

Leseprobe aus Kapitel 6 ‚Elektrische Maschinen‘ des Buchs

### ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Diese Leseprobe simuliert den **Feld-gesteuerten Gleichstrom-Motor**. Gezeigt wird, wie die Drehzahl durch Feld-Verstärkung vermindert und durch Feld-Schwächung gegenüber der Nenn-Drehzahl vergrößert werden kann.

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter [strukturbildung-simulation.de](http://strukturbildung-simulation.de)

#### 6.4.5 Der Gleichstrom-Motor mit separater Feld-Spule

Anstelle eines Permanent-Magneten kann auch eine Spule zur Magnetfeld-Erzeugung verwendet werden. Das bringt zwei Vorteile:

- Die Drehzahl kann verlustarm über das Feld gesteuert werden und
- auch die Drehrichtung kann verlustarm umgeschaltet werden.

Das sind Eigenschaften, die z.B. zur Automatisierung gefordert werden.

Bei Anwendungen mit schnell wechselnden Drehzahlen hat die Feld-Steuerung einen Nachteil:

- Wegen der Verzögerung des Feldstroms ist die Drehzahl-Einstellung langsamer (träger) als mit Permanent-Magnet.

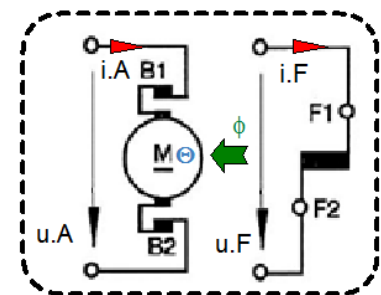


Abb. 6-135 Symbol und Anschlüsse eines Motors mit separater Feld-Spule

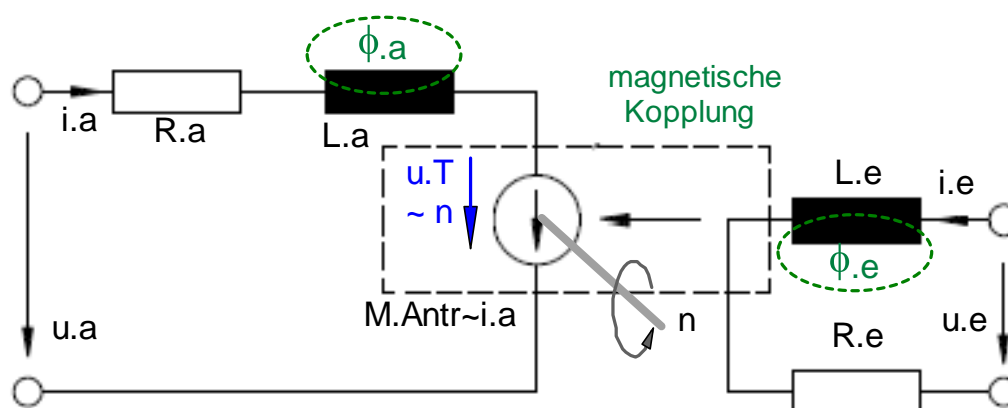


Abb. 6-136 Ersatz-Schaltung eines Motors mit separater Feld-Spule: Zu zeigen ist, wie die Drehzahl  $n$  über das Feld gesteuert werden kann.

Das stationäre Verhalten des Feld-gesteuerten Motors ist das gleiche wie mit Permanent-Magnet. Deshalb verzichten wir hier auf die Simulation.

Zur Spulen-Dimensionierung:

Zur Simulation eines Motors mit separater Feld-Spule sind die **Anker- und die Feld-Spule** zu dimensionieren.

- Die Dimensionierung der Anker-Spule ist die gleiche wie beim vorher behandelten Gleichstrom-Motor mit Permanent-Magnet.
- Der Algorithmus zur Dimensionierung der Feld-Spule ähnelt dem der Anker-Spule mit folgendem Unterschied:

Da der Motor durch Feld-Ströme gesteuert werden soll, die wesentlich kleiner als die Anker-Ströme sein sollen, muss die Windungszahl der Feld-Spule größer als die der Anker-Spule sein, damit das Drehmoment erhalten bleibt. Die Einzelheiten dazu werden im nächsten Abschnitt bei der Drehzahl-Steuerung über den magnetischen Fluss geklärt.

Zunächst besprechen wir die Simulation des Nebenschuss-Motors mit separater Feld-Spule.

### 6.4.5.1 Simulation des Motors mit separater Feld-Spule

Durch die separate Feld-Spule entsteht eine zweite Möglichkeit zur Drehzahl-Steuerung:

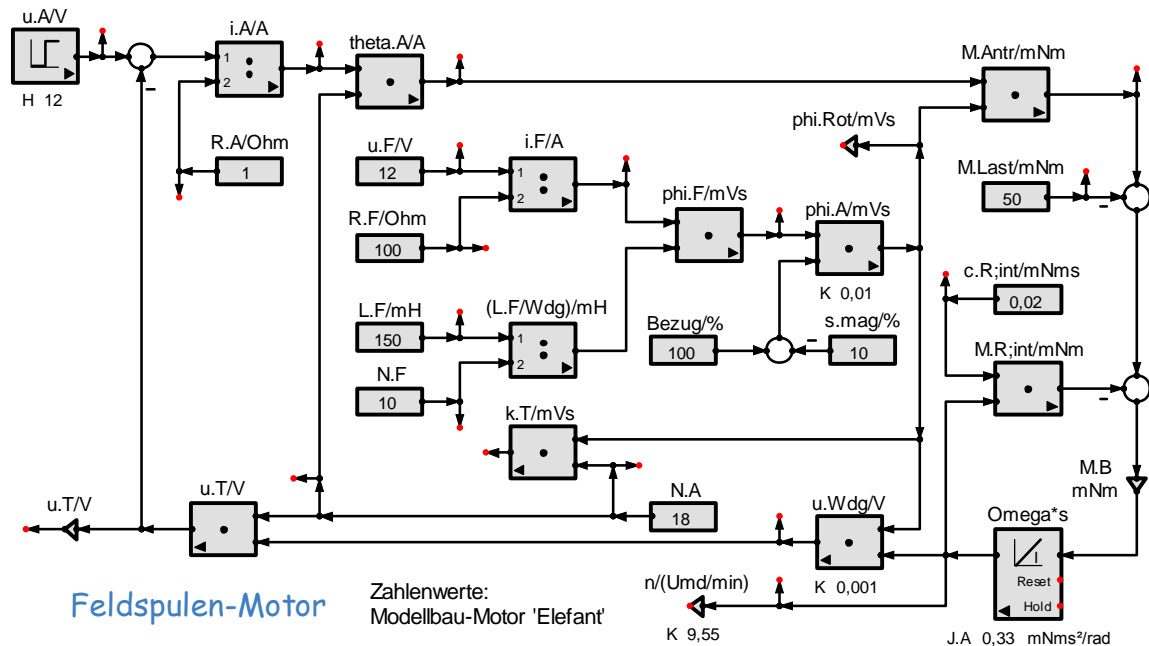


Abb. 6-137 die Struktur des Gleichstrom-Motors mit separater Feld-Spule

#### Erläuterungen zur Struktur des Motors mit separater Feld-Spule:

- Steuer-Größen sind die Anker-Spannung  $u.A$  und die Feld-Spannung  $u.F$ .
- Gesteuert ist das Antriebs-Moment  
 $M.Antr = \Theta \cdot \phi$
- Berechnet werden soll die Leerlauf-Drehzahl  $\Omega$  ( $\Omega \sim n$ ) in Abhängigkeit von der Belastung, dargestellt durch den internen Reibungs-Widerstand  $c.R:int$ .

Wie die obige Struktur des Motors zeigt, entsteht  $\Omega$  durch eine Gegenkopplung. Sie ist im Normalbetrieb eine Regelung, denn die Tacho-Spannung  $u.T \sim \Omega$  ist fast so groß wie die Anker-Spannung  $u.A$ . Deshalb kann die Drehzahl durch die Anker-Spannung  $u.A$  eingestellt werden. Die Einstellbarkeit der Drehzahl und ihre Last-Abhängigkeit sollen mittels obiger Struktur untersucht werden.

1. Im oberen Zweig wird das Antriebs-Moment  $M.Antr = \Theta \cdot \phi$  berechnet.  
 $\Theta = N.A \cdot i.A$  ist die Durchflutung des Ankers. Bei der Auswahl des Motors wird der Anker-Strom  $i.A$  gefordert. Wie die Windungszahl  $N.A$  des Ankers dazu dimensioniert wird, haben wir in Abb. 6-133 gezeigt.
2. Im mittleren Teil der Struktur sehen Sie, wie der Fluss des Ankers aus dem Feld-Strom  $i.F = u.F/R.F$  erzeugt wird.  $i.F$  wird durch die Feld-Spannung eingestellt. Zur Berechnung des Feld-Flusses  $\phi.F$  wird der Feldspulen-Widerstand  $R.F$  und die Windungszahl  $N.F$  der Feldspule benötigt. Wie sie dimensioniert werden, zeigt der nächste Abschnitt.

- Die Differenz aus Antriebs- und Last-Moment ist das Beschleunigungs-Moment. Durch dessen Integration entsteht die Drehzahl  $\Omega$ . Durch die Reibungs-Rückkopplung entsteht die mechanische Verzögerung  $T_{me}=J/c.R$ .
- Im unteren Zweig der Struktur erkennen Sie die proportionale Gegenkopplung der Drehzahl durch die Tacho-Spannung  $u.T=k.T \cdot \Omega$ .

### Drehzahl-Steuerung durch den Feld (Erreger)-Strom

Über den Erreger-Strom lässt sich die Drehzahl eines Motors wie über den Anker-Strom steuern, nur wesentlich Leistungs-ärmer:

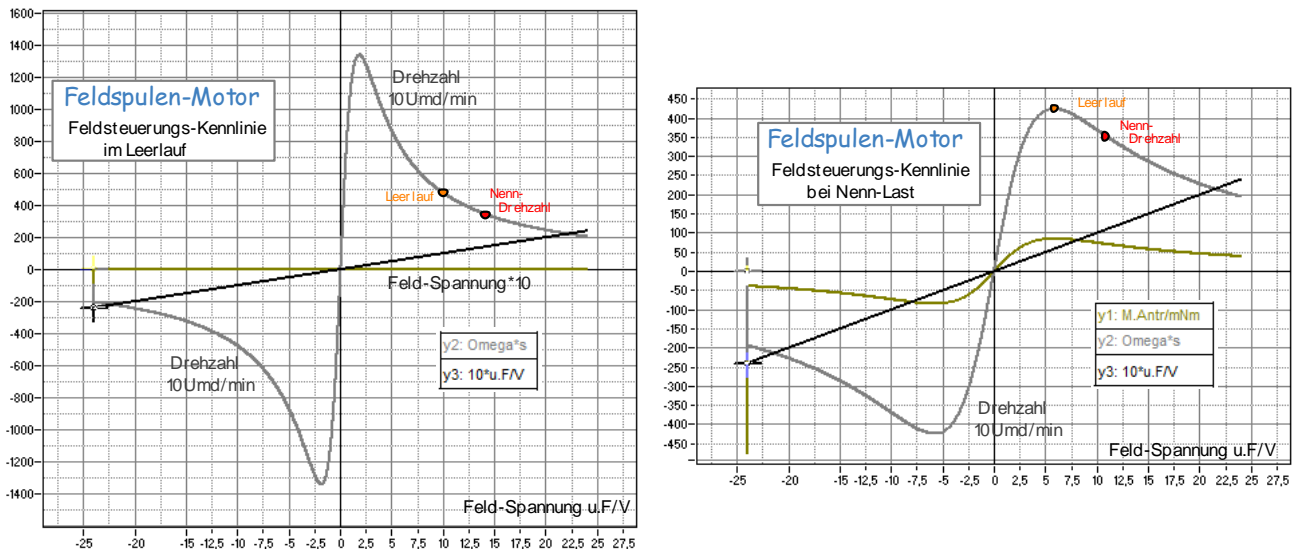


Abb. 6-138 links: die Leerlauf-Drehzahl  $n_0$  als Funktion der Feldspulen-Spannung ( $\sim$  Feld-Strom  $i_F$ ) – rechts: die gleiche Kennlinie bei Nenn-Last

### Der Einschalt-Vorgang über den Feldstrom

Um die Schnelligkeit der Drehzahl-Steuerung über den Feld-Strom mit der über den Anker-Strom vergleichen zu können, wird eine Sprungantwort des Hochlaufs nach dem Einschalten des Feldstroms simuliert:

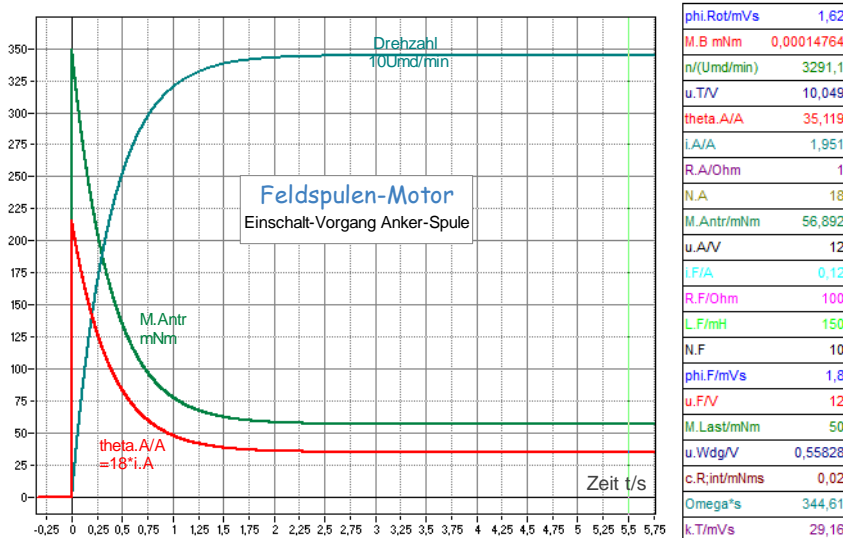


Abb. 6-139 Bei Feld-Steuerung ist der Drehzahl-Anstieg langsamer als bei Anker-Steuerung.

Zur Verlust-armen Drehzahl-Steuerung:

Pulsweiten-Modulation auch bei Feld-Steuerung möglich (Abb. 6-124)



## Die Drehzahl bei kleinem und großem magnetischen Fluss

Abb. 6-141 zeigt unterschiedliches Verhalten des Motors bei kleinem und großem magnetischen Fluss:

- Anfangs steigt die Drehzahl  $\Omega$  mit dem Fluss an.
- Er erreicht bei dem Grenz-Fluss  $\phi_{gr}$  ein Maximum
- und sinkt bei größeren Flüssen als  $\phi_{gr}$  mit steigendem Fluss ab.

Wo der Grenz-Fluss  $\phi_{gr}$  liegt, der den Übergang von kleinem zu großem Fluss markiert, soll mit den Parametern  $R.A$ ,  $c.R$  und  $N.A$  errechnet werden. Dadurch wird erkannt, wie groß der magnetische Fluss eingestellt werden muss.

## Fluss-Berechnung mit regelungstechnischen Mitteln

Wie die Struktur von Abb. 6-141 zeigt, ist der Spannungs-gesteuerte Motor eine Gegenkopplung. Deshalb soll er mit regelungstechnischen Mitteln untersucht werden. Die Grundlagen dazu finden Sie im Kapitel 1 dieser ‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘.

Die Übertragungs-Faktoren des Spannungs-gesteuerten Motors:

Der Übertragungsfaktor  $G$  zwischen der Drehzahl  $\Omega$  und der Anker-Spannung  $u.A$  errechnet sich mit einer Vorwärts-Konstanten  $k.V$  und einer Rückwärts-Konstanten  $k.R$  nach der Gegenkopplungs-Gleichung:

$$G = \frac{\Omega}{u.A} = \frac{k.V}{1 + G.0}$$

- mit der Vorwärts-Konstanten  $k.V = \Omega/u.R; A = N.A \cdot \phi / (R.A \cdot c.R)$
- der Rückwärts-Konstanten  $k.R = u./\Omega = \phi \cdot N.A$
- und der Kreisverstärkung  $G.0 = u.T/u.R; A = k.V \cdot k.R$

- ergibt  $G.0$  als Funktion der Motor-Parameter:

$$G.0 = \frac{u.T}{U.R; A} = \frac{(N.A * \phi)^2}{c.R * R.A}$$

$G.0$  steigt mit  $\phi^2$  an, weil  $\phi$

- zum Einen im Vorwärtszweig der Motor-Struktur (Abb. 6-140) zur Erzeugung des Drehmoments und
- zum Anderen im Rückwärtszweig zur Bildung der Tacho-Konstanten  $k.T$

benötigt wird.

Bei  $G.0 < 1$  ist der Motor eine Drehzahl-Steuerung. Dann ist  $G \approx k.F$ .

Bei  $G.0 > 1$  ist der Motor eine Drehzahl-Regelung. Dann ist  $G \approx k.F/G.0$ .

An der Grenze zwischen Steuerung und Regelung ist  $G.0 = 1 \rightarrow (N.A \cdot \phi)^2 = c.R \cdot R.A$

Daraus folgt der **Grenz-Fluss**, ab dem sich die Drehzahl mit steigendem Fluss verringert:

### Gl. 6-42 Der Grenz-Fluss zur Drehzahl-Erhöhung durch Feld-Schwächung

$$\phi_{gr} = \sqrt{R.A * c.R / N.A}$$

Zahlenwerte:  $R.A = 1\Omega$ ;  $c.R = 10\text{mNms} = 0,01\text{Nms}$ ;  $N.A = 100$  -  $\phi_{gr} = 1\text{mVs}$

Diesen Grenzfluss erkennen Sie in Abb. 6-141.

Das Verhalten des Motors bei kleinerem und größerem Fluss als  $\phi_{gr}$  soll nun genauer untersucht werden. Das soll die Steuerbarkeit der Drehzahl durch den magnetischen Fluss aufzeigen.

1. Drehzahl-Steuerung:  $G_0 < 1 \rightarrow U.R; A < u.L$  und  $(N.A \cdot \phi)^2 < c.R \cdot R.A$   
d.h. kleiner Fluss und kleine Windungszahl und große elektrische und mechanische Reibung.  
Dann ist

$$\Omega \approx k.V * u.A = \frac{N.A * \phi}{c.R * R.A} * u.A \sim u.A * \phi$$

Bei geringem magnetischen Fluss  $\phi$  steigt die Drehzahl  $\Omega$  mit der Anker-Spannung  $u.a$  und  $\phi$  an. Wie stark, hängt von der elektrischen und mechanischen Reibung ab ( $R.A$  und  $c.R$ ). Das ist technisch unerwünscht. Deshalb ist  $G_0 < 1$  keine übliche Betriebsart des Motors.

Zahlenwerte:  $R.A=1\Omega$ ;  $c.R=10mNms$ ,  $N.A=100$ ;  $\phi=10mVs \rightarrow k.F=100/Vs$ .

2.  $G_0 > 1$ : Drehzahl-Regelung

$$G \approx k.V/G_0 = 1/k.R = 1/(\phi * N.A)$$

... mit der oben definierten Rückwärts-Konstanten  $c.R=u./\Omega = \phi \cdot N.A$

Zahlenwerte:  $N.A=100$ ;  $\phi=10mVs \rightarrow \phi \cdot N.A=1Vs$  und  $G=\Omega/u.A \approx 1/Vs$ .

Bei der Nenn-Spannung  $u.A; Nen=12V$  wird  $\Omega \approx 12rad/s=115Umd/min$

Oberhalb des Grenz-Flusses  $\phi.gr$  (hier  $1mVs$ ) sinkt die Drehzahl mit  $1/\phi$  ab.

Das bedeutet:

- Die Drehzahl ist linear durch die Anker-Spannung einstellbar.
- Sie ist nicht mehr von der elektrischen und mechanischen Reibung abhängig.
- Sie ist nur wenig vom Last-Moment abhängig.

Wenn der Arbeitspunkt  $\Omega.Nen \ll \Omega.gr$  durch die Anker-Spannung  $u.A$  so **groß gegen** die **Grenz-Drehzahl  $\Omega.gr$**  eingestellt wird, kann die Drehzahl  $\Omega$  durch **Feld-Schwächung** maximal bis  $\Omega.gr$  erhöht werden. Wie groß  $\Omega.gr \sim 1/\sqrt{c.R}$  ist, hängt nach Gl. 6-42 vom Reibungs-Widerstand  $c.R$  an der Welle ab.

3. Sonderfall  $G_0=1$ : Dies ist Grenze zwischen Steuerung und Regelung. Dann ist  $G=k.V/2$ .

Zahlenwerte:  $k.V=100/Vs$ ;  $u.A=12V - G.gr(\phi.gr)=k.V/2=50/Vs$ .

Für  $u.A=u.Nen=12V$  wird  $\Omega.gr=600rad/s \rightarrow n.gr=5730Umd/min$

Beim Modellbau-Motor ‚Elefant‘ wird die Nenn-Drehzahl mit  $4000Umd/min$  angegeben. Deshalb bestünden bei ihm nur geringe Möglichkeiten zur Drehzahl-Erhöhung durch Feld-Schwächung.

### Zur Drehzahl-Erhöhung durch Feld-Schwächung

Die induzierte Anker-Spannung  $u.A=\phi \cdot \Omega$  hat einen konstanten Wert, z.B. die Nenn-Spannung  $u.Nen$  des Motors. Das bedeutet, dass die Drehzahl  $\Omega \sim n$  umso größer wird, je kleiner der magnetische Fluss  $\phi$  ist – und umgekehrt.

$$\text{Aus } u.A \approx u.T = N * \phi * \Omega \text{ folgt } \Omega(u.A, \phi) \approx u.A / (N * \phi)$$

Man erkennt:

1. die proportionale Steuerung der Drehzahl durch die Anker-Spannung  $u.A$  und
2. die Drehzahl-Erhöhung bei Feld-Schwächung – und umgekehrt.

Das bedeutet,

- dass der Motor bei **Unterbrechung des Feldstroms ‚durchgehen‘** kann. Ob er das tut, hängt von der äußeren Reibung ab.
- dass bei großen Motoren eine Drehzahl-Begrenzung eingebaut sein soll.

Um Einzelheiten der Feld-Steuerung zu erkennen, betrachten wir Abb. 6-138:

- Schon bei kleinen Feld-Strömen steigt  $n_0$  auf große Werte an. Das muss so sein, um die Ankerspannung  $u_A$  zu bei kleinem magnetischen Fluss zu induzieren.
- Bei weiter ansteigendem Feld-Strom verringert sich die Drehzahl nach einer  $1/n$ -Funktion.

Feld-Schwächung wird angewandt, wenn die Drehzahl bei begrenzter Anker-Spannung über die Nenn-Drehzahl hinaus angehoben werden soll. Sie setzt voraus, dass der Motor im Nenn-Betrieb mit kleinerer als der Grenz-Drehzahl tourt.

→ Feld-Verstärkung verringert die Drehzahl, Feld-Schwächung vergrößert die Drehzahl

→ Feld-Schwächung bewirkt **Antriebs-Minderung**

Nach Gl. 6-2 ist  $M. Antr = \Theta * \phi$

→ Bei Feld-Änderung bleibt die **Antriebs-Leistung konstant**

$$P. me = M. Ant * \Omega \approx u. A * \Theta$$

Bei konstanter Durchflutung – also konstantem Ankerstrom – ist die Antriebs-Leistung proportional zur Anker-Spannung.