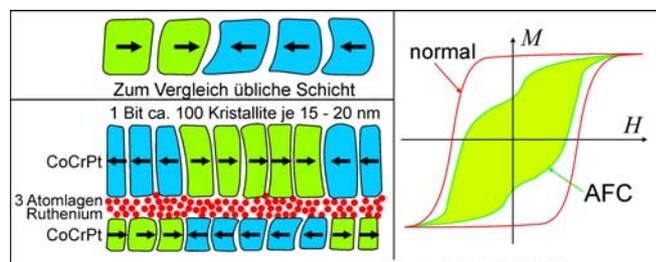
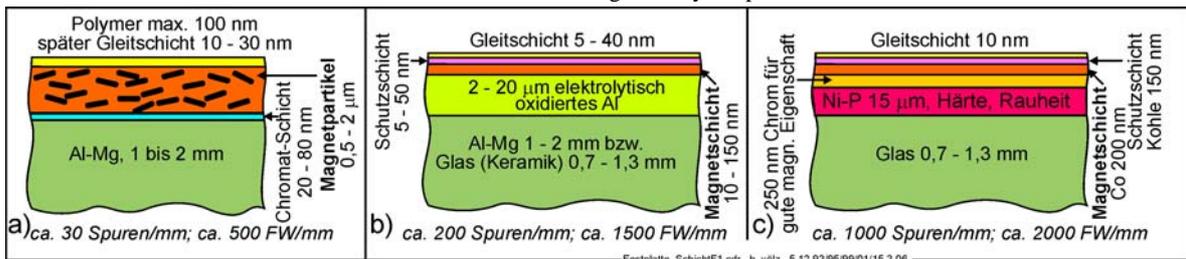


Ansätze für neuartiges Magnetmaterial

Zur Steigerung der Speicherdichte gibt es mehrere neue Ansätze, es folgen nur ausgewählte Beispiele. Wichtig sind kleinste, noch magnetische Teilchen, z.T. auch durch *Selbstorganisation bei Nanostrukturen*. Bereits LEV DAWIDOWITSCH LANDAU (1908 – 1968) schätzte *Grenze der Speicherdichte theoretisch* ab. Um 2000 gelang Nachweis an magnetischer Kette aus *einzelnen aneinander gereihten Co-Atomen*. Mittels Selbstorganisation auf Pt-Oberfläche erzeugt, Ihre Spins wechselwirkten spontan, bis 10 K ferromagnetisches Verhalten. 2005 wurde dann eine zuvor unbekannte, extrem dünne magnetische Grenzschicht zwischen Kobalt und Nickeloxyd gefunden. Zukunft auch *organischer Magnetismus* möglich.

Antiferromagnetische Austauschkopplung

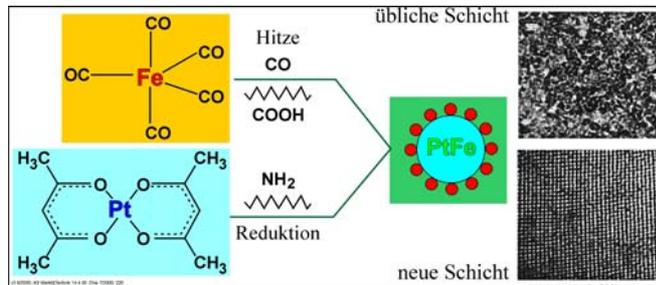
= AFC = antiferromagnetically coupled



Ursprünglich 2001 IBM \Rightarrow Ende 2002 zu Hitachi dort für 4-GByte Microdrive umgesetzt. 2 Schichten der magnetischen Legierung $\text{Co}_{70}\text{Cr}_{18}\text{Pt}_{12}$, getrennt durch 3 Atomlagen (0,6 nm) unmagnetischem Ruthenium. Mittels Ionenstrahl wird Schicht schachbrettähnlich in kleine, etwa 2 nm große Körner zerteilt $\approx 10\,000$ Atome. Die beiden magnetischen Schichten wirken aufeinander durch antiferromagnetische Austauschkopplung. Dadurch stellen sich die magnetischen Domänen der oberen und unteren Schicht immer entgegengesetzt ein. Ferner sind obere, größere Partikel senkrecht zu ihrer Form-Anisotropie magnetisiert, ermöglicht höchste Speicherdichte. Die Hysteresekurve ermöglicht, dass vorübergehend während Aufzeichnung gleiche Ausrichtung beide Schichten auftritt. Effekt ähnelt „pinned layer“ bei MRAM (s. d.). Hitachi nennt Material „Pixie Dust“ (Feenstaub). Ähnliche, jedoch bisher nur experimentell erprobt: 4 nm große Kobalt-Teilchen in eine Matrix aus Kobaltoxyd.

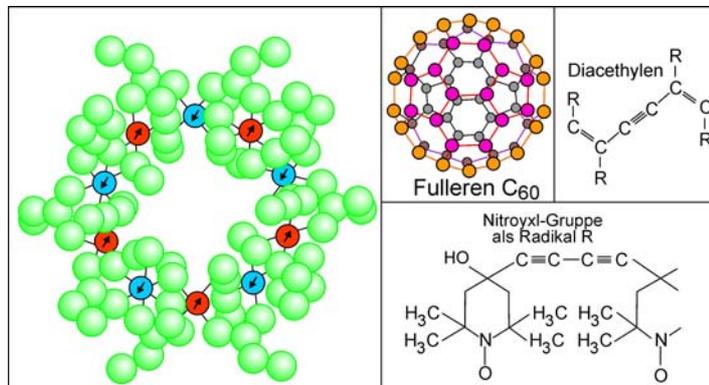
exchange coupled nanocomposite

2002: Nutzt Austauschwechselwirkung (exchange coupling) weichmagnetisches und hartmagnetisches Material
 Beginnt mit vermischtem Eisen-Carbonyl- und Platin-Acetylacetonat, Erhitzen bewirkt Synthese und Selbstorganisation
 Metalle verlieren ihre organischen Bestandteile, es entsteht FePt-Legierung, Partikel = einige tausend Atome 1 : 1 \approx Fe : Pt
 Gegen Zusammenklumpen in spezieller Flüssigkeit unter Luftausschluss auf ≈ 650 °C erhitzt
 Die unmagnetische kubische Struktur geht in eine tetragonale hartmagnetische über
 Zusätzlich entsteht zweite Phase aus weichmagnetischem, hoch magnetisierbarem **Fe₃Pt**
 FePt-Körner sind in Fe₃Pt-Matrix eingebettet. Beide Phasen wechseln sich in ≈ 3 nm ab. Energiedichte $\approx 0,1$ J/cm³
 Material für Anwendungen zu teuer



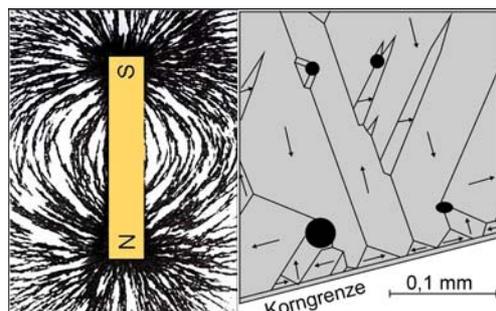
Organisches Material

Bereits 1968 gab es rein theoretische Abschätzungen für organische Magnete aus Polymeren
 Bis 1985: nur d- und f-Elemente zeigen magnetisches Verhalten, Spinkopplung verlangt zusätzlich abschirmende Schale
 Häufig genannt „Eisenrad“ $\text{Fe}_{10}(\text{OCH}_3)_{20}(\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl})_{10}$
 Ab 1988 organischen Verbindungen beobachtet, die bei sehr tiefen Temperaturen Ferro- bzw. Ferrimagnetismus zeigen
 Erste Verbindung: Decamethyl-Ferrocen und Tetracyanoäthylen $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{M}_5)_2]^+ \cdot [\text{TCNE}]^-$ (M = Metall), $T_C = 5$ K
 Bald auch Verbindungen ohne Metallanteile, u.a. engmaschiger Polyether ferromagnetisch unterhalb -260 °C
 1991 wurde das Fulleren-Derivat TDAE-C₆₀ gefunden, das nur H, C und N enthält unterhalb 16 K magnetisch
 2000 unter hohem Druck Polymer aus Fullerenen (C₆₀) bis 230 °C schwach magnetisch
 Je hundert C₆₀ nur ein Spin wirksam, wahrscheinlich durch Störstellen
 Hinweis: im Gehirn immer geringe Magnetit-Konzentration vorhanden, steigt deutlich mit Beginn einer Demenz



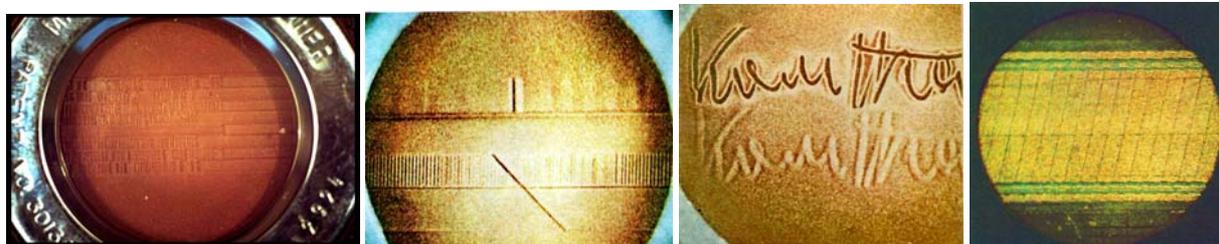
Felder sichtbar machen

Magnetfelder sind unmittelbar unsichtbar, können aber über ihre Kraftwirkung sichtbar gemacht werden
 In der Schule mit Eisenfeilspänen, die sich im Magnetfeld gerichtet sammeln
 (Elektrische Felder ähnlich mit feinsten Lein-Samenkörnern, Gries oder Gipskristallen)
 Mittels Bitter-Technik schon in 30er Jahren möglich, Domänengrenzen des Ferromagnetismus sichtbar zu machen
 Auf die Oberfläche wird eine wässrige Suspension kleinster magnetischer Teilchen (z. B. Fe₃O₄) aufgebracht



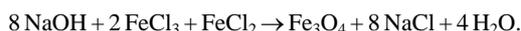
Magnetband-Aufzeichnungen

Magnetbandaufzeichnungen sichtbar zu machen, ist wegen kleiner Feldstärken recht schwierig
 Dadurch anfangs magnetische Daten-Speicherung mit Misstrauen belastet
 1941 gelangen H. HEIDENWOLF erste Darstellungen mit sehr feinem Eisenpulver [Guckenburg]
 1954 W. GUCKENBERG Versuche mit feinstem in Öl oder Glycerin dispergiertem Carbonyl-Eisen-Pulver
 Zunächst nur Trocken, später stark erwärmt, magnetische Kraft verformt erweichte Unterlage, Aufzeichnung wird zerstört
 1960 „*Magnetic Tape Viewer*“ lupenartig, $\varnothing = 45$ mm; MMM (Minnesota Mining & Manufacturing Co. USA = 3M)
 Enthält eine magnetische Flüssigkeit, in der braunes Magnetpulver (Magnetbandproduktion) suspendiert ist
 Gefäß aus Metall, zum Band hin sehr dünne unmagnetische Metallfolie, oben ist ein Glasfenster zur Beobachtung
 Gerät wird auf das Magnetband gelegt, an der Oberseite sind dann die magnetisierten Strukturen sichtbar
 Es sind nur Wellenlängen ≥ 100 μm sichtbar (Dicke der Metallfolie)
 Gerät ermöglicht u.a. auch Spurlage der Köpfe, Geradheit der Spalte sowie Start- und Stoppvorgänge zu erkennen
Kriminalistische Anwendung durch CHRISTIAN KORISTKA: Schallaufzeichnungen = Dokumentenechtheit
 Ab 1970 dadurch in der DDR, Magnetband unter Bedingungen als Beweismittel in Prozessen zu nutzen [Koristka]
 1988 Weiterentwicklung durch KARL WILLASCHEK, schnell **verdampfende Trägerflüssigkeit** unmittelbar dünn auf Band
 Beim Verdampfen lagern sich die Teilchen entsprechend dem vorhandenen Magnetfeld ab
 Mikroskop Wellenlängen < 1 μm sichtbar, spezielle schräge Beleuchtung und Beugungseffekte
 \Rightarrow magnetische Wellenlänge = Gitter als Farbbilder sichtbar, **sogar Videospuren** [Willaschek]
 Trotz sehr großer Fortschritte wird heute Sichtbarmachung von Magnetaufzeichnungen selten benutzt

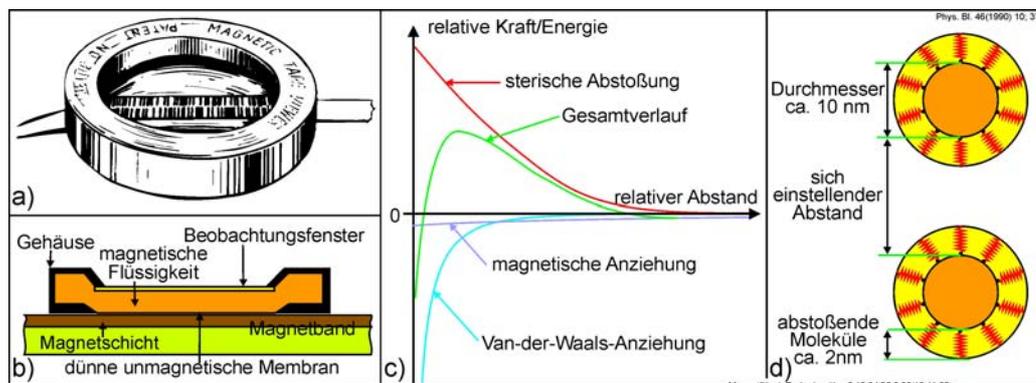


Magnetische Flüssigkeit (Ferrofluid)

Magnetische Flüssigkeiten erstmalig 1965 von S. PAPELL hergestellt (Bezeichnung Ferrofluid eigentlich irreführend)
 Ferro- oder ferrimagnetische Teilchen $\varnothing \leq 10$ nm \Rightarrow kleiner als Einbereichsteilchen = **superparamagnetisch**
 $\approx 10^7/\text{cm}^3$ Teilchen kolloidal in **Trägerflüssigkeit**, z.B. Wasser, Öle, Ester oder Kohlenwasserstoffe suspendiert
 Kleinheit: kein sedimentieren oder koagulieren: Schwerfeld, inhomogenen Magnetfelder, gegenseitige Anziehung
 Teilchen mit **oberflächenaktiven Substanzen** (z.B. Ölsäure) umgeben \Rightarrow Zusammenballen verhindert, Kräftegleichgewicht
Volumenkonzentrationen der Teilchen ≈ 10 %; **Sättigungsmagnetisierung** ≈ 50 kA/m (massives Fe $\approx 1,7$ MA/m)
 Partikel entstehen durch Zerkleinern in **Kugelmühle** mit der späteren Trägerflüssigkeit
 Auch **Fällen aus Salzlösungen** unter Zugabe Trägerflüssigkeit und oberflächenaktiven Substanzen ist möglich, z.B.



Variation der Herstellungsparameter: heute im **Handel breites Spektrum** magnetischer Flüssigkeiten



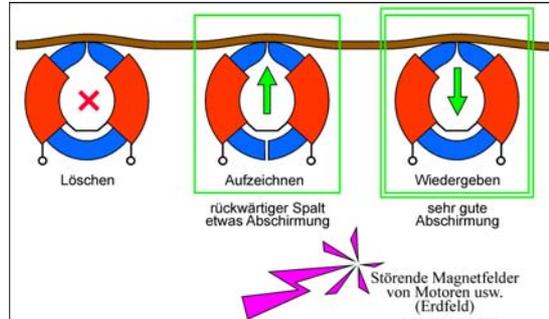
Weitere Anwendungen

Trotz hoher magnetische Suszeptibilität $\chi > 1$ Verhalten wie übliche Flüssigkeiten, auch im μs -Bereich
 Bereits geringe Magnetfelder ändern rheologische und hydrodynamische Eigenschaften wesentlich \Rightarrow viele Anwendungen
 Magnetisch steuerbare Kupplung, je stärker äußeres Magnetfeld, desto zäher Flüssigkeit
 Ähnlich im Luftspalt von Leistungslautsprechern, dämpft und kühlt dabei die Schwingspule
 Permanentmagnet frei beweglich in magnetischen Flüssigkeit wird in ihre Mitte gezogen + magnetischen Auftrieb
 Hiermit konstruierte S. PAPELL Pumpen und vakuumdichte Durchführungen ohne mechanisch bewegte Teile (Raumfahrt)

Weitere Anwendungen: Sortieren von Schrott und magnetische Tinte für spezielle Drucker
 Medizin, in Blutbahn injiziert, durch Magnetfelder an ausgewählte Körperstellen räumlich und zeitlich bewegen
 Kontrastmittel für Röntgenaufnahmen, abgelöste Netzhaut magnetisch wieder „Andrücken“

Magnetköpfe, Abschirmungen usw.

Beide Anwendungen betreffen ähnliche Eigenschaften und fast ausschließlich für *weichmagnetisches* Material



Anforderungen

- **Hohe Permeabilität** (Kopfwirkungsgrad, Abschirmung, Spalttiefe \leftrightarrow Abrieb., Lebensdauer)
- **Hohe Sättigungsmagnetisierung**, besonders Spaltkanten, Sättigung \leftrightarrow verbreitert Spalt
- **Geringe Koerzitivfeldstärke** und **Remanenz** Aufzeichnung, Wiedergabe \Rightarrow Restmagnetisierung bewirkt Rauschen
- Bei Magnetköpfen zusätzlich **hohe Abriebfestigkeit \approx Härte**: $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \approx \text{HV } 300$, $\text{CrO}_2 \approx \text{HV } 800$, \Rightarrow Schleifmittel Optik
- **Großer spezifischer Widerstand \approx geringe Wirbelstromverluste** (Löschkopf), \leftrightarrow **Hohe bis höchste Frequenzen** (Video)
- **Ausreichende Curie-Temperatur** insbesondere Löschköpfen

Wichtigkeit der Materialkenngrößen

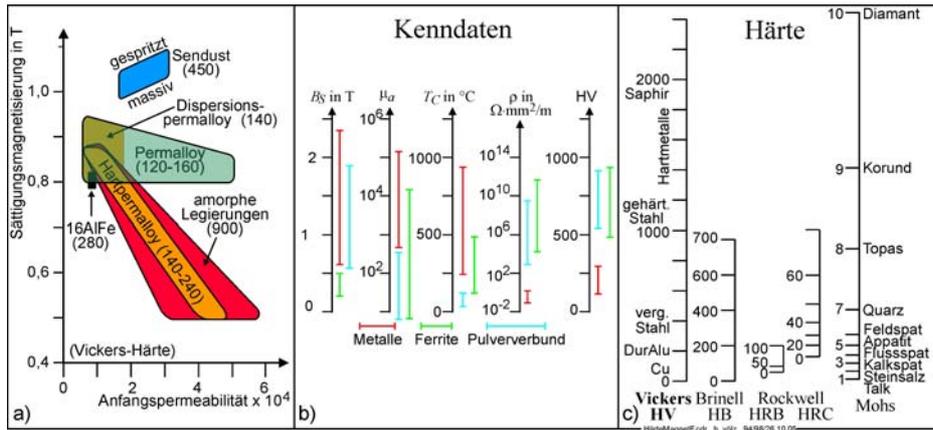
	Wiedergabe	Aufzeichnung	Löschung	Betreff
μ_a	sehr groß	mittel	unwichtig	Wirkungsgrad, Linearität, Abschirmung
B_S	unwichtig	sehr groß	sehr groß	Speicherdichte
H_C	sehr klein	klein	unwichtig	Rauschen, Restmagnetismus, Linearität
ρ	groß	groß	groß	Wirbelstromverluste, Grenzfrequenz, Abschirmung
HV	groß	groß	groß	Abrieb (Verarbeitbarkeit)
T_C	unwichtig	hoch	hoch	Betriebssicherheit

Bei jeder Anwendung **widersprechen sich** die Material-Forderungen zumindest teilweise \rightarrow fast immer **Kompromisse**

Werkstoffe für Magnetköpfe und Abschirmungen

Kristallin z.B.: Fe, Kohlenstoffstahl, $\text{FeSi}_4\%$, FeNi_{30} bis 83 %, FeCo_{23} bis 50 %, FeAl, FeAlSi, u.a. Sendust; * = Mu-Metall
Amorph: FeBSi , FeNiBSi , Co-Basis [Co, Fe, Ni](B, Si, C)], $(\text{CoFe})\text{M}$ mit M = Zr, Hf, Nb.

Material	H_C in A/cm	B_S in T	T_C in $^\circ\text{C}$	Permeabilität	Widerstand in $\text{m}\Omega\text{-cm}$	VICKERS-härte
Reines Eisen	0,2 - 1,4	2,15	770			
Sintereisen	0,006 - 0,12	2,15	770			
$\text{FeCo}_{15...18}$	1 ... 2	2,25				
$\text{FeCo}_{25...35}$	1 ... 2	2,35	950			
$\text{FeAl}_{12...13}$	0,2	1,6	600	1 000	110	
FeAl_{16} Alfenaol	0,04	0,9	350	8 000	145	250
$\text{FeSi}_{9,5}\text{Al}_{5,6}$ Sendust)	0,02	1,1	500	30 000	90	450
$\text{FeSi}_{9,7}\text{Al}_{5,7}\text{Ti}_2$	0,03	0,9		15 000	120	550
CoMoFeMn amorph	0,08	0,8		5 000	130	900
MnZn-Ferrit	0,08	0,4	150	5 000	10^6	600
heißgepresst	0,1	0,5	190	15 000	10^5	650
Einkrsitall	0,01	0,45	180	15 000	10^5	650
NiZn-Ferrit	0,1	0,3	150	5 000	10^{10}	650
...heißgepresst	0,1	0,5	135	5 000	10^{10}	750
$\text{FeNi}_{75...81}$ Permalloy	0,05	0,8	400	200 000	55	130
$\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{16}\text{Co}_2\text{Cu}_5$ *	0,02	0,75	280	100 000	55	220
$\text{FeNi}_{35...40}$	0,5	1,3	240	10 000	40	
FeNi_{50}	0,1	1,5	500	5 000	45	
$\text{Fe}_{76...81}$, amorph	0,03	1,5	400	10 000		
$\text{Fe}_{70}\text{Ni}_{20}$, amorph	0,01	1,5		200 000		
Carbonyleisen	5	1,6			10^7	



Magnetkreis

Magnetkreis wegen stets **geschlossener Feldlinien** notwendig

Im Prinzip mittels **Entmagnetisierung** behandelbar, besser ist hier aber Einführung **magnetische Widerstände**

Sonderfall der diskreten Abstufung genügt meist

Analog elektrischem Widerstand: Querschnitt A , Länge l und Permeabilität μ

\Rightarrow magnetischer Widerstand R_{magn} bzw. reziprok magnetischer Leitwert Λ_{magn}

$$\Lambda_{magn} = 1/R_{magn} = \Phi/V = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A/l.$$

Im Beispiel liegt Reihenschaltung der Widerstände vor ($\approx A_L$ -Wert von Spulen!)

$$R_{total,magn} = \sum_i R_{i,magn}$$

Erregung durch Spule n Windungen und Strom I durchflossen \Rightarrow magnetische Spannung

$$V = \sum_i H_i \cdot l_i = I \cdot n$$

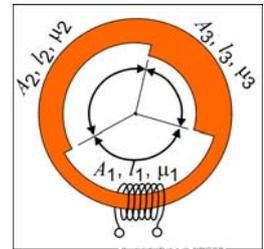
Es soll kein magnetischer Streufluss außerhalb des Magnetmaterials ($\mu_r \gg 1$) auftreten:

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3.$$

Die Längen l_i sind meist groß gegenüber den Querschnitten A_i : $l_i \gg \sqrt{A_i} \Rightarrow$ in jedem Abschnitt für Flussdichten

$$B_i = \Phi/A_i \text{ mit Teilfeldstärken } H_i = B_i/(\mu_0 \mu_{ri}).$$

Rechnung gilt auch, wenn einzelne Abschnitte **Luftspalte** sind



Dauermagnetkreis

Wichtig für Gleichfeldlösch-, magneto-resistive Köpfe, Motoren und Aktuatoren

Dauermagnet: Länge l_d , Querschnitt A_d muss zuerst Feldstärke H_a im

Arbeitsraum mit l_a, A_a bestimmt werden ($l_a \ll \sqrt{A_a}$)

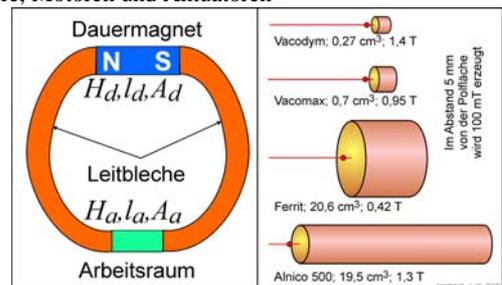
Leitbleche $\mu_{ra} \rightarrow \infty$ dienen der Anpassung

$$V = H_d \cdot l_d + H_a \cdot l_a = 0: \text{keine Verluste} \Rightarrow \Phi = B_d \cdot A_d = B_a \cdot A_a.$$

Energie im Dauermagnet = entgegengesetzt im Arbeitsraum:

$$B_d \cdot H_d \cdot A_d \cdot l_d = -B_a \cdot H_a \cdot A_a \cdot l_a.$$

Folgen u.a. Bedingungen für optimale Geometrie von Dauermagneten



Anwendung auf Ringkopf

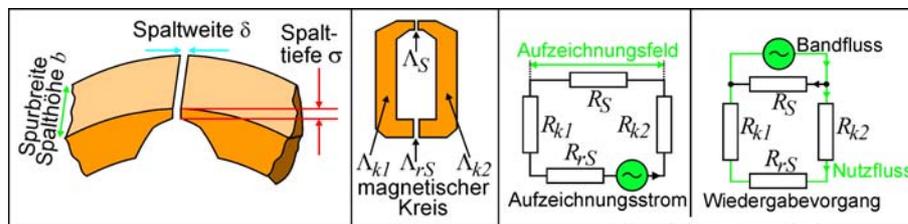
Reihenschaltung magnetischer Widerstände $R = 1/\Lambda$: Arbeitsspalt Λ_s , rückwärtigen Spalt Λ_r und Kernhälften Λ_{k1} und Λ_{k2}

Für **Kernteile** gilt $A =$ mittlerer Querschnitt, $l =$ Länge und μ_r Anfangspermeabilität des Materials

$$\Lambda = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A/l$$

Für **Luftspalte** (Näherung weil Feldlinien auch seitlich herausragen!)

$$\Lambda \approx \mu_0 \cdot \sigma \cdot b/\delta$$



Aufzeichnungskopf

Recht einfach zu behandeln, auch dann, wenn 2 Luftspalte vorliegen

Es existiert eine reine Reihenschaltung mit **Einspeisung** durch den **Spulen-Strom** \approx obige Betrachtung

Das **Aufzeichnungsfeld** tritt nur am Arbeitsspalt auf, R_{k1} und R_{k2} sind meist zu vernachlässigen

Nachteilig hierfür evtl. der rückwärtige Spalt, wirkt aber linearisierend für Arbeitskennlinie und reduziert Restmagnetismus

Für hinreichenden Magnetfluss, Feldstärke im Aufzeichnungsspalt, ist nur der notwendige Aufzeichnungsstrom größer

Wiedergabekopf

Es liegt Parallelschaltung von R_S mit $R_n = R_{k1} + R_{k2} + R_{rS}$ vor

Einspeisung erfolgt parallel dazu vom Bandfluss (äquivalent Spannung)

Wirksam wird nur der Fluss Φ_n durch Kernteile, auf denen sich die Spulen befinden \rightarrow magnetischen Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_s}}$$

Damit er groß (≈ 1) wird, muss $R_s \gg R_n$ gelten.

Weil eine kleine Spaltweite δ erforderlich ist, ist R_s leider recht klein

Geringe Spalttiefe vergrößert ihn, bringt aber Problem bzgl. seiner Stabilität und dem Abrieb (Standzeit)

Folglich notwendig: rückwärtiger Spalt $\rightarrow 0$ und $\mu_r \rightarrow \infty$

Aufzeichnungs-Wiedergabekopf

Für einfache Speicher existiert nur ein Kopf für Aufzeichnung und Wiedergabe

Ersichtlich sind Entwurfskriterien teilweise erheblich widersprüchlich

Bereitet Schwierigkeiten bei der Nutzung, meist werden die Kriterien des Wiedergabekopfes bevorzugt

Löschkopf

Bereitet keine besonderen Entwurfsprobleme, Schaltbild entspricht Aufzeichnungskopf

Arbeitsspalt muss wegen Löschwirkung ohnehin recht groß sein, zusätzlich rückwärtige Spalt $\rightarrow 0$

Folglich gesamte Energie automatisch im recht weiten Arbeitsspalt

Magnetische Stabilität

Bei der magnetischen Speicherung wird der Magnetkreis durch Kopfkontakt fortwährend geändert

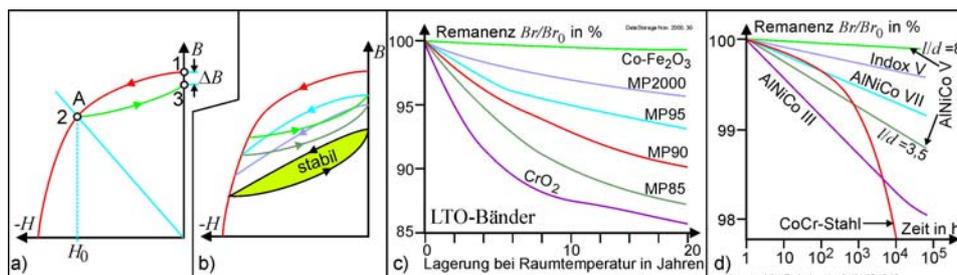
Vorübergehender Kurschluss der Feldlinien führt zu einer Rückmagnetisierung \rightarrow verbleibende Remanenz sinkt

Nur schrittweise erfolgt Übergang zur stabilen Ellipsenform

Verluste wurden im Laufe der Entwicklung von Speichermedien deutlich geringer

Dennoch vor allem bei erster Wiedergaben etwas Pegelverlust, meist < 2 dB

Ähnlich für Dauermagnete, auch wegen der statistisch wirkenden thermischen Energie



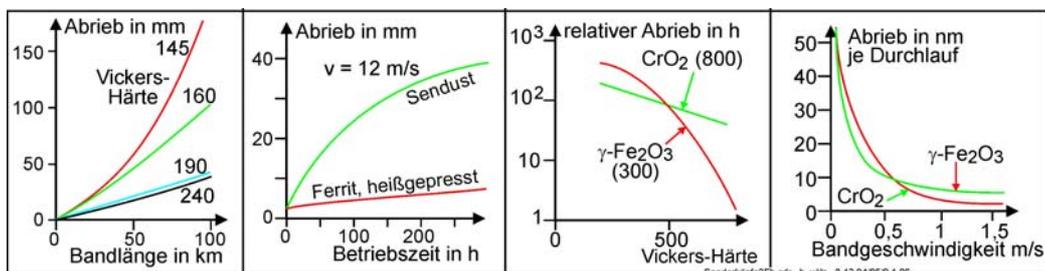
Mechanische Stabilität

Schleifmittelcharakter Fe_2O_3 (VH ≈ 300), CrO_2 (VH ≈ 800) bewirkt, jeder Banddurchlauf trägt etwas vom Magnetkopf ab

Es **sinkt** die **Spalttiefe** \Rightarrow zunächst besserer **Wirkungsgrad**, dann verbreitert sich Kopfspalt, **schlechter Frequenzgang**

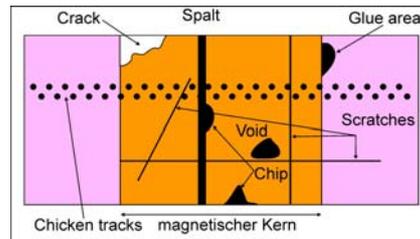
Typisch wenigen hundert bis zu einigen tausend **Betriebsstunden**, Zusammenhänge recht komplex, wenig erforscht

U. a. gehen ein: Band-Umschlingungswinkel, Bandzug und die Bandgeschwindigkeit [Details Buch Völz]



Weitere Auswirkungen

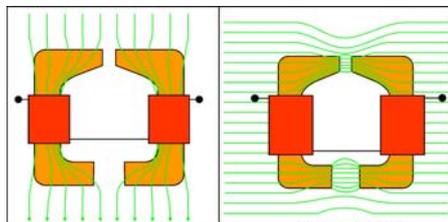
- Chicken tracks** = fährtenähnliche Vertiefungen in Bandlaufrichtung, entstehen durch kleine lose, aber harte Partikel
- Chips** bzw. **Voids** = Materialeinbrüche an Materialkanten bzw. an Poren, füllen sich mit Schmutz oder Abriebprodukten, treten besonders häufig bei kompaktem Material, z.B. bei Ferrit auf
- Cracks** = Materialeinbrüche besonders häufig bei Ferriten, vermeiden durch isostatisch hochverdichtetes Material
- Glue lines** \approx **Glue areas** = linien- oder flächenhafte klebrige Ablagerungen, verstärkt am Kopf-Spiegel, Ursache meist Bindemittel vom Magnetband
- Scratches** = lange, schmale, geradlinige Kratzer auf der Spiegeloberfläche, entstehen beim Läppen, Bandlauf, falsche Handhabung.



Störeinflüsse

Neben **Fremdstörungen** durch Motoren, Trafos usw. teilweise auch Erdfeld, gibt es **Eigenstörungen**:
 Beim Aufzeichnungs- und z.T. beim Löschkopf besteht Gefahr, dass Störungen aufgezeichnet werden!
 HF-Vormagnetisierung erhöht diese Gefahr, weit streuende HF-Felder, Vorteil Wirbelstrom
 Bei read-after-write bzw. Hinterbandkontrolle: Übersprechen vom Aufzeichnungs- zum Wiedergabekopf
 Alle Effekte können unterschiedlich verringert bis beseitigt werden, Kombination der Verfahren sinnvoll

- Abschirmung des Störers, z. B. Motor, Trafo, (Erdfeld)
- Abschirmung des Gestörten, Wiedergabe, falls notwendig Aufzeichnungs- oder gar Löschkopf
- Kompensation der Störung beim Gestörten, Wiedergabekopf, z. B. Reihenschaltung mit Spule im Störfeld
 Hierzu zählen auch und vor allem **symmetrisch aufgebaute Magnetköpfe** (Achtung: Richtung des Feldes)
Gleichfelder sind durch Dauermagnete zu kompensieren



Arten der Abschirmung

Magnetische **Abschirmung** verwendet weichmagnetische Werkstoffe hoher Permeabilität
 Nur bei sehr großem μ_r bleibt abgeschirmter Innenraum ziemlich feldfrei (stets wesentlich schlechter als elektr. Isolation)
 Bei Wechselfeldern ist zusätzlich gute elektrische Leitfähigkeit nützlich \Leftrightarrow Wirbelstrom und Eindringtiefe δ

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \Rightarrow \text{Größengleichung} \rightarrow \delta / \text{mm} = 50 \cdot \sqrt{\frac{\rho / \mu\Omega \cdot \text{cm}}{\mu_r \cdot f / \text{Hz}}}$$

ρ = spezifischer Widerstand, μ = Permeabilität, μ_r = relative Permeabilität, f = Frequenz \Rightarrow Größengleichung

Wirbelströme werden also erst bei relativ hohen Frequenzen wirksam

Wirkung wird erhöht durch leitende Überzüge aus Kupfer

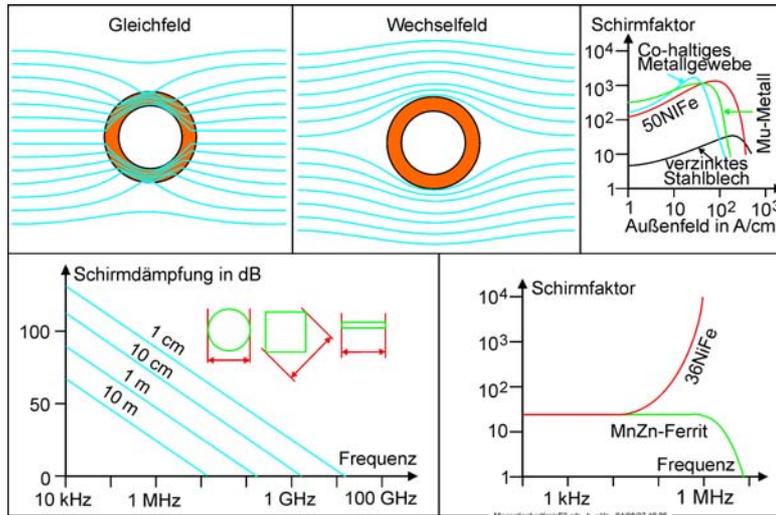
Jede Abschirmung sollte möglichst lückenlos das Objekt umfassen, kleinstes Loch reduziert deutlich Schirmwirkung
 Bei Magnetköpfen zumindest Löcher für den Eintritt des Magnetbandes, zusätzliche Kanäle um das Band notwendig

Eindringtiefe bei einigen Abschirmmaterialien

Werkstoff	ρ in $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	μ_r	δ in m bei 50 Hz	δ in mm bei 100 kHz
Ni ₅₀ Fe ₅₀	45	5 000	0,7	0,015
Ni ₇₆ FeMoCu	55	30 000	0,3	0,007
Co ₅₀ Fe ₄₈ V ₂	35	1 000	1,3	0,03
Stahlblech, verzinkt	10	250	1,4	0,045
Co ₆₆ Fe ₄ MoSiB, amorph	130	10 000	0,6	0,015

Schirmfaktor (absolut), -dämpfung (dB)

= Verhältnis vom äußeren zum inneren Magnetfeld, für einfache Anordnungen gut berechenbar, Messungen effektiver



Rechts oben: Rundbleche von 50 mm \varnothing und 0,1 mm Dicke

Links unten: Spezielle Gehäuseformen

Rechts unten: lange Rohre mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Wandstärke von 0,1 mm.

Löschen, Löschköpfe

Erfolgt aus unterschiedlichen Gründen

1. Meist soll eine vorhandene Aufzeichnung **vernichtet** werden:

Zum **Datenschutz**, die Aufzeichnung soll dann auf keine Weise rekonstruierbar sein: Achtung! bei nicht genau übereinstimmenden Spurlagen: breiterer Löschkopf

Wiederverwendung des Speichermediums für eine erneute Aufzeichnung

Aus ökonomischen Gründen wurde so in der Analogzeit viel Kulturgut unwiederbringlich vernichtet

Infolge der vielfältigen magnetischen Prozesse – reversible, irreversible Wandverschiebungen, Klapp- und Drehprozesse, des Abriebs usw. ist ursprünglicher Zustand des Mediums nicht erreichbar.

Daher durfte bei **Studioaufnahmen** kein gelöscht Band für hochwertige Aufnahmen eingesetzt werden

2. Löschung automatisch für optimale **Aufzeichnung vorbereiten**. Günstiger Arbeitspunkt auf Hysterese-Kurve

3. Löschung **durch einfaches Überschreiben** mit neuer Aufzeichnung

Bei digitaler und frequenzmodulierter Technik einfach zu realisieren, Nachteil kaum ganz störungsfrei

4. Ein Block wird als **ungültig erklärt** nur bei digitaler Technik, genügt nicht für Datenschutz, *hier nicht weiter behandelt*

Löschen mit Magnetköpfen

(vorübergehende) Sättigung des Speichermaterials

die Remanenz M_R enthält keine ursprüngliche Information mehr

Einfaches Prinzip und ohne elektrische Energie, wurde mit **Dauermagneten** bei alten Geräten benutzt

Wechselfeldlöschung = HF-Löschung

Wechselfeld steigt auf Maximum (Sättigungsfeldstärke) und nimmt langsam und symmetrisch auf Null ab

Hysterese-Kurve wird fortlaufend in immer kleiner werdenden Unterschleifen durchfahren

Am Ende liegt der unmagnetisierte Zustand vor

Damit genügend zyklische Ummagnetisierungen auftreten muss der **Arbeitsspalt des Löschkopfes** recht weit sein

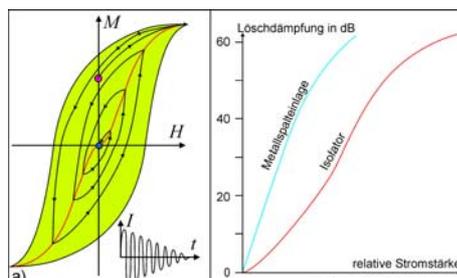
Verbesserung durch **Doppelspalt-Löschköpfe**

enger Spalt intensive Ummagnetisierungen, weiter Spalt systematisch zu Null abklingend

Metallische Spalteinlage kann Löschung verstärken, durch Wirbelströme ragt Wechselfeld weiter herau

Erregender Strom darf **keine geradzahigen Harmonischen** besitzen

Nichtlineare Kennlinie erzeugt dann eine verbleibende Gleichfeldmagnetisierung (Gegentaktoszillatoren)



Löschköpfe und -einrichtungen

Bei Löschköpfen gibt es neben dem üblichen Ringkopf auch mehrere Sonderausführungen
So gab es in Sonderausführung mit einem **Dauermagnet**, die dennoch wie ein Wechselfeld wirkt, abnehmender Bandabstand

Es gab auch Verfahren, die gleich den **gesamten Bandwickel löschen**

Wichtig **50-Hz-Löschdrossel**, die über den Wickel in zwei Richtungen bewegt und in großer Entfernung abgeschaltet wird
Weniger effektiv ist der **Löschstift**, der auch zum Entmagnetisieren von Köpfen, Führungen usw. dient

Es gab auch ein spezielles **Lösch-Gerät**, in das die Magnetbandspule hinein geschoben wird

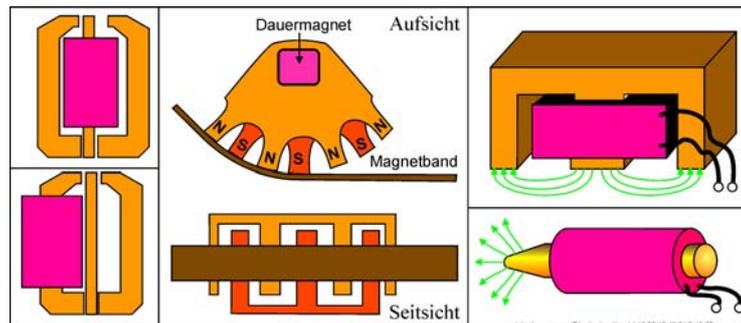
Ober- und unterhalb der Magnetbandspule befindet sich je eine große Drahtspule

Ein großer Kondensator (ca. 10 μF) wird auf $\approx 5 \text{ kV}$ aufgeladen und dann mit den Drahtspulen verbunden

Dadurch entsteht ein Schwingkreis ($L + C$) Güte ≈ 20 , Resonanzfrequenz $\approx 100 \text{ Hz}$

Es entstehen ≈ 50 Perioden einer abklingenden Schwingung, Löschung ebenfalls in mindestens zwei Richtungen

Weniger bewährt hat sich die Nutzung der **Curie-Temperatur** magnetischer Materialien



Aufzeichnung \Leftrightarrow Wiedergabe

1. Jeder elektrische Strom hat ein Magnetfeld zur Folge = wichtig für die Aufzeichnung

Das magnetische Feld H folgt unmittelbar der erregenden Stromstärke $I \Rightarrow H \sim I$

2. Jede Änderung eines Magnetfeldes bewirkt in Leitern eine Induktionsspannung = wichtig für die Wiedergabe

Die induzierte Spannung U folgt der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses $\Phi \Rightarrow U \sim d\Phi/dt$

\Rightarrow **Wiedergabe** ist schwieriger zu behandeln (s. u. Reziprozitätstheorem)

Einfache I-H-Betrachtung ohne magnetisches Material

Gemäß BIOT-SAVART'schen Gesetz von 1820 erzeugt ein Strom I erzeugt am Messpunkt das Magnetfeld

JEAN BAPTISTE BIOT (1774 – 1862); FÉLIX SAVART (1791 – 1841)

Wurde 1823 unabhängig von ihnen von ANDRÉ MARIE AMPÈRE (1775 – 1836) gefunden

$$H = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \int_l \frac{I \cdot \sin(\varphi)}{r^2} \cdot ds \cdot$$

r = Abstand zur differentiellen Wegstrecke ds , φ = Winkel zwischen beiden

Das Integral ist über die gesamte Länge l des Leiters zu bilden, bei Kreisstrom das Kurvenintegral

Auf der zentral gewählten x -Achse des Kreisstromes mit Radius r gilt

$$H_x = \frac{I}{2} \cdot \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \cdot$$

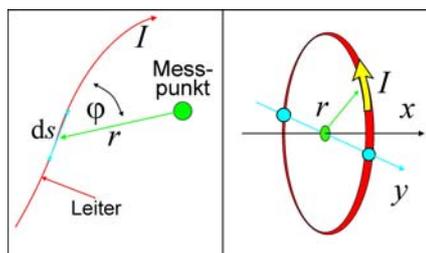
Bei einer Spule mit n Windungen addieren sich die n Kreisströme

Für eine Spule der Länge $L \gg r$ ist eine Vereinfachung möglich. Auf der Achse im Innern der Spule existiert die Feldstärke

$$H_x = n \cdot \frac{I}{L} \cdot$$

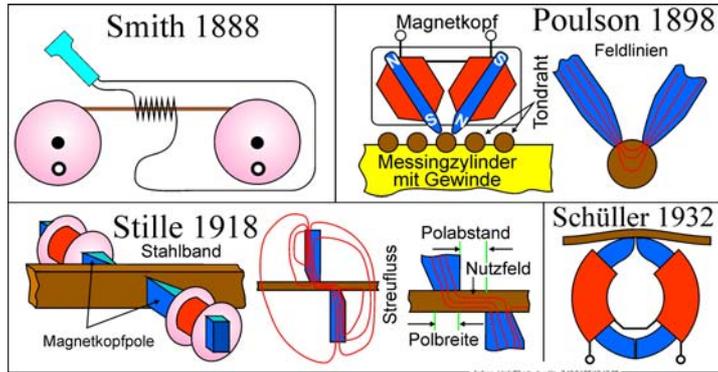
Dies führt unmittelbar zur **Durchflutung** in Ampère

$$V = \oint H \cdot ds = \sum I \quad (\text{alt } \Theta \text{ statt } V) \cdot$$



Übergang zum Ringkopf

Ohne magnetisches Material reicht das Magnetfeld einer Spule weit in den Raum
 Das ermöglicht keine Speicherung in kleinen Volumen, Historisch entstanden zunächst drei Etappen
 1898 benutzte VALDEMAR POULSEN (1859 – 1942) zum Magnetdraht einen Kopf mit zwei Polen
 Da sich der Draht drehen konnte traten erhebliche Schwankungen bei der Wiedergabe auf. (Profilseite!)
 1918 setzte daher CURT STILLE (1873 – 1957) massiven Stahlband ein, versetzte die beiden Pole leicht in Bandrichtung
 Entspricht exakter Längsaufzeichnung
 1932 führte EDUARD SCHÜLLER (1904 - 1976) den noch heute üblichen Ringkopf beim PFLEUMER-Band ein
 Vorteile: Magnetkreis ist *geschlossen* = hoher Wirkungsgrad, Kopf nur an einer Bandseite
 ab etwa 1970 neue Kopfvarianten für Senkrecht-Speicherung, Floppy und Festplatten



Mathematische Analyse des Ringkopfes

Die Feldberechnungen eines Luftspaltes, wie beim Ringkopf sind kompliziert und umfangreich
 Sie erfolgten anfangs analytisch mittels der **Funktionentheorie** [Mallinson], [Völz68]
 1954 entscheidende Untersuchungen durch O. KARLQUIST bzw. W. K. WESTMIJZE
 Später kamen stark vergrößerte **experimentelle Modelle**, z. B.: Gummimembran oder elektrolytischer Trog
 Heute fast nur noch **Computermodell, Programme**, z. B. Mathematica, Mathcad, Matlab oder finite Elemente

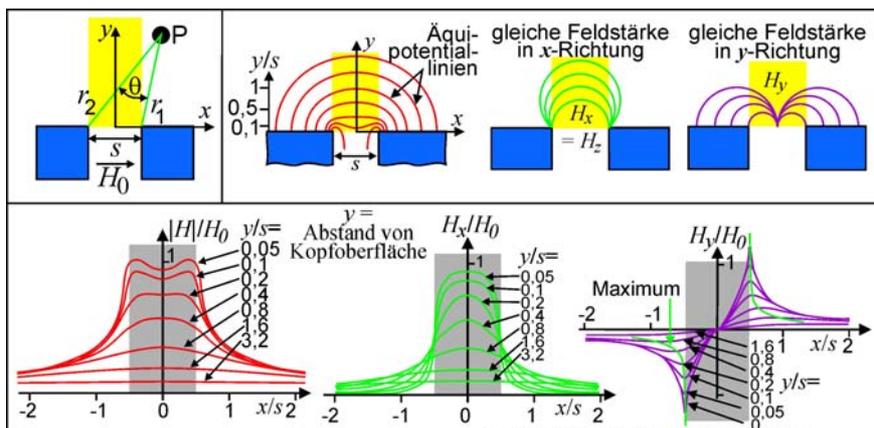
Der Spalt besitze die Weite s (x -Richtung), wird in z -Richtung unendlich lang angenommen
 Ebenso die Spiegellängen in den vom Spalt abgewandten x -Richtungen
 Von einem Aufpunkt bestehen zu beiden Spaltkanten die Entfernung r_1 und r_2 mit dem Winkel θ
 Im Spalt herrsche die Feldstärke H_0 . Für die Feldkomponenten in x - bzw. in y -Richtung gilt dann:

$$H_x = \frac{H_0}{\pi} \cdot \left[\arctg\left(\frac{x + s/2}{y}\right) - \arctg\left(\frac{x - s/2}{y}\right) \right] \quad \text{bzw.} \quad H_y = \frac{H_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[\frac{(x + s/2)^2 + y^2}{(x - s/2)^2 + y^2} \right]$$

Meist wird die Näherung von O. KARLQUIST: benutzt

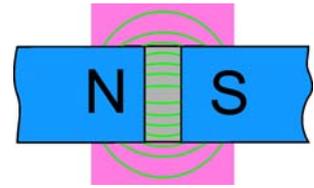
$$H_x = H_0 \frac{\theta}{\pi} = \frac{H_0}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{y \cdot s}{x^2 + y^2 - (s^2/2)} \right]$$

Nun ist y Abstand vom Kopfspiegel (Oberfläche Magnetkopf) und $\pm x$ Entfernung von Spaltmitte
 Berechnet werden u. a. die **Äquipotentiallinien**, sie besitzen einen nahezu **halbkreisförmigen** Verlauf
 Für die Speicherung sind die x - und y -Komponente des Feldes im **spaltnahen Bereich** besonders wichtig
 Die **Längskomponente** (x) ist symmetrisch zur Spaltmitte
 Die **Quer**komponente (y = Senkrecht) ist in der Spaltmitte gleich Null, rechts und links entgegengesetztes Vorzeichen
 Eine **gute Feldkonzentration** existiert nur in der unmittelbaren Nähe des Spalts, $y \rightarrow 0$
 Daher muss der **Abstand $a = y$** (bzw. y/s) zum Speichermedium **so klein wie möglich** sein



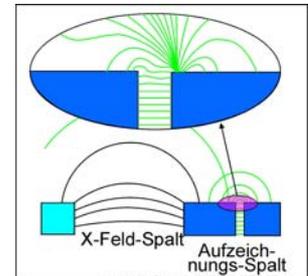
Spaltweite s , -länge l_s

Für y -Ausdehnung des Spaltes $l_s \rightarrow \infty$ angenommen, technisch muss sie aber endlich sein
 Das hat Folgen für die Speicherdichte \Rightarrow an den Rändern ragt das Feld auch seitlich heraus
 Das **vergrößert die Spurbreite** der Aufzeichnung
 Es muss sogar $s \ll l_s$ gelten = lang gezogenes Rechteck!
 Gegensatz **Optik**, wo **Brennfleck** ein Kreis ist: x - und y -Richtung gleich groß!
 Folgerungen bei **thermomagnetischer Aufzeichnung** und β -Videotechnik



X-Feld-Kopf

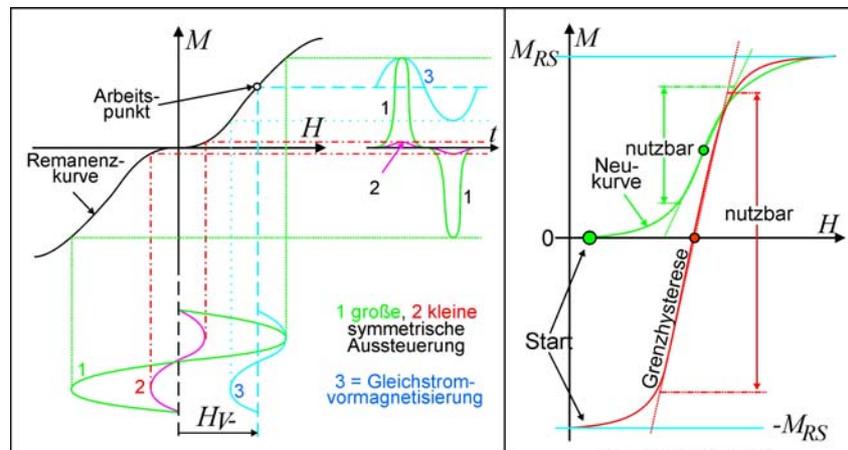
Festlegung der Aufzeichnung ist Feldstärke an der **ablaufenden Spaltkante** wichtig
 Mehrfach versucht, Magnetköpfe mit einem hierfür besseren Feldverlauf zu finden
 Einzig erprobte Variante ist X-Feld- bzw. Kreuzfeld-Kopf
 Wurde bereits 1933 von SCHÜLLER patentiert
 Zusätzlicher breiter Spalt erzeugt stärkere Feldlinien-Krümmung an einer Spaltkante
 Der Vorteil ist jedoch bezüglich der aufwändigen Konstruktion zu gering
 Thermooptische Aufzeichnung ist wesentlich besser!



Gleichstrom-Vormagnetisierung

Einfache Beschreibung der magnetischen Speicherung über die **Remanenzkurve**

- Um den **Nullpunkt herum** ist sie jedoch leider extrem nichtlinear \rightarrow starke Signalverzerrungen
 Nicht für Audio geeignet, jedoch für Frequenzmodulation (Video) oder Impulstechnik (digital)
 - Mittels **Gleichstrom-Vormagnetisierung** (englisch bias) kann ein linearer Teil genutzt werden
 inhomogene Magnetschicht bewirkt starkes Rauschen
 \Rightarrow Dichte, Lage, Größe der Partikel, Rauheit der Oberfläche usw.
 - Grenzhysterese ab Sättigung** \Rightarrow ≈ 3 -Mal größerer Aussteuerungsbereich, Rauschen bleibt aber etwa gleich
 ist aber annähernd symmetrisch zum Nullpunkt
- Dennoch hat sich die Gleichstromvormagnetisierung eine gewisse Zeit bei einfachen Diktiergeräten behaupten können



HF-Vormagnetisierung

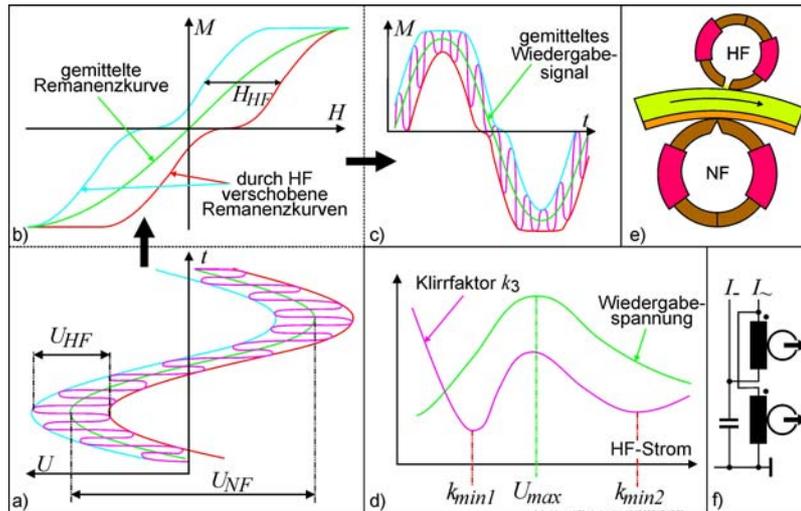
18.4.1940 Tagebuch-Eintrag von WALTER WEBER (1907 – 1944) zur HF-Vormagnetisierung
 Zufällig gemeinsam mit HANS-JOACHIM VON BRAUNMÜHL (1900 – 1980) gefunden
 Es gibt dazu viele Legenden und „angebliche“ Versuche anderweitig, z. B. Japan (sehr unwahrscheinlich)
 Beide versuchten Rauschen durch Gegenkopplung zu verringern, dabei geriet Verstärker ins Schwingen (Rückkopplung)
 Bis heute keine befriedigende Theorie, einfache Erklärung durch CAMRAS
 HF-Wechselfeld = Impulsfeld schaltet zwischen zwei verschobenen Remanenzkurven um
 Hohe Frequenz wird nicht aufgezeichnet, Wiedergabe bildet unverzerrten Mittelwert

Vorteile

- Sehr gut lineare** Arbeitskennlinie
- Ganzer Remanenzbereich** von positiver bis negativer Sättigung ist nutzbar
- Der **Rauschpegel** sinkt auf extrem kleinen Wert, übertraf damals alle technische Verfahren um Größenordnungen

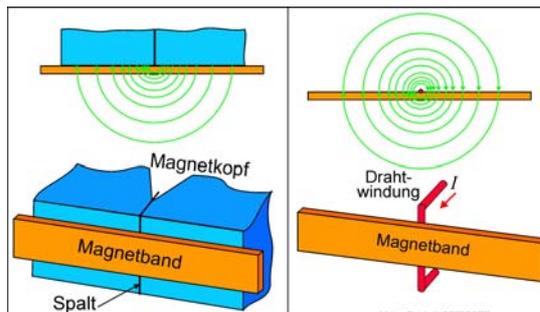
Bedingungen

- HF muss etwa **dreimal so hoch** wie maximale NF-Frequenz und darf **keine geradzahigen Harmonischen** enthalten
- Optimale Amplitude** der HF liegt bei etwa 1/3 der maximalen NF-Amplitude (Remanenzwert)
- Die optimale HF-Amplitude hängt von vielen Einflüssen ab, **nur experimentell** bestimmbar
- Beachten:** Nichtlinearität der Remanenzkennlinie kann zu **Interferenzen** zwischen HF und NF führen
 damit sie nahezu unhörbar bleiben, Frequenz recht hoch wählen, Grenze Wirbelstromverluste
- Es existieren getrennt **zwei Amplituden-Maxima** und ein **Klirrfaktor-Minimum** des Wiedergabesignals



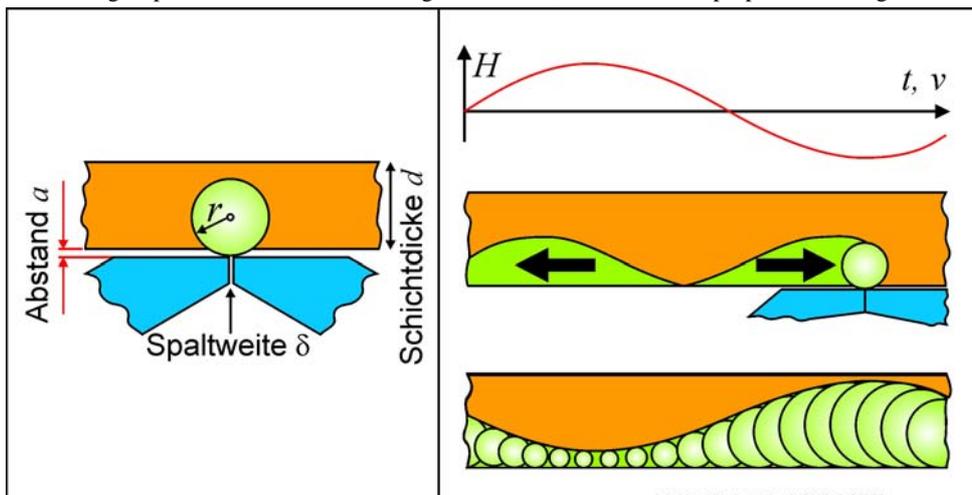
Kopfspalt, gerader Draht

Für Aufzeichnung ist Magnetfeld des Kopfes entscheidend
 Theoretisch kann Magnetspalt unendlich eng angenommen werden, ermöglicht Ersatz stromdurchflossener Draht
 Folge kreisförmiges Magnetfeld \Leftrightarrow Halbkreise + Kopf-, „Spiegel“ \Rightarrow ermöglicht einfachere Betrachtungen
 Spaltweite δ entspricht Drahtdurchmesser \varnothing



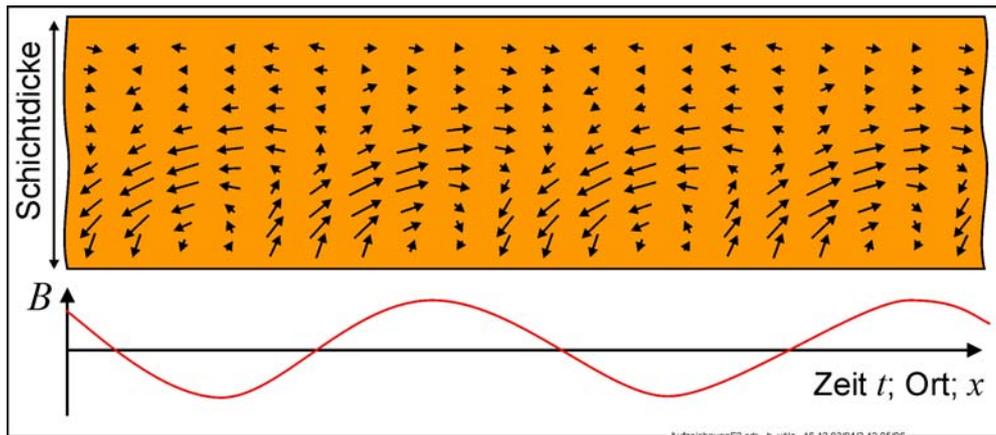
Modell von BAUER und MEE

Annahme: Magnetband schalltet bei einer festgelegten Schwellfeldstärke; (mehr bei [Vajda])
 Vor dem Aufzeichnungskopf bildet sich ein kreisförmiges Schaltfeld, dessen Radius proportional erregendem Strom ist



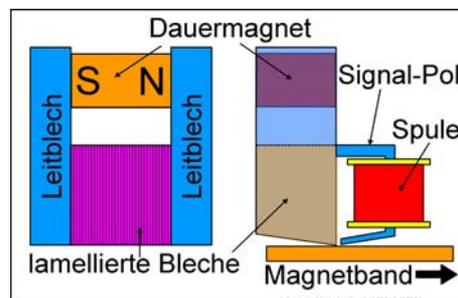
Experimente TJADEN und LEYTEN

1963 schufen sie bei Philips (Diplomarbeit) ein 5000-fach *vergrößertes Modell* von Magnetkopf und Band
 Spaltweite = 20 mm, Schichtdicke vom Magnetband = 50 mm, Bandlänge mehrere Meter
 Nach Aufzeichnung „Magnetband“ in kleine Blöcke zerschnitten und deren Magnetisierung bestimmt
 Länge und Richtung der Pfeile kennzeichnen remanente Magnetisierung der Proben
 Ergebnisse weichen deutlich von allen Theorien ab



Kopf für Seiten-, Hörschrift

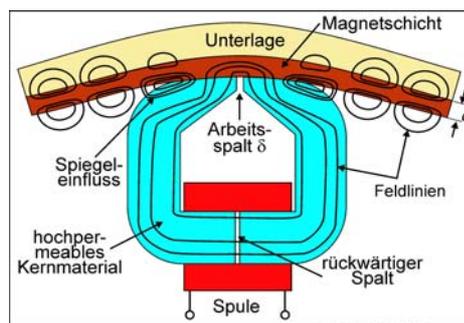
Eine Zeitlang gab es Versuche, die Magnetbandaufzeichnung wie ein Oszilloskop zu nutzen
 Dafür waren ein spezieller Kopf und Magnet-Flüssigkeit erforderlich
 Experimente haben jedoch keine größere Anwendung gefunden



Wiedergabe

Zunächst gibt es eine wellenlängen-abhängige *Entmagnetisierung* im *Magnetband*
 Bei der *Wiedergabe* treten *mehrere Effekte* auf

1. Infolge des *Induktionsgesetzes* tritt ein ω -Frequenzgang auf = *f-proportionale* Zunahme der Spannung
2. Der *endliche Kopfspiegel* schließt viele Feldlinien des aufgezeichneten Bandes kurz, gilt nicht für große Wellenlängen
3. Der große magnetische *Spalt-Widerstand* leitet einige *Feldlinien über den Kern*
4. Für *sehr kurzen Wellenlängen* ist dies nicht, bestenfalls z. T. möglich
5. Zwischen Aufzeichnung und Wiedergabe kann eine *Spalt-Schiefstellung* vorhanden sein



Zum Frequenzgang Unterscheiden

Örtliche Koordinaten x auf dem Speichermedium und *zeitliche Signalwerte* t an den Magnetköpfen

Dazwischen vermittelt die relative *Transportgeschwindigkeit* v gemäß $x = v \cdot t$

Daher *frequenz- und wellenlängenabhängige Verluste* unterscheiden

Können experimentell nur durch Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten indirekt getrennt werden

Meist wird *sinusförmiger Verlauf* mit der Frequenz f (Kreisfrequenz $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$) angenommen.

Bezüglich und im *Medium* gilt die *Wellenlänge* λ

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\omega} \quad \text{bzw. Flussdichte im Medium} \quad B = B_0(H_{\text{aufz}}, \omega) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right)$$

B_0 abhängig von: Aufzeichnungsfeldstärke H_{aufz} (-strom), -frequenz ω und technischen Parameter

Im Band wirkt die **Entmagnetisierung** (Schichtdicke d und Wellenlänge λ), zum Kopf der **Band-Kopf-Abstand** a dämpfend

Beides kann experimentell durch einen **Faktor** λ_1 beschrieben werden: $\exp(\lambda_1/\lambda)$

Mit dem ω -Gang gilt daher

$$U(t, \omega, \lambda) = B_w \cdot \omega \cdot e^{-\lambda_1/\lambda} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Bei Geschwindigkeit v folgt für die Signalamplitude Proportionalität

$$\hat{U} \sim \frac{e^{-\lambda_1/\lambda}}{\lambda} \sim f \cdot e^{-f \cdot \lambda_1}$$

Der λ_1 -Wert bestimmt das wellenlängenabhängige **Maximum des Wiedergabesignals**

In den 50er Jahren lag er bei 50 bis 100 μm , heute werden wenige μm erreicht

Spaltweite

Vorangehende Betrachtungen nur für Spaltweite $\delta \rightarrow 0$

Für endliche, nicht zu große Spaltweite δ ist über einen entsprechenden Flussbereich zu integrieren ist

$$B_w = B_0 \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \int_{-\delta/2}^{+\delta/2} \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \cdot dx = B_0 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \delta / \lambda)}{\pi \cdot \delta / \lambda}$$

Der dämpfende Faktor ist die Spaltfunktion $\sin(\alpha)/\alpha$ mit $\alpha = \pi \delta / \lambda$; entspricht WHITTAKER-Funktion Informationstheorie

Erste Nullstelle bei $\lambda = \delta$, weiteren bei $\lambda = \delta/n$ mit $n = 2, 3, 4$, usw.

Zwischen den Nullstellen liegen Maxima mit relativ geringer Amplitude, ermöglichen nur selten brauchbares Signal

Folglich erreichbare Grenzfrequenz, -wellenlänge $\lambda > \delta$

Spaltschiefstellung

Aufzeichnungs- und Wiedergabespalt können um einen **Fehlerwinkel** α voneinander abweichen (Justage, Bandaustausch)

Einfluss wird durch zusätzliche Integration über Spalte mit differentiellen Längen in Richtung Breite des Bandes erfasst

Da zunächst nur Schiefstellung interessiert, kann Spaltweite $\delta \rightarrow 0$ angenommen werden;

Ergebnis entspricht dann einem genau ausgerichteten Spalt mit der effektiven Spaltweite $\delta_{schief} = b \cdot \tan(\alpha)$.

Ergibt multiplikativ wirkenden Dämpfungsfaktor

$$D_{schief} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot \tan(\alpha)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \cdot b \cdot \tan(\alpha)}{\lambda}}$$

Spiegeleinfluss

Kontaktfläche (Kopfspiegel) wirkt als magnetischer Kurzschluss der Länge l

Wirkt sich indirekt als zusätzliche Spaltfunktion aus

$$D_{Spiegel} = \int_0^l \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda}\right) \cdot dx = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi_0 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda}\right)\right)$$

Bewirkt so Welligkeit des Frequenzganges bei großen Wellenlängen \rightarrow tiefen Frequenzen

In der Praxis wird jedoch ein stark abgerundete Spiegel (Ringkopf) benutzt der „sanft“ Informationsträger berührt

Dadurch wird der wellige Dämpfungsverlauf deutlich geringer, Rechnungen sind aber erheblich schwieriger

Eine recht übersichtliche Näherungsformel enthält u.a. [Altrichter]

$$D_{Spiegel, Ring} = 1 - 0,2 \cdot \frac{\cos\left(\pi \cdot \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{6}\right)}{\left(\frac{l}{\lambda}\right)^{2/3}}$$

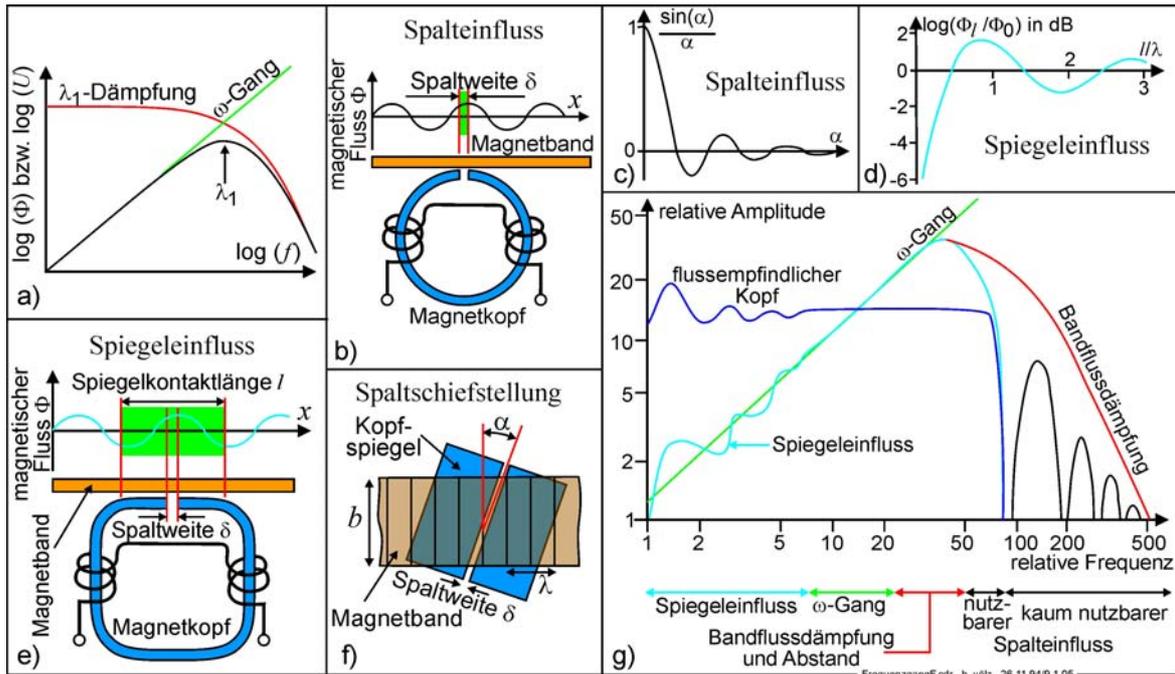
Zusammenfassung

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

Schließlich sind noch **elektrische Kopfverluste**: Wirkungsgrad, Wirbelstrom- und Hysterese-Verluste hinzuzufügen
Ihr Einfluss ist aber meist deutlich geringer. Wichtig ist aber

Fast alle Verluste erfolgen **nicht mit Minimalphase**, = Apertur-Fehler (*lateinisch apertura* Öffnung) s. Optik

Das erschwert ihre phasentreue Entzerrung beachtlich, sie ist nicht mit einfachen RCL-Schaltungen möglich



Reziprozitätstheorem

Hiernach können *Sender und Empfänger formal* ohne Änderung der Übertragung *vertauscht* werden. Dabei dürfen aber *keine anderen Nichtlinearitäten* auftreten, z. B. bei Sende- und Empfangsantennen. Ein **Transformator** kann sowohl von der Primär- als auch von der Sekundärseite aus betrieben werden. W. K. WESTMIJZE für Magnetbandspeicher: Erkenntnisse der *Aufzeichnung auf die Wiedergabe übertragbar*

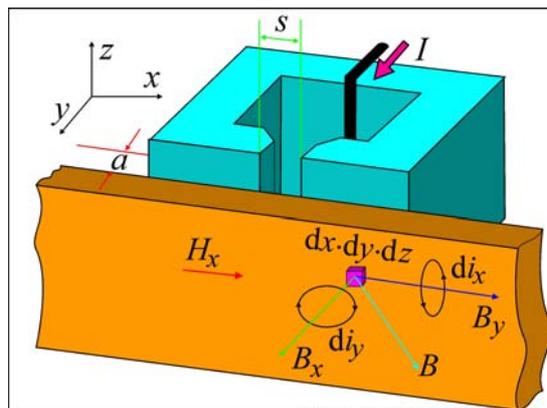
Wiedergabe: Im Speichermedium vorhandene Magnetisierung bewirkt ein elektrisches Signal.
 Reziprozitätsprinzip: Analyse vom Kopf zum Band: **Magnetfluss** des Mediums stammt von **stromerregten Mikrospulen**.
 Quasi ein Transformator, dessen Sekundärwicklung der Magnetkopf ist.
 Dann Primär- und Sekundärwicklung vertauschen \Rightarrow Wiedergabe \rightarrow Aufzeichnung.
 Differentielles **Volumenelement** $dx \cdot dy \cdot dz$ besitzt die magnetische Induktion B : in Komponenten B_x und B_y zerlegt.
 Beide entsprechen einem **differentiellen Kreisstrom**: $di_x = B_x \cdot dx$ bzw. $di_y = B_y \cdot dy$.
 Ihr magnetischer Fluss wirkt auf **Gegeninduktivität** M bzgl. Magnetkopf $d\Phi = M \cdot di$.
 Reziprozitätsprinzip: Richtungen Kopf \rightarrow Band bzw. Band \rightarrow Kopf gleiche Gegeninduktivität.
 Trotz **nichtlinearer Hysterese**: Bei Wiedergabe infolge **kleiner magnetischer Flüsse und Änderungen** gut erfüllt.
 Zwischen Feldstärken H und differentiellen magnetischen Flüssen $d\Phi$ besteht Zusammenhang:

$$d\Phi_x = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_x \cdot dz \cdot dy \quad \text{bzw.} \quad d\Phi_y = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_y \cdot dz \cdot dx.$$

Summe der differentiellen Ringströme im Band ruft Fluss Φ hervor, der durch Integration erhalten wird

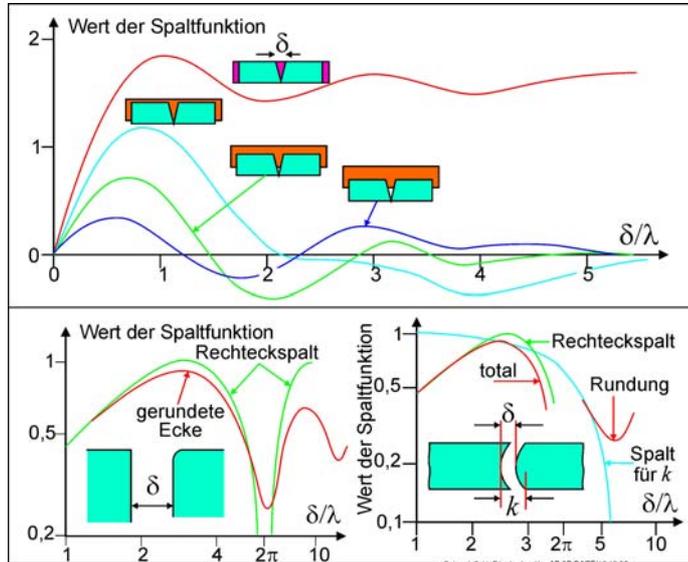
$$\Phi \sim h \int_a^{a+d} \int_{-\infty}^{+\infty} B(x, y) \cdot H(x, y) \cdot dx \cdot dy.$$

a = Abstand, V = Volumen aus Banddicke d und Bandhöhe h . B = magnetische Flussdichte, H = Feldstärke. Kopf-Geometrie usw. ermöglichen Berechnungen für Frequenzgänge usw.
 Induktiver Kopf zusätzlich Induktionsgesetz mit $d\Phi/dt$ beachten



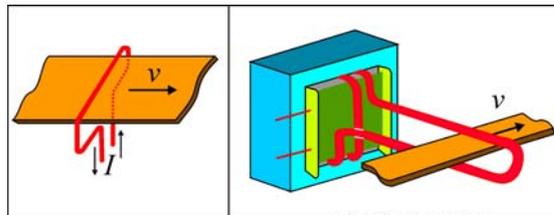
Zusätzliche Spalteinflüsse

Kopfspalte sind in der Realität nicht exakt parallel und rechteckig. Solche Einflüsse sind mittels Funktionentheorie und Integration schwer zu berechnen. Neben makroskopischen Modellen hat sich hier das Reziprozitätstheorem gut bewährt. Außerdem ist es so Möglich die gegenseitige Lage von Band und Spalt zu berücksichtigen. Beispiele für Ergebnisse zeigt das Bild.



Experimentelle Überprüfung

Infolge der Nichtlinearität der Hysterese ist es recht schwierig die theoretischen Aussagen zu überprüfen. Deswegen wurden für exakte Messungen eisenlose Köpfe entwickelt. Der einfachste Fall ist der *Einwindungskopf*, der um 1954 vom Institut für Rundfunktechnik verwendet wurde. Der Trafo besorgt die Anpassung des 0,5 mm dicken Kupferdrahtes an den Verstärker. Eine zweite Variante bestand aus einer Spule mit 6000 Windungen. Beide ermöglichen jedoch nur, vergleichsweise große Wellenlängen aufzuzeichnen und wiederzugeben. Es konnten so aber erstmalig absolute Werte erhalten werden.



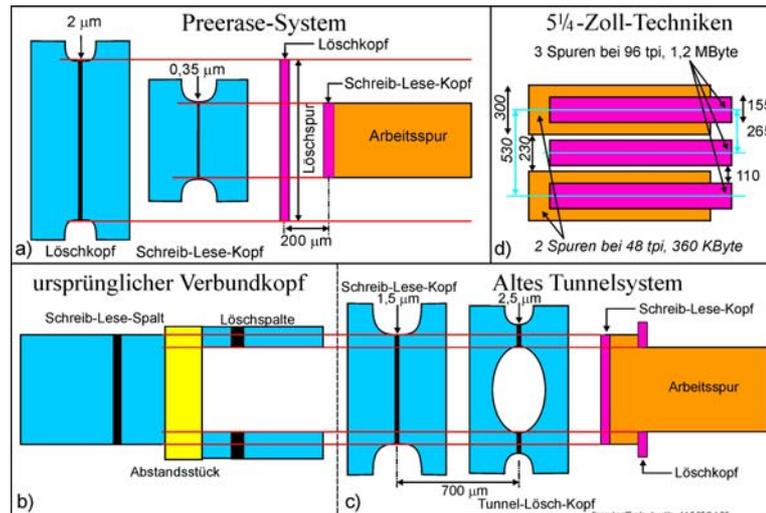
Rasen und Mehrspuraufzeichnung

Dicht beieinanderliegende Spuren treten z. B. Disketten, Festplatten aber auch Bändern auf. Zwischen diesen Spuren muss ein unbenutzter *Abstand* = „Rasen“ existieren, der die *Speicherdichte reduziert*. Andernfalls träte ein störendes „Übersprechen“ auf. Dafür gibt es mehrere Ursachen, insbesondere

1. Zwischen einzelnen Aufzeichnungen und Wiedergaben gibt es immer *mechanische Spurtoleranzen* der Bandführung
2. Hinzu kommen *Temperatur- und Feuchteänderungen* von Speichermaterial und -Gerät
3. Besonders bei schmalen Spuren $< 100 \mu\text{m}$ ragen *Feldlinien auch seitlich* deutlich aus dem Kopfspalt heraus

Zur Reduzierung dieser Einflüsse gibt es mehrere Lösungen, die älteste gehört zu den Disketten. Zunächst entstand das *Tunnelsystem*: Aufzeichnungs-Wiedergabekopf besitzt eine relativ breite Spur. Der Aufzeichnung folgt ein Löschkopf mit zwei weit entfernten Löschkapfen, löscht Ränder der Aufzeichnung. Verbleibende Spur ist daher schmaler als die des Aufzeichnungs-Wiedergabekopfes. So bleiben Spurlageschwankungen ohne Auswirkung. Später entstand das heute noch benutzte *Preerase-System*. Zunächst wird mit breiter Spur gelöscht und anschließend in normaler Spur aufgezeichnet bzw. wiedergegeben.

Bei den „alten“ $5\frac{1}{4}$ -Zoll-Disketten gab es etwa 70 unterschiedliche Formatierungen. Benutzten verschiedene Blockgrößen, Speicherdichten und waren einseitig oder zweiseitig benutzbar. Ursprünglich 48-tpi (track per inch, Spuren je Zoll) und 360 KByte. Übergang zu 96 tpi und 1,2 MByte mussten zwei Spuren einer alten kompatibel zugeordnet werden.



Spaltschiefstellung und Betamax

Für die Videospeicherung hat Sony das **Betamax-System** entwickelt, es nutzt absichtlich die Spaltschiefstellung *Japanisches Beta* bedeutet dabei etwa ganzflächig, vollständig oder dicht an dicht. (nicht α , β , γ)
 Daher auch als *Dicht-an-Dicht-Speicherung* oder *Dichtspeichertechnik* bezeichnet
 Es wird keine Löschung, sondern direktes Überschreiben aufeinanderfolgender (benachbarter) Spuren benutzt
 Sie sind wechselseitig um $\pm\alpha$ gegenüber der Spurgeraden geneigt (*englisch slanted azimuth recording*)
 Daher werden zwei spezielle Köpfe mit den Spaltneigungen $\pm\alpha$ gegenüber der Senkrechten benötigt
 Die Spuren werden etwas überlappend aufgezeichnet, überschreiben so Teil der vorangehenden benachbarten Spur
 Verbleibende aufgezeichnete Spurbreite ist daher geringer als Spurbreite b der Köpfe
 Bei der Wiedergabe werden folglich die benachbarten Spuren etwas mitgelesen
 Infolge Spaltschiefstellung werden sie jedoch kaum oder gar nicht wiedergegeben
 Mit Wellenlänge λ gilt für den relativen Spannungsverlust:

$$f_{\text{schief}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot \tan(\alpha)}{\lambda}\right)}{\pi \cdot b \cdot \tan(\alpha)}$$

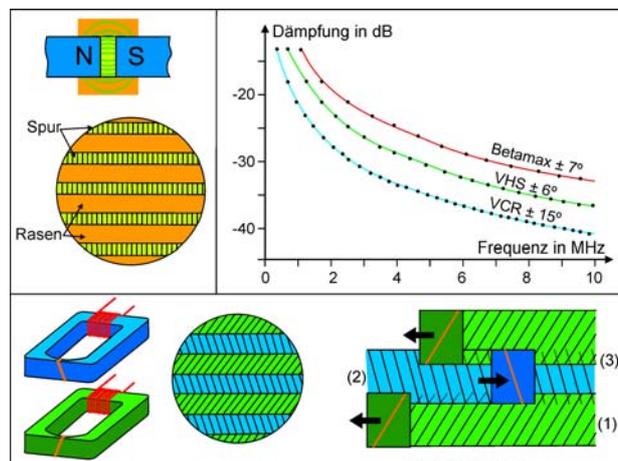
Mit der Bandgeschwindigkeit v gilt $\lambda = v/f$, für die frequenzabhängige Dämpfung in dB gilt dann

$$\ddot{u}[\text{dB}] = 20 \cdot \log \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot f \cdot \tan(2 \cdot \alpha)}{v}\right)}{\pi \cdot b \cdot f \cdot \tan(2 \cdot \alpha)} \right)$$

Für die Frequenz der ersten Nullstelle gilt

$$f_{\text{null}} = \frac{v}{b \cdot \tan(2 \cdot \alpha)}$$

Unterhalb von f_{null} ist die Dämpfung weitgehend zu vernachlässigen, darüber findet vorwiegend keine Wiedergabe statt
 Es gibt dort periodisch wiederkehrende Nullstellen, meist wird ein worst-case-Verlauf (schlechteste Variante) angenommen



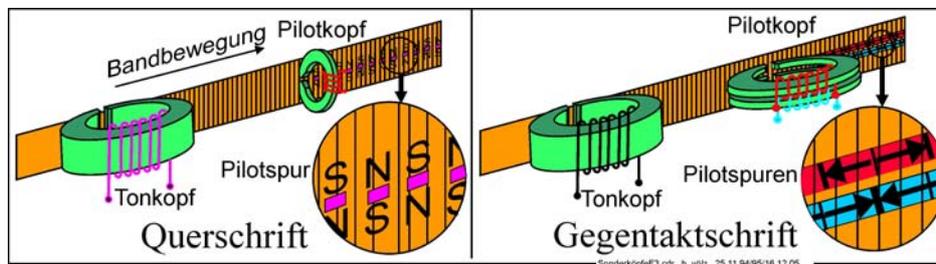
Erste Nullstelle bei Videospeichern nach Betamax

Verfahren	α	b [μm]	v [m/s]	f_{null} [kHz]
VHS	6°	49,0	4,84	464,7
Betamax	7°	32,8	5,83	712,9
V2000	15°	22,6	5,08	389,3
VCR	15°	51,0	8,20	278,5

Pilotspuren

Beim Magnetfilm wurde die Bild-Ton- Synchronisation (*Lippensynchronität*) ursprünglich durch die Perforation gesichert. Magnetfilmapparaturen waren immer groß und schwer, daher entstanden Lösungen für Magnetband mit Pilotspur. Die tiefen Frequenzen dürfen aber nicht stören: 96 Hz bei 24 Bildwechseln, bzw. 100 Hz: Fernsehen 25 Bildwechsel.

- Ursprünglich wurde Rückseite des Magnetbandes *periodisch bedruckt*
- Besser war eine *transversale Magnetspur* = senkrecht zur Tonspur = *Querschrift*, Breite 0,5 mm. Es ist sehr genaue *Justage* erforderlich, wegen großer Spaltweite auch große *Vormagnetisierungsleistung*
- 1958 entwickelte KUDELSKI das *Gegentaktverfahren*, deren Symmetrie sich rein elektrische Weise einstellen lässt. Außerdem ist es zum ersten Verfahren kompatibel.
- Heute werden Bild und Ton *digital* aufgezeichnet, dann genügt ein integrierter *Time-Code* zur Synchronisation.



Kopftechnologien

Magnetköpfe werden heute nach drei recht unterschiedlichen **Grundtechnologien** gefertigt:

- aus dünnen *Blechen*
- aus *kompaktem* keramischen, ferritischen *Material*
- nach *fotolithografischen* Methoden, ähnlich der Halbleiterindustrie

Dünne Bleche

- Aus einem Blech (Bandmaterial) werden die einzelnen Kernbleche ausgestanzt bzw. herausgeätzt
- Für gute magnetische Eigenschaften folgt thermisch Nachbehandlung
- Bleche mit einer elektrisch isolierenden Schicht versehen: einseitig Papier und/oder Lack (allseitig)
- Zusammenfassen, meist Verkleben zu Kernpaketen (Problem thermisch stabiler Kleber!)
- Aufbringen der Wicklung
- Fertige Kernhälften durch vorsichtiges, feines Läppen (Verlust an Permeabilität!) der Polflächen
- Vollständiges Kopfsystem: 2 Kernhälften + Spalteinlage mit gleichem Abriebverhalten wie Kerne! (evtl. auch hintere)
- Einbringen in eine Abschirmung, meist dort vergossen
- Anschließend vorsichtiges Bearbeiten (Läppen + Polieren) der Spiegelfläche

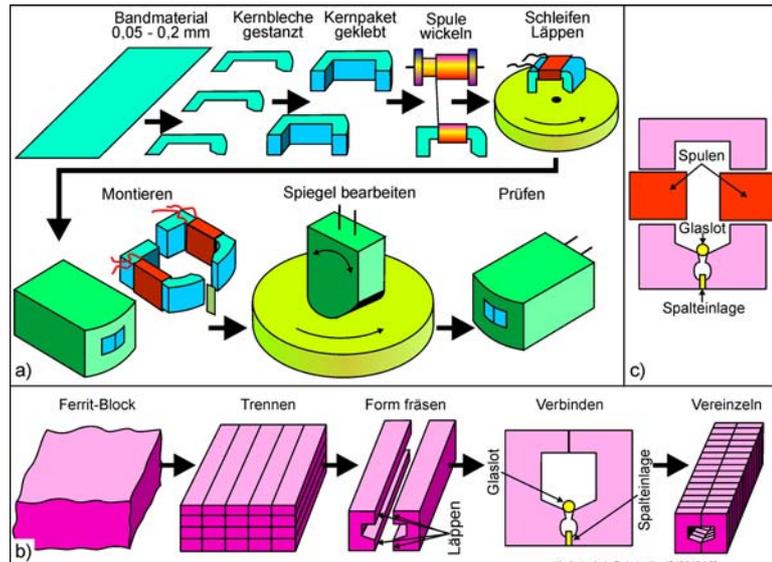
Kompaktes Material, z. B. Ferrit

- Kompakten Block Trennen mit sehr harten Werkzeugen (Diamantscheiben): lange Quader mit geringem Querschnitt
- Kernquerschnitt durch Formfräsen oder Ätzen erzeugen
- Läppen der Polflächen
- 2 Kernhälften und Spalteinlage(n) zusammenfügen, mit Glaslot fest verbinden (erzeugt z. T. auch Spalt)
- Nach der Abkühlung in einzelne Kerne zerteilen
- Durch Fädeln mit den Wicklungen zu versehen
- Montieren, Spiegel bearbeiten, läppen

Variante hierzu

Kern aus *getrennter hinterer und vorderer Hälfte*

Vorteil; Spulen können getrennt gefertigt werden, Zusammenbau sehr einfach, kein Fädeln



Integrierte Köpfe

Festplatten erfordern sehr kleine Magnetköpfe, immer nur kleiner „Anhang“ am Gleiter (s. Festplatten)
 Bald notwendig extrem klein, nur durch Methoden der **Halbleiterstrukturierung** erreichbar
 Mittels Epitaxie, Aufdampfen, Sputtern, Ätzen usw. werden Schichten über Photomasken hergestellt bzw. entfernt
Neu lediglich einige, vor allem **magnetische Materialien**. Vorteile sind:

- Es lassen sich extrem kleine Abmessungen erreichen
- Ohne wesentlich erhöhten Aufwand ist eine Mehrspurtechnik, auch mit großer Spuranzahl, möglich
- Auf Wafer sind gleichzeitig mehrere Magnetköpfe zu erzeugen, die dann nur der Trennung und Montage bedürfen

Wegen Planartechnik muss die Spule ebenfalls flächenhaft gestaltet werden
 Bei den hohen Geschwindigkeiten der Festplatten ist eine geringe Windungszahl (ca. 30) ausreichend
 Später werden magnetoresistive Köpfe (s. u) eingesetzt werden.

Kopfvarianten

Heute Vielzahl von Kopfvarianten, die aus Ringkernprinzip von SCHÜLLER abgeleitet sind, vor allem drei Gründe:

- **Anwendungen** erzwingen besondere **Auslegungen** und anderen Aufbau.
- Ausgewählten Konstruktion umgehen **technologische Schwierigkeiten** und/oder realisieren **preisgünstige** Lösungen
- **Sonderforderungen** erzwingen einen speziellen Aufbau.

Betreffen u.a.:

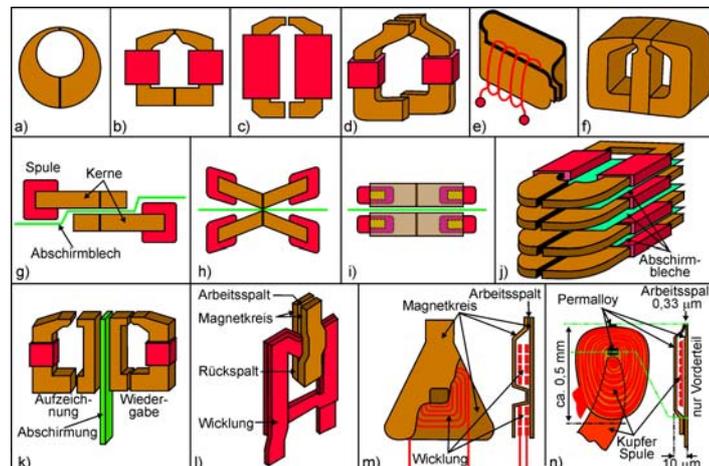
Form und Gestalt des Magnetkreises

Stereoköpfe unterschiedlicher Ausführung, Schmetterlings- bzw. X-Form, zusätzlicher Wickelraum

Mehrspurköpfe bis ca. 30 Spuren

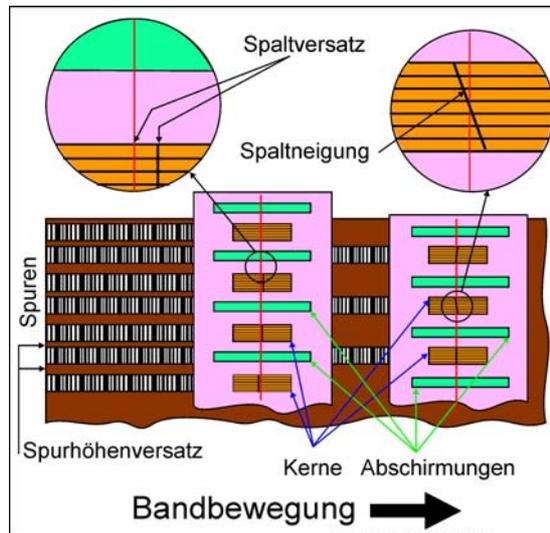
Doppelspalt-Löschkopf, X-Feld-Kopf, read-after-write-Kopf für die digitale Speicherung

Integrierte Technik (s. u.)



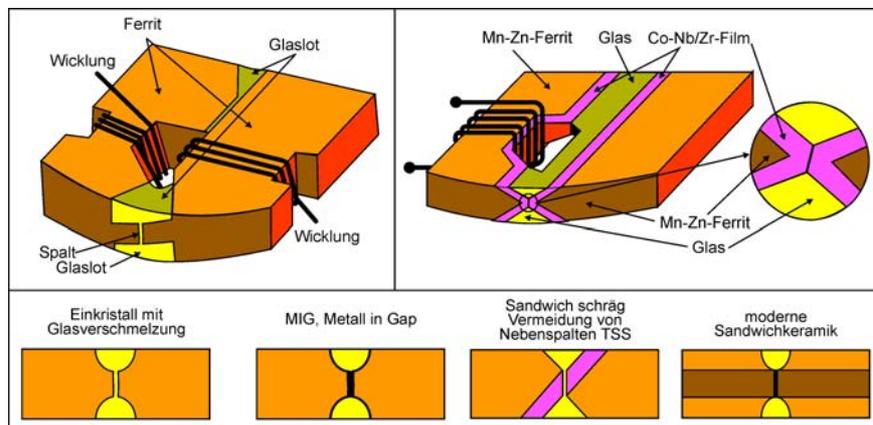
Vielspurkopf

Vor der Digitaltechnik waren in **Audiostudios** komplizierte **Vielspuraufzeichnungen** mit breiten Bändern erforderlich
 Gleiche Technik auch bei den Messwertspeichern, z. B. Geologie
 Technik verlangt Kopfsysteme mit 4, 8, 16, 24 oder noch mehr Magnetkreisen, dazu gegenseitig abgeschirmt
 Wesentlich schwieriger als Stereo-Technik, zusätzlich Verschachtelung von zwei Kopfsystemen (Kopfpaar)
 Spuren kammartig versetzt, geradzahlige und ungeradzahlige Spuren je ein Kopfsystem
 Verlangt höchste technologische Produktion \Rightarrow Systeme sehr teuer, einige tausend €
 Vielzahl kleiner Toleranzabweichungen, zudem unterschiedlich bei den Lösch-, Aufzeichnungs- und Wiedergabepaaren



Fertigung Beta-Kopf

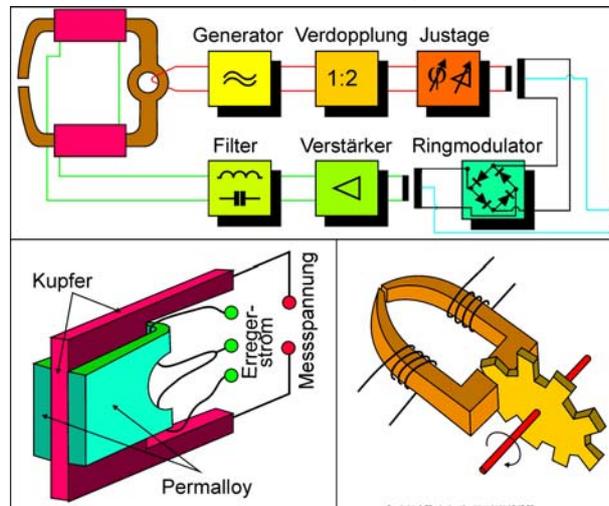
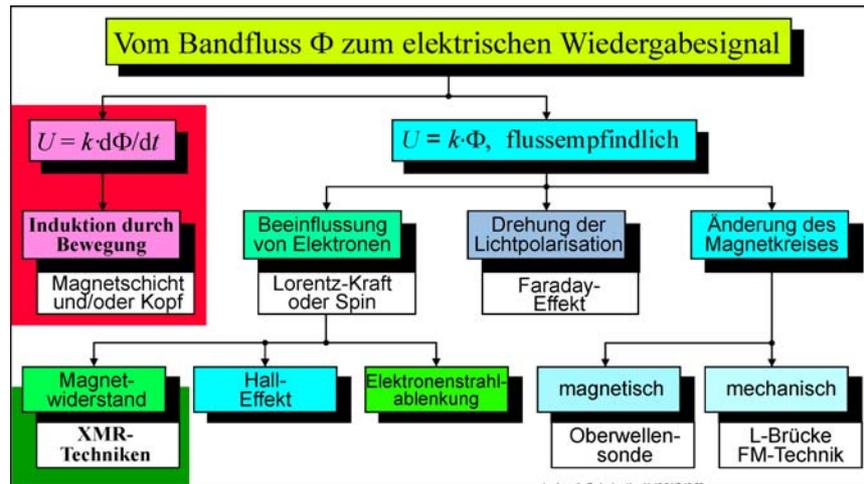
Verlangt spezielle Technologien (viele Varianten) und wegen hoher Frequenzen: Ferrite
 Nachträgliches Bearbeiten für Spurbreite und Schiefstellung



Weitere Möglichkeiten der Wiedergabe

Das induktive Gesetz mit $d\Phi/dt$ bereitet wegen des Ω -Ganges vielerlei Schwierigkeiten
 U. a. große Pegelunterschiede im weiten Frequenzbereich und kleine Spannungen bei tieffrequenten Signalen
 So gab es schon sehr früh mehrere Versuche für **flußempfindliche Köpfe**

- Früh begannen Versuche mit dem **HALL- oder magnetoresitiven Effekt**
 Hier setzten sich ab 1980 sehr effektive Varianten zunächst nur bei Festplatten durch (GMR s. u.)
- Auch **magnetooptische Effekte sind möglich**, sie setzten sich später bei den MO-Medien durch
- Die **Ablenkung von Elektronenstrahlen** erwies sich als völlig unzureichend
- Ebenso ein **magnetisches Zahnrad**, das den magnetische Widerstand des Magnetkreises ändert
L-Brücke, FM-Technik
- Einige Bedeutung erlangte **FÖRSTER-Sonde**, mit ihr werden sehr kleiner magnetischer Felder gemessen
 Der hintere Teil des Wiedergabekopfes enthält mit HF bis an die Sättigung erregten zusätzlichen Ringkern
 Es muss alles so gut symmetriert sein, dass keine HF-Anteile zum Arbeitsspalt gelangen
 Das Nutzfild des Bandes verschiebt dann die Schaltpunkte im Ringkern, wodurch der Oberwellenanteil sich ändert
 Er wird über ein Filter ausgesiebt, verstärkt und schließlich phasenempfindlich gleichgerichtet



Senkrechtspeicherung

Die **Senkrechtspeicherung** verlangt spezielle Medien und Köpfe

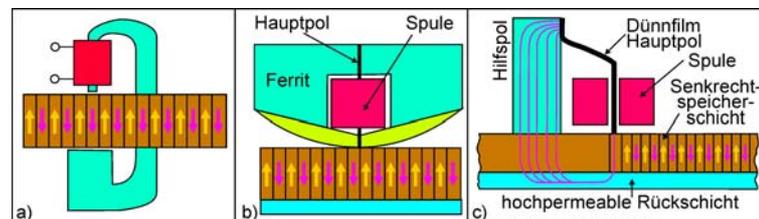
Lediglich zur **Aufzeichnung** kann der Ringkopf lediglich benutzt werden

Für die Wiedergabe ist es am einfachsten, die **Magnetpole zu beiden Seiten** des Bandes anzuordnen, leider sehr unpraktisch

Im Prinzip genügt aber eine sehr **feine hochpermeable Spitze** statt des Spaltes, kombiniert mit großflächigem Gegenpol

Dann ist aber eine magnetisch weiche **Rückschicht** hinter der Senkrechtschicht notwendig

Beides führt zu einer **vereinfachten integrierbaren Ausführung**, die sich weitgehend durchzusetzen scheint



Drei spezielle Köpfe

Es gibt viele spezielle Köpfe, hier nur 3 Beispiele ausgewählt

Quasiintegrierter Mehrspurkopf: der senkrechte stromführende Leiter ist zugleich der Spalt (vgl. Einwindungskopf)

Durch die waagrechten Leiter können einzelne „Spuren“ angesteuert werden

Der **spaltlose Kopf** besteht aus einem kompakten Block mit einer scharfen und abgerundeten Kante

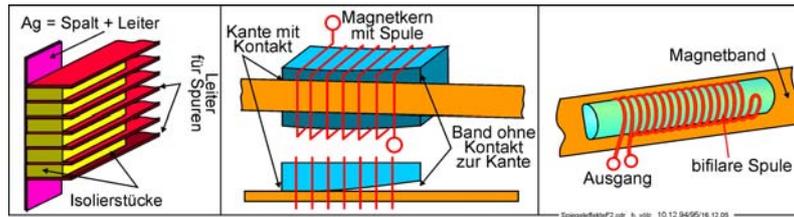
die scharfe Kante wirkt als Spiegelgrenze ähnlich wie ein Spalt wirkt

das Prinzip wurde ähnlich bei einem mechanischen Videospielder benutzt

Der **Magnetkopf mit einer bifilaren Wicklung** besitzt **hochselektive Wellenlängeneigenschaften**

Nur Wellenlängen des Wickelabstandes und deren ungeradzahlige Vielfache werden wiedergeben

Er ist also sowohl Magnetkopf als auch **Filter für Wellenlängen**, unabhängig von der Bandgeschwindigkeit!



Leitungs-Elektronen ablenken

Bei zwei wichtigen Effekten werden auch im Leiter bewegte Elektronen abgelenkt, unabhängig von v der Wiedergabe

- **HALL-Effekt** erzeugt eine Querspannung
- Beim **magneto-resistiven Effekt** wird der Weg der Elektronen verlängert

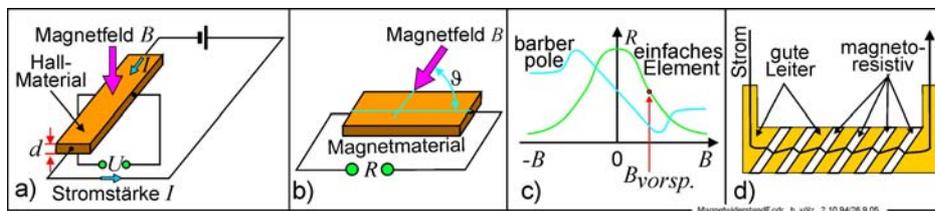
Der magnetoresistive Effekt ist unabhängig vom Vorzeichen des Magnetfeldes, symmetrische, parabelförmige Kennlinie

Zur Nutzung ist daher ein magnetisches Ruhefeld (Vorspannung, Dauermagnet) erforderlich

Außerdem ist die Änderung ΔR sehr gering, z. B. bei Permalloy nur wenige %

Verbesserung wurde „**barber pole**“ erreicht (von Kennzeichen der Frisuren engl. barber)

Das Element muss **in Spalt** des Wiedergabekopfes eingebaut werden, der als Ringkopf auch zur Aufzeichnung geeignet ist



Geschichte zur Weiterentwicklung des magneto-resistiven Effekts

Es gibt heute mehrere Varianten mit wesentlich verstärktem Effekt

Zum Verständnis der Weiterentwicklung sind quantenphysikalische Grundlagen notwendig

Hierbei ist **Spin der Elektronen** wesentlich \Rightarrow **Spin-Elektronik**, insbesondere bei TMR und GMR

Formal (theoretisch) wird der Strom durch Material magnetisch ein- und ausgeschaltet \rightarrow **Spin-Ventile** (spin valve)

Häufig **XMR** (expanded magneto resistive bzw. x-beliebiger Magnetwiderstand) zusammenfassend, zeitlich gilt etwa:

1857 **AMR** (anisotrope) Sir **William Thomson, Lord Kelvin** (1824 – 1907) an einer Eisenstange entdeckt

1971 **BOB HUNT** erste Sensoren

1980 **TSANG** bei IBM erste Festplattenköpfe

1975 **TMR** (tunnel) mit Isolationsschicht; von **MICHEL JULLIÈRE** an Fe/Ge/Co-Dünnschichten bei 4,2 K entdeckt

1988 **GMR** (giant) mit metallischem Leiter, Streuung von Spin-Elektronen

1992 **GMI** (giant magnetic inductance); Wechselstromwiderstand, Skin-Effekt.

1993 **CMR** (colossal); Phasenübergang vom Leiter zum Isolator, im Volumen, unter 100 K

1998 **EMR** (extraordinary) bei inhomogenen Halbleitern.

GMR-Geschichte

Effekt 1988 unabhängig von **PETER GRÜNBERG** (IBM Jülich) und **ALBERT FERT** (Universität Paris) entdeckt

Zunächst bei ≈ 4 K an dünnen Fe/Cr/Fe-Viellagenschichten: Widerstandsänderungen von fast 50 % gemessen, später >200 %

FERT publizierte die Ergebnisse sofort, GRÜNBERG reichte Patente

Zeitlang Urheberstreitigkeiten, für Nutzung gewann letztlich GRÜNBERG

1991 **STUART PARKIN** u.a. (IBM) mit Co/Cu/Co-Mehrlagenschichten bei Raumtemperatur ähnlich hohe Werte

Erstmalig das Pinning (s. u.) durch zusätzliche antiferromagnetische FeMn-Schicht

1993 von IBM für die Leseköpfe bei Festplattenspeichern eingeführt

Heute Standard: IBM verdient durch Nutzung und Lizenz jährlich mehrere Millionen Euro

ab 2000 Anwendung für Entwicklung von **MRAM**

Spin und Stromfluss

Spin der Elektronen: zwei Arten „ \uparrow “ und „ \downarrow “, „up“ und „down“

Im „üblichen“ elektrischen Strom beide Spin gleich stark \Rightarrow rotationssymmetrischer magnetischer Wirbel um Stromfluss

Zusätzlich bewirkt jeder Spin einen transversalen Wirbel, kompensieren sich aber durch gleiche Anteile

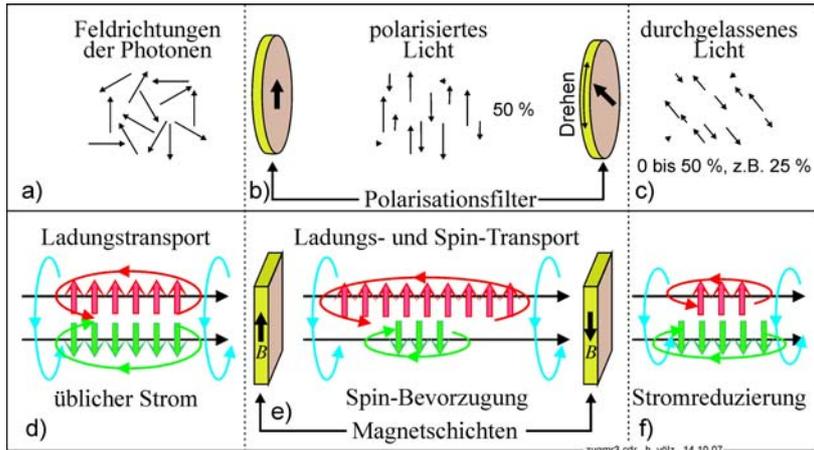
Fließt der Strom durch Magnetmaterial mit Magnetfluss B , dann kann „Spin-Flip“ auftreten

Elektronen mit Spin in „ungünstiger“ Orientierung kippen ihre Spin-Richtung, z.B. „ \downarrow “ \Rightarrow „ \uparrow “

Dabei kann, muss aber nicht die Stromstärke erhalten bleiben

Fließt Strom anschließend durch Magnetmaterial mit entgegengesetztem Fluss $-B$, so erfolgt erneut eine Spin-Auswahl

Dabei tritt eine Stromreduzierung auf, besteht Analogie zu Photonen durch Polarisationsfilter



Voraussetzungen

1. Beide *magnetischen Materialien* müssen *sehr dünne Schichten* sein, nm-Bereich

Dünne Trennschicht $\approx 2 - 3$ nm, sowohl *Leiter* (GMR) als auch *Isolatoren* (TMR)

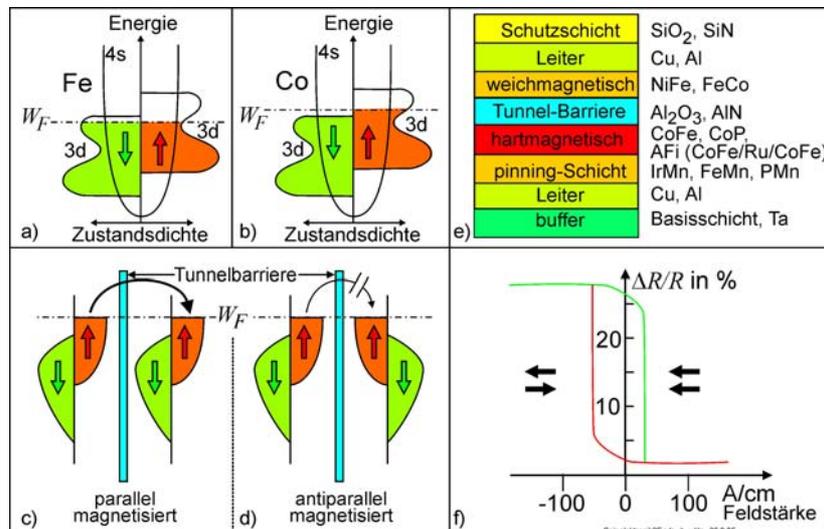
2. Damit entgegengesetzte Magnetisierung möglich ist, *Abstand so groß*, beide magnetisch entkoppelt, Austauschkopplung unterdrückt
3. *Abstand so klein*, dass mittlere freie Weglänge (2 - 5 nm) der Leitungselektronen unterschritten wird, sonst in Übergangszone Stoßprozesse, können Spin-Orientierung umkehren

FERMI-Kante und Spin-Flip

FERMI-Kante W_F innerhalb der beiden spin-abhängigen Leitungsbänder bestimmt Spin-Flip

Abweichung beträgt bei Ni ≈ 1 eV, Fe $\approx 2,4$ eV

Bei Fe sind 3d-Terme für beide Spin-Richtungen *nicht* voll belegt \rightarrow relativ leicht Spin-Flips möglich, anders bei Co
Z.Z. für magnetoresistiven Effekte noch keine umfassende Theorie, die alle beobachteten Phänomene beschreibt



Messwerte

Änderungen des Magneto-Widerstands $\Delta R(H)$ durch das äußere Magnetfeld H werden auf Widerstand $R_S = R_{\parallel}$ bezogen
Er liegt vor, wenn beide Magnet-Schichten parallel ausgerichtet und magnetisch gesättigt sind

Bei GMR niederohmig, bei TMR hochohmig, bei alten Varianten Extremwert = ohne äußeres Magnetfeld

$$\frac{\Delta R}{R_S}(H) = \frac{R(H) - R_S}{R_S}$$

Durch das Magnetfeld kann ein maximaler und minimaler Widerstand R_{max} bzw. R_{min} eingestellt werden
Die maximal mögliche Änderung wird als Magneto-Widerstands-Wert = XMR_{Wert} bezeichnet

$$XMR_{Wert} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}}$$

GMR

Beide magnetischen Schichten durch unmagnetischen Leiter getrennt, Element ist niederohmig: Gegensatz zu TMR
 Äußeres Magnetfeld und Lesestrom stehen senkrecht zueinander, magnetische Felder wirken in Richtung Chipebene
 Strom fließt nicht senkrecht zu den Schichten, sondern bevorzugt lateral, Elektronen werden an Grenzflächen gestreut
 Elektronen mit „falschem“ Spin werden an magnetisch-unmagnetischen Grenzflächen weitgehend reflektiert

antiparallel magnetisiert: Elektronen: Spin „↑“ vorwiegend in oberer Schicht, Spin „↓“ unten
 Keine Elektronen-Art kann den Sensor vollständig passieren = großer Widerstand

parallel magnetisiert: Spin „↑“ kann in keine Schicht eindringen, Spin „↓“ passiert = kleiner Widerstand

Ähnlich Halbleitern: Majoritäts-, Minoritätsträger

Gesamtwiderstand = Parallelschaltung der Widerstände beider Spin-Richtungen

Optimal: hochpermeable, **ferromagnetische Legierungen** $Fe_{81}Ni_{19}$ (Permalloy) und $Co_{90}Fe_{10}$
 Für Schichtdicke d und mittlere freie Weglänge l der Elektronen gilt mit guter Näherung

$$\frac{\Delta R}{R} \sim e^{-d/l}$$

Erreichbare Widerstandsänderung nimmt stark mit wachsender Schichtdicke ab → nur 1 - 5 nm zulässig

Zwischenschichten $\approx 0,5 - 3$ nm, nichtmagnetisches Material

Leitungsband muss ferromagnetischen Material gut angepasst sein: Cu, Ag, Au, Ru, Cr und Ir

Temperaturerhöhung nachteilig ⇒ zusätzliche Spin-Flips

Weiterer Gewinn **mehrere Schichtfolgen übereinander gestapelt**, seitlich kontaktiert, also parallel geschaltet

Herstellung: abwechselnd FeNi- und Ag-Schichten von ≈ 2 nm auf Ta-Substrat abscheiden

Dann $300^\circ C$ erhitzen → Ag-Atome dringen in Magnetschicht, erzeugen dort kleinste getrennte magnetische Bereiche, deren Orientierung von Schicht zu Schicht wechselt

GMR Layer

Das äußere Magnetfeld darf nur eine, die freie Schicht (*free layer*) mit $H_{C \text{ free}}$ einwirken

Die fixierte Schicht (*fixed layer*) muss dabei ihre magnetische Orientierung behalten

Dazu müssen beide Schichten unterschiedliche Koerzitivfeldstärken $H_{C1} \neq H_{C2}$ besitzen

Erfolgt u.a. durch verschiedene Materialien, z.B. Co und FeNi ⇒ pseudo spin valves

Heute fast immer fixierte weichmagnetische Schicht gehoppelt mit **antiferromagnetischer Schicht** (AF)

Material hierfür Co + FeMn, z. T. NiMn, IrMn, PtMn, oxydische Antiferromagnete, wie NiO, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ oder TbCo

Doppelschicht besitzt hohe „wirksame“ Koerzitivfeldstärke = **gepinnte Schicht** (pinned layer, *englisch pinning* anheftend)

Insgesamt typisches Vierschichtsystem, z.B. Co/Cu/Co/FeMn.

Austauschkopplung zwischen beiden Schichten beruht auf Austauschfeld H_{EB} (exchange bias) = Austausch-Anisotropie

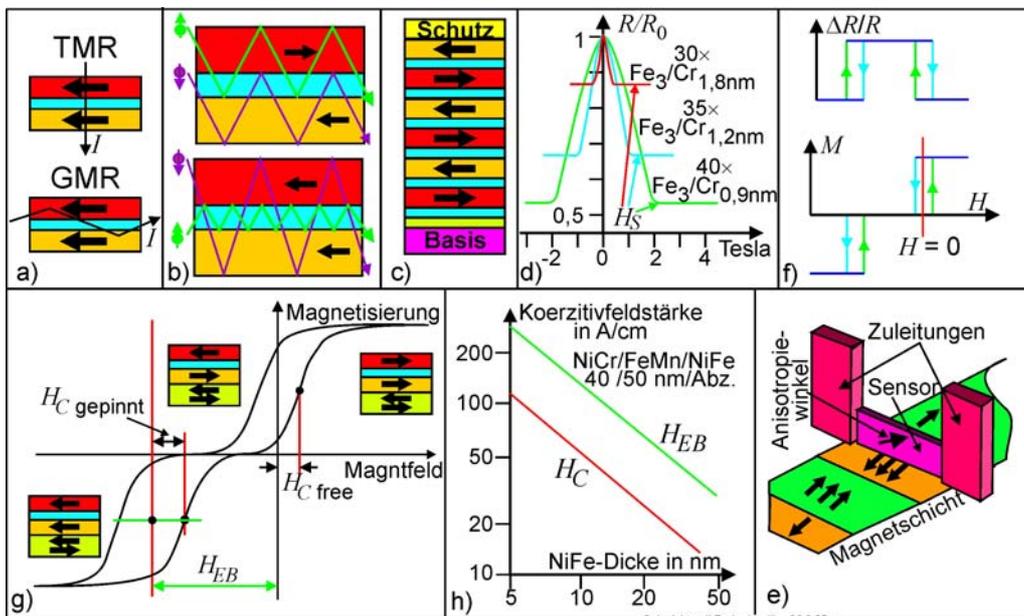
Verschiebt Hysterese-Kurve der weich-ferromagnetischen Schicht um $H_{C \text{ pinned}}$, eigentlich nur indirekt die fixierte Schicht

Bei kleinen äußeren Feldstärken $H \leq H_{EB}$ wird nur Magnetisierung der freien Schicht verändert

Günstig ist symmetrische Anordnung: freie Schicht zwischen zwei gepinnten Schichten

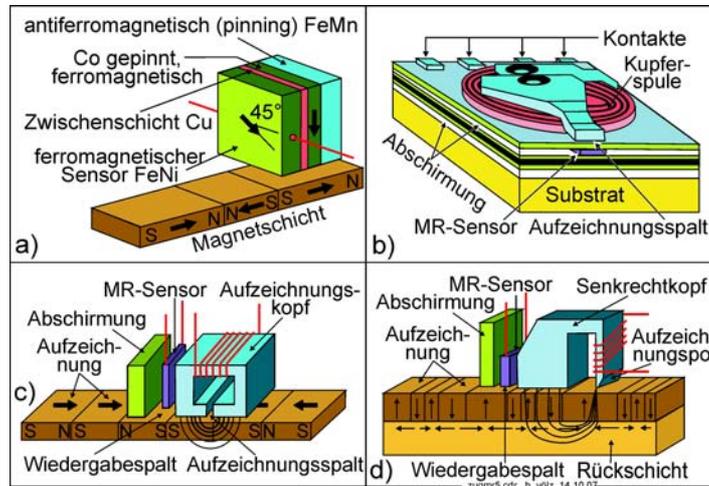
Zu beachten sind Stabilitätsfaktoren, z. B. thermische Einflüsse, wie Néel-Temperatur und Korrosionsfestigkeit

Anwendungen erfordern oft noch zusätzliche Hilfsschichten, z. B. beim TMR eines MRAM



GMR-Elemente

Widerstandsänderung erfolgt näherungsweise proportional zum Betrag des äußeren Feldes $|H|$
 Für Festplatten daher notwendig, positive und negative Magnetisierung zu unterscheiden
 Anisotropie der ferromagnetischen freien Schicht um 45° gegenüber dem Stromfluss und der gepinnten Schicht gedreht

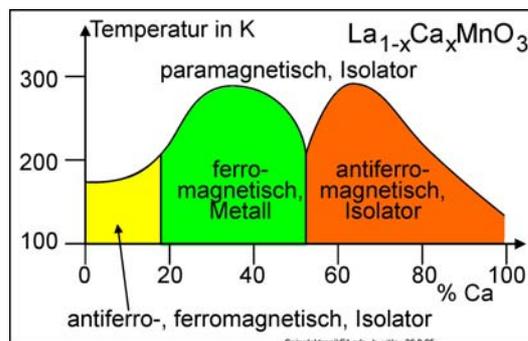


TMR

TMR 1975 von MICHEL JULLIÈRE an Fe/Ge/Co-Dünnschichten bei 4,2 K entdeckt, keine praktische Anwendung möglich
 Weitere Untersuchungen erst nach erfolgreichen Anwendungen des GMR bei Festplattenköpfen ab 1988
 1994 erstmals bei Raumtemperatur $\Delta R/R \approx 18\%$ an Schichtsystem Fe/Al₂O₃/Fe \Rightarrow MRAM
 Dafür Vorteil: $\Delta R/R$ hängt nicht von der lateralen Größe des Bauelements ab
 Wichtig heute HEUSLER-Verbindungen Co₂Cr_xFe_{1-x}Al in etwa 700 Varianten
 Hier fehlen meist die s- und p-Zustände an der Fermi-Kante = vollständige Spin-Polarisation
 Mit Co₂Cr_{0,6}Fe_{0,4}Al bei Raumtemperatur, Widerstandsänderungen $\Delta R/R \approx 20\%$, heute bis 200 % und Schaltzeiten <10 ns
 Übliche Tunnelschichten aus Al₂O₃, selten AlN mit 1 bis 2 nm (<10 Atomlagen)
 Beide Bänder für Spin „↓“ voll besetzt \rightarrow keine Elektronen tunneln, mit Spin „↑“ dagegen mit Wahrscheinlichkeit möglich
 Beide Schichten antiparallel magnetisiert: kein Tunneln möglich

CMR (colossal magneto resistive)

1993 entdeckt: Tritt nicht an Grenzschichten, sondern im Volumen auf: $\Delta X/X$ -Werte mehrere 100 %
 Vor allem bei perowskitischen Materialien (nach Graf L. A. PEROWSKI; 1792 – 1856) beobachtet
 Als Phasenänderung in der Nähe ihrer Übergangstemperatur vom metallischen Leiter zum Halbleiter bzw. Isolator (<100 K)
 Magnetfelder von einigen Tesla notwendig, beeinflussen die Energiebänder eines Metalls mit sehr schmalen Leitungsband
 Streuung der Leitungselektronen nimmt stark zu, genauer untersucht Manganoxyde La_nX_{1-n}MnO₃, z.B. La_{0,67}Ca_{0,33}MnO₃
 X = Ca, Sr oder Ba. Erste Untersuchungen bereits 1955 gemessen, keine Anwendung abzusehen



Weitere Effekte, bisher ohne Nutzung

GMI-Effekt (giant magnetic inductance)

1992 gefunden, betrifft nur den Wechselstromwiderstand, tritt an Drähten auf, Oberfläche mit Magnetmaterial überzogen
 Magnetisierung muss ebenfalls ringförmig um den Draht wirken
 Magnetfelder in der Drahtlängsrichtung drehen sich dann in diese Richtung: ändert Induktivität
 Skineffekts verstärkt die Auswirkung bei hohen Frequenzen: bei FeSi_{0,03} $\Delta L/L \approx 360\%$

EMR-Effekt (extraordinary magneto resistive)

Tritt bei inhomogenen Halbleiterstrukturen auf, wenige Jahre bekannt, noch fehlen detaillierte Angaben

Ferromagnetische Halbleiter, 1996 entdeckt,
Z. B. Europium-Chalkogenide, halbleitende Spinelle und Materialien wie CdMnGeP, CrAs, TiO₂, ZnCo, CrSb und InMnAs
Selten bei Zimmertemperatur ferromagnetisch, könnten künftig Anwendungen finden
GaAs wird bei starker Mn-Dotierung ferromagnetisch, ermöglicht **magnetischen FET**, jedoch ≈ 150 K.

Ausgewählte Literatur

- Altrichter, E.: Das Magnetband. Verlag Technik, Berlin 1958
- Ardenne, Effenberger, Müller, Völz: „Untersuchungen über Herstellung und Eigenschaften aufgedampfter Magnetschichten als Speicherschichten für Magnetbänder“. IEEE Trans. Mag. MAG-2 (1966) 3, 202 – 205 () „Investigations regarding production and properties of vapour deposited magnetic films for dynamic stores“
- Braginskij, G. I.; Timofeev, E. N.: Technologie der Magnetbandherstellung. Akademie Verlag, Berlin 1981 (russ. Original 1974)
- Guckenberg, W.: Sichtbarmachung magnetischer Schallaufzeichnungen. In:
Winkel, F.: Technik der Magnetspeicher. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg 1. Aufl. 1960. S. 112 – 125
- Koristka, Ch.: Magnettonaufzeichnungen und kriminalistische Praxis. Publikumsabteilung, Ministerium des Innern, Berlin 1968. ähnlich und gekürzt in Völz, H.: Grundlagen der Magnetischen Signalspeicherung. Band I. S. 79 - 96
- Krones, F.: in Winkel, F.: Technik der Magnetspeicher. 1. Aufl. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg 1960
- Mallinson, J. C.: The foundations of magnetic recording. 2. Aufl. Academic Press, Boston u.a. 1993
- Schneider, Chr.: „Magnetband“ in Völz, H.: Grundlagen der Magnetischen Signalspeicherung. Band II. Akademie-Verlag Berlin 1970. S. 1 - 46
- Stierstadt, K.: Magnetische Flüssigkeiten - flüssige Magnete, Physikalische Blätter 46 (1990), S. 377 – 382.
- Stopperka, Kl.: Über die zukünftige Entwicklung der magnetomotorischen Speichermedien. Bild und Ton 40 (1987) H. 1, S. 19 – 26
- Thiele, H.: Neue Erkenntnisse über die Entstehung des Magnetbands. fernseh- und kino-technik **42** (1988) H. 2., S. 59
- Vajda, Z.: „Magnetköpfe“ in Völz, H.: Grundlagen der Magnetischen Signalspeicherung. Band I. S. 97 – 183
- Vajda, Z.: „Aufzeichnungstheorie“. In Völz, H. Grundlagen der magnetischen Signalspeicherung. Band VI: S. 81 -139
- Völz, H (Hrsg.): Grundlagen der Magnetischen Signalspeicherung. Band I. Grundlagen und Magnetköpfe. Akademie-Verlag Berlin 1968
- Völz, H. (Hrsg.): Grundlagen der Magnetischen Signalspeicherung. Band VI. Theorie der Aufzeichnung und Wiedergabe. Akademie-Verlag Berlin 1968
- Völz, H.: Informationsspeicher, Grundlagen - Funktionen - Geräte. Expert-Verlag, Renningen – Malsheim + Linde - Verlag 1996
- Willaschek, K.: Visualisierung von magnetisierten Bereichen in der Magnetspeichertechnik. radio, fernsehen elektronik **37** (1988) H. 8, S. 525 – 527.