

# 1. Einleitung zu Energiewandlung und Antrieben

Die Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der elektrischen Energiewandlung unterstreicht:

Unabhängig von den immer schnelleren Veränderungen der Technologien sind **Vorgänge und Prozesse der Elektrotechnik** grundsätzlich durch

- **Intransparenz**, die nur punktuell durch Messmittel aufgehoben werden kann,
- heute sogar noch stark zunehmende **Komplexität** und eine
- deutliche **Eigendynamik**

gekennzeichnet.

## **Analyse von elektrischen Maschinen und deren Betriebsverhalten**

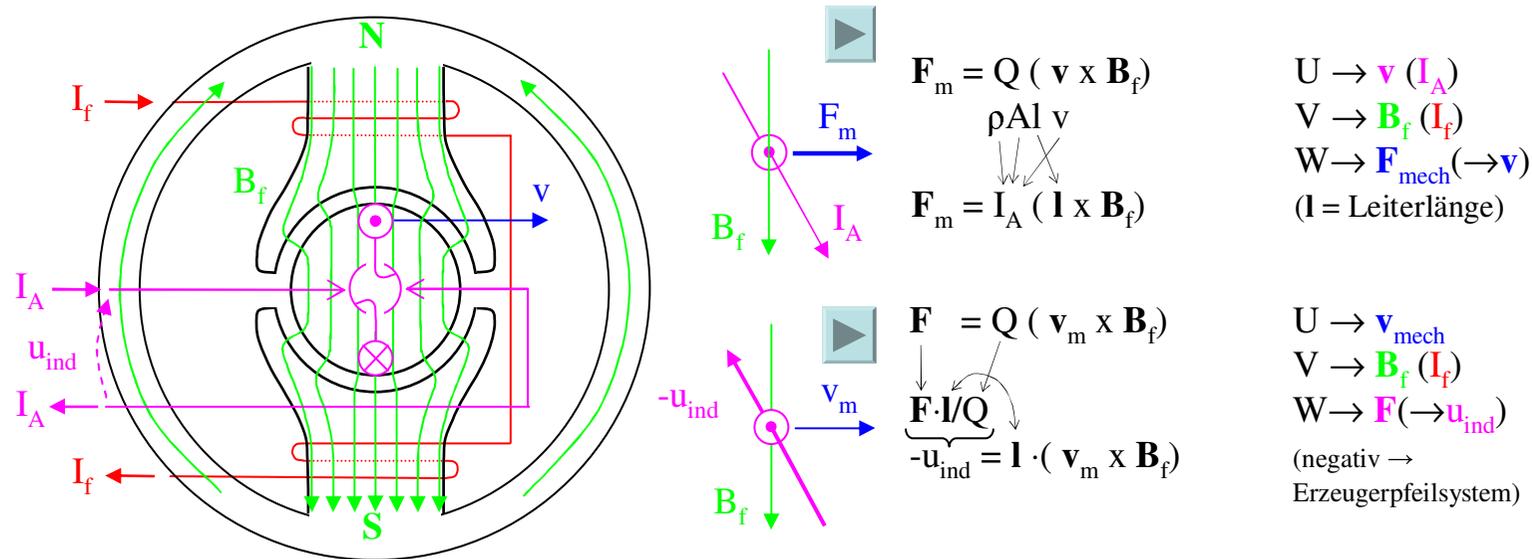
- o ruhende (Transformator, leistungselektronische Wandler) und
- o rotierende elektrische Maschinen
  - Gleichstrommaschinen,
  - Wechselstrommaschinen bzw.
  - Drehfeldmaschinen

## **Analyse leistungselektronischer Energiewandlern mit deren Betriebsverhalten.**

## 2. Elektrische Maschinen

### 2.1 Maschinen bei Gleichstrom

Die Gleichstrommaschine wird als Motor und Generator genutzt.  
 Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld → Kraft.  
 Bewegter Leiter → induzierte Spannung.



$I_f$  erzeugt das  $B_f$  (Rechte-Hand-Regel)

infolge  $I_A$  bewegten Ladungen → Kraft  $F_m$  (Richtung UVW-Regel, rechte Hand)

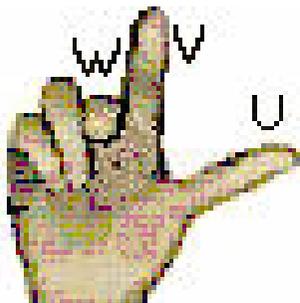
$v_m$  in  $B_f \rightarrow F$  (UVW-Regel) **Energiezufuhr** → **negativen Spannungsabfall**  $-u_{ind}$

# Lorentzkraft

Die **Kraft zwischen zwei bewegten Ladungen** wurde von **Lorentz** gefunden und sie entspricht der Kraft einer bewegten Probeladung im Magnetfeld einer sich bewegenden Ladung

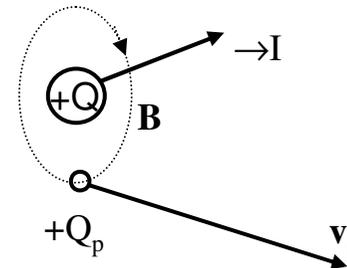
**Lorentzkraft**

$$\mathbf{F} = Q_p \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}$$



Richtungen nach der **U V W – Regel** mit der rechten Hand

Daumen	– Ursache	$\mathbf{v}_p$
Zeigefinger	– Vermittlung	$\mathbf{B}$
Mittelfinger (nach vorn)	– Wirkung	$\mathbf{F}$



Vermittlung bedeutet hierbei, die magnetische Flussdichte vermittelt, bewirkt aber **keine Energieveränderung**.

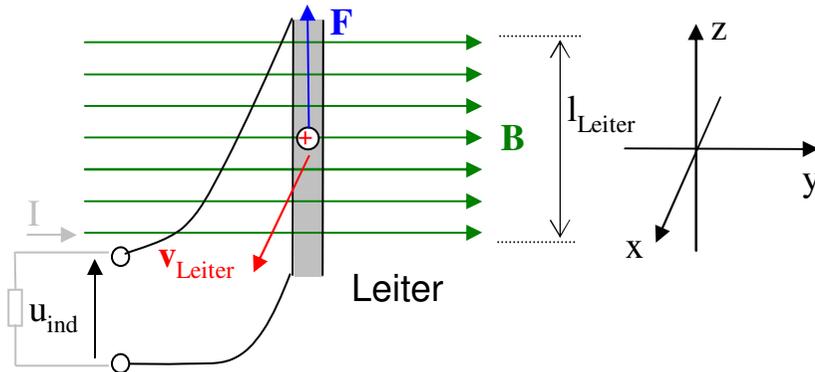
Das ist darin begründet, dass die **Kraft immer senkrecht** auf der momentanen Bewegungsrichtung steht.



## Das Induktionsgesetz

Das Induktionsgesetz tritt bei experimentellen Untersuchungen in zwei Formen auf. Die **Bewegungsinduktion** und die **Ruheinduktion**.

### Prinzip der Bewegungsinduktion



Richtung der Spannung  $u_{ind}$  nach der **Rechten-Hand-Regel**  
 Daumen in Flussrichtung, dann zeigen die **gekrümmten Finger** um den Fluss mit den Fingerspitzen zur **Zielklemme**.

Stromfluss  $\rightarrow$  Spannungsabfall umgekehrt

$$u_{ind} = - \int_{l_{Leiter}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}_{Leiter} = - \int_{l_{Leiter}} (\mathbf{v}_{Leiter} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{s}_{Leiter}$$

mit  $\mathbf{E} = \mathbf{F}/Q_p$   
 $\mathbf{F} = Q_p \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}$

### Induktionsgesetz Bewegungsinduktion

$$u_{ind} = - (\mathbf{v}_{Leiter} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}_{Leiter} = - v_x B_y l_z$$

**Lenz'sche Regel** ist unmittelbar erfüllt.



## Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung

In der Praxis **beide Vorgänge gleichzeitig**:

- Beim Motor → **Rückwirkung** → induzierte Gegenspannung
- beim Generator → **Rückwirkung** → Gegenkraft

**Anker** ist das Bauteil, dessen Wicklungen durch Bewegung im Feld induzierte Spannungen erhalten.

Bei großen Maschinen zwischen den Polschuhen der Hauptpole

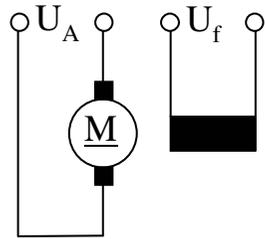
- Wendepole mit **Wendepolwicklungen** sowie
- in Nuten der Hauptpole **Kompensationswicklungen**.



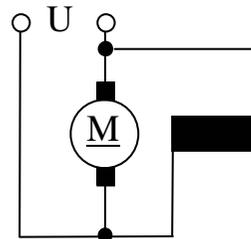
Elektrische Schaltung zum Betrieb der Gleichstrommaschine → drei grundsätzliche Varianten:

- **Nebenschlussmaschine** – Parallelschaltung von Anker- und Feldwicklung,
- **Reihenschlussmaschine** – Reihenschaltung von Anker- und Feldwicklung und
- **Verbundmaschine** – beide Schaltungsarten auf einmal (gleich- oder gegensinnig).

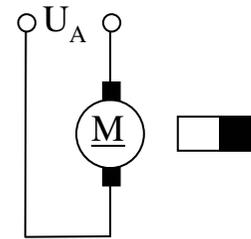
**Nebenschlussmaschine:** fremderregt, selbsterregt und permanenterregt



a) fremderregt

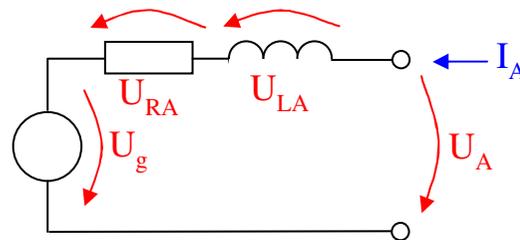


b) selbsterregt



c) permanenterregt

**Ersatzschaltung** des Ankerkreises: **Widerstand** und **Induktivität** der Wicklung sowie **Gegenspannung** als  $f(B_f, n)$



$U_g$  nach Erzeugerpfilsystem!

$$U_A = U_g + R_A I_A + L_A \frac{dI_A}{dt} \quad \text{Maschensatz nach Ersatzschaltung}$$

$$U_g = c_1 n \Phi_f \quad \text{aus } -u_{\text{ind}} = \mathbf{l} \cdot (\mathbf{v}_m \times \mathbf{B}_f) = U_g \quad \text{mit } c_1 = l_\Sigma 2\pi r_A B_f / \Phi_f$$

$$M_M = c_2 I_A \Phi_f \quad \text{aus } \mathbf{F}_m = I_A (\mathbf{l} \times \mathbf{B}_f) \quad \text{mit } c_2 = l_\Sigma r_A B_f / \Phi_f$$

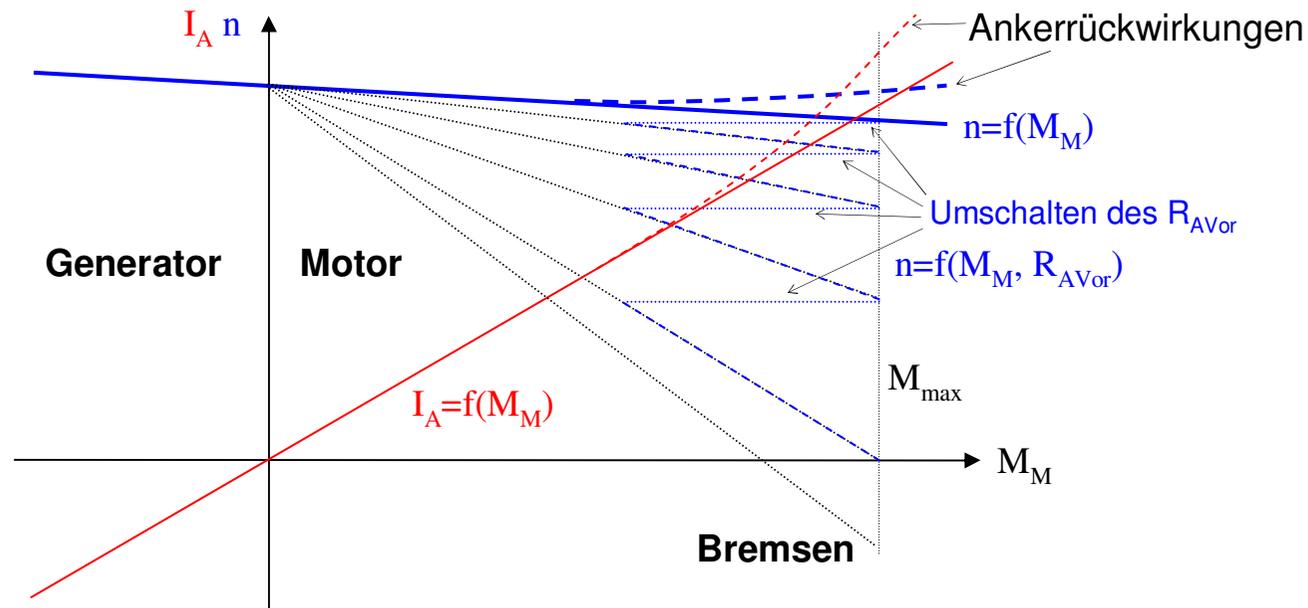
$$J \frac{d\omega}{dt} = M_M - M_{\text{Last}} \quad \text{Drehmomentengleichung (aus Mechanik).}$$

**Stationäre Betriebsverhalten** (alle  $d/dt = 0$ ) →

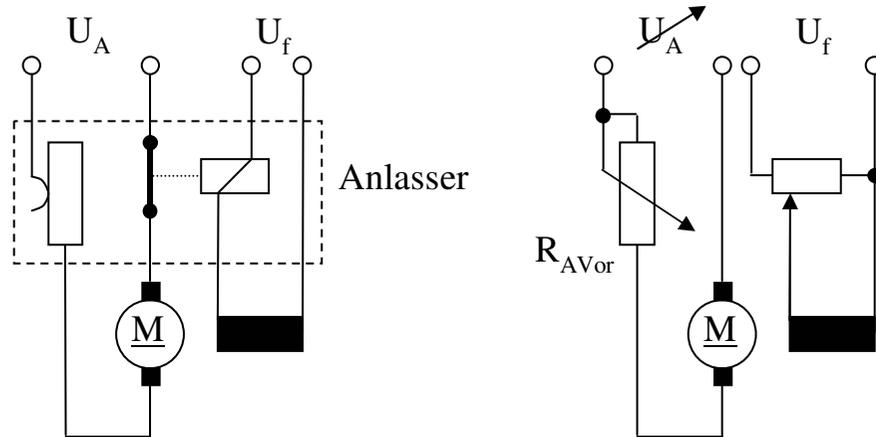
- Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie und
- Strom-Drehmoment-Kennlinie

$$n = \frac{U_A}{c_1 \Phi_f} - \frac{R_A}{c_1 c_2 \Phi_f^2} M_M \quad \text{damit wird} \quad n_0 = \frac{U_A}{c_1 \Phi_f} = n(M_M = 0)$$

$$I_A = \frac{M_M}{c_2 \Phi_f} \quad \text{bei} \quad M_M = M_{\text{Last}}$$



# Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung



Im **Anlasser** außer Anlasswiderständen **Kontrolle des Feldstromes** integriert

→ bei Ausfall → Ankerstrom unterbrochen.

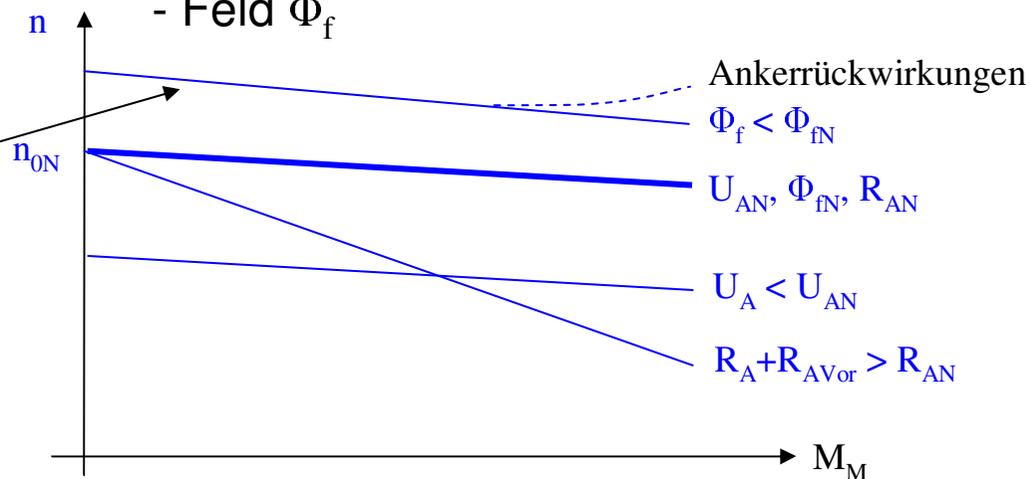
→ Außerdem → Vorwiderstand beim Abschalten auf höchsten Wert

**Veränderung der Drehzahl:**

- Ankerspannung  $U_A$ ,
- Widerstand  $R_{Ges} = R_A + R_{AVor}$  oder
- Feld  $\Phi_f$

**Ausgang: Nennwerte**

Kennlinienabfall und Ankerrückwirkungen stärker



## Analyse von Antriebsprozessen, deren Steuerung sowie von Prozessen der Energiewandlung

**Drehzahl** der Gleichstromnebenschlussmaschine →

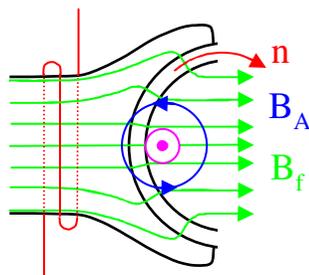
- relativ einfach in weitem Bereich veränderbar,
- maximale Drehzahl nur nach  $c_1$  und Anzahl Polpaare →  $> 10\,000$  U/min

**Haupteinsatzgebiet:** - Antriebe mit Drehzahlstellung und  
- sehr hohen Drehzahlen

**Steller** nutzen heute anstatt Widerstände Stromrichter

**Ersatz** immer mehr durch Frequenzumrichter und Asynchronmaschinen

**Ankerrückwirkungen** Erregerfeld auf einen Seite **geschwächt**, auf der anderen **verstärkt** (wegen Sättigung Verstärkung begrenzt).



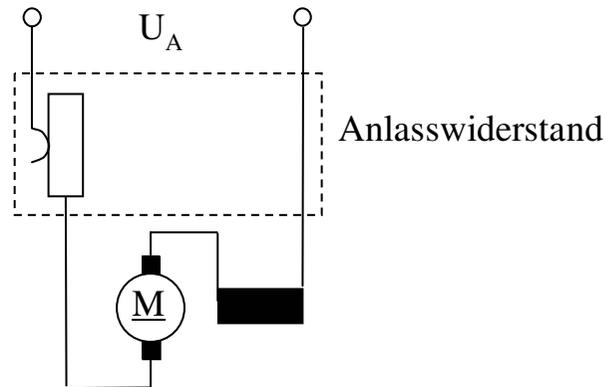
**Insgesamt** Feldschwächung → geringe Drehzahlerhöhung

Außerdem **verschiebt sich das Feld** etwas in Drehrichtung bei Generator, umgekehrt bei Motor → **Kompensation:**

- Kompensationswicklungen (folglich mit Ankerstrom) in Nuten der Polschuhe,
- Wendepolwicklungen zwischen Polschuhen (unterdrücken Felder zwischen Polen) ◀

**Reihenschlussmaschine** (Hauptschlussmaschine) →

Unterschied zum Nebenschluss → Erreger- **und** Ankerfeld ← **derselbe** Strom



wiederum Maschinenkonstante → Feld  $\Phi_f = c_3 I_A$

**Strom- Drehmoment- und die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie**

$$\text{damit wird } I_A = \sqrt{\frac{M_M}{c_2 c_3}} \quad \text{und} \quad n = \frac{U_A}{\sqrt{c_1^2 c_3 / c_2}} \frac{1}{\sqrt{M_M}} - \frac{R_A}{c_1 c_3}$$

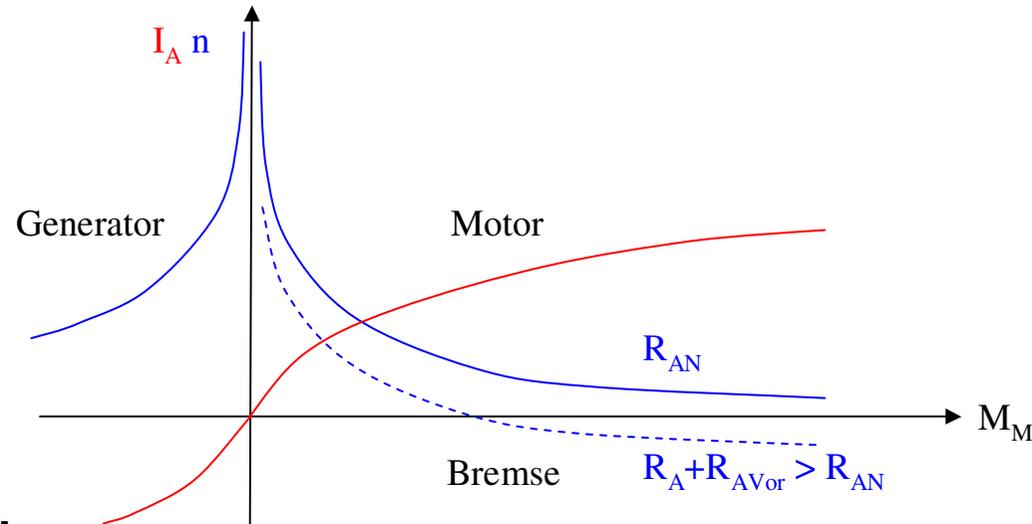
$$\text{d.h. } n_0(M_M \rightarrow 0) \rightarrow \infty$$

Reihenschlussmaschine **ohne Belastung** (mechanisch Leerlauf  $M_M = 0$ )

→ durchdrehen (Bei größeren Maschinen reichen Eigenverluste bei  $M_M = 0$  nicht)

→ sie können **ohne Last nicht betrieben** werden.

Strom bei Leerlauf → es **schützt keine Sicherung!**



### Reihenschlussmaschine

- gutes **Anlaufmoment** ( $n = 0$ )
- günstiger **Anlaufstrom**

} typisches „Reihenschlussverhalten“

**Drehzahlregelung** durch Verringerung von  $U_A$  oder Erhöhung von  $R_A + R_{AVor}$

**Drehrichtungsumkehr** durch Umpolen innerhalb der Reihenschaltung

**Bremsbetrieb** ( $n < 0$ ) ist hier mit **hohen Bremsmomenten und akzeptablem Strom**

### Anwendung insbesondere für Fahrzeuge

**Verbundmaschine** (Doppelschluss- oder Compoundmaschine) zwei Wicklungen (Nebenschlusswicklung und Reihenschlusswicklung)

- Linearisieren der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie oder
- Einstellen Steigung der Strom-Spannungs-Kennlinie des Generators

### Aufgabe 2.1.1

Die Angaben auf dem Typenschild einer fremderregten Gleichstrommaschine sind:

Anker	(A1 – A2)	220 V, 750 A,
Erregung	(F1 – F2)	20 V, 12 A,
	650 U/min,	150 kW.

Frage 1: Wie groß ist der Wirkungsgrad  $\eta$ ?

Frage 2: Wie groß ist das mechanische Drehmoment bei Nennbetrieb?

Ankerwicklung	A1 – A2 (alt A – B)
Wendepolwicklung	B1 – B2 (alt G – H)
Kompensationswicklung	C1 – C2 (wenn vorhanden mit den Wendepolen)
Reihenschlusswicklung	D1 – D2 (alt E – F)
Nebenschlusswicklung	E1 – E2 (alt C – D)
Wicklung Fremderregung	F1 – F2 (alt I – K)

### **Aufgabe 2.1.2**

Messung der Kennlinien einer fremderregten Gleichstrommaschine am Versuchsstand

#### **Versuchsaufbau:**

Der Motor, die Wirbelstrombremse (Motor-) bzw. eine Antriebsmaschine (Generatorbetrieb) und die Drehzahlmessung werden mechanisch und elektrisch nach Vorlage angeschlossen.

#### **Versuchsdurchführung:**

Nach Einstellen von Erregung und Ankerspannung bei Leerlauf (keine Bremse) werden in Stufen das Moment der Wirbelstrombremse erhöht, Drehzahl sowie Ankerstrom gemessen.

Bei Generatorbetrieb werden der Laststrom erhöht sowie Ankerstrom und -spannung gemessen. Darstellen der Kennlinien  $n = f(M_M)$  und  $I_A = f(M_M)$  bzw.  $U_A = f(I_A)$ .

Beachten Sie, dass der Nennankerstrom nicht überschritten wird!

- 0 Kennlinie für Nennerregung und Nennankerspannung
- 1 Kennlinie für Nennerregung und 70 % Ankerspannung
- 2 Kennlinie für 80 % Erregerstrom und Nennankerspannung
- 3 Generatorkennlinie bei Nenndrehzahl (konstant halten!) und Nennerregung

#### **Zusammenfassung der Versuchsergebnisse:**

- 1 Die Kennlinien entsprechen den theoretischen Erwartungen.
- 2 Bei geringerer Ankerspannung liegt die Kennlinie parallel mit geringerer Drehzahl.
- 3 Bei verringertem Erregerstrom folgt eine höhere Drehzahl mit erhöhtem Strom.
- 4 Die Generatorspannung fällt mit steigendem Ankerstrom.