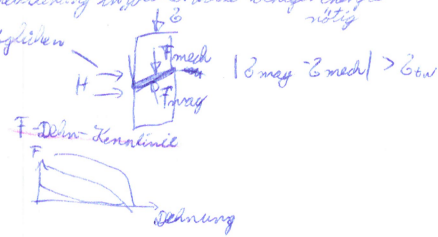
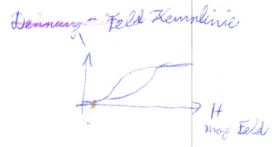


Festkörpereffekt

Magnetisch induzierte Reorientierung → magnetellinduzierter Dehnung MFIS = magnetoelastische Kopplung

Dehnungsabhängige Größen: R_{01} (magnetische Gitterstruktur (Martinit))
 μ (magnetische Permeabilität)

- selbsthaltende multistabile Eigenschaften
- mag. Anisotropie → Polarisationsunterschied → Magnetisierung in wärmeren Schicht "weniger Energie nötig"
- bewegliche Zwillingsgrenzen → MIR ermöglichen



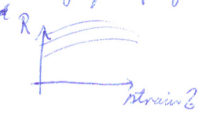
Anwendung Sensoren

widerstandsbasiert / permeabilitätsbasiert

- geometrische & spezifische Widerstandsänderung arbeitet gegeneinander
- störgrößenunfallig
- störgrößenanfällig

magnetische Anisotropie → unterschiedlich magnetisch

über Gitterinduktivität → RC-Schwingkreis
über Elektronenänderung → über statisches, hysterisches Verhalten

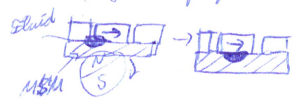


Anwendung Aktoren

direkte / indirekte Bewegungübertragung

mech. mag. Induktion durch Verformung

multistabil, zurückstellbewegung senkrecht z.B. Hydrostatische Pumpe



multistabile Aktoren, adaptive Magnetkreise

stabil / instabil

passiver MSM / aktiver MSM

- rein mech. Brückenmoment
- aktiver MSM
- durchdrückt Gegenkraft nötig, die mag. induzierte Dehnung aufhebt

μ-Änderung als veränderliches magnetisches Widerstand nutzen → ermöglicht Steuerung im Magnetfeld



Beliebige Dehnung ohne Anzug zu halten

- leistungloses Halten
- ab-niedrigem Detrill durch Festkörperrückführung

Multifunktionale Nutzung

- Integration mehrerer Funktionen
- ↳ hohe Energiedichte → Miniaturisierung
- ↳ leistungsfrei stationär halten
- ↳ Dehnungsabhängige Größen → Selbstheilung Potential

6. Magnetostriktive Halbleitung

13

6.1 Magnetostriktiver Effekt

=> interessant für Aktoren; wie Piezo

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ "Foucaults Effekt"}$$

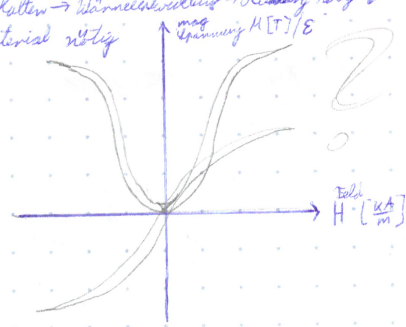
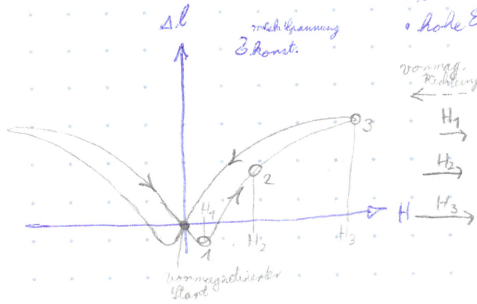
magnetostriktive Materialien ändern äußere Abmessungen unter Magnetfeldeinfluss

6.2 Materialien

natürlich: Eisen, Nickel, Kobalt
↳ aber meist andere störende Eigenschaften
synthetisch: Terfenol D
Tb, Dy, Fe Verbindung

Eigenschaften:

- spröde, zughaftempfindlich → aufwendige Krafteinleitung, nach Vorspannen
- starke Nichtlinearität (abhängig von mech. Spannung)
- schlecht bearbeitbar, Anisotropie, teuer → Kosten
- extrem kleiner neg. Ist-Koeffizient → magnetisch vorspannen
- eingeschränkte Geometrie → nur Plattenform
- starke Magnetfelder & kein bistationelles Verhalten → Wärmeeinwirkung → Kühlung nötig
- hohe Energiedichte → (4) wenig duktiles Material nötig

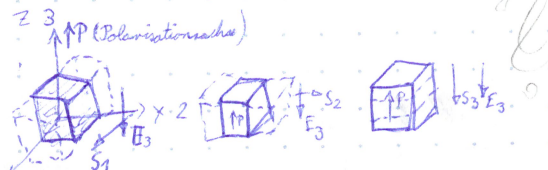


6.3 math. Beschreibung / Grundlagen

magnetostriktives Material
 $B = \mu^T H + dT$
magnetostriktive Spannung $S = dT$
magnetostriktive Dehnung $S = dT + dH$

Richtungsabhängig
(analog zu Piezo: $P \rightarrow T$, $E \rightarrow H$)

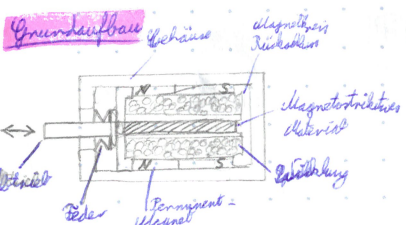
d_{31} bewirkt, Feld in Richtung 3, H_3 verursacht Dehnung in Richtung 1 & 2



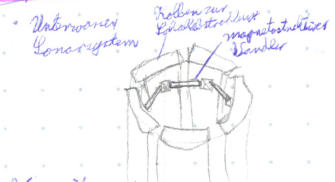
Longitudinal- / Transversaleffekt

- Aktoren: nur Plattenform
- mag. Vorspannung nötig (Braunmagnet)
- mech. Vorspannung nötig (Feder)
- starke neg. Feldkoeff. nötig (Wicklung)
- ohne mech. Vorspannung: $S_2 = d_{33} \cdot H_3$
- mit mech. Vorspannung: $\Delta L = d_{33} \cdot H_3 \pm \frac{F}{C_T}$
- Felddeformation / Magnetisierungseigenschaft sind gleich
- $d_{31} \approx -0.5 d_{33}$
- Feld & Magnetisierung gleich, aber Deformation in entgegengesetzte Richtung gerichtet
- stark von mech. Vorspannung abhängig

6.4 real magnetostriktive Aktoren



Beispiele



Bauelemente zur Realisierung größerer Bewegungen

- Reibübertragung (siehe Piezo) → konventionelle Wellen
- Schräkmotoren (Terfenol D Motor)
- Rohr mit Vorspannung
- Platte mit durchdringendem Magnetfeld
- Terfenol D Stab
- Rohr mit Vorspannung

Vergleich: Magnetostriktion / Piezo

Faktor	25-33	110 $[-10^{11} \text{ m}^2]$
Energiedichte	14-26	? $[J/m^3]$
Curie Temp.	380	765-300 $[^\circ C]$
Antriebsart	Strom	Spannung
Feld	H-Feld	D-Feld (Spannungsfeld)
	feldfrei	Quellfeld

Zusammenfassung

- ① Höhere Energiedichte, Curie Temp. als Piezo
- bei Überschreitung verloren Eigenschaften nach Schmelzen zurück
- günstige Antriebsart für elektrostatische Aufgaben

Anwendung:

- (außer den genannten)
- aktive Schwingungsdämpfung
- Aktoren
- Ultraschallwandler & Schweißger.

- ② Feldquelle ständige Erregung nötig → kein bistationelles Verhalten
- ohne Vorspannung nur positive Längenänderung erzielbar
- ↳ realer Betrieb nur mit mag. & mech. Vorspannung
- sehr zughaftempfindlich, aber spröde, schlecht bearbeitbar
- hohe neg. Feldstärken nötig → hohe Te, Verlustwärme & hohe Leistung

Vorteile / Nachteile Ultraschallmotoren

- ⊕ - hohes M bei niedrigem n
Drehmoment Drehzahl
- kurze Start-Stop-Gedächtnisse $< 1ms$
- Leistungslos, hohes Haltemoment
- Überlastbarkeit $\rightarrow$ Ratatallupplung
- keine mag. Felder, raumtauglich
- gut miniaturisierbar
 $\hookrightarrow$ einfache Geometrie & hohe Leistungsdichte

- ⊖ - Kräfteablass, Verschleiß, begrenzte Lebensdauer
- Wirkungsgrad 30-35% $\rightarrow$ Reibverluste
- hohe Betriebsspannungen (bei Kleinmotoren eher auch mal nur 3,3V)
- Begrenzte mech. Leistung (60W)
- Temperaturabhängig
- meißelte Elektronik
- wenig bekannt $\rightarrow$ wenige Anbieter

Steuerung

quantitativ: Spannungsgesteuert , Ladungsgesteuert
 $\hookrightarrow$ nicht linearer Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang
 $\hookrightarrow$ Regelkreis für Absolutposition nötig
 $\hookrightarrow$ keine ständigen Leistungsabgaben
 $\hookrightarrow$ Leistungsabgaben
 $\hookrightarrow$ Leistungsverschiebung

Ultraschall

Wendervellenmotor: VCO (Voltage Controlled Oscillation)
 20-100kHz
 DC zu Hochfrequenzwandler
 mit Phasenverschiebung $\rightarrow$ Induktivität
 zeitlicher $\rightarrow$ Transformatoren
 $\rightarrow$ gewandelt in sinusförmige $U = 100-200V$

Leistungsgrenzen

$$V_{max} = 10^{10} \frac{mm}{s}$$

$$T_{max} = 100 N$$

Leistungssteigerung durch Resonanz im Hochbereich begrenzt
 $< 20kHz$

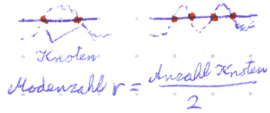
Ultraschallantriebe → **Stehwellenmotoren** (monomodal/multimodal)

Bewegungsbewertung durch kleine Stöße auf Betrieb
 ↳ nutzt Trägheitskräfte & Resonanz

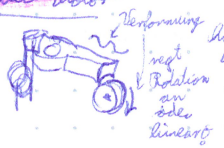
niedrige Kraft, hoher
 $\sim 100\text{N}$ max $800 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Monomoden- / Stehwellenmotoren

Schwingungsmoden Balken
 (Kreis geht auch)



Elektro-Motor



harmonische Anregung zur induzierten Eigenform der Transduktion
 ↳ spezielle Betriebsfrequenz pro Ausrichtung
 - geringe mech. Leistung
 - Stellungsgeber
 ↳ Ventile, Klappen
 - Drehmoment durch Hebel skalierbar

andere Formen

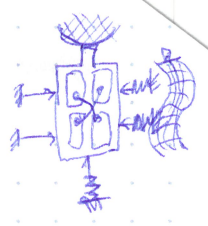


Physikinstrumente PI-Karlsruhe



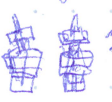
Longitudinalmode (Schwingung)
 tangential axial Mode
 komponente tangential-axial-Mode

Einzel-/Umlaufende Bewegung



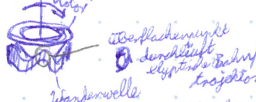
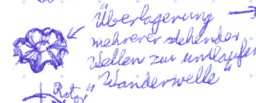
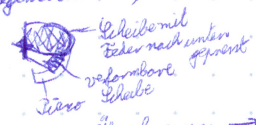
Wanderwellenmotoren

Canon-Objektiv Motor



Wanderwellenmotor

Don hat sich beschrieb



↳ kontinuierliches Antreiben des Rotors

addition 2er stehender Wellen gleicher Amplitude
 ↳ räumlich & zeitlich phasenverschieben
 φ_0
 pos. wandernde Welle $y = A \cos(kx - \omega t)$
 neg. wandernde Welle $y = -A \cos(kx + \omega t)$

zeitliche Phasenverschiebung über el. Ansteuerung



räumliche Phasenverschiebung durch 2 Anregungsbereiche

Bauformen

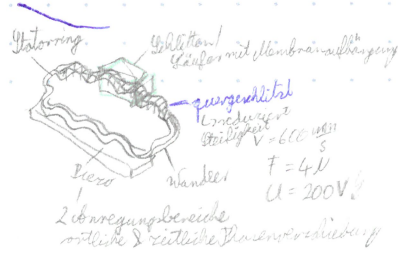
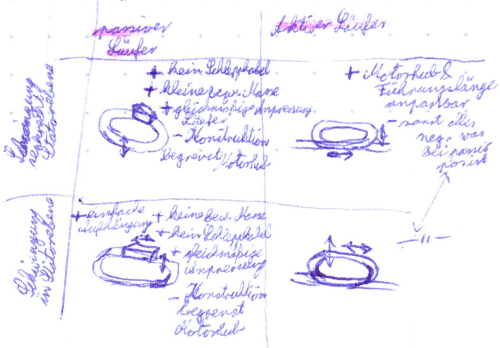
- ↳ umlaufende Biege-Wellen
- ↳ umlaufende Schwingungs-Wellen
- ↳ linear Wanderwellenmotoren

PI-Wanderwellenmotor

- axial umlaufend
- 3-phasig angeregte 120° Schwingung
- Tausch zweier Phasen umkehrt Richtungs-umkehr

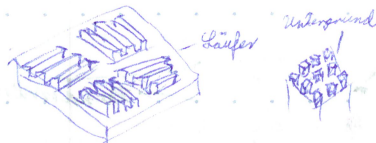
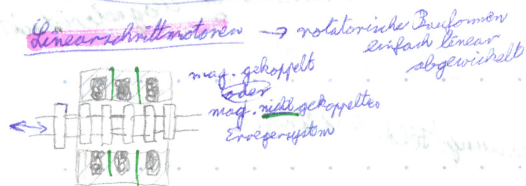


DC Motoren gleichen Bauweise kleineres Drehmoment größere Drehzahl höherer Wirkungsgrad



4.3.2 Schrittmotoren

Multikoordinatenschrittmotoren



durch mehr Teilch.
Motoren möglich

9

Betriebsverhalten von Schrittmotoren

Drehmoment-Drehwinkel-Charakteristik
(bzw. Kraft-Weg Kennlinie)
sinusförmig

die sollte ich zeichnen

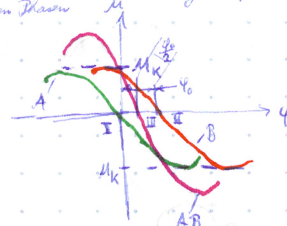
• Kippmoment M_K = max. M mit $\varphi = 0$
von außen nötig, um in dem Moment nichts passiert
Motor zu nächstem Schritt zu bewegen

• **Halbschritt**: Kippmoment M_K ist halbiert
→ $\varphi = 0$ Zielposition: Kippmoment gleichmäßig
Mausen (Stück-Last) = Minnen
eine Stellung $M_{motor} = 0$
aber durch Reibung / Last verbleibt
inneres Gegenmoment → Winkelfehler
bezüglich idealer
Positionen Lastwinkel φ_L

• **Schrittwinkel** φ_0 = Winkel / Schritt
 $\varphi_0 = \frac{360^\circ}{m \cdot Z_{Stator}}$

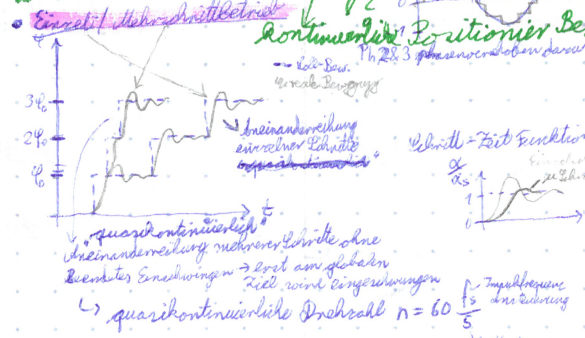
Vollschrittbetrieb: alle Statorphasen gleichzeitig aktiv → Toranstellung
mit Phasen gleichzeitig aktiv → Toranstellung
Halbschrittbetrieb: halbiert konstruktive Schrittweite durch
Verstromung eines weiteren Drahtes an
Stator (Phasen z.B. 2-3-2)

→ Auswirkung auf Drehmoment



Leiterschrittbetrieb: Phasen nicht mit voller
Amplitude angesteuert
→ gestufte Amplituden
entlang sin erzeugen
Zweinstromstellungen

warum schrittfrequenz wichtig



Kontinuierliche Positionierbewegung & möglichst schnell

→ deshalb will man hohe f

→ wenn zu hoch



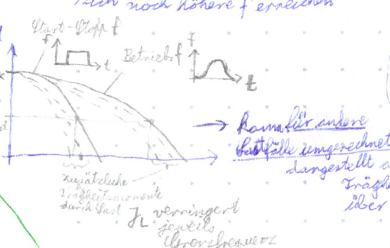
**größtes Problem
Lagerfehler
Schrittfehler**

• **Frequenzverhalten**
→ Reaktion Schrittmotor stark abhängig
von Lastträgheit

• **Frequenzgrenzen im Bereich** (für Geschw. der
Reaktion)

• **Platz-Stop-Frequenzgrenze** (untere f_{min})
→ Motor kann innerhalb eines Schrittes ohne
Schrittschalt anlaufen/stopfen

• **Betriebsfrequenzgrenze**
→ wenn f nach Anlaufen / vor Anhalten
kontinuierlich erhöht / gesenkt wird lassen
nicht noch höhere f erreichen



• **Stellgliedvarianten zur Steuerung der Betriebsfrequenz**

• **Bei kontinuierlicher Ansteuerung**

- **Bidirektional-Ansteuerung**: zunächst höherer Endspannung angelegt
aber abgeschaltet bei Erreichen von 0 Strom
→ steilerer Stromanstieg

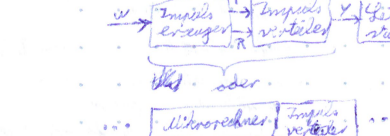
- **Vorwiderstand R_V** : kleinere el. Zeitkonstante → höhere Betriebsspannung

- **Parallelkondensator**

- **Konstantstromsteuerung (Chopper Betrieb)**: deutlich höhere U angelegt
→ bei Erreichen / Unterschreiten eines Regellandes
Strom ab / zugeschaltet

• **Ansteuerung**

• **offene Steuerkette** → Ansteuerfrequenz der Phasen benötigt Schrittfolge



• **geschlossener Regelkreis**
auch möglich
Schrittweite vergleichbar DC
Schrittschalt, ausgleichen der
Regelung von Weg / Winkel / Geschwindigkeit
Leistungssystem nötig

• **Genauigkeit**
- interne Klappwerkkörpernung durch Zahnstruktur
→ kein zusätzlicher Messsystem nötig
→ Genauigkeit Endposition abhängig
Fertigungs-genauigkeit Zahnbildung
- bei Halb- / μ Schrittbetrieb müssen Engepschritte
identisch sein → sonst Positionsfehler
- reibungsbedingte Fehlstellung / Fehlbildung
durch Gegenkräfte → Auslenkung aus Vollposition
→ Positionfehler / Lastwinkel
verbleibt

Bipolar



• L in beide Richtungen von
L durchdringen
• einseitiger Polstrom / durch / Endpol
möglich
• wichtig für μ Schrittbetrieb
• H-Brücke
→ pro Phase notwendig 2 Transistoren aus
Motor herausgeführt

• **optimale Performance**
bei Drehmoment, Flexibilität, Wirtschaftlichkeit

• **aufwendige Steuerungstechnik**
→ kann falls 2 Relais einer Seite gleichzeitig
→ Kurzschluss zerstört Endstufe

Unipolar



• pro Statorpol 2 Wicklungen für Süd / Nordpol
von 2 Phasen
• pro Polwicklung 3/4 Betrieb aus Motor
herausgeführt

• **einfache el. Ansteuerung**

• **zu jedem Zeitpunkt nur 50% des
Kupfers für Drehmoment genutzt** → $M \sim 50\%$
bei gleicher Baugröße → unwirtschaftlich

• **Ansteuerung μ Schrittbetrieb (S. DC Motoren)**
variable Amplituden von 1 nötig → analoge Verstärker /
getaktete Stellglieder PW, M

• **Zusammenfassung elektromagnetische**

- einfacher Gesamtaufbau
- offene Steuerkette ohne Überstrom
- interne Klappkörpernung
→ gleichzeitige Einansteuerung

- schwingungsfähig
- mittlere Anforderungen an Genauigkeit &
Positioniergeschwindigkeit

• **Schrittwinkel**: $\varphi_0 = 0,36^\circ - 5^\circ$ Geschwindigkeit

max $M_K = 0,5 N \cdot m$

max $f = 2-4 kHz$

max $\omega = 20 kHz$

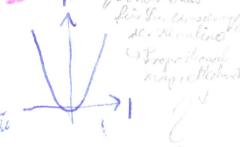
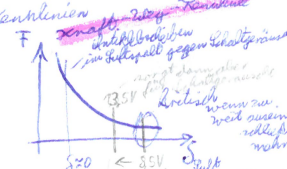
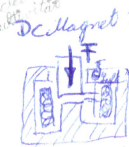
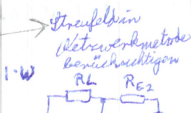
4 Elektromagnetische Feldtechnik

4.1 Kraftwirkung auf Grenzflächen

Gesetze: Durchflussdichtengesetz
 (siehe Kap. 2.5) $\rightarrow$ es gibt auch noch andere Gesetze
 Lorentzkraft / Ampere-Kraft
 zur Berechnung z.B. Flussdichte im Dreiphasenmotor

Kraftformel (auf Grenzflächen)

$$F_z = \frac{A}{2\mu_0} B_z^2$$



Wichtiges:

- Bei Ball B-Feld auf
 - 1. unersättlicher Wärmeschaltung P_v
 - 2. Wärme muss abgeführt werden
- Magnetkräfte abhängig von
 - Erregung I, w
 - 1. Induktionszahl
 - 2. Erregungswert abhängig von Geometrie $M, Sättigung, usw.$
- F-Kraftwirkung hängt von Bmag Induktion an Grenzflächen ab
 - 1. reduziert Bewegungsgrünge

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{A \mu_0 I^2 w^2}{L_{ges}}$$

Strominduktion
 egal für Kraftwirkung?
 $\rightarrow$ Richtstellung nötig

4.31 Elektromagnete

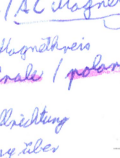
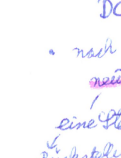
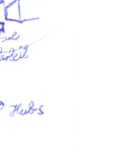
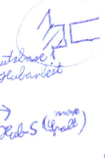
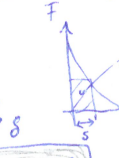
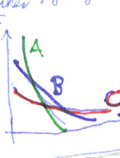
Bauformen:

- Kategorisierung:
 - 1. lineare Dreh / rotatorische Bauform
 - 2. Kolbmagnet
 - 3. Drehmagnet
 - 4. Magnet (eingestaltig) E / U Magnet Typ
 - 5. Variation anderer Bauformen
- 6. Flachanker
 - 7. Zylinderanker
 - 8. Tauchanker
 - 9. Kleeblätter
 - 10. Drehanker

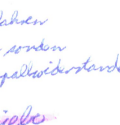
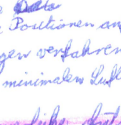
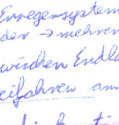
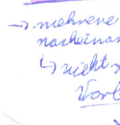
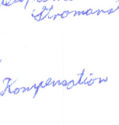
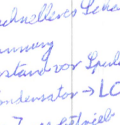
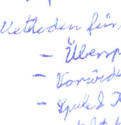
Eigenschaften (statisch / quasistatisch)
 Betriebseigenschaften
 $F_z \sim I^2$
 $F_z \sim \frac{1}{\delta^2}$
 nichtlineare Abhängigkeit der Kraft vom Magnetstrom
 größte Kraft bei $\delta \rightarrow 0$ (Praktisch)
 $\rightarrow$ Kennlinienbeeinflussung

* Kennlinienbeeinflussung

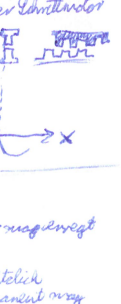
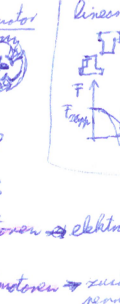
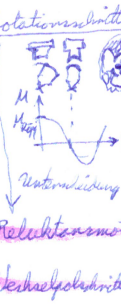
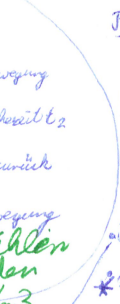
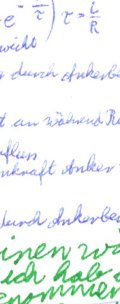
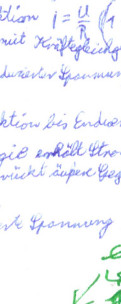
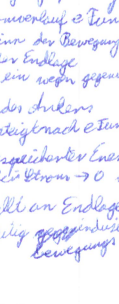
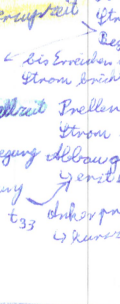
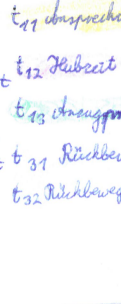
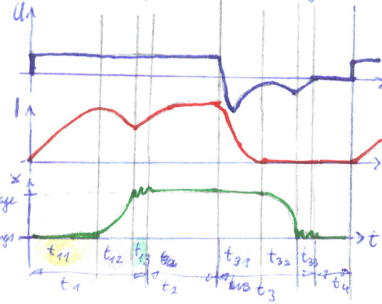
Proportionalitätsregel: linearisierte / verbesserte Kennlinie
 1. Kegelform drehen $\rightarrow$ geringere Leitwertänderung über Hub



dynamisches Verhalten $\rightarrow$ Induktion erfordert Elementänderung

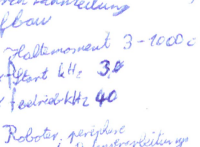
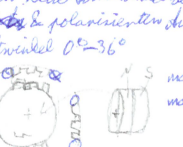
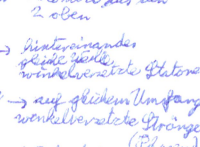
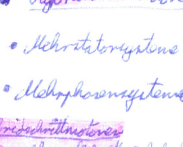
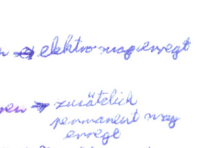
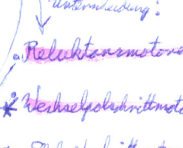
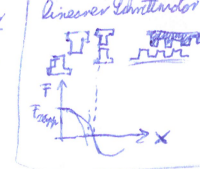
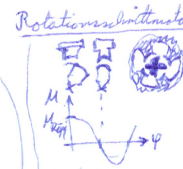


ψ-Haltvorgänge eines Elektromagnets

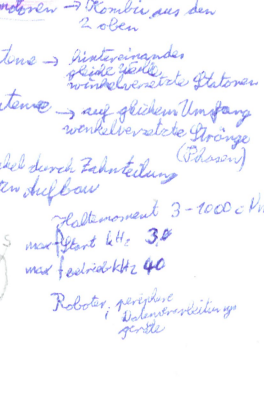
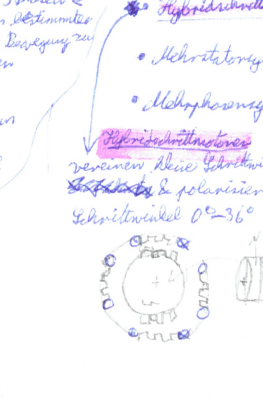
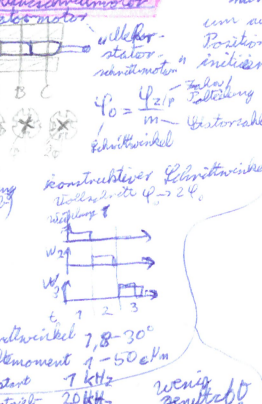
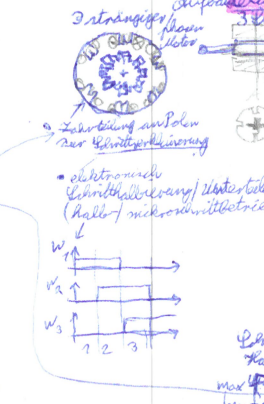
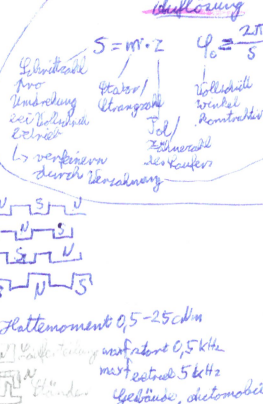
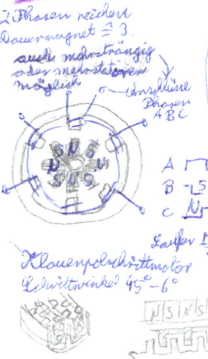


4.3.2 Schnittmotoren

- mehrere Erregersysteme $\rightarrow$ mehrere Positionen anfahren
- nicht zwischen Endlagen verfahren sondern vorbeifahren am minimalen Luftspaltwiderstand
- $\rightarrow$ diskontinuierliche Antriebe
- bei hoher Frequenz „quasikontinuierlich“ betriebsfähig



2-Phasen Reluktanzmotor



3.6 Betriebverhalten elektrodynamischer Antriebse

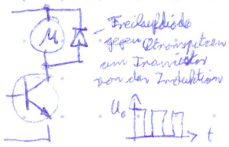
Bewegungsverhalten

Kontinuierlicher Antriebssystem → benötigt für Positionieraufgaben geschlossenen Regelkreis

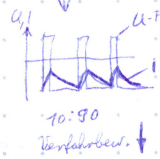
- Komponenten:
- Leistungsteilglied
 - kleines System
 - Regler
 - genaue Ansteuerung
 - entw. ggf. Kommutierung

PWM

Einquadrantenbetrieb



Viervierantenbetrieb



→ Sollstrom hat bei PWM der Spannung obere & untere Grenzwert

Blutstand
 Mittelwert → Erwärmung / nicht gleich für Verlust & Motor

$P_{Verlust} = I^2 R$

große Stromschwankungen
 vergrößert Wärmeverlust
 60 V.d. bei kleinen Induktivitäten
 z.B. Freilaufstrom ohne Eisenkern

Leistung: hohe f_PWM & vorgeschaltete Induktivität

a) Bewegungsgleichungen im dynamischen Betrieb

(4 Teilaspekte)

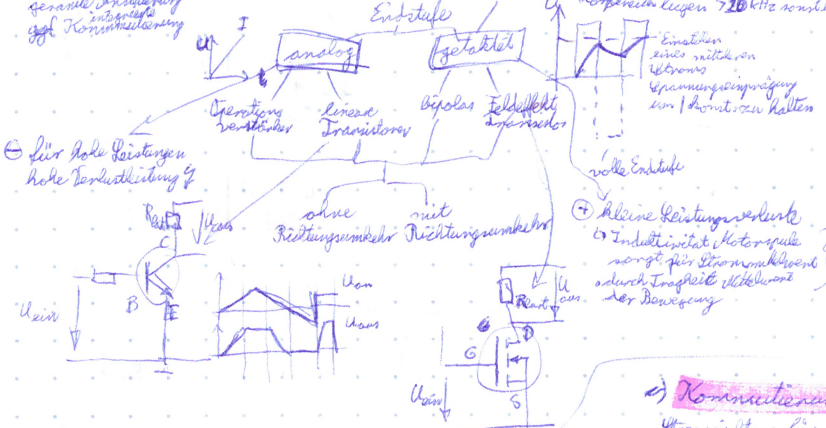
Signalflußplan (Regelungstechnik) → Bewegungs-Ges. → Übertragungsfunktion

→ Stromfluss fest funkt. mit den Spannungs- & Federkraft

verschiedene LT möglich

X welche Leistungsteilglieder, wie funktionier, die

b) Endstufe / Leistungsteilglieder



c) Kommutierung

Stromrichtung für Magnetfeldrichtungsänderung (siehe Kap 3.5)

d) Messsysteme

→ nötig für Position & Geschwindigkeitmessung

Weg/Winkel: digitale relative Kontinu. → geschlossener Regelkreis

absolute Inkrementalanschläge Bsp: integrierter Impulsges. magnetischer Impulsges. optischer Impulsges.

mag. Geber (absolut/digital)

interferometrisch

Geschw.: → Zeit / Zählfrequenz der Vorgehens bestimmt

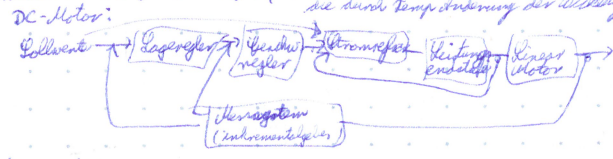
Genauigkeit: des Motors werden maßgeblich von dem System bestimmt

analog: geringe Diffusion bei großen Bereich
 aber bei kleinen sehr hoch

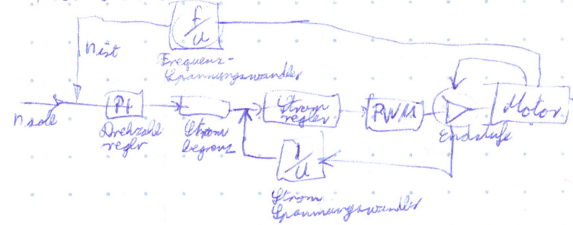
digital: → deutlich gleiche Diffusion
 80 µm Bereich aber teuer

e) Regelkreise

- häufig mehrfach kaskadiert
- unterlagerte Stromregelung → Kompensation bzw. induzierter Gegenmaßnahmen; Nichtlinearitäten von Motorinduktoren die durch Temp.änderung der Wicklung entstehen
- geschw. & Drehzahlregelung → bei hochdynamischen Systemen
- Weg & Winkelregelung → äußere Schleife



EC/BLDC Motor:



Zusammenfassung Elektrodynamische Antriebssysteme

- einfacher Aufbau
- geringe mechanische Genauigkeitsanforderungen
- erstm. hohe Dynamik möglich und hohe Genauigkeit
- zusätzliche Messsysteme für Störgrößen nötig & Regelkreis erst elektronisch aufwandvoll & teuer
- prinzipiell hohe Genauigkeit messsystemabhängig
- mechanisch Getriebevermeidung

optimale Regelstruktur sorgt dafür dass Messergebnisse auch genau gemessen werden können herausgegeben werden

b) ~~DC-Motoren~~ **DC-Relaismotor & Universalmotoren** weil DC Relaismotor theoretisch auch mit AC betriebsfähig werden können

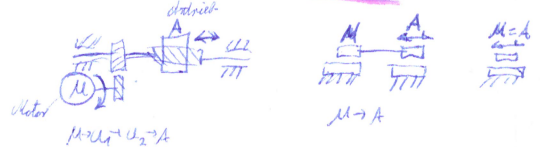
- ↳ Anker & Erregerwicklung in Reihe geschaltet
- Erregerfluss nicht konst. sondern Funktion des Stroms Φ
- ↳ lastabhängig
- ↳ am Drehzahl einstellbar:
 - Ankerparallelwiderstände
 - Ankerwiderstände
 - Variation Betriebsspannung
 - Feldschwächung durch ~~Widerstände~~ Raster zu Erregerwicklung

c) **Eigenschaften asynchron & Synchronmotoren**

- asynchrone Wechselstrom ω_s durch Netzfrequenz & Polpaarzahl festgelegt durch Spannung der Statorwicklung
- Bestromungsunabhängige Winkelgeschw. $\omega = \omega_s$
- kurzgeschlossene Läuferwicklung Rotor induzierte Spannung erzeugt Drehmoment
- ↳ Geschwindigkeitsdifferenz $v_{synch} > v_{asynch}$
- Reluktanz, Flutenwechsel Permanentmagnet-Läufer
- ↳ Überlast Motor gerät auf Totpunkt
- ↳ große Trägheitsdrehung in Synchronismus
- starke Drehzahlverluste $\rightarrow$ Zeitmessgeräte
- ↳ Drehmotor $\rightarrow$ Drehmotor
- ↳ Rotorwicklung gebildet
- ↳ Läuferwicklung gebildet
- ↳ großstrommoment
- robust
- wartungsfrei
- geringer Schwingungsgrad
- kostengünstig
- benötigt Ankerhilfe
- z.B. 500W Ankerkondensatoren
- oder Spaltpolanordnungen
- ↳ Spaltmotor
- ↳ Statorpole mit Klauen oder Kurvenwicklungen
- ↳ mag. teilbare Stromfluss
- ↳ ablaufen
- ↳ vgl. mit DC aufwändig zu steuern/regeln
- höheres Gewicht



2) **Kontinuierliche Linear Motoren**

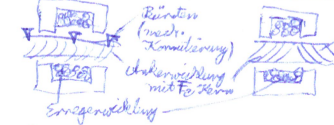


- ebenfalls 4 Teilgebiete über Gleichungen verknüpft
- mag.: - Erregerstrom (permanentmagnet od.)
- Felder Polarität (N/S) **Stator / Rotor** / **Statorpolanordnung**
- el.: - mit / ohne Kommutierung
- el./magn. Stromkommutierung
- nach Silber, Silberkontakte bei Spaltanordnung
- nach: - bew. Komponente Spule / Magnet / bewegter Dauermagnetkreis
- Aufbau Geometrie (rotationssymmetrisch, prismatisch)

Einfluss bewegte Magnete

- Größe fest
- Wirkung durch Fall Grenzflächen & Ummagnetisierung im Endwickelsystem
- ↳ keine Phasenführ. bew. Teile
- Leistung Wärmeleits der Gruben Kontakt zu Rückstrom
- definierte Ausgangsposition durch Reluktanzkräfte
- ↳ große Verdrängung bei gleicher Spulenauflösung
- radiale Reluktanzkräfte wenn unipolare rot. sym. / dipol. Anordnung
- ähnlich Reluktanzkräfte rückbleibende Kraft $\rightarrow$ verstärkt nicht linear
- ↳ Induktion $\rightarrow$ Induktion
- ↳ Induktion

elektromech. & magnet. Linearmotoren

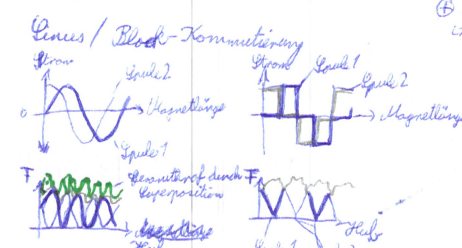
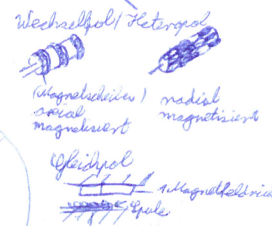


- Erregerwicklung
- Wickelfeld mit Kommutierung
- + kleine Motorgeräusche
- lageabhängige Stromkommutierung
- ↳ elektronisch
- + 2. und verbindende Kurzspulen
- alle in einer Anordnung
- mag. Teilenecke $\rightarrow$ wechsell. Feldrichtung
- 2/3 Phasen
- überlappende / parallele Spulen

Spulen / Block-Kommutierung

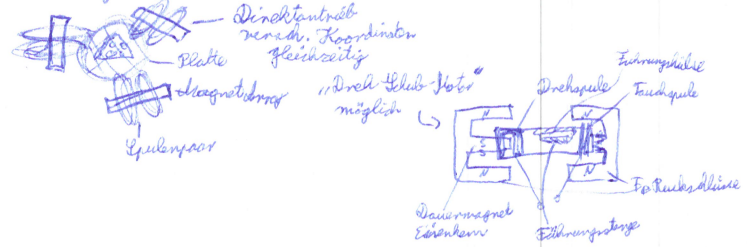


- + mag. Kreis im Motor
- + keine Endwickelschleife (da kein nachfolgender, sondern konst. B-Feld)
- + fest. Spule einwärts $\rightarrow$ leicht Einföhrung durch
- + Hochdynamische Betriebs möglich
- Stromrückführung beweglich nötig & kompliziert
- mit Kommutierung
- ohne Kommutierung
- ↳ Spulen / Teilspulen stets im Magnetfeld
- ↳ daher keine Kommutierung erforderlich
- + geometrisch einfach realisierbar
- mit Kommutierung
- ↳ nur Spulenkreise im Magnetfeld bestromt
- + energieeffizient
- ↳ weniger Wärmeabfuhr



3) **Mehrkordinatensysteme**

Nicht angetriebenes Kreuzblatt



elektromagnetisch		elektrodynamisch
Schrittmotor		DC Servomotor
+	- offener Regelkreis - Kein Leertastentrieb nötig - einfache Systemintegration	- sehr hohe Positionierungsgenauigkeit - hohe Dynamik (da geringe Masse & hohe Drehzahlen) - hoher Wirkungsgrad - hoher Drehmomentstreckverhältnis
	- geringe Dynamik - geringer Wirkungsgrad - geringere Drehmomentverhältnisse - geringere Genauigkeit - geringere Drehzahlen - hoher Elektronikaufwand bei Microschrittmotoren	- geschlossener Regelkreis nötig - konstanter für Position & Geschwindigkeit nötig - hoher Elektronikaufwand für Regelung

2.6 Kraftwirkung in el. Kreisl.

a) Kräfte auf Grenzflächen "maximaler Spannungsteiler" $T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \mu H^2 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} \mu H^2 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} \mu H^2 \end{bmatrix}$

Zugkraftformel $F = \frac{\mu_r - 1}{2 \mu_0} A B_I^2$

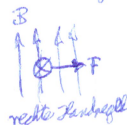
$\mu_r \gg 1: F \approx \frac{A}{2 \mu_0} B_I^2 \rightarrow$ genutzt bei el. mag. Statik (Elektromagnetische Schrittmotoren)

b) Kräfte auf bew. Ladungen Q in B-Feld

↳ Lorentzkraft oder elektrodynamische Kraftwirkung

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{F}_L = (\vec{v} \times \vec{B}) I$$

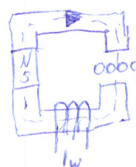


Umpolung möglich
(bei Grenzflächenkraftbruch)

genutzt bei elektrodynamischer Statik (Elektromotoren)
Körner in einem Überfall von beiden Seiten zusammenwirken elektrodynam. Felder aus

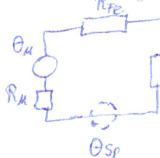
3 Elektrodynamische Statik

Arbeitsprinzip



Spule als Stab in Arbeitsluftspalt
winkt als el. Erregung mit Iw auf Kreis zurück
↳ wirksame W. zählend nicht bei Drehung

Erregerhaltung



$$\Phi = \frac{SE}{R_{ges}} = \frac{SE}{\sum R}$$

Ankernmagnet (H^* adäquate Kreisstrahlstärke)

$$\Phi = B_m A_m = H^* l_m + l_w$$

$$= B_E A_E = \frac{E}{\mu_0 \mu_r k_m} + \frac{l_w}{\mu_0 A_l} + \frac{l_E}{\mu_0 \mu_r A_E}$$

↳ daraus Luftspaltinduktion B_L

vereinfacht für $A_m = A_l = A_E$ & $\mu_r \gg 1$

gilt: **Hubkraftgleichung**

$$F = B_L(l) \cdot l \cdot I$$

Hubkraft-Weg-Kennlinie (Kap. 2.5)

Wird Komponente in Gegenrichtung zu groß = bleibende Schwächung permanenter mag. Felder (Kap. 2.5)

$$F = I(\vec{L} \times \vec{B})$$

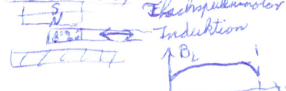
↳ Krafttrierbare Länge

$$I \perp B: F = B L I \rightarrow B L = \text{"Kraft- oder Motor-Konstante"}$$

$$\text{Motormoment: } M = F r = B L I r \Rightarrow M = c \Phi I = k_m I$$

Stablänge c oder k_m Motor-Konstante k_m Drehmoment / Motor-Konstante

Charakteristische Nichtlinearitäten



↳ Überlagerung Lorentzkraft & Kraft auf Grenzflächen bei Linearitätsprinzip

3.2 Grundstruktur d. dyn. Statik

Wie wird es bei Entwicklung vorgehen

Teilsysteme:

elektrisches T.: Wicklung, Stromversorgung, Ansteuerung, Regelung

magnetisches: el. & permanenter mag. Erregung, Flussführung, Arbeitsluftspalte

mechanisches: Pleuel- & Pleuellsysteme, bewegte Masse, Gegenkräfte, Reibkräfte, ...

thermisches: el., mag., mech. Komponenten & ihre Wärmeleit-, Wärmestrahlung & Konvektions-eigenschaften & Umwelteinfluss

Großdimensionierung:

1. Anforderungen: Bauraum, Kräfte, Bewegungsprofil, Massen, Betriebsweisen
2. Auswahl prinzipiell geeigneter Grundstruktur
z.B. bewegter Magnet, Gleichpolstruktur, ohne Kommutierung

3. grobe Abschätzung spezifischer Verlustleistung im Bauraum (Experiment; Paul, therm. Zeitkonstante)

4. erforderliche Kräfte aus Anforderungen

5. grobe Abschätzung erreichbarer Hubkräfte im Dauerbetrieb
↳ Grundlegende Def.: Paul & Bauraum
"Hubkraft pro Volumeneinheit bei Paul"

6. Motor- & Pleuellgestaltung (Magnetkreis)
7. überschlägig magnetisches / Pleuellkraft Formel berechnen (mit FEH)

8. Ermittlung Strom- & Drehmoment / Pleuellkraft

3.3 Wechselwirkung el. Teilsysteme

Therm. Verlustleistung P_v im Antrieb

↳ statische Belastung → keine Kräfte, oder in Wärme umgewandelt

• $P_v = I^2 R$ führt zu Temperaturerhöhung

Wirkung → begrenzt damit zulässiger Strom I → damit auch Pleuellkraft F im Dauerbetrieb begrenzt

• inwieweit Wirkung = Widerstandserhöhung
↳ Kupf. / Halbleiter

spezifischer $R \rightarrow R = \rho \frac{l}{A}$
temp. abhängig

Betriebsarten

• Dauerbetrieb S1: stationär eingeschwenkt, konstante Belastung

• Kurzzeitbetrieb S2: therm. Belastungszustand zeitlich nicht erreichbar

↳ Bestimmungsgemäßer Betrieb auf temp. Umgebung abgebildet

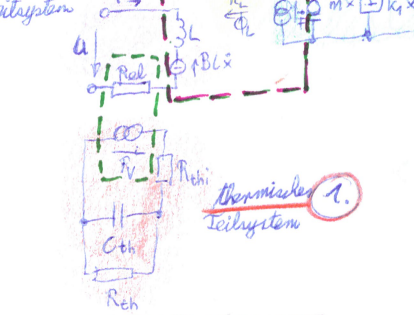
• Drehmoment S3: zyklisch ein-/ausfallen

konstante Bestromung & Pleuellkraft

↳ temp. kein abbauen auf temp. Umgebung; oberer stationärer Grenztemp. stellt sich ein

4

elektrisches Teilsystem



2

mechanisches Teilsystem

1

thermisches Teilsystem

Nachwirkung der Teilsysteme

$P_{el} = U \cdot I$
el. Kreis
Gegenfeld durch I, w
magnet. Kreis
magnet. Feld
magnet. Feld
magnet. Feld

$P_{mech} = F \cdot v$
mech. Kreis
Reibung & Gegenkräfte

$P_{therm} = P_{el} - P_{mech}$
therm. Kreis
Reibung & Gegenkräfte

- Punkt el. idR Erregung in bewegter Pleuellspule → begrenzt Pleuellkraft im Dauerbetrieb
- mag. Feld & Gegenfeld überlagern sich → mögliche Nichtlinearität & Pleuellkraftschwächung
- Impuls- / Kurzzeitbetrieb → therm. Wärmestrom → therm. Erregung nicht mehr
- ⇒ Gegenfelder wirken begrenzend

2.4 magnetische Messtechnik

Flussmessung (Induktionsmethode) "Flussmeter"

in Windungen wird bei Flussänderung eine Spannung induziert

erzeugt durch ein/ausgeschalt. mag. Feld $B = \frac{\Phi}{A}$ & $H = \frac{\Phi}{\mu_0 l}$ berechnen
 räumlicher Einfluß / Drehen / Kerneinschieben
 Messgerät: Spule / Feldspule / Stromabkomponente Spule



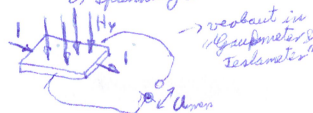
Potentialmagnete

(lange konstante Wicklungsdichte)
 mag. Spannungsdiff. $V_m = SH \cdot ds$
 zwischen 2 Punkten messen



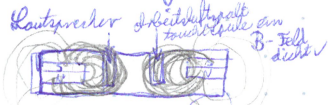
Feldstärke & Induktionsmessung mit Hall-Sonden

Hallbleiter senkrecht zu Stromfluss
 Magnetfeld $H_y \rightarrow$ abhängig Ladungselektronen senkrecht zu Feldrichtung
 Spannung entsteht



3

2.5 Berechnung el. mag. Kreise

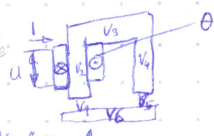


Richtungsfluss
 Richtung des Feldes
 im Magnetkreis
 nach rechts / Kerneinschieben

Grundlagen

Durchflutungsgesetz

Durchflutung (mag. Fluss) Φ ist konst. im mag. Kreis wie Strom
 $\Phi = I \cdot l = SH \cdot ds = \sum I \cdot l$ für stationäres el. Feld
 mag. Spannungsdiff. $V_m = SH \cdot l$ $\leftarrow$ Summe der mag. Spannungsdiff. in Teilbereichen



Feldverlauf Spule
 Gegenrichtung gleichrichtung
 Helmholtzspule = konst. Feld

Kontinuitätsgleichung

$\Phi = BA$ inhomogenes Feld
 (keine Flussdichte des Stromsgrößen
 Fluss konst. im unversch. Kreis $\oint B \cdot dA = 0$
 vgl. el. Feld gilt keine Quellfreiheit $\rightarrow$ Einwicklungen als Quellen möglich

Induktionsgesetz

Spannung in Leiter bei Feldänderung
 bei Spule: $U_{ind} = -W \cdot \frac{d\Phi}{dt}$ $\rightarrow$ veränderter Fluss $\Psi = W \cdot \Phi$
 Änderung Feld induziert Strom reiner Ursache entgegen "verursacht Flussänderung zu verhindern"
 "Lenz'sche Regel"

Änderung des Flusses über versch. Methoden:

- zeitlich veränderl. Feld mit "transformatorische Spannungserzeugung"
- Relativbewegung Feld / Spule "transformatorische Spannungserzeugung"
- Plasmaänderung & selbstinduzierte Spannung "gegenänderung"

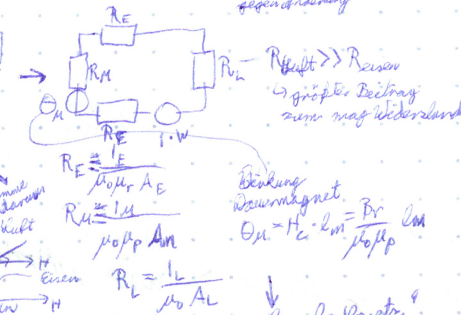
Analogie el. / mag. Größen:



Magnetkreisberechnung

a) Konventionelle Methode

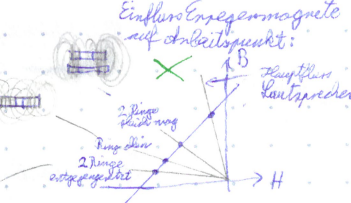
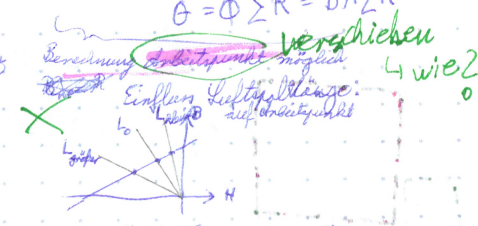
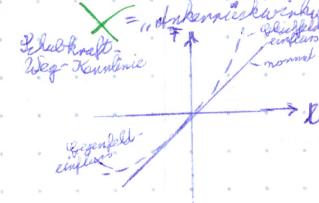
Verteilung Magnetkreis:
 Teilabschnitte mit konst. Querschnitt & homogene Teilfelder $\rightarrow$ konst. Feldstärke H
 Kernabschnitte streckenform wenn unversch. $\rightarrow$ $\Phi \cdot BA = \text{konst.}$
 materialkennlinien sind nichtlinear $\rightarrow$ hier wird aber vereinfacht linear angenommen
 μ_r als konst. angenommen



$\Theta = \Phi \sum R = BA \sum R$

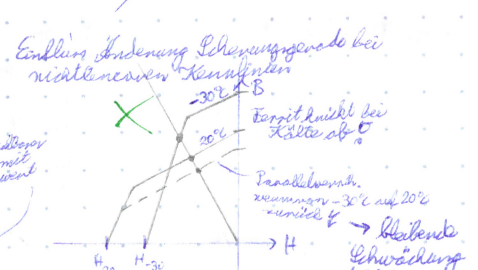
Permeabilität $\mu = \frac{B}{H}$
 Feldstärke $E = \frac{U}{l}$
 Spannung $U = \int E \cdot ds$
 Strom $I = \frac{U}{R}$
 Brechzahl $S = \frac{1}{\epsilon} = \kappa \epsilon$
 mag. Widerstand $R_m = \frac{l_m}{\mu A_m}$
 $R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m}$
 $R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m}$
 $R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m}$

Auswirkung zusätzliche el. Engung auf Induktivität & Schaltungsverzögerung
 Gegen- / gleichfeldbeeinflussung erzeugen Nichtlinearität in F-R / H-l-Kennlinie
 "Ankernückwirkung"



Kernkennlinien

Ankernückpunkt: $\Phi_{Ankernück}$
 Streiffaktor $S = \frac{\Phi_{Ankernück}}{\Phi_{Kernfließen}}$
 $\approx 12-14$
 Potentialkoeffizient $C_p = \frac{H_l}{H_0}$
 bei einem idR vernachlässigbar
 $\approx 0,8-0,95$



Bemer:
 Berechnung über mag. Widerstände

auch Ankernückpunktverlebung durch Feld eines Spule möglich
 Verlagerung auf tieferliegende permanente Zustandsgrößen

b) Netzwerkmethod



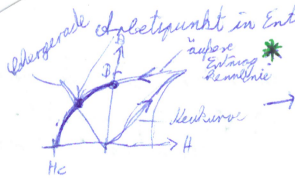
vereinfachte Flusswege
 Netz aus Widerständen & Quellwerten zur Nachbildung des Felds
 Spannungen über Teilfeldern z.B. Luftspalt mag. Vmag & Flussdichte B berechenbar
 Offener als konventionelle Methode
 teilweise numerisch (FEM)
 durch iterative numerische Berechnung mit Beachtung von nichtlinearen Kennlinien möglich

c) numerische Feldberechnung

genau & universell einsetzbar
 FEM
 Modell & Vernetzungsgüte
 Einfluss Genauigkeit & Rechenzeit

Permanentmagnete

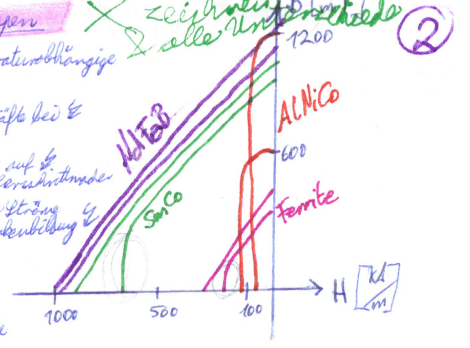
statisch permanentes Magnetfeld $\rightarrow$ Leistungsenergie u. Umwandlung



innere Entmagnetisierungskurve
 $\rightarrow$ nach dem Abschalten von äuß. entmagnetisierung
 $\rightarrow$ ist irreversibel
 $\rightarrow$ deshalb bei erneuter Magnetisierung hysteresenartige Schleife innere Entmagnetisierung
 $\rightarrow$ erst max. magnetisier. nach Aufheben äuß. Magnetfeld
 $\rightarrow$ dann Entmagnetisierung auf Null
 $\rightarrow$ schmal, deshalb Energieverlust auf permanente Zustandsgerade

Werkstoffgruppen

- $\rightarrow$ alle sehr temperaturabhängige Eigenschaften
- $\rightarrow$ extreme Energieverluste bei Montage
- $\rightarrow$ Verdrängung Magnetfeld auf 1/2 Magnetstrecke durch Kernschichtmoder
- $\rightarrow$ Bewegung induzierte Strömung im Magnetfeld $\rightarrow$ Turbulenzbildung



SmCo-Magnete

- selbstentzündliches Klebstoff
- Lanthanum Kobalt (Erdmagnet)
- sehr teuer
- sehr spröde & schlecht bearbeitbar
- keine Entmag. Kennlinie
- H_c hoch
- B_r hoch
- Einsatztemp. 200°C (Curie Temp. 720°C)

NdFeB-Magnete

- derzeit höchste Energiedichte
- H_c & B_r 1,1-1,2 T
- kein Kobalt
- große Verformbarkeit, verformbar aber nicht durchschweißbar
- gerintert $\rightarrow$ hart & spröde (aber besser als Si_3N_4)
- neigt zu starker Korrosion $\rightarrow$ Oberflächenbehandlung
- 15% geringeres spezifisches Gewicht
- zerfallen sich bei Kontakt mit Wasser
- Magnetisierung erfordert extrem hohe Feldstärke H bis 2800 kA/m
- Einsatztemp. 100-130°C (Curie Temp. 310°C)

Ferrit-Magnete

- 50% Kohlenstoff
- keramisches Magnetwerkstoff
- Barium/Strontiumferrit
- vorgepresst, gemahlen, gepresst, gesinter
- kostengünstig (da kein Kobalt)
- bei Kälte knirsch wie Glas $\rightarrow$ niedrige Temp. bleibende Verformung
- Einsatztemp. bis 200°C (Curie Temp. 450°C)
- niedrige B_r 0,2-0,4 T
- relativ leicht zu ent-/remagnetisieren $\rightarrow$ stark höhere H_c als AlNiCo
- niedrige Energiedichte BH_{max} 8-30 mJ/cm³
- Nachbearbeitung (wie Keramik) nur schleifen/Diamantbearbeitung
- gerintert/Entmagnetisierungskennlinie als AlNiCo
- gedrungener, konstruktives Design
- großer Mag. Querschnitt

AlNiCo-Magnete

das kleine Kobalt & geringe unmag. Stoff $\rightarrow$ feinstes Hochmag. 850°C Feile Feile

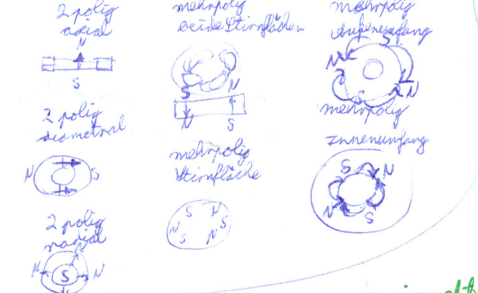
abkühlen langsam 550°C
 Entmag. $\rightarrow$ alle Richtungen gleiche Eigenschaften
 Vorrichtung anisotrop $\rightarrow$ veränderte mag. Eigenschaften
 entmagnet. $\rightarrow$ veränderte mag. Eigenschaften
 (Entmagnetisierungsfeld zweifach ausgerichtet)

- leicht zu ent-/remagnetisieren (kleine H_c)
- mittlere B_r 0,8-1,4 T
- Einsatztemp. bis 450°C (Curie Temp. 700-850°C)
- Energiedichte 30-50 mJ/cm³
- Gütewert BH_{max}
- stabile, langrechte Barform

Isotropie/anisotropie

- Werkstoff meist ausgetempert
- durch äußere Magnetfeld bei Fertigung erzeugt $\rightarrow$ Anisotropie
- Anisotropie: Magnetfeld in eine Richtung
- Isotropie: Magnetfeld in alle Richtungen
- gegeben bei Kohlenstoffmagnetwerkstoffen
- Formanisotropie

Magnetisierungsarten



2.3 Änderung Magnetisierungsart

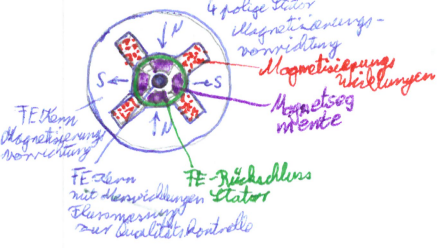
Permanentmagnete

Magnetisierung

- nach Fertigung
- bis zur Fertigung aufmagnetisieren
- zu Arbeitspunkt auf äußeres Entmag. Kurve
- nachfolgendes verbleibt Magnet durchsetzpunkt fort im II. Quadrant
- (gedrückt durch äußere einwirkende Kraft im 2. Quadrant)
- Magnete häufig erst nach Montage magnetisiert (sonst Fehlfeld schwierig)
- für technisch ausreichende Längung $H_s = 3$ bis $5 \times H_c$
- hohe Feldstärke nötig

wie geht magnetisieren was passiert

- Magnet entmag. & umgepolt bis 14 $\times H_c$ nötig
- Impulsmagnetisierung
- Magnetfeld für wenige ms durch Kondensator-Batterie Entladestrom aufgebaut (1 bis 100 A)
- Kondensator-Entladung über Spule (Primärwicklung) $\rightarrow$ Impulstransformator in versch. Impulsformen
- auch vielpolige & komplexe Magnetisierungen möglich



Gleichstrommagnetisierung

- Elektromagnet
- homogenes Feld im "Loch"
- Luftspalt, wo Magnetmaterial angelegt wird
- Isolierung zur Feldkonzentration & Homogenisierung & weiches
- nur 2-polige mag. möglich

Entmagnetisierung

1. Thermische Entmagnetisierung
 - $\rightarrow$ erhitzen über Curie Temp. hinaus
 - $\rightarrow$ dabei können Anisotropien verloren gehen
2. Wechselfeld-Entmagnetisierung
 - abg. Wechselst. mit langsam abnehmender Amplitude
 - über Hysterese-Schleife (mit kleineren Schritten) bis Nullpunkt
 - außen können
 - Methode: Magnet aus 50 Hz System herausziehen



