

Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik

1. Versuch

GET 9: Messung der Kraft-Weg-Kennlinien von Gleichstrommagneten

2. Standort

In unseren Laboren im Helmholtzbau H2546, H2547, H2548 und H2549.

3. Ziel und Inhalt

Aufnahme der statischen Kraft-Weg-Kennlinien $F = f(I, \delta)$ von Gleichstrommagneten ohne und mit Ankergegenstück mittels Kraftmessdose.

Aufnahme der $\Psi(I, \delta)$ -Kennlinien des Gleichstrommagneten ohne Ankergegenstück mit Hilfe eines Flussmessers.

Ermittlung der Kraft aus dem Kennlinienfeld für verschiedene Luftspalte.

Vergleich der Messmethoden.

Einfluss der Ankergegenstücke auf den Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinie.

4. Vorausgesetztes Wissen

- Energiebilanz der elektromagneto-mechanischen Energiewandlung und Kraftbestimmung
- Gleichstrommagnet als Topfmagnet und die Wirkungsweise des Ankergegenstückes

5. Literatur zur Vorbereitung

- Lehrbuch Seidel/Wagner, Allgemeine Elektrotechnik, Kapitel 3, Unicopy Campus Edition 2009
- Vorlesungs- und Übungsunterlagen Allgemeine Elektrotechnik
- Philippow, Taschenbuch Elektrotechnik, Band 1, Abschnitt 1.3.2.7. - Verlag Technik Berlin.
- Kallenbach, Der Gleichstrommagnet, Kapitel 3.8 - Geest & Portig

8. Aufgabenstellung und Versuchsauswertung

Aufnahme der Kraft-Weg-Kennlinien für Topfmagneten ohne Ankergegenstück (ohne Kennlinienbeeinflussung).

- 8.1. Messen Sie die Kraft-Weg-Kennlinien des Topfmagneten **ohne** Ankergegenstück ab $\delta = 30$ mm bis $\delta = 2$ mm (Mindestwert!) in Schritten von $\Delta\delta = 2$ mm für die Stromstärken $I = 1$ A, $\sqrt{2}$ A, 2 A. Der Elektromagnet ist ggf. mehrfach ein- und auszuschalten, um Einflüsse der Remanenz (Vermeidung partieller Hystereseschleifen) auf die Größe der Kraft zu verhindern. Stellen Sie die Ergebnisse in einem gemeinsamen Diagramm dar.
- 8.2. Überprüfen Sie folgende Aussage für $\delta = 30, 24, 18, 12, 6$ mm :
für ein magnetisch lineares System mit $\mu_r \rightarrow \infty$ gilt $F \sim I_0^2$.
- 8.3. Überprüfen Sie folgende Aussage für $I_0 = 1$ A und $\delta = 2, 4, 6, 8$ mm :
für ein magnetisch lineares System mit $\mu_r \rightarrow \infty$ gilt $F \sim 1/\delta^2$.
(Zum Vergleich: der Durchmesser des Ankers beträgt $d = 45$ mm.)
- 8.4. Berechnen Sie die Flussdichte B_δ im Luftspalt für $I_0 = 2$ A und $\delta = 6$ mm aus der Maxwellschen Zugkraftformel.
Von der Ankerquerschnittsfläche ($d = 45$ mm) ist die Querschnittsfläche der unmagnetischen Führungssachse mit Führungsbuchse ($d = 18$ mm) abzuziehen.

Aufnahme der Kraft-Weg-Kennlinien für den Topfmagneten mit Ankergegenstück (mit Kennlinienbeeinflussung).

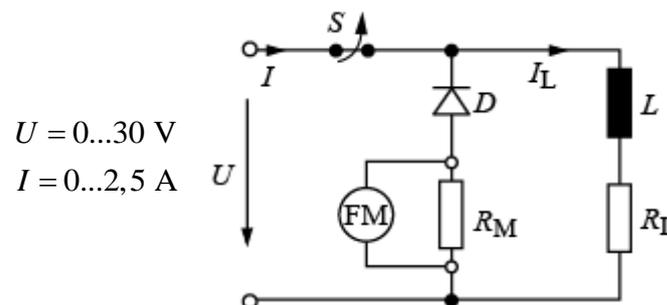
- 8.5. Messen Sie die Kraft-Weg-Kennlinien des Topfmagneten **mit** Ankergegenstück ab $\delta = 30$ mm in Schritten von $\Delta\delta = 2$ mm (Mindestwert!) für die Stromstärken $I = 1$ A, $\sqrt{2}$ A, 2 A. Der Elektromagnet ist ggf. mehrfach ein- und auszuschalten, um Einflüsse der Remanenz (Vermeidung partieller Hystereseschleifen) auf die Größe der Kraft zu verhindern. Stellen Sie die Ergebnisse in einem gemeinsamen Diagramm dar.
- 8.6. Diskutieren Sie die gemessenen Kennlinien. Am Versuchsplatz liegt das verwendete Ankergegenstück aus. Vergleichen Sie Ihre Messergebnisse mit den qualitativen Verläufen nach Bild A2 im Anhang.

Aufnahme der $\Psi(I, \delta)$ -Kennlinien für Topfmagneten ohne Ankergegenstück.

8.7. Messen Sie für die Luftspalte $\delta = 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28$ mm den Induktionsfluss $\Psi(I)$ mit δ als Parameter für den Topfmagnet ohne Kennlinienbeeinflussung zu den Strömen $I = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ A ($R_M = 100 \Omega, R_L = 9,5 \Omega$). Stellen Sie die $\Psi(I, \delta)$ -Kennlinien in einem gemeinsamen Diagramm dar. Ermitteln Sie die mittleren Kräfte F_{mitt} für die Luftspalte $\delta = 6, 10, 14, 18, 22, 26$ mm und für $I = I_0 = 2$ A und tragen Sie die Werte in das Diagramm gemäß Aufgabenstellung 8.1 ein. Vergleichen Sie die Ergebnisse.

Anordnung zum Ausmessen der $\Psi(I, \delta)$ -Kennlinien

Die Stromeinprägung in die Erregerspule erfolgt über ein Netzgerät gemäß folgender Schaltung:



Beim Abschalten der Stromversorgung des Elektromagneten gilt für den Stromkreis aus Elektromagnet, Messwiderstand und Freilaufdiode:

$$0 = \frac{d\Psi}{dt} + i \cdot (R_L + R_M) = \frac{d\Psi}{dt} + i \cdot R_M \cdot \left(\frac{R_L}{R_M} + 1 \right) = \frac{d\Psi}{dt} + u_M \cdot \left(\frac{R_L}{R_M} + 1 \right)$$

Damit wird $\int_{t_0}^{\infty} d\Psi = - \left(1 + \frac{R_L}{R_M} \right) \int_{t_0}^{\infty} u_M dt$ und mit der Annahme $\Psi(\infty) = 0$ gilt:

$$\Psi(t_0) = \left(1 + \frac{R_L}{R_M} \right) \int_{t_0}^{\infty} u_M dt$$

Das Zeitintegral der Messspannung wird mittels eines Fluxmeters (FM) erfasst.

Die Messmethode geht von der Annahme aus, dass der Magnetkreis nach dem Abschalten remanenzfrei ist. Weitere Messfehler sind begründet in der Temperaturabhängigkeit des Spulenwiderstandes R_L und im Schaltverhalten der Freilaufdiode (z. B. Bahnwiderstand in Durchlassrichtung).

Hinweise zur Messung mit dem Fluxmeter MF-5D

Das Messgerät wird durch Drücken des Netzschalters ON eingeschaltet und erreicht nach ca. 5 bis 15 Minuten Anwärmzeit seine thermische Stabilität. Bei einer Einstellung des 3-dekadischen Kodierschalters auf 999 und gedrücktem Bereichsschalter $\times 100$ liefert die Anzeige den Messwert in Vs ($1 \text{ Vs} = 1 \text{ Wb}$). Durch Antippen des RESET-Druckschalters wird die Anzeige auf Null zurückgestellt (mit der Tastung wird der Integrationskondensator kurzgeschlossen und entladen). Die Druckschalter RMS (Mittelwert), AC und NL (Drift-Einstellung) bleiben ausgeklippt.

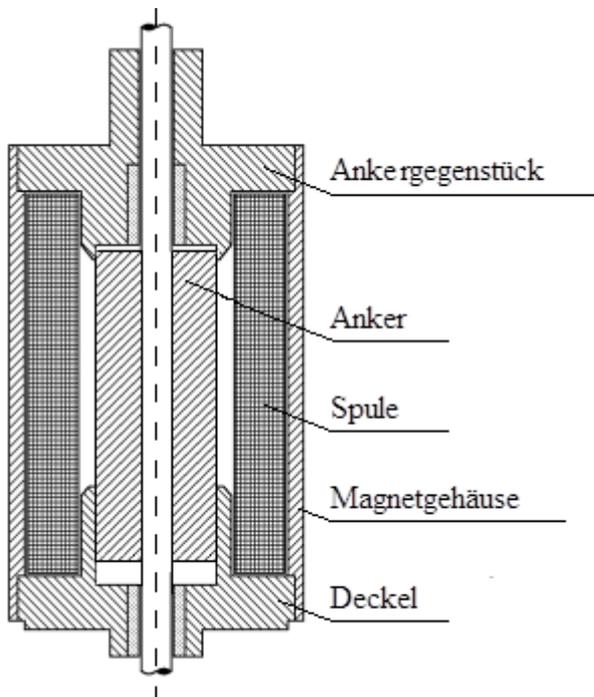
Anhang

Der Gleichstrommagnet als Topfmagnet und die Wirkungsweise des Ankergegenstückes

Eine technisch bedeutsame konstruktive Ausführungsform des Gleichstrommagneten ist der Topfmagnet. Bild A1 zeigt die Schnittdarstellung eines Topfmagneten. Der Fluss wird im Magnetgehäuse, Deckel mit Flussleitstück, Anker, Ankergegenstück geführt. Bild A1 zeigt auch den Feldlinienverlauf im Magnetkreis für einen bestimmten Luftspalt und eine bestimmte Durchflutung der Erregerspule. Wegen der Rotationssymmetrie der Anordnung ist der Feldlinienverlauf nur ab Rand der unmagnetischen Führungsschneide bis Außenrand des Magnetgehäuses dargestellt.

a) Schnittdarstellung

Bild A1. Gleichstrommagnet als Topfmagnet



b) Ausschnitt mit Feldlinienverlauf



Durch unterschiedliche Formgebung des Ankergegenstückes kann man den Kraft-Weg-Verlauf in gewissen Grenzen beeinflussen und so für viele technische Aufgaben ein besser angepasstes Verhalten des Gleichstrommagneten erreichen.

Bild A2 zeigt die Wirkungsweise des Ankergegenstückes bei verschiedenen Formgebungen auf den $\Psi(I, \delta)$ -Kennlinienverlauf und den Kraft-Weg-Verlauf $F(\delta)$.

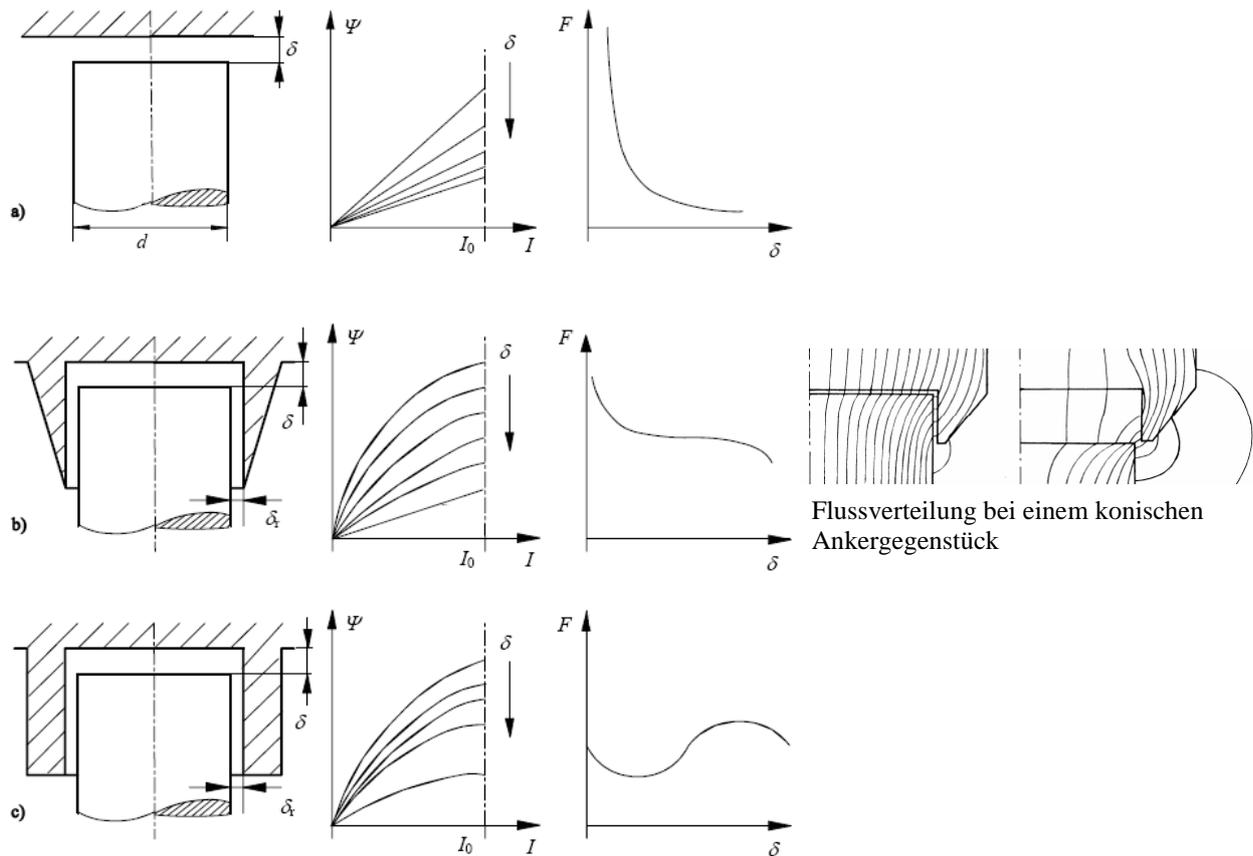


Bild A2. Qualitativer Verlauf der Magnetkraftkennlinie und des $\Psi(I,\delta)$ -Kennlinienfeldes bei charakteristischen Ankergegenständen (Für die qualitative Darstellung wurde die Parameteränderung $\Delta\delta = \text{konst.}$ angenommen)

Bei Gleichstrommagneten ohne Ankergegenstück nach Bild A2 a) wird die Energieänderung längs des Hubweges, die die Magnetkraft zur Folge hat, im Wesentlichen durch die Änderung des magnetischen Widerstandes des Arbeitsluftspaltes bestimmt

$$R_m(\delta) = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot A} = \frac{4\delta}{\mu_0 \cdot \pi d^2}$$

Diese Gleichung gilt angenähert nur für $\delta = 0,2 \cdot d$, da für größere Luftspalte die Phänomene der Streuung nicht zu vernachlässigen sind. Andererseits sind bei sehr kleinem Luftspalt der magnetische Widerstand des Eisenkreises und seine Nichtlinearität zu berücksichtigen.

Mit Hilfe eines Ankergegenstückes gemäß Bild A2 b) und c) wird ein magnetischer Nebenschluss über die radialen Luftspalte ausgebildet, der von der Größe des radialen Luftspaltes, von den geometrischen Abmessungen des Gegenstückes und der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie abhängt. Dieser magnetische Nebenschluss führt zu einer Erhöhung der Flusszunahme (Sättigung) zu Beginn des Hubes und damit zu einer höheren Anzugskraft. Angestrebt werden Magnetkraftkennlinien nach Bild A2 b), wie sie durch konische Ankergegenstücke realisierbar sind. Für ein konisches Ankergegenstück zeigt Bild A2 b) beispielhaft die Flussverteilung für verschiedene Luftspalte. Die Analyse dieser Flussverteilung erfordert den Einsatz leistungsstarker Feldberechnungsprogramme.