

Theoretische Grundlagen

Im Leistungsbereich oberhalb 0,75 kW ("integral horsepower") sind etwa 7% der gefertigten elektrischen Maschinen Gleichstrommaschinen. Haupteinsatzgebiete sind Hütten- und Walzwerke, Papiermaschinen, Hebezeuge, Kranantriebe und Traktionsantriebe. Zum Aufbau des magnetischen Feldes werden Permanentmagnete (kleine Leistungen, z. B. bei KFZ- Hilfsantrieben: Scheibenwischer, Gebläse,...) oder Erregerwicklungen eingesetzt. Je nach Schaltung der Erregerwicklung werden Nebenschlußmaschinen (Erregerstrom unabhängig vom Ankerstrom) und Reihenschlußmaschinen (Erregerstrom = Ankerstrom) unterschieden. Gleichstrommaschinen dienen nahezu ausschließlich als drehzahlveränderbare motorische Antriebe (fremderregte Nebenschlußmaschinen, Speisung von Erreger- und Ankerwicklung über zwei steuerbare Gleichrichter). Reine Gleichstromgeneratoren haben als Folge der Weiterentwicklung der gesteuerten Stromrichter praktisch völlig an Bedeutung verloren.

Die Spannungsgleichung der Gleichstrommaschine lautet

$$(3.1) \quad U = U_i + R_A \cdot I$$

mit dem Ankerstrom I , der Klemmenspannung U , dem Ankerkreiswiderstand R_A und der induzierten Spannung

$$(3.2) \quad U_i = k_1 \cdot \Phi \cdot n.$$

Die induzierte Spannung ist außer von der durch die Wicklungsauslegung bestimmten Maschinenkonstanten k_1 nur vom Fluß pro Pol (Φ) und der Drehzahl (n) abhängig. Durch Multiplikation der Spannungsgleichung (3.1) mit dem Ankerstrom ergibt sich eine Leistungsgleichung:

$$(3.3) \quad U \cdot I = U_i \cdot I + R_A \cdot I^2 \\ = P_{\text{mech}} + P_{\text{Cu}}$$

Die aufgenommene ($I > 0$) bzw. abgegebene ($I < 0$) elektrische Leistung teilt sich auf in die an der Welle abgegebene (Motorbetrieb) bzw. aufgenommene (Generatorbetrieb) Leistung P_{mech} und die Stromwärmeverluste im Ankerkreis.

Das Drehmoment kann aus der mechanischen Leistung berechnet werden:

$$(3.4) \quad M = \frac{P_{\text{mech}}}{2\pi n} = \frac{U_i \cdot I}{2\pi n} = \frac{k_1 \cdot \Phi \cdot n \cdot I}{2\pi n} = \frac{k_1}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I = k_2 \cdot \Phi \cdot I$$

Das Drehmoment der Gleichstrommaschine ist proportional zum Fluß pro Pol und zum Ankerstrom.

Nebenschlußverhalten

Bei Nebenschlußmaschinen ist der Fluß nicht vom Ankerstrom abhängig. Bei Speisung der Erregerwicklung aus einer separaten Spannungsquelle kann der Fluß unabhängig

von der Ankerspannung verstellbar werden. Aus der Ankerspannungsgleichung (3.1) ergibt sich für $I = 0$ die Leerlaufdrehzahl

$$(3.5) \quad n_0 = U / (k_1 \Phi).$$

Die Leerlaufdrehzahl ist somit proportional zur Ankerspannung und umgekehrt proportional zum Fluß Φ . Aus Gl. (3.5) wird deutlich, daß bei leerlaufender Maschine niemals die Erregung abgeschaltet werden darf, da die Maschine sonst "durchgeht" ($n \rightarrow \infty$).

Zur Veränderung der Drehzahl bestehen, ausgehend von der Nenndrehzahl, daher nur zwei Möglichkeiten:

- Drehzahlstellen nach unten durch Verringerung der Ankerspannung U ,
- Drehzahlstellen nach oben durch Verringerung des Flusses Φ .

Die Auflösung der Drehmomentgleichung (3.4) nach der Drehzahl ergibt unter Verwendung der Spannungsgleichung (3.1) die Drehmomentabhängigkeit der Drehzahl.

$$(3.6) \quad n = n_0 - M \cdot \frac{R_A}{k_1 k_2 \Phi^2}$$

Die Motordrehzahl sinkt -ausgehend von der Leerlaufdrehzahl n_0 - linear mit dem Lastmoment. Der Drehzahlabfall ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Flusses und linear vom Ankerkreiswiderstand abhängig. Bild 3.1 zeigt die Drehzahl- Drehmoment-Kennlinien der fremderregten Gleichstrom-Nebenschlußmaschine.

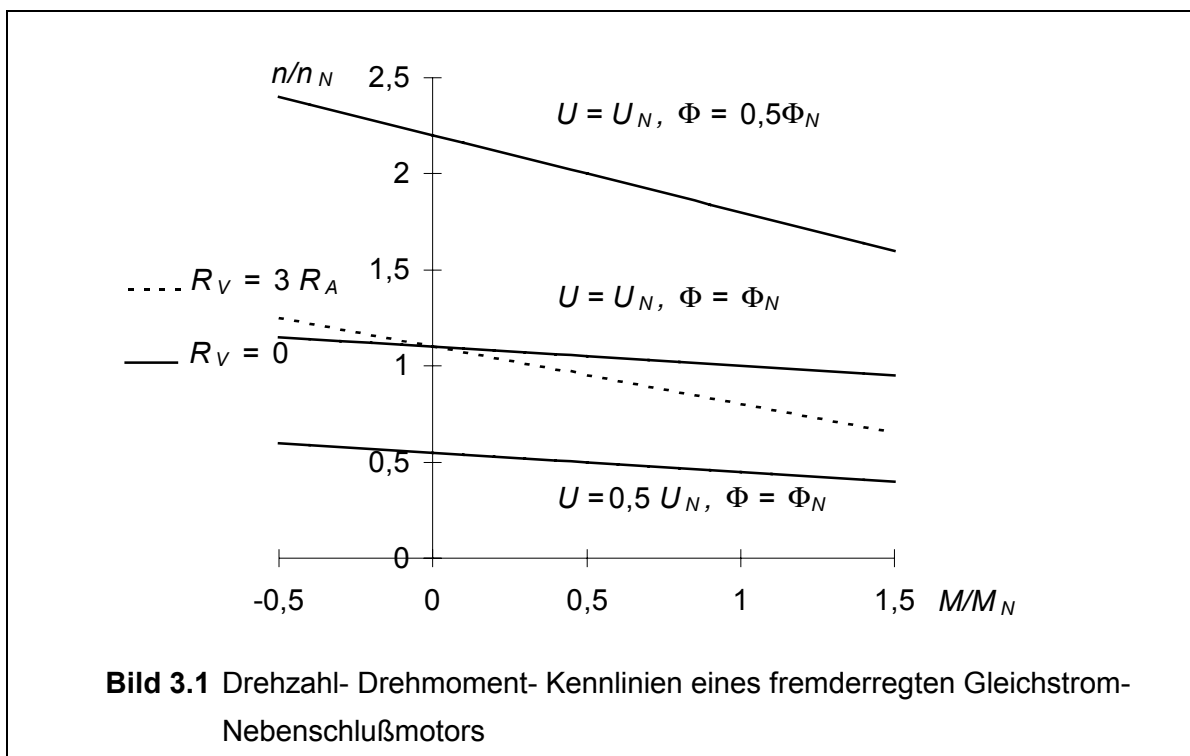


Bild 3.1 läßt einige der typischen Merkmale des Nebenschlußverhaltens erkennen:

- bei konstantem Fluß tritt bei Belastung nur eine relativ kleine Änderung der Drehzahl auf

- der Nebenschlußmotor geht ohne Schaltungsänderung vom Motor- in den Generatorzustand über (generatorische Nutzbremmung für $n > n_0$)

Neben der generatorischen Nutzbremmung ist auch die sogenannte Widerstandsbremmung möglich. Hierzu wird die Maschinen an den Klemmen mit einem Widerstand beschaltet. Die mechanisch zugeführte Energie wird dabei in Stromwärme umgesetzt.

Selbsterregung von Gleichstromnebenschlußgeneratoren

Die fremderregte Gleichstromnebenschlußmaschine geht ohne Schaltungsänderung vom motorischen Betrieb in den generatorischen Betrieb über, wenn sie über die Leerlaufdrehzahl hinaus angetrieben wird.

Werner v. Siemens entdeckte, daß sich Gleichstromnebenschlußmotoren selbst erregen können. Hierzu ist die Erregerwicklung über einen Vorwiderstand an die Ankerwicklung anzuschließen (Prinzipschaltung siehe Bild 3.2b). Voraussetzung für einen stabilen Betriebspunkt ist eine gekrümmte Magnetisierungskennlinie $U_i = f(I_E)$ sowie eine von Null verschiedene Remanenzspannung $U_r = U_i(I_E = 0)$, wie es in Bild 3.2a dargestellt ist.

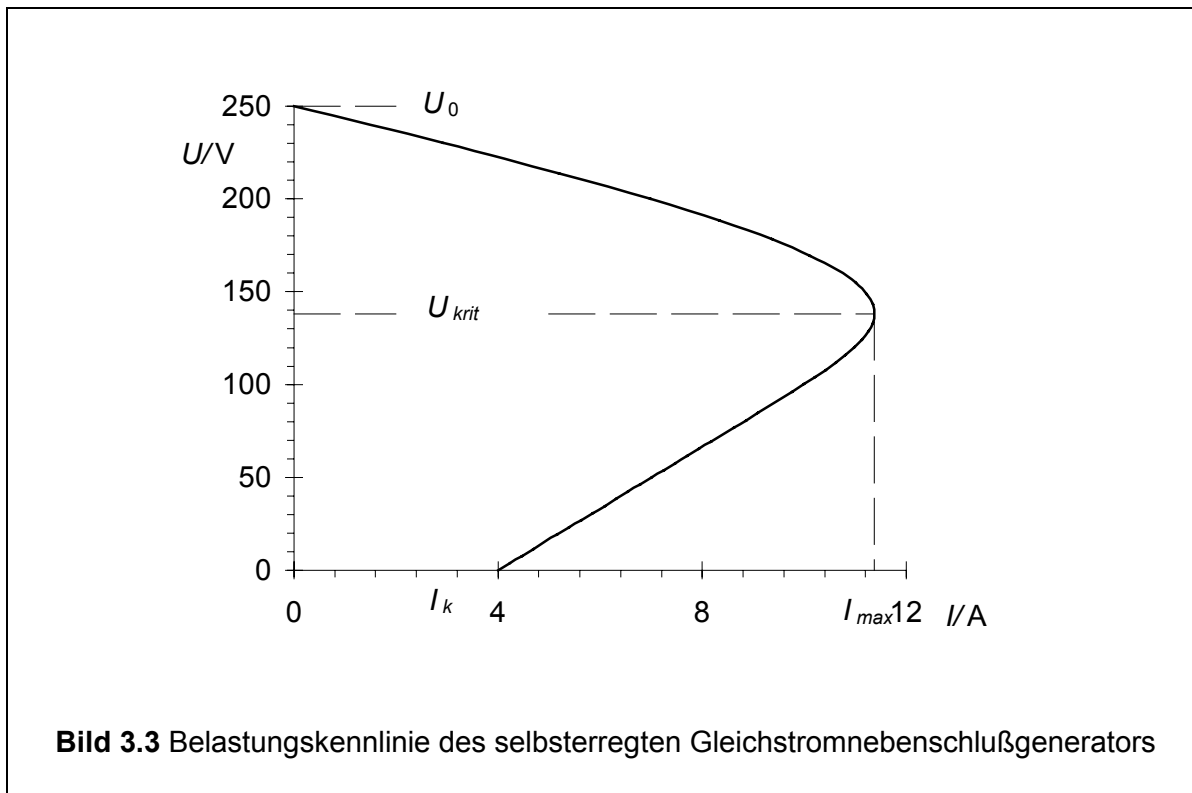
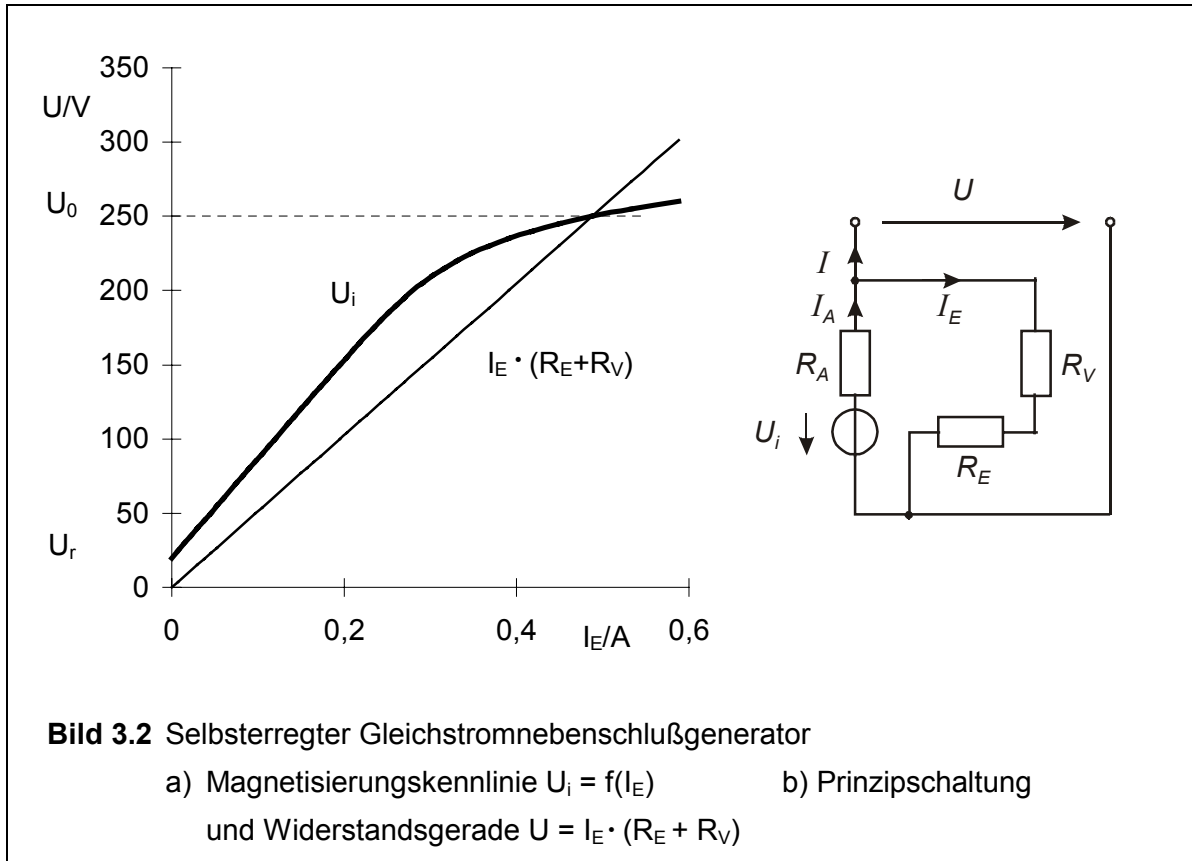
Bei unbelastetem Generator stellt sich ein stabiler Leerlaufpunkt ein, wenn die Magnetisierungskennlinie $U_i = f(I_E)$ und die Widerstandsgerade $U = I_E \cdot (R_E + R_V)$ einen eindeutigen Schnittpunkt aufweisen ($U_i = I_E \cdot (R_E + R_V) = U_0$). Die Leerlaufspannung U_0 kann mit Hilfe des Vorwiderstands R_V eingestellt werden. Aus Bild 3.2a wird jedoch deutlich, daß die Einstellung kleiner Leerlaufspannungen wegen der schwachen Kennlinienkrümmung problematisch ist.

Bei Belastung sinkt die Klemmenspannung des Generators ab. Wenn der Widerstand im Erregerkreis groß gegenüber dem Ankerkreiswiderstand ist, gilt für die Klemmenspannung

$$U = I_E \cdot (R_E + R_V) = U_i - (I + I_E) \cdot R_A \approx U_i - R_A \cdot I.$$

Die Differenz zwischen der Magnetisierungskennlinie und der Widerstandsgeraden ist der Spannungsabfall am Ankerkreiswiderstand. Diese Differenz - und damit der Ankerstrom - ist bei der Spannung U_{krit} maximal. Bei stärkerer Belastung verringert sich trotz abnehmenden Lastwiderstands der Ankerstrom.

Bild 3.3 zeigt die Abhängigkeit der Ankerspannung vom Ankerstrom. Bei Kurzschluß stellt sich der stationäre Kurzschlußstrom $I_k = U_r/R_A$ ein.



Reihenschlußverhalten

Bei der Reihenschlußmaschine sind Erreger- und Ankerwicklung in Reihe geschaltet. Die beiden Wicklungen werden also von demselben Strom durchflossen. Wegen der Sättigung des Eisens ist der Zusammenhang zwischen Fluß und Strom nichtlinear (Magnetisierungskennlinie $B = f(H)$). Daher kann das Betriebsverhalten des Reihenschlußmotors nicht in elementarer Weise berechnet werden. Um die grundsätzlichen Besonderheiten des Reihenschlußverhaltens zu erkennen, soll der Einfluß der Sättigung vernachlässigt werden. Bei ungesättigter Maschine ist der Fluß zum Ankerstrom proportional.

$$(3.7) \quad \Phi = \Phi_N / I_N \cdot I$$

Somit ergibt sich für das Drehmoment aus Gl. (3.4)

$$(3.8) \quad M = \frac{k_1}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I = \frac{k_1}{2\pi} \frac{\Phi_N}{I_N} \cdot I^2$$

Das Drehmoment der Reihenschlußmaschine ist proportional zum Quadrat des Stroms. Mit Gl. (3.7) lautet die Spannungsgleichung der Maschine

$$\begin{aligned} U &= U_i + R_A \cdot I = k_1 \Phi n + R_A \cdot I \\ &= k_1 \Phi_N / I_N \cdot I \cdot n + R_A \cdot I \end{aligned}$$

Die Auflösung nach dem Strom liefert

$$(3.9) \quad I = \frac{U}{k_1 \cdot (\Phi_N / I_N) \cdot n + R_A}$$

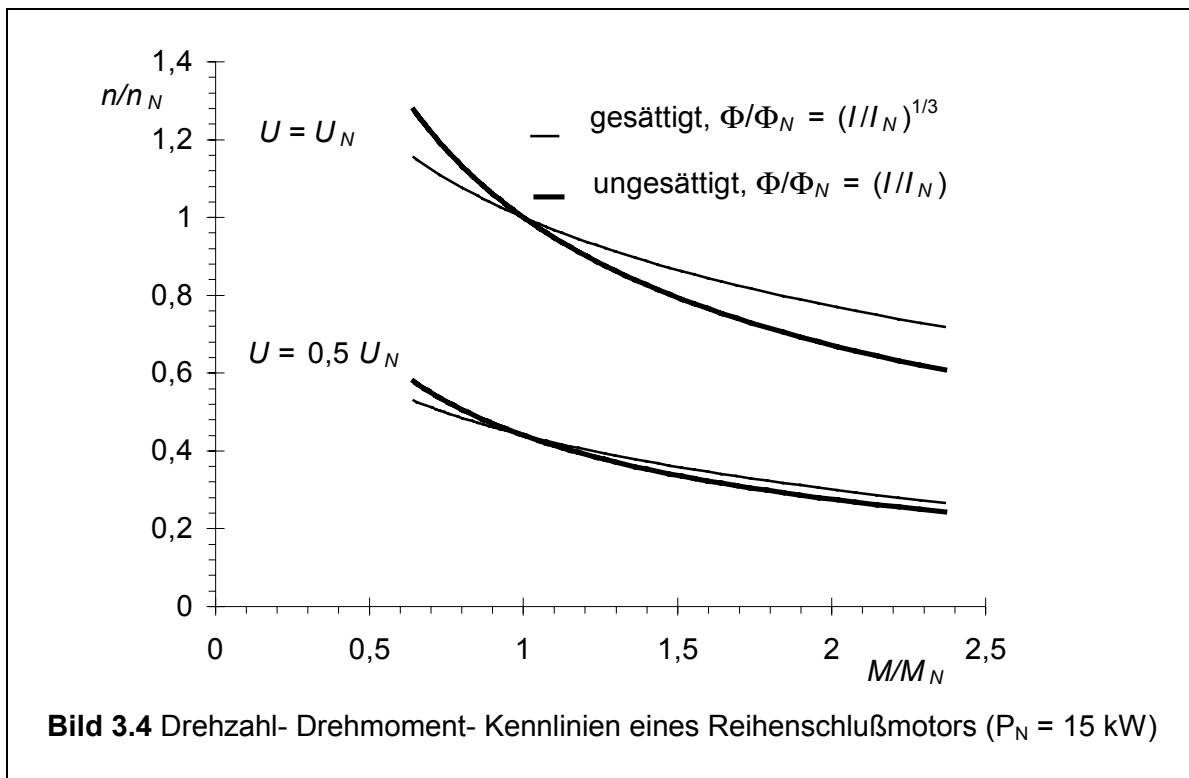
Gleichung (3.9) läßt erkennen, daß sich nur für sehr große Drehzahlen ($n \rightarrow \infty$) ein sehr kleiner Strom ($I \rightarrow 0$) ergibt. Umgekehrt folgt daher, daß Reihenschlußmaschinen bei Entlastung "durchgehen". Zur Herleitung der Drehmoment- Drehzahl- Charakteristik wird der Strom nach Gl. (3.9) in Gl. (3.8) eingesetzt. Die Auflösung nach der Drehzahl liefert

$$(3.10) \quad n = \frac{U}{\sqrt{2\pi M \cdot k_1 \Phi_N / I_N}} - \frac{R_A}{k_1 \Phi_N / I_N}$$

Zur näherungsweisen Berücksichtigung der Sättigungserscheinungen kann für den Zusammenhang zwischen Fluß und Erregerstrom die analytische Funktion

$$\Phi / \Phi_N = (I / I_N)^{1/3}$$

verwendet werden. Bild 3.4 zeigt die Drehmoment- Kennlinien einer Reihenschlußmaschine bei voller und bei halber Spannung. Zum Vergleich sind die "gesättigten" Kennlinien ebenfalls in Bild 3.4 eingetragen.



Der Vergleich mit der Drehmoment- Drehzahl- Kennlinie des fremderregten Motors (Gl.3.6) zeigt die Besonderheiten des Reihenschlußverhaltens:

- es gibt keine definierte Leerlaufdrehzahl; der Reihenschlußmotor geht bei Entlastung durch,
- der Übergang vom Motor- in den Generatorbetrieb ist daher nicht ohne besondere Maßnahmen möglich,
- die Reihenschlußmaschine besitzt eine starke Abhängigkeit der Drehzahl vom Drehmoment.

Daher sind Gleichstrom- Reihenschlußmaschinen als Konstantdrehzahlantriebe nicht geeignet, sie wurden vor allem als Traktionsantriebe (Straßenbahn) eingesetzt. Da das Drehmoment quadratisch vom Strom abhängt, entwickeln Reihenschlußmotoren auch bei Anschluß an Wechselspannung ein Drehmoment. Kleine Reihenschlußmotoren (Leistungen bis etwa 2 kW) werden daher auch als Universalmotoren bezeichnet; sie werden vor allem bei Hausgeräten (Waschmaschinen- Trommelantrieb, Mixer, Bohrmaschinen usw.) eingesetzt.

Versuchsdurchführung

1. Daten des Typenschildes abschreiben

Die Prinzipschaltungen für die Schaltungen von Nebenschluß- und Reihenschlußmaschine sind in Bild 3.5 (Seite 24) dargestellt. Die detaillierten Schaltbilder für die Versuchsdurchführung liegen am Versuchsplatz aus.

2. Gleichstrom - Nebenschlußmaschine

2.1 Belastungsversuche

Messen Sie die Drehzahl n und den Ankerstrom I als Funktion des Lastmoments bei

2.1.1 $U = U_N$, $R_V = 0$, $I_E = \text{konst.} = I_{EN}$ (volle Erregung)

2.1.2 $U = U_N$, mit Vorwiderstand $R_V > 0$, $I_E = \text{konst.} = I_{EN}$

2.1.3 $U < U_N$ (reduzierte Spannung), $R_V = 0$, $I_E = I_{EN}$

2.1.4 $U = U_N$, $R_V = 0$, $I_E = \text{konst.} \approx 0,8 \cdot I_{EN}$ (Feldschwächung)

2.1.5 $U = U_N$, $R_V = 0$, $I_E = \text{konst.} \approx 1,2 \cdot I_{EN}$ (verstärktes Feld)

2.2 Betrieb als fremderregter Generator bei konstanter Drehzahl

Messen Sie bei $I_E = I_{EN}$ die Klemmenspannung U als Funktion des Ankerstroms I .

2.3 Betrieb als selbsterregter Generator bei konstanter Drehzahl

Messen Sie die Klemmenspannung U und den Erregerstrom I_E als Funktion des Ankerstroms I .

3. Reihenschlußmotor

Messen Sie die Drehzahl n und den Ankerstrom I

- bei voller Spannung $U = U_N$

- bei reduzierter Spannung $U < U_N$

als Funktion des Lastmoments.

Versuchsauswertung

1. Berechnen Sie das Bemessungsmoment

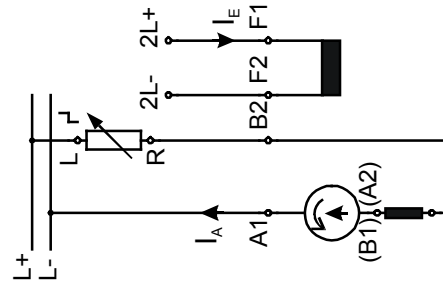
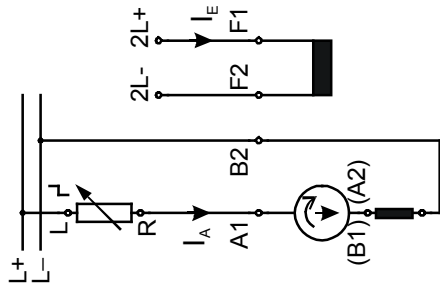
2.1 Zeichnen Sie die Drehzahl- Drehmoment- Kennlinien nach 2.1.1 bis 2.1.5 in ein Diagramm. Diskutieren Sie die Kennlinienverläufe (Leerlaufdrehzahl n_0 , Kennliniensteigung).

2.2 Zeichnen und diskutieren Sie die Kennlinie $U = f(I)$ (Leerlaufspannung, Kennliniensteigung)

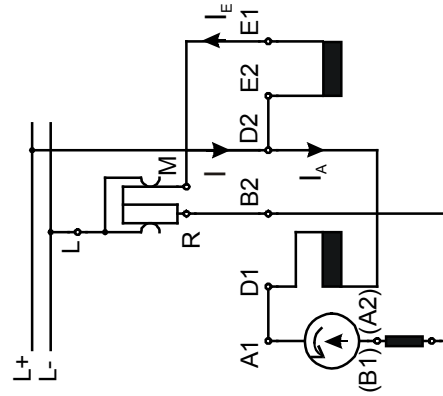
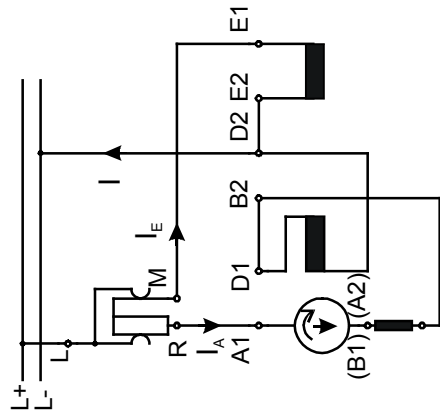
2.3 Zeichnen und diskutieren Sie die Kennlinie $U = f(I)$ des selbsterregten Gleichstromnebenschlusgenerator (Leerlaufspannung, kritische Spannung, Kurzschlußstrom).

3. Zeichnen Sie die Drehzahl- Drehmoment- Kennlinien des Reihenschlußmotors bei voller und bei reduzierter Spannung in ein Diagramm.

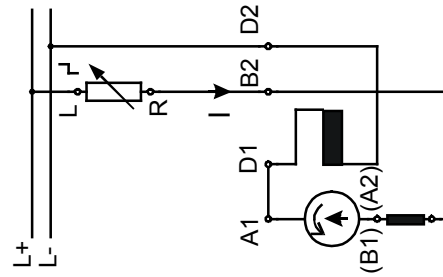
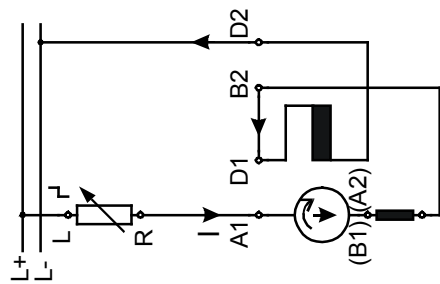
mit fremderregter Neben-
schlusswicklung



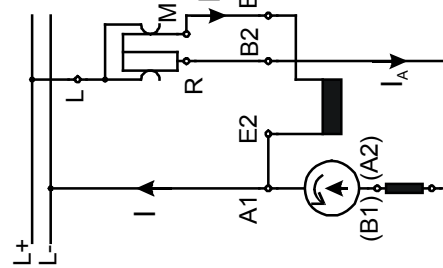
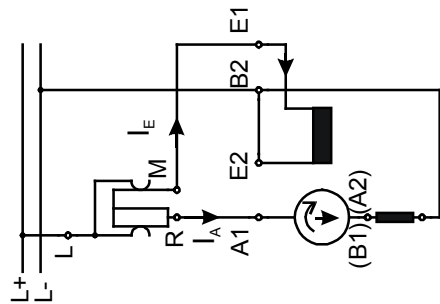
mit Neben- und (Zusatz-)
Reihenschlusswicklung



mit Reihenschluss-
wicklung



mit Nebenschluss-
wicklung



Rechtlauf

Linkslauf

Bild 3.5 Prinzipschaltungen der Gleichstrommaschine