

## Gleichstrommaschinen

Gleichstrommaschinen sind die ältesten elektrischen Maschinen und wurden in den Anfängen der elektrischen Energienutzung bis zu höchsten Leistungen gebaut. Hauptanwendung war die Energieerzeugung, der Antrieb industrieller Produktionsanlagen sowie die Traktion, beispielsweise in Straßenbahnen. Heute werden Gleichstrommaschinen nur noch selten für große Leistungen gebaut. Statt dessen haben Gleichstrommaschinen eine große Bedeutung im kleinen Leistungsbereich. Im Automobil sind praktisch alle Motoren permanenterrregte Gleichstrommotoren, allein dort werden täglich hunderttausende gebraucht. Auch im Haushalt- und Heimwerkerbereich werden fast ausnahmslos Gleichstrommotoren, sogenannte Universalmotoren, eingesetzt. Es handelt sich dabei um Gleichstromreihenschlussmotoren. Diese können mit Wechsel- als auch mit Gleichstrom betrieben werden.

Gleichstrommotoren<sup>1</sup> kleiner Leistung sind wegen ihrer sehr hohen Produktionsstückzahlen billig, haben jedoch einige gravierende Nachteile. Fast alle Gleichstrommotoren haben einen Kommutator und Bürsten, über die dem Rotor der Strom zugeführt wird. Der Kommutator mit den Bürsten ist im Betrieb laut und begrenzt die Lebensdauer der Motoren in der Regel auf wenige hundert Stunden. Ausserdem sind die Bürsten aus Graphit und ihr Abrieb verschmutzt im Laufe der Zeit den Motor und seine nähere Umgebung erheblich. Ein besonderer Vorteil des Gleichstrommotors ist seine hervorragende Drehzahlsteuerbarkeit und Dynamik. Er hat deswegen, neben der obengenannten Massen Anwendung, Bedeutung als Positionierantrieb (Servoantrieb), dort als bürstenloser, d.h. elektronisch kommutierter Motor.

### Aufbau von Gleichstrommaschinen

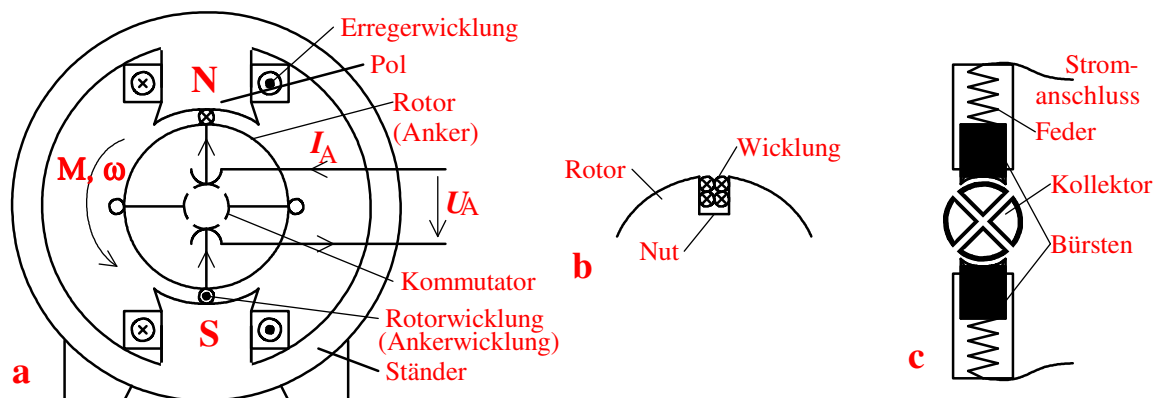


Abb.3.1: Prinzipieller Aufbau der Gleichstrommaschine; **a** Gesamtaufbau, **b** Rotornut, **c** Bürstenkonstruktion

Ein Motor besteht aus einem stehenden Teil, dem **Ständer**<sup>2</sup> und einem rotierenden Teil, dem **Rotor**<sup>3</sup> (Abb. 3.1). Den Rotor bezeichnet man im obenliegenden Fall auch als **Anker**<sup>4</sup>.

Allgemein ist der Anker der Teil einer elektrischen Maschine, der den Arbeitsstrom führt, d.h. den drehmomentbildenden Strom.

Zwei Magnetpole erzeugen einen magnetischen Fluß im Luftspalt zwischen Pol und Rotor. Das Magnetfeld kann mittels einer stromdurchflossenen Erregerwicklung<sup>5</sup> oder mittels eines

<sup>1</sup> Gleichstrommaschine: DC-drive

<sup>2</sup> Ständer: stator

<sup>3</sup> Rotor: rotor

<sup>4</sup> Anker: armature

Permanentmagneten erzeugt werden. Mehrere Rotorwicklungen sind axial auf der zylindrischen Rotoroberfläche aufgebracht. Die stromdurchflossene Rotorwicklung im Magnetfeld erzeugt das Drehmoment. Für einen guten Kraftschluss zwischen Wicklung und Rotor ist die Wicklung in **Nuten**<sup>6</sup> verlegt (Abb. 3.1b). Der **Kommutator**<sup>7</sup> polt die Rotorwicklung um. Dreht sich der Rotor, so wandert die drehmomenterzeugende Wicklung aus dem Magnetfeld heraus. Die nächste Wicklung tritt nun in das Magnetfeld ein und muss mit Strom versorgt werden, während die erste keinen Strom mehr braucht. Dieses Umschalten übernimmt der Kommutator. Er besteht aus kupfernen Lamellen, die mit den Wicklungen verbunden sind, dem sogenannten **Kollektor**<sup>8</sup> und Schleifkontakten, die den Strom der rotierenden Rotorwicklung zuführen, den sogenannten **Bürsten**<sup>9</sup> (Abb. 3.1c).

### Ankerquerfeld

Die Erregerwicklung verursacht ein näherungsweise homogenes Luftspaltfeld vom Nord- zum Südpol. In diesem Feld wird mittels des Ankerstromes das Drehmoment aufgebaut. Leider erzeugt der Ankerstrom seinerseits ein magnetisches Feld, das sich dem Erregerfeld überlagert. Auf der einen Seite jedes Polschuhs wird dadurch das Erregerfeld geschwächt und auf der anderen Seite theoretisch verstärkt, praktisch wird das Eisen dort jedoch in die Sättigung gefahren.

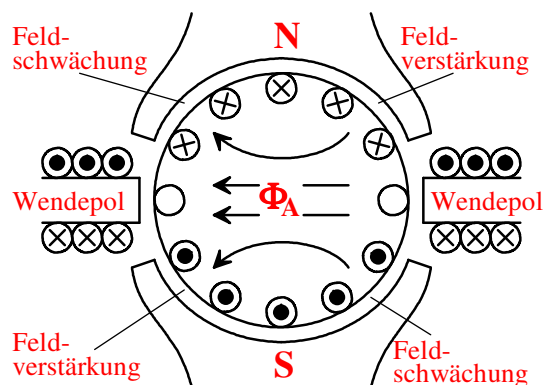


Abb.3.1a: Ankerquerfeld: Der Ankerstrom erzeugt ein magnetisches Feld, das sich dem Erregerfeld überlagert.

Das Luftspaltfeld wird durch den Ankerstrom verändert; im Resultat geschwächt, weil die Feldschwächung auf der einen Seite nicht durch eine Feldverstärkung auf der anderen Seite infolge der magnetischen Sättigung kompensiert wird. Die Folge ist, dass das Drehmoment nicht proportional zum Ankerstrom steigt sondern etwas geringer. Diesen Zusammenhang bezeichnet man auch als **Ankerrückwirkung**<sup>10</sup>.

Die Ankerrückwirkung verursacht ein weiteres Problem: Die Bürsten werden mechanisch so angeordnet, dass die Wicklungsumschaltung eine möglichst geringe Funkenbildung am Kollektor verursacht. Dieser günstigste Punkt verschiebt sich durch die Ankerrückwirkung. Ein erhöhtes Bürstenfeuer bei Belastung ist die Folge.

<sup>5</sup> Erregerwicklung: exciting winding; Erregung: excitation

<sup>6</sup> Nut: slot

<sup>7</sup> Kommutator: commutator

<sup>8</sup> Kollektor: collector

<sup>9</sup> Bürsten: brushes

<sup>10</sup> Ankerrückwirkung: armature reaction

### Kompensationswicklung

In manchen Gleichstrommaschinen haben die Polschuhe ebenfalls Nuten, in denen der Ankerstrom entgegengesetzt zur Ankerwicklung fließt. Diese Wicklung<sup>11</sup> kompensiert unter den Polschuhen das Ankerquerfeld. Diese Technik findet Anwendung bei großen Gleichstrommaschinen sowie bei Gleichstrommaschinen, deren Drehzahl unter anderem durch Feldschwächung verändert wird.

### Wendepolwicklung

Die Ankerwicklung wird in der **neutralen Zone**, nämlich dort, wo das Erregerfeld Null ist, umgeschaltet. Die neutrale Zone verschiebt sich mit zunehmendem Ankerquerfeld (beim Gleichstrommotor entgegen der Drehrichtung). Die Wendepolwicklung<sup>12</sup> hebt im Bereich der neutralen Zone das Ankerquerfeld auf. Außerdem erzeugt es eine **Wendepolspannung** in der Ankerwicklung, die der Ankerspannung entgegengesetzt ist und so das funkenlose Umschalten der Ankerwicklung unterstützt. Die Wendepolwicklung ist vom Ankerstrom durchflossen. Siehe Abb. 3.1a.

### Der drehende Rotor und sein Ersatzschaltbild

Wird eine Spannung  $U_A$  an die Rotorwicklung gelegt, so fließt zunächst ein Strom  $I_A = \frac{U_A}{R_A}$  ( $R_A$ : ohmscher Widerstand der Rotorwicklung). Der Strom und das magnetische Feld bewirken das Drehmoment, wodurch der Rotor anläuft (siehe Motorprinzip). Das Drehmoment beschleunigt den Rotor. Die Drehung des Rotors bewirkt ihrerseits eine induzierte Spannung  $U_q$  in der Rotorwicklung (siehe Generatorprinzip). Diese induzierte Spannung wirkt der treibenden Spannung  $U_A$  entgegen. Die für den Ankerstrom wirksame Spannung ist  $U_A - U_q$ . Die induzierte Spannung  $U_q$  ist neben den konstruktiven Daten der Maschine abhängig von der Drehzahl und von der magnetischen Flussdichte  $B$ . Die induzierte Spannung wächst mit der Drehzahl, sodass die wirksame Ankerspannung mit steigender Drehzahl kleiner wird und dementsprechend der Ankerstrom ebenfalls.

Der Ankerstrom beträgt  $I_A = \frac{U_A - U_q}{R_A}$ . Diese Gleichung führt zur allgemeinen Spannungsgleichung der Gleichstrommaschine:

$$U_A = I_A R_A + U_q$$

Die Spannungsgleichung führt zum Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine (Abb. 3.2):

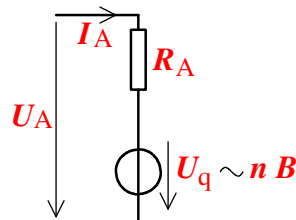


Abb.3.2: Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine

<sup>11</sup> Kompensationswicklung: compensating winding

<sup>12</sup> Wendepolwicklung: interpole, commutation pole

Abb. 3.3 gibt die Leistungsbilanz des Ersatzschaltbildes an. Dies ist eine vereinfachte Leistungsbilanz der Gleichstrommaschine. Die zugeführte elektrische Leistung  $P_e = U_A \cdot I_A$  teilt sich auf in die mechanische Leistung an der Welle  $P_{\text{mech}} = U_q \cdot I_A$  und die Verlustleistung  $P_v = R_A \cdot I_A^2$  im ohmschen Widerstand der Ankerwicklung.

$$P_e = U_A \cdot I_A = P_{\text{mech}} + P_v = U_q \cdot I_A + R_A \cdot I_A^2 \quad \text{und} \quad P_{\text{mech}} = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi n}{60 \text{ s/min}}$$

Vernachlässigt werden die elektrischen Verluste in der Erregerwicklung (sofern die Maschine nicht permanenterregt ist) und die Spannungsabfälle an den Bürsten (die Spannungsabfälle an den Bürsten liegen in der Regel zwischen 0,5 und 1V). Die mechanische Leistung teilt sich auf in die Reibungsverluste innerhalb der Maschine, die Leistungsaufnahme des Lüfterrades und die an der Welle abgegebene mechanische Leistung.

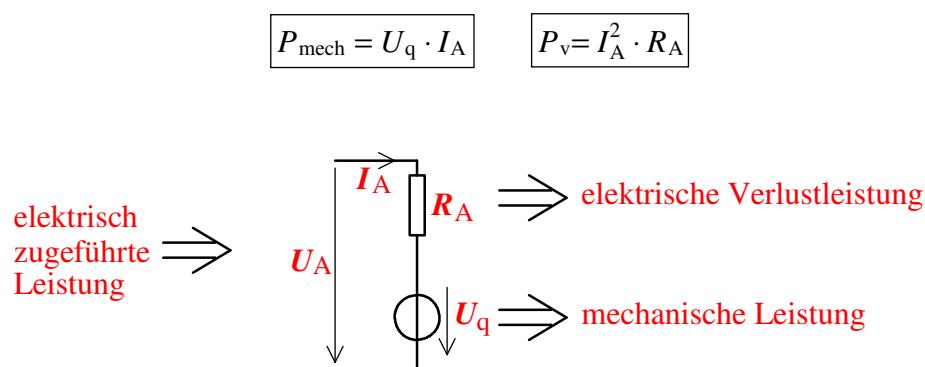


Abb.3.3: vereinfachte Leistungsbilanz der Gleichstrommaschine

- ♦ Die induzierte Spannung  $U_q$  repräsentiert die Energiewandlung von elektrischer in mechanische Energie bzw. Leistung.

### Nebenschluss- und Reihenschlussmaschinen

Die Nebenschlussmaschine<sup>13</sup> arbeitet in allen Betriebspunkten mit konstantem magnetischem Fluss, d.h. das Erregerfeld bleibt im gesamten Drehzahl- und Lastbereich konstant. Dies kann entweder erreicht werden, indem das Erregerfeld mittels eines Permanentmagneten erzeugt wird oder indem die Erregerwicklung an einer konstanten Spannung liegt und daher mit konstantem Strom versorgt wird. Der Begriff "Nebenschluss" ist historisch bedingt. Die Erregerwicklung war *neben* dem Ankerkreis an die Gleichspannungsquelle angeschlossen, d.h. dem Ankerkreis parallelgeschaltet und so mit konstantem Strom versorgt. Praktisch alle Motoren im Kfz-Bereich sind permanenterregte Gleichstrommotoren, d.h.

Nebenschlussmotoren. Im Gegensatz dazu ist bei der Reihenschlussmaschine<sup>14</sup> die Erregerwicklung mit dem Ankerkreis in Reihe geschaltet. Dadurch ist der magnetische Fluss proportional zum Ankerstrom, was bei großem Laststrom zu einem sehr hohen Drehmoment führt. Ausserdem hat die Reihenschaltung von Erreger- und Ankerwicklung zur Folge, dass der Motor mit Wechselstrom betrieben werden kann. Der Reihenschlussmotor hat in diesem Falle die Bezeichnung Universalmotor und wird in großen Stückzahlen im Haushalt und Heimwerkerbereich eingesetzt.

<sup>13</sup> Nebenschlussmotor: shunt motor

<sup>14</sup> Reihenschlussmotor: series motor

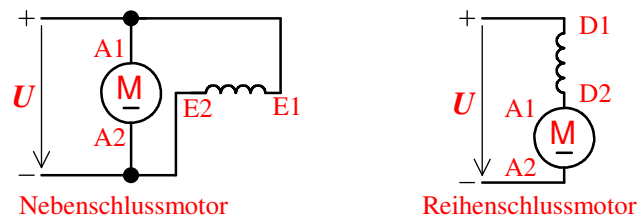
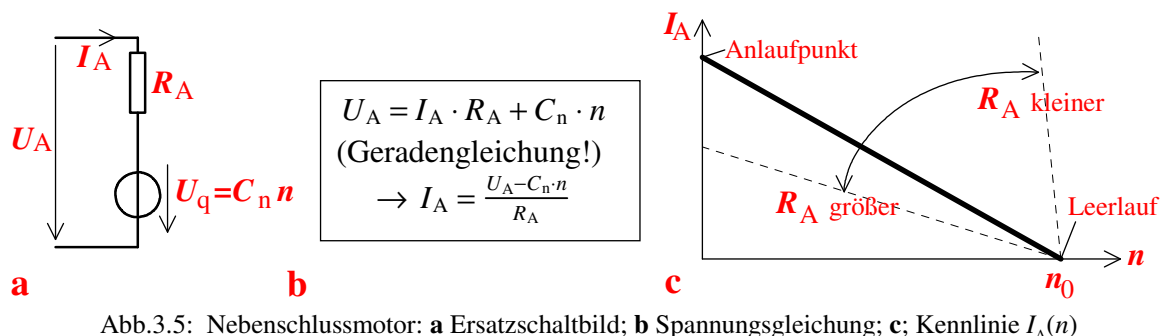


Abb.3.4: Schaltbild des Nebenschluss- und Reihenschlussmotors mit Klemmenbezeichnungen

Die nachfolgenden theoretischen Überlegungen und Berechnungen für den Nebenschluss- und Reihenschlussmotor vernachlässigen insbesondere die magnetischen Sättigungserscheinungen und die mechanische Reibung innerhalb des Motors. Die Berechnungen beschränken sich im wesentlichen auf den Umgang mit den Typenschildangaben des Motors. Die Typenschildangaben beschreiben einen Betriebspunkt des Motors, den sogenannten Bezugspunkt bzw. Nennpunkt. Er gibt für diesen Betriebspunkt die Eingangsgrößen  $U_N$  und  $I_N$  sowie die mechanischen Ausgangsgrößen  $n_N$  und  $P_N$  an. Bei der angegebenen Leistung  $P_N$  handelt es sich immer um die mechanische Wellenleistung.

### Nebenschlussmaschinen

Die Nebenschlussmaschine arbeitet in allen Betriebspunkten mit konstantem magnetischem Fluss, d.h. das Erregerfeld bleibt im gesamten Drehzahl- und Lastbereich konstant. Dies kann entweder erreicht werden, indem das Erregerfeld mittels eines Permanentmagneten erzeugt wird (permanenterregte Gleichstrommotoren sind *immer* Nebenschlussmotoren) oder indem die Erregerwicklung mit konstantem Strom versorgt wird. Entsprechend dem Ersatzschaltbild in Abb.3.2 ist die induzierte Spannung  $U_q$  nur abhängig von der Drehzahl  $n$ , sie steigt linear mit der Drehzahl (Abb.3.5).

Abb.3.5: Nebenschlussmotor: **a** Ersatzschaltbild; **b** Spannungsgleichung; **c**; Kennlinie  $I_A(n)$ 

Mit steigender Drehzahl  $n$  wird die wirksame Ankerspannung ( $U_A - U_q$ ) linear kleiner und der drehmomentbildende Strom  $I_A$  ebenfalls. Wenn die Drehzahl so hoch ist, dass  $U_q = U_A$  ist, wird  $I_A = 0$  und das Drehmoment wird ebenfalls Null (Abb. 3.6a). Im Leerlauf, d.h. der Motor wird nicht belastet, beschleunigt der Motor theoretisch genau bis zu der Leerlaufdrehzahl, in der  $U_q$  gleich  $U_A$  wird und das Beschleunigungsmoment gleich Null wird. Das Drehmoment ist proportional zum Strom. Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie ist deswegen ebenfalls eine Gerade (Abb. 3.6).

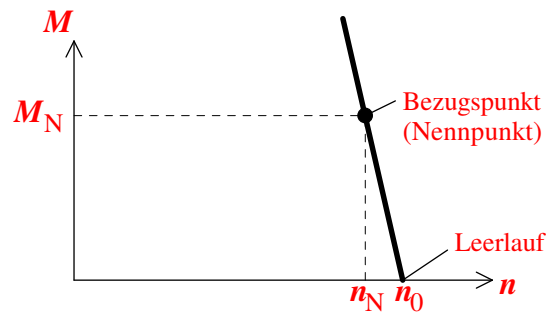


Abb.3.6: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Nebenschlussmotors

Der Ankerwiderstand  $R_A$  ist in der Regel sehr klein, sodass ein sehr hoher Anlaufstrom fließt und ein sehr hohes Anlaufmoment entsteht. Mittels einer Strombegrenzung kann der hohe Anlaufstrom begrenzt werden. Infolge des kleinen Ankerwiderstandes verläuft die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie sehr steil, d.h. die Drehzahl ändert sich bei Belastung des Motors kaum gegenüber der Leerlaufdrehzahl. Man bezeichnet eine solche Kennlinie als "hart". Allgemein bezeichnet man eine harte, lineare Motorkennlinie als "Nebenschlussverhalten".

Aus den vorangegangenen theoretischen Überlegungen können näherungsweise alle Betriebspunkte eines Nebenschlussmotors berechnet werden, wenn ein Betriebspunkt, in der Regel der Nennpunkt (Typenschildangaben), bekannt ist.

BEISPIEL:

Die Nenndaten eines permanentenerregten Gleichstrommotors seien:

$$U_N=24\text{V}, I_N=8\text{A}, P_N=160\text{W}, n_N=2000\text{min}^{-1}.$$

In der nachfolgenden Rechnung werden alle Verluste, auch die inneren Reibungsverluste als elektrische Verluste  $P_v = I_A^2 \cdot R_A$  aufgefasst. Die mechanisch abgegebene Leistung beträgt dann  $P_{\text{mech}} = u_q \cdot I_A$ .

Zunächst zwei Hilfsrechnungen zum Ersatzschaltbild. Induzierte Spannung  $U_{qN}$  im Nennbetrieb beträgt:

$$P_N = U_{qN} \cdot I_N \quad \rightarrow \quad U_{qN} = \frac{P_N}{I_N} = \frac{160\text{W}}{8\text{A}} = 20\text{V}$$

Der Ankerwiderstand  $R_A$  beträgt:

$$U_N = I_N \cdot R_A + U_{qN} \quad \rightarrow \quad R_A = \frac{U_N - U_{qN}}{I_N} = \frac{24\text{V} - 20\text{V}}{8\text{A}} = 0,5\ \Omega$$

Berechnung des Nennmomentes  $M_N$ :

$$P_N = M_N \cdot \omega_N = M_N \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot n_N \quad \rightarrow \quad M_N = \frac{P_N}{n_N} \cdot \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} = 0,764\text{Nm}$$

Berechnung der theoretischen Leerlaufdrehzahl  $n_0$  (im Leerlauf ist  $U_a = U_A$ ):

$$n \sim U_q \quad \rightarrow \quad \frac{n_0}{n_N} = \frac{U_N}{U_{qN}} \quad \rightarrow \quad n_0 = n_N \cdot \frac{U_N}{U_{qN}} = 2000 \frac{1}{\text{min}} \cdot \frac{24\text{V}}{20\text{V}} = 2400 \frac{1}{\text{min}}$$

Berechnung des Anlaufstroms  $I_{An}$ , sofern keine Strombegrenzung den Anlaufstrom begrenzt (im Anlauf ist  $U_q=0$ ):

$$I_{An} = \frac{U_N}{R_A} = \frac{24 \text{ V}}{0,5 \Omega} = 48 \text{ A}$$

Berechnung des theoretischen Anlaufmomentes (das Drehmoment ist proportional zum Strom):

$$M \sim I_A \rightarrow \frac{M_{An}}{M_N} = \frac{I_{An}}{I_N} \rightarrow M_{An} = M_N \cdot \frac{I_{An}}{I_N} = 0,764 \text{ Nm} \cdot \frac{48 \text{ A}}{8 \text{ A}} = 4,58 \text{ Nm}$$

Jeder andere Betriebspunkt kann berechnet werden, wenn zwei Parameter von  $U_A$ ,  $I_A$ ,  $n$ , oder  $M$  bekannt sind:

$$n \sim U_q; \quad M \sim I_A; \quad U_A = I_A \cdot R_A + U_q; \quad P_{\text{mech}} = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot n = U_q \cdot I_A$$

### Drehzahlverstellung beim Gleichstromnebenschlussmotor:

#### **Drehzahlverstellung durch Veränderung der Ankerspannung:**

Das übliche und beste Verfahren die Drehzahl eines Nebenschlussmotors zu verändern, ist, die Ankerspannung zu verändern. Die Veränderung der Ankerspannung bewirkt eine Parallelverschiebung der Drehzahl- Drehmoment-Kennlinie (siehe Abb. 3.7). Die Kennlinie verschiebt sich mit kleiner werdender Ankerspannung zu kleineren Drehzahlwerten. Der Leerlaufpunkt  $U_q = U_A$  verschiebt sich proportional zur Ankerspannung. Die Steigung der Kennlinie verändert sich nicht, weil sie vom Ankerwiderstand bestimmt wird.

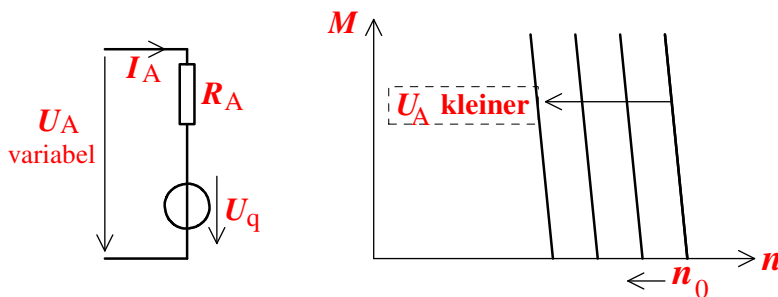


Abb.3.7: Änderung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie durch Änderung der Ankerspannung

Beispiel 1:

Spannungs- und Stromberechnung  $U_1$ ,  $I_1$  für einen bestimmten Drehzahl/Drehmomentpunkt  $M_1$ ,  $n_1$  (siehe Abb. 1)

$R_A$  und  $U_{qN}$  im Nennpunkt sind bekannt (Berechnung Beispiel Seite 3.6)

$$M \sim I \Rightarrow I_1 = I_N \cdot \frac{M_1}{M_N}$$

$$U_q \sim n \Rightarrow U_1 = U_{RA} + U_{q1} = I_1 R_A + U_{qN} \cdot \frac{n_1}{n_N}$$

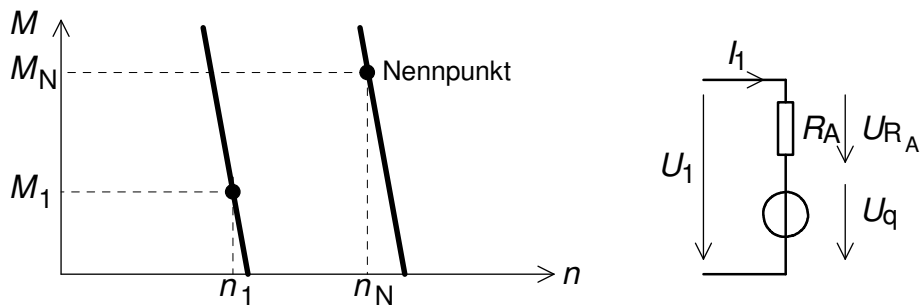


Abb. 1: Drehzahl-Drehmoment Änderung bei der Gleichstromnebenschlußmaschine

Beispiel 2:

Drehzahl- und Drehmomentberechnung  $M_1, n_1$ , wenn im Betrieb eine bestimmte Spannung  $U_1$  und ein bestimmter Strom  $I_1$  gemessen wurden.

$R_A$  und  $U_{qN}$  im Nennpunkt sind bekannt (Berechnung siehe Beispiel Seite 3.6)

$$M \sim I \Rightarrow M_1 = M_N \cdot \frac{I_1}{I_N}$$

$$U_q \sim n \Rightarrow n_1 = n_N \cdot \frac{U_{q1}}{U_{qN}} = n_N \cdot \frac{(U_1 - I_1 R_A)}{U_{qN}}$$

Die Veränderung der Ankerspannung wird in der Regel mit sogenannten **Choppern (Gleichstromstellern)**<sup>15</sup> durchgeführt. Dies sind Transistorschaltungen, in denen ein Leistungstransistor mit einem variablen Tastverhältnis  $t_1/T$  ein- und ausgeschaltet wird (Abb.3.8). Dies Verfahren ist auch als **Pulsweitenmodulation**<sup>16</sup> bekannt. Die Schaltfrequenz liegt üblicherweise im Bereich einiger 10kHz (zumindest außerhalb des Hörbereiches). Mittels des Tastverhältnisses kann die mittlere, wirksame Ankerspannung verstellt werden. Die Wicklungsinduktivität des Motors glättet den Ankerstrom, sodass dieser praktisch ein Gleichstrom ohne Pulsation ist (Abb. 3.8). Der Chopper kann auf einfache Weise in einen Regelkreis eingebunden werden, um beispielsweise eine Drehzahl- oder eine Positioniersteuerung zu realisieren.

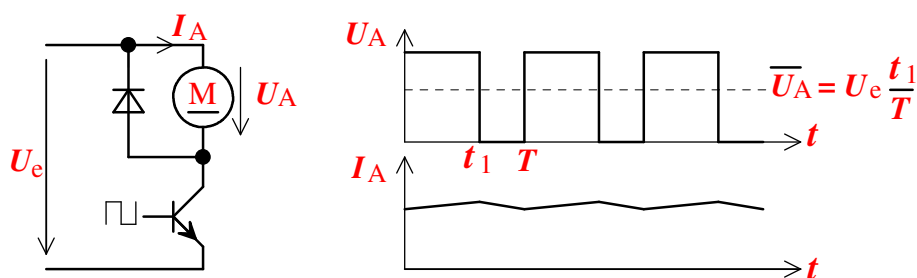


Abb.3.8: Prinzip eines Choppers (Gleichstromsteller)

<sup>15</sup> Gleichstromstelle: chopper

<sup>16</sup> Pulsweitenmodulation (PWM): pulse-width-modulation (pwm)



### Drehzahlverstellung mittels Feldschwächung:

In Nebenschlussmotoren, die mittels eines Erregerstromes magnetisiert werden, kann durch Änderung des Erregerstromes die Drehzahl verändert werden (Abb. 3.10).

Die Leerlaufdrehzahl läuft bei Feldschwächung nach oben zu höheren Drehzahlen, weil der Leerlaufpunkt  $U_q = U_A$  wegen  $U_q \sim n \cdot B$  (siehe Generatorprinzip) erst bei höheren Drehzahlen erreicht wird. Wird das Feld zu stark zurückgefahren (oder gar abgeschaltet), kann dies infolge der hohen Drehzahl zur mechanischen Zerstörung des Motors führen. Auf der anderen Seite wird der Motor weicher. Der Anlaufstrom des Motors bleibt konstant, das Anlaufmoment geht jedoch zurück wegen  $M \sim I \cdot B$  (siehe Motorprinzip). Dadurch wird die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie flacher.

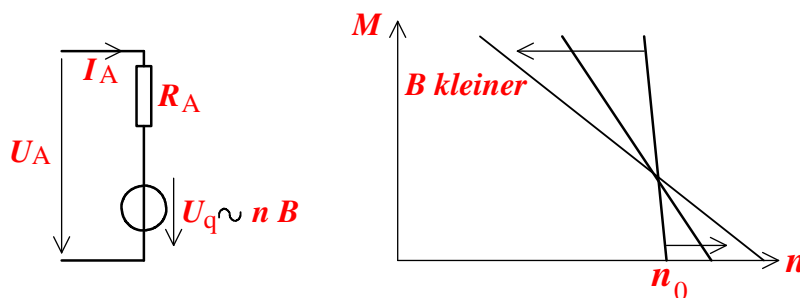


Abb.3.10: Änderung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie mittels Feldschwächung

### Drehzahlverstellung mittels Vorwiderstand:

Der Vorwiderstand  $R_V$  vermindert den Ankerstrom und damit die Drehzahl bei einem bestimmten Drehmoment. Die Leerlaufdrehzahl bleibt näherungsweise konstant. Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie wird weicher (Abb. 3.9).

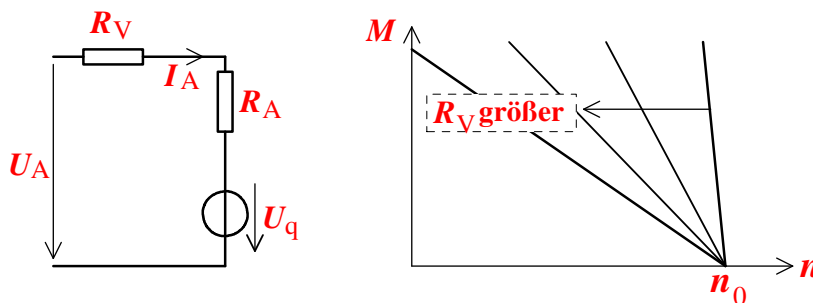


Abb.3.9: Änderung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie mittels Vorwiderstand

### Reihenschlussmaschinen

In der Reihenschlussmaschine ist die Anker- und die Erregerwicklung in Reihe geschaltet. Das Erregerfeld ist proportional zum Ankerstrom. Die induzierte Spannung  $U_q$  ist proportional zur Drehzahl  $n$  und zum Ankerstrom  $I_A$ ; ( $U_q \sim n \cdot I_A$ ). Mit dem "Motorprinzip"  $F = l \cdot B \cdot I$  folgt daraus, dass das Drehmoment proportional zum Quadrat des Ankerstromes ist.

$$M \sim I_A^2 \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M_N} = \left( \frac{I_A}{I_N} \right)^2,$$

Index N: Bezugsdaten (Typenschildangaben)

- Das Drehmoment des Reihenschlussmotors wächst mit dem Quadrat des Stromes.

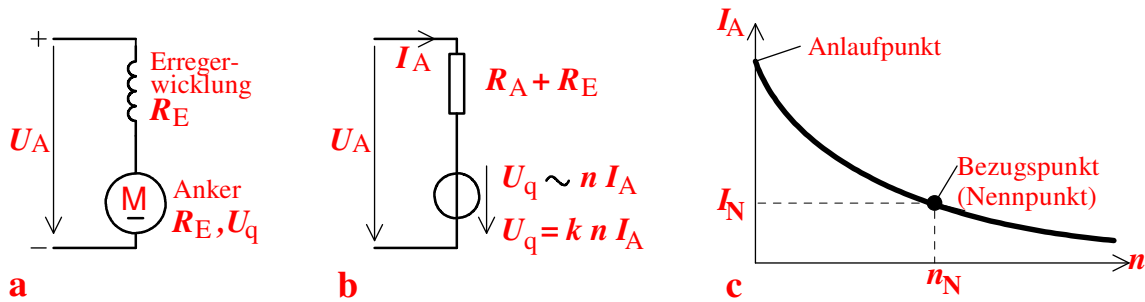


Abb.3.11: Reihenschlussmotor: **a** Schaltbild; **b** Ersatzschaltbild; **c**: Kennlinie  $I_A(n)$

Aus dem Ersatzschaltbild in Abb. 3.11b folgt für den Strom  $I_A$  als Funktion von  $n$ :

$$U_A = I_A \cdot (R_A + R_E) + U_q = I_A \cdot (R_A + R_E) + k \cdot n \cdot I_A \quad \rightarrow \quad I_A = \frac{U_A}{k \cdot n + (R_A + R_E)}$$

Die Konstante  $k$  kann aus den Nenndaten des Motors berechnet werden. Die induzierte Spannung  $U_q$  repräsentiert die mechanische Leistung:  $P_{\text{mech}} = U_q \cdot I_A = M \cdot \omega$ . Außerdem gilt:  $M \sim I_A^2$ . Daraus folgt

$$U_q = \frac{M \cdot \omega}{I_A} = M_N \frac{I_A^2}{I_N^2} \cdot \frac{\omega}{I_A} = \frac{M_N}{I_N^2} \cdot \underbrace{\frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}}_k \cdot n \cdot I_A \quad \Rightarrow \quad k = \frac{M_N}{I_N^2} \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}$$

- Mit den Bezugsdaten des Reihenschlussmotors und der Proportionalität  $M \sim I_A^2$  kann jeder anderen Betriebspunkt berechnet werden. Mechanische Verluste sowie Sättigungserscheinungen werden dabei vernachlässigt.

Vernachlässigt man die Spannungsabfälle an den Wicklungswiderständen, so ergibt sich:

$$I_A \sim \frac{1}{n} \quad \rightarrow \quad \frac{I_A}{I_N} \approx \frac{n_N}{n}; \quad (R_A + R_E) \text{ vernachlässigt}$$

- In der Reihenschlussmaschine ist der Strom näherungsweise umgekehrt proportional zur Drehzahl.

Mit der obengenannten Beziehung  $M \sim I_A^2$  ergibt sich für die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie:

$$I_A = \frac{U_q}{k \cdot n + (R_A + R_E)} \quad \rightarrow \quad M \sim \left( \frac{U_q}{k \cdot n + (R_A + R_E)} \right)^2$$

und bei Vernachlässigung von den Wicklungswiderständen ( $R_A + R_E$ ) ergibt sich:

$$M \sim \left( \frac{1}{n} \right)^2 \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M_N} \approx \left( \frac{n_N}{n} \right)^2 \quad \text{bzw.} \quad \frac{n}{n_N} \approx \sqrt{\frac{M_N}{M}}; \quad (R_A + R_E) \text{ vernachlässigt}$$

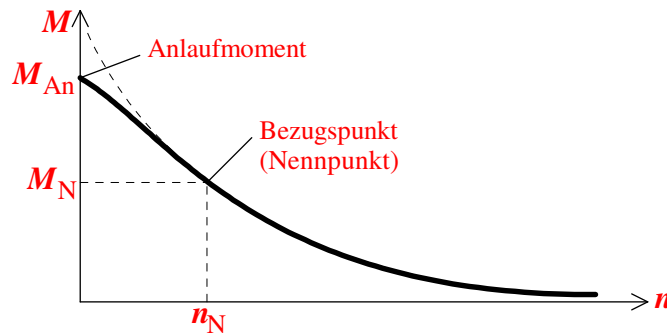


Abb.3.12: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Reihenschlussmotors

Der Reihenschlussmotor hat eine hyperbolische Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie. Er hat ein sehr hohes Anlaufmoment, jedoch nicht so hoch, wie die obengezeigte Berechnung vermuten lässt. Sättigung und Ankerquerfeld verringern das theoretische Anlaufmoment (Abb. 3.12). Im Leerlauf erreicht die Reihenschlussmaschine sehr hohe Drehzahlen. Grosse Motoren können im Leerlauf über die mechanisch zulässigen Grenzen laufen und dadurch zerstört werden. Bei kleinen Motoren begrenzen Reibung und Lüfterleistung die Leerlaufdrehzahl auf ungefährliche Werte.

Beispiel 1:

Welche Spannung  $U_1$  wird benötigt und welcher Strom  $I_1$  ergibt sich für einen bestimmten Drehzahl/Drehmomentpunkt  $M_1, n_1$  (siehe Abb. 1)

$R_A$  und  $U_{qN}$  im Nennpunkt sind bekannt (Berechnung Beispiel Seite 3.6)

$$M \sim I^2 \Rightarrow I_1 = I_N \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_N}}$$

$$U_q \sim n \cdot I \Rightarrow U_1 = U_R + U_{q1} = I_1 R + U_{qN} \cdot \frac{n_1}{n_N} \cdot \frac{I_1}{I_N}$$

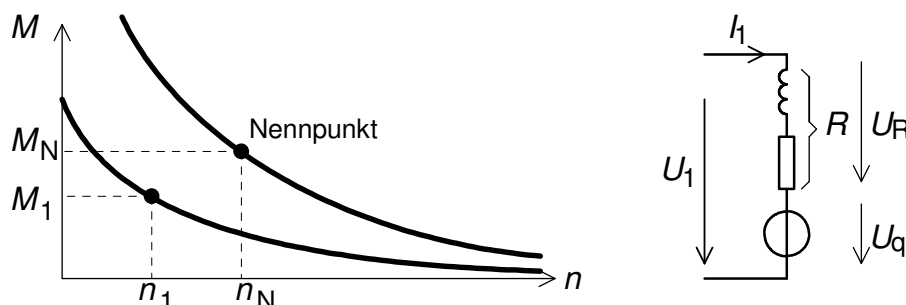


Abb. 1: Drehzahl-Drehmoment Änderung bei der Gleichstromreihenschlußmaschine

Beispiel 2:

Welche Drehzahl  $n_1$  und welches Drehmoment  $M_1$  ergibt sich, wenn im Betrieb eine bestimmte Spannung  $U_1$  und ein bestimmter Strom  $I_1$  gemessen wurden.

$R_A$  und  $U_{qN}$  im Nennpunkt sind bekannt (Berechnung siehe Beispiel Seite 3.6)

$$M \sim I^2 \Rightarrow M_1 = M_N \cdot \left( \frac{I_1}{I_N} \right)^2$$

$$U_q \sim n \cdot I \Rightarrow \frac{U_{q1}}{U_{qN}} = \frac{n_1}{n_N} \cdot \frac{I_1}{I_N} \Rightarrow n_1 = n_N \cdot \frac{U_{q1}}{U_{qN}} \cdot \frac{I_N}{I_1} = n_N \cdot \frac{(U_1 - I_1 R)}{U_{qN}} \cdot \frac{I_N}{I_1}$$

### Reihenschlussmaschinen am Wechselstromnetz:

Reihenschlussmotoren können am Wechselstromnetz betrieben werden. Es ist sogar so, dass Reihenschlussmotoren heute fast ausnahmslos am Wechselstromnetz betrieben werden. Sie heißen dann **Universalmotoren**, weil sie an Gleich- und Wechselspannung betrieben werden. Sie werden in großer Stückzahl für Heimwerker- und Haushaltsmaschinen, beispielsweise Handbohrmaschinen und Staubsauger, produziert.

Da die Stromrichtung sowohl als auch die Richtung des magnetischen Flusses mit jeder Halbperiode des Wechselstromes ihr Vorzeichen wechselt, bleibt die Richtung des Drehmomentes konstant (siehe "Motorprinzip"). Der Motor hat näherungsweise ohmsches Verhalten, weil der Strom maßgeblich durch die mechanisch abgegebene Leistung bestimmt wird und diese von der Netzseite gesehen elektrisch "ohmsch" ist. Die Leistungsaufnahme am Wechselstromnetz pulsiert. Sie beträgt in jedem Nulldurchgang Null und hat im Scheitelwert von Strom und Spannung ihr Maximum. Bei konstanter Drehzahl hat dies zur Folge, dass das Drehmoment mit der Leistung pulsiert (Abb. 3.13).

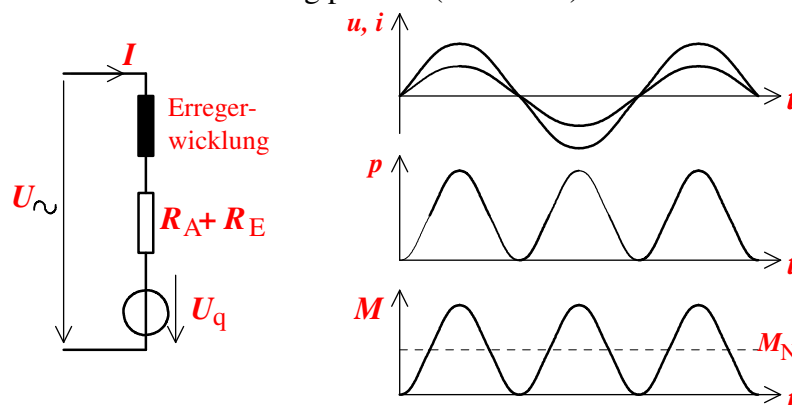


Abb.3.13: Drehmomentpulsation bei Wechselspannungsbetrieb (Erregerinduktivität vernachlässigt)

### Drehzahlsteuerung von Universalmotoren

Reihenschlussmotoren werden in ihrer Drehzahl gesteuert, indem die Spannung verändert wird. Eine Verkleinerung der speisenden Spannung hat zu Folge, dass die Drehzahl-Drehmomentkennlinie verschoben wird. Leider wird die Kennlinie mit kleinerer Spannung zunehmend weicher, d.h. bei Belastung bleibt sie fast stehen (Abb. 3.14a).

Die Drehzahländerung von Gleichstromreihenschlussmotoren wird am Wechselstromnetz mittels Phasenanschnittsteuerung (Dimmer) erreicht (Abb. 3.14b). Für eine Drehzahlregelung gibt es spannungsgesteuerte Dimmer, die in einen geschlossenen Drehzahlregelkreis eingebaut werden können.

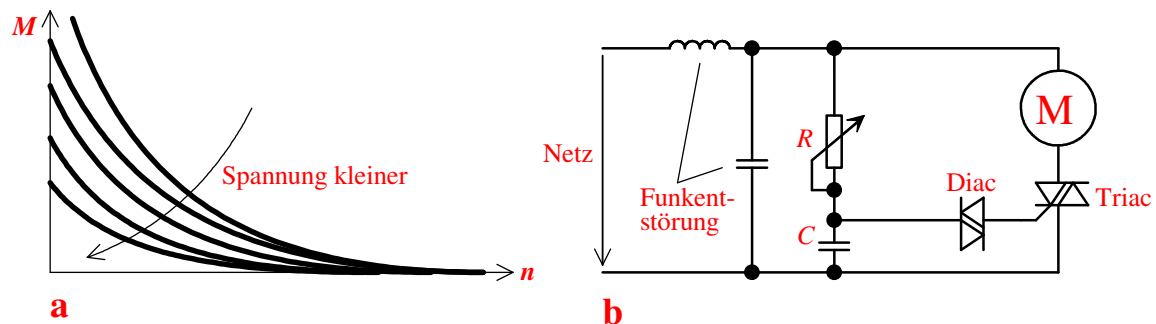


Abb. 3.14: Drehzahlsteuerung von Universalmotoren; **a**: Spannungsabhängigkeit der Drehzahl-Drehmomentkennlinie, **b**: Spannungsänderung mittels Phasenanschnittsteuerung

### Nebenschluss- und Reihenschlussverhalten

Nebenschluss- und Reihenschlussmaschinen haben beide ein charakteristisches Drehzahl-Drehmomentverhalten. Die Nebenschlussmaschine ist sehr hart, das heißt, ihre Drehzahl gibt bei Belastung nur wenig nach. Ihr Drehzahl-Drehmomentverhalten ist linear. Die Reihenschlussmaschine ist sehr weich, das heißt, die Drehzahl geht bei Belastung stark zurück. Ihr Drehzahl-Drehmomentverhalten ist hyperbolisch.

Diese beiden Charakteristika verallgemeinert man und unterscheidet unterschiedlichste Motoren nach diesen beiden Verhaltensweisen. So sagt man beispielsweise, dass eine Drehstromasynchronmaschine im Bereich des Nennpunktes Nebenschlussverhalten hat, obwohl sie von ihrer Konstruktion her eine völlig andere Maschine, als die beschriebenen Nebenschlussmaschinen ist. Man spricht bei ihr von Nebenschlussverhalten, weil sie im Nennpunkt sehr hartes und lineares Verhalten aufweist.

