

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

Kapitel 2: Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Inhalt Kapitel 4 : Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

- 4.1 Schaltbild und Systemgleichungen
- 4.2 Widerstandsgesteuerter Betrieb
- 4.3 Spannungsgesteuerter Betrieb
- 4.4 Betriebsbereiche
- 4.5 Reihenschlussmaschine
- 4.6 Arbeitsmaschinen

4.1 Schaltbild und Systemgleichungen

Zusammenfassung aus Kapitel 3

Ankerspannungsgleichung: $U_A = U_{\text{ind}} + R_A \cdot I_A + L_A \cdot dI_A/dt$

Drehmomentkonstante: $k_i = c \cdot \Phi$ der magn. Fluss Φ wird durch den Erregerstrom I_F eingestellt

Inneres Drehmoment: $M_i = k_i \cdot I_A$ Wellenmoment, stationär: $M_W = M_i - M_S$

Induzierte Spannung: $U_{\text{ind}} = k_i \cdot \omega$ mit ω [rad/s] = N_W [Upm] $\cdot \pi/30$

Leistungsbilanz: $U_{\text{ind}} \cdot I_A = M_i \cdot \omega$ innere Leistung

Momentenbilanz: $M_i = M_W + M_S + J_{\text{Ges}} \cdot d\omega/dt$ $M_W =$ Lastmoment an der Welle
 $M_S =$ Schleppmoment GM
 $J_{\text{Ges}} =$ Trägheitsmoment

4.1 Schaltbild und Systemgleichungen

Beispieldaten für eine fremderregte 4kW-Maschine

Erregerkreis

$$U_{F,N} = 200 \text{ V}$$

$$I_{F,N} = 0.8 \text{ A}$$

$$R_F = 250 \text{ } \Omega$$

$$L_F = 10 \text{ H}$$

$$P_{Cu,F} = 160 \text{ W}$$

$$T_F = 40 \text{ ms}$$

Ankerkreis

$$U_{A,N} = 200 \text{ V}$$

$$I_{A,N} = 25 \text{ A}$$

$$R_A = 1.2 \text{ } \Omega$$

$$L_A = 4 \text{ mH}$$

$$P_{Cu,A} = 750 \text{ W}$$

$$T_A = 3.3 \text{ ms}$$

Auslegung auf halbe Spannung

$$U_{A,N} = 100 \text{ V}$$

$$I_{A,N} = 50 \text{ A}$$

} 1/2 Windungszahl N

$$R_A = 0.3 \text{ } \Omega$$

$$L_A = 1 \text{ mH}$$

} 1/4 Impedanz

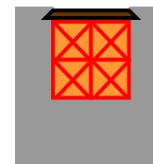
$$P_{Cu,A} = 750 \text{ W}$$

$$T_A = 3.3 \text{ ms}$$

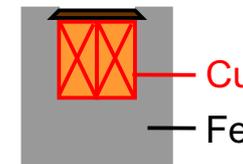
} unverändert

$$\text{ohm'sche Verluste: } P_{Cu} = I^2 \cdot R$$

Wicklung auf halbe Windungszahl N geändert:
doppelter Querschnitt A_{Cu} , halbe Drahtlänge l_{Cu}



N = 4



N = 2

$$R_{Cu} = \frac{1}{\sigma_{Cu}} \cdot \frac{l_{Cu}}{A_{Cu}}$$

$$L_{Wicklung} \sim N^2$$

4.1 Schaltbild und Systemgleichungen

Beispieldaten für eine fremderregte 4kW-Maschine

Erregerkreis

$$U_{F,N} = 200 \text{ V}$$

$$I_{F,N} = 0.8 \text{ A}$$

$$R_F = 250 \text{ } \Omega$$

$$L_F = 10 \text{ H}$$

$$P_{Cu,F} = 160 \text{ W}$$

$$T_F = 40 \text{ ms}$$

Ankerkreis

$$U_{A,N} = 200 \text{ V}$$

$$I_{A,N} = 25 \text{ A}$$

$$R_A = 1.2 \text{ } \Omega$$

$$L_A = 4 \text{ m H}$$

$$P_{Cu,A} = 750 \text{ W}$$

$$T_A = 3.3 \text{ ms}$$

Leistungsbilanz

$$P_{A,N} = 5.00 \text{ kW}$$

$$P_{Cu,A} = 750 \text{ W}$$

$$\Rightarrow P_{i,N} = 4.25 \text{ kW} \text{ "innere Leistung"}$$

$$P_{FE} + P_{\text{Schlepp}} = 250 \text{ W}$$

$$\Rightarrow P_{w,N} = 4.00 \text{ kW} \text{ "Wellenleistung"}$$

$$P_{Cu,F} = 160 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_w}{P_{A,N} + P_{Cu,F}} = 77.5 \%$$

$T_F \gg T_A$: Dynamische Regelung $\rightarrow T_A$

$P_{Cu,F} < P_{Cu,A}$: Teillastbetrieb $\rightarrow I_A$ verringern

 Drehmoment über
Ankerstrom einstellen!

4.1 Schaltbild und Systemgleichungen

Beispieldaten für eine fremderregte 4kW-Maschine

Typenschild:

$$U_{A,N} = 200 \text{ V}$$
$$I_{A,N} = 25 \text{ A}$$

} Induzierte Spannung berechnen:
 $U_{\text{ind},N} = U_{A,N} - R_A \cdot I_{A,N} = 170 \text{ V}$

$$P_N = 4 \text{ kW}$$
$$N_N = 1500 \text{ Upm}$$

} Nenndrehmoment (Welle) berechnen:
 $P_N = M_N \cdot \omega_N = M_N \cdot N_N \cdot \frac{\pi}{30} \Rightarrow M_N = 25.46 \text{ Nm}$

Messung:

$$R_A = 1.2 \Omega$$

Drehmomentkonstante:

$$U_{\text{ind},N} = c \cdot \Phi \cdot \omega_N = c \cdot \Phi \cdot N_N \cdot \frac{\pi}{30}$$

$$\Rightarrow c \cdot \Phi = k_i = 1.08 \text{ Nm/A}$$

$$M_N = c \cdot \Phi \cdot I_{A,N}$$

$$\Rightarrow c \cdot \Phi = k = 1.02 \text{ Nm/A} \Rightarrow \text{Rechenfehler???$$

Kontrollrechnung:

$$\text{Innere Leistung: } P_i = U_{\text{ind},N} \cdot I_{A,N} = 4.25 \text{ kW}$$

(enthält 250W Eisen- und Schleppverluste)

$$\text{daraus: } M_{iN} = 27.06 \text{ Nm und } k_i = 1.08 \text{ Nm/A}$$

4.1 Schaltbild und Systemgleichungen

Beispieldaten für eine fremderregte 4kW-Maschine

Typenschild:

$$U_{A,N} = 200V$$

$$I_{A,N} = 25A$$

$$P_N = 4kW$$

$$N_N = 1500Upm$$

Messung:

$$R_A = 1.2\Omega$$

Leerlaufdrehzahl bei Nennspannung:

Schleppmoment berechnen:

$$\left. \begin{array}{l} M_{iN} = 27.06Nm \\ M_N = 25.46Nm \end{array} \right\} M_s = 1.6Nm \Rightarrow M_s / k = 1.48A = I_{A,0}$$

$$U_{ind,0} = U_{A,N} - R_A \cdot I_{A,0} = 198.2V$$

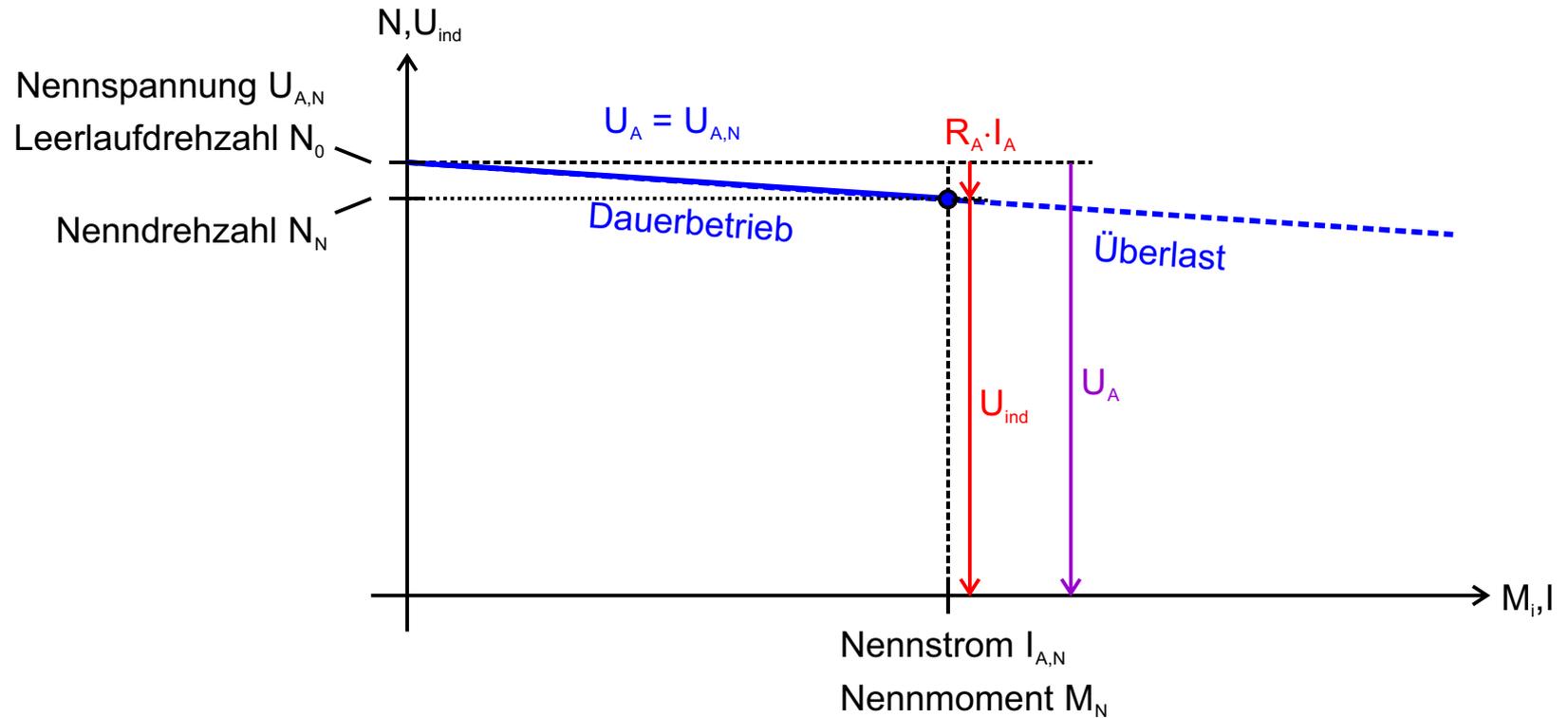
$$N_{LL} = \frac{U_{ind,0}}{U_{ind,N}} \cdot N_N = 1749Upm$$

4.2 Widerstandsgesteuerter Betrieb

Kennlinie Motorbetrieb Grunddrehzahlbereich - Spannung fest

Ankerspannungsgleichung

$$\text{stationär: } U_A = U_{\text{ind}} + R_A \cdot I_A$$



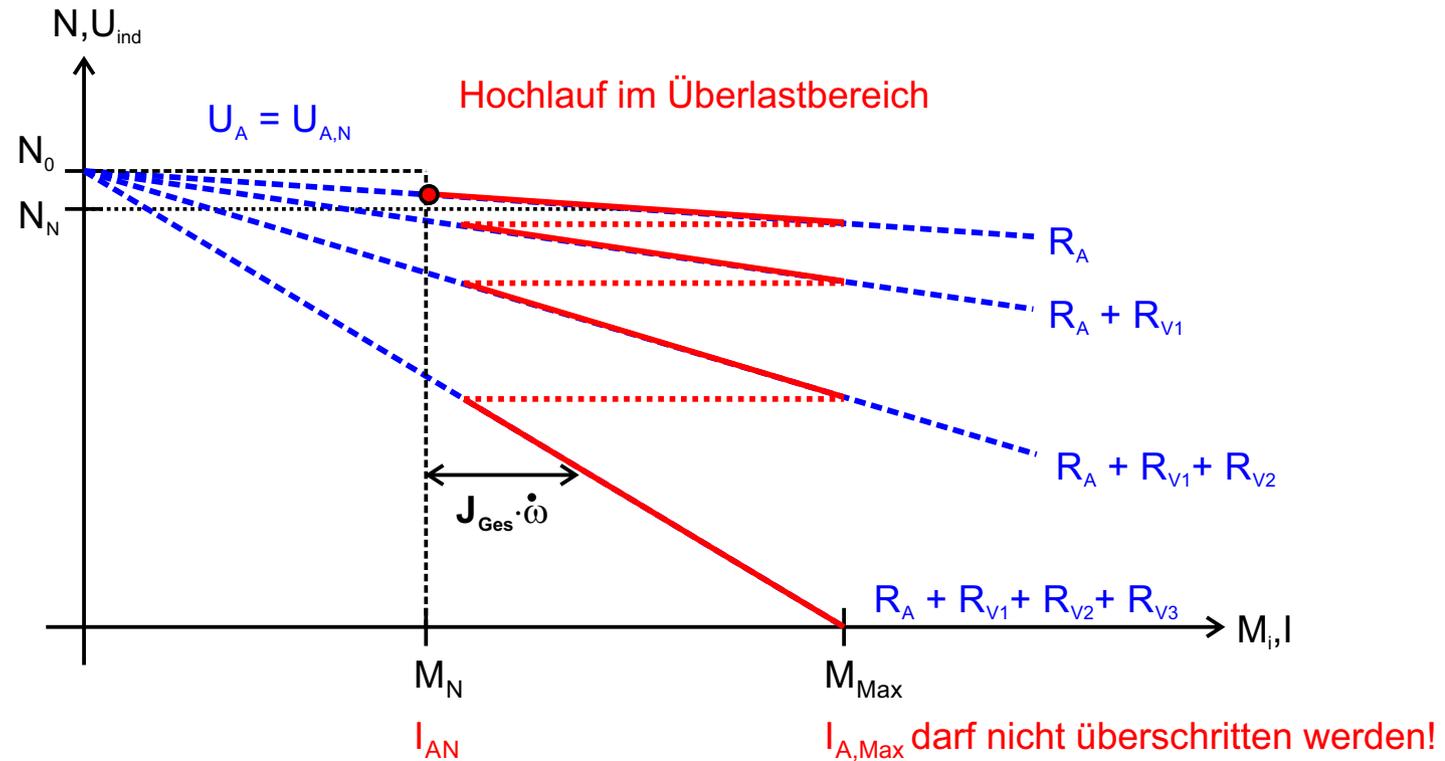
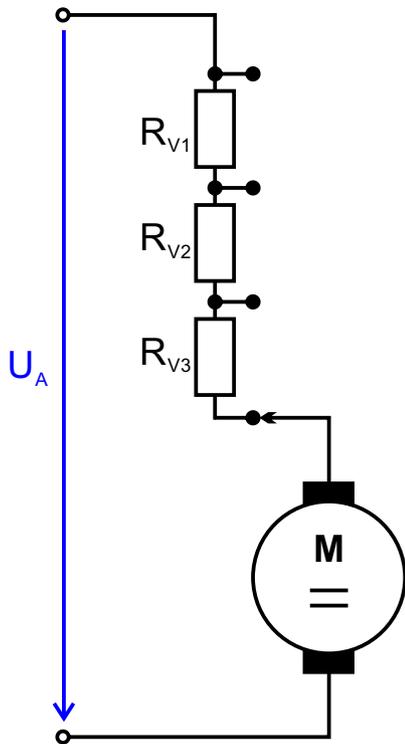
4.2 Widerstandsgesteuerter Betrieb

Hochlaufen mit Vorwiderständen - Spannung fest

Ankerspannungsgleichung

stationär: $U_A = U_{\text{ind}} + (R_A + R_V) \cdot I_A$

- Hochlaufen
- ⋯ Umschalten
- stationärer Betriebspunkt

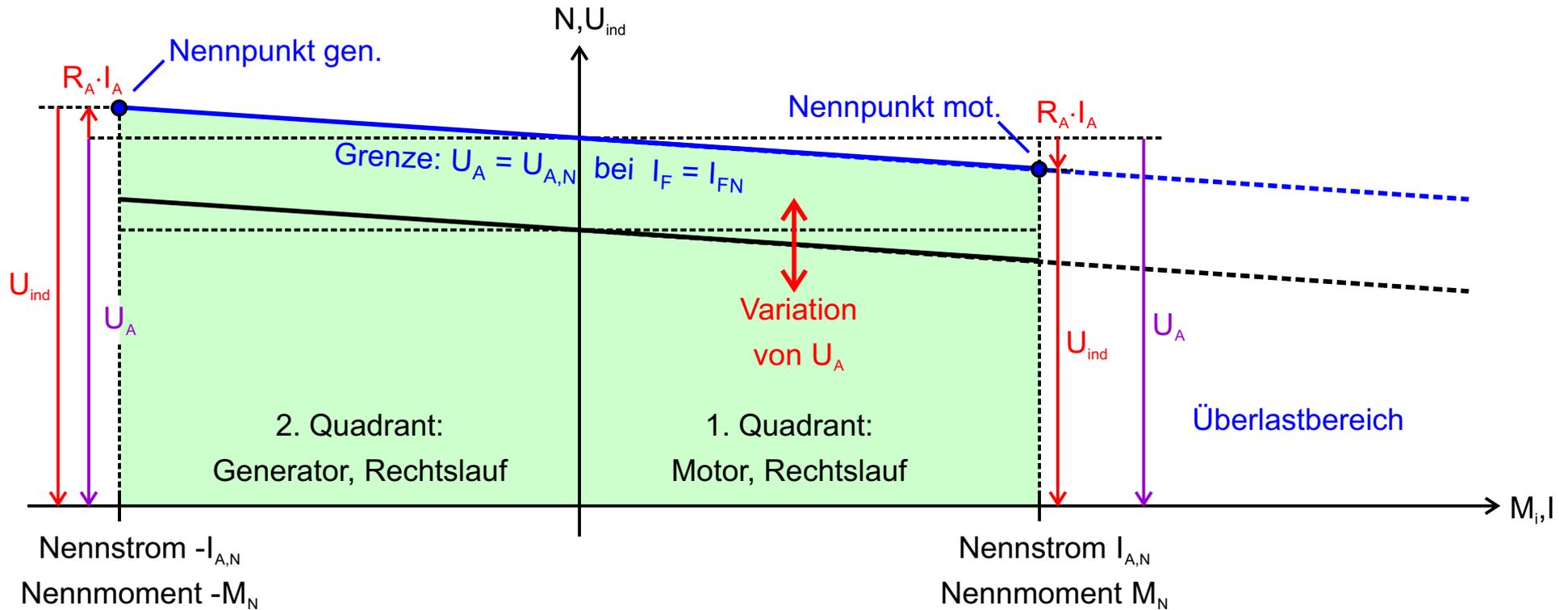


4.3 Spannungsgesteuerter Betrieb

Kennlinien Motor/Generatorbetrieb - Spannung einstellbar

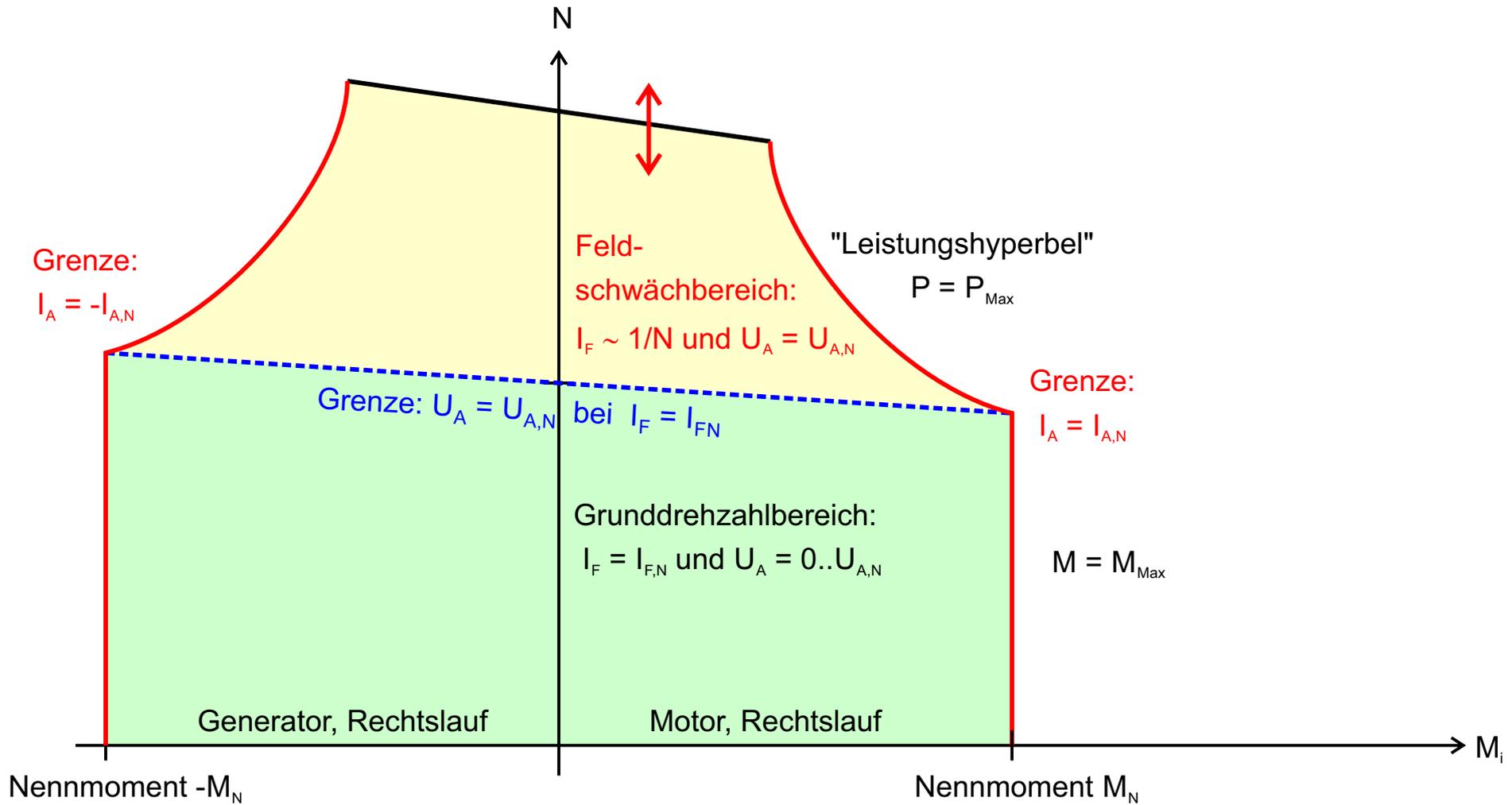
Ankerspannungsgleichung

stationär: $U_A = U_{\text{ind}} + R_A \cdot I_A$



4.3 Spannungsgesteuerter Betrieb

Kennlinien Feldschwächbetrieb - Spannung einstellbar



4.4 Betriebsbereiche

Spannungsgesteuerter Betrieb \leftrightarrow Stromregelung

Spannungsgesteuerter Betrieb

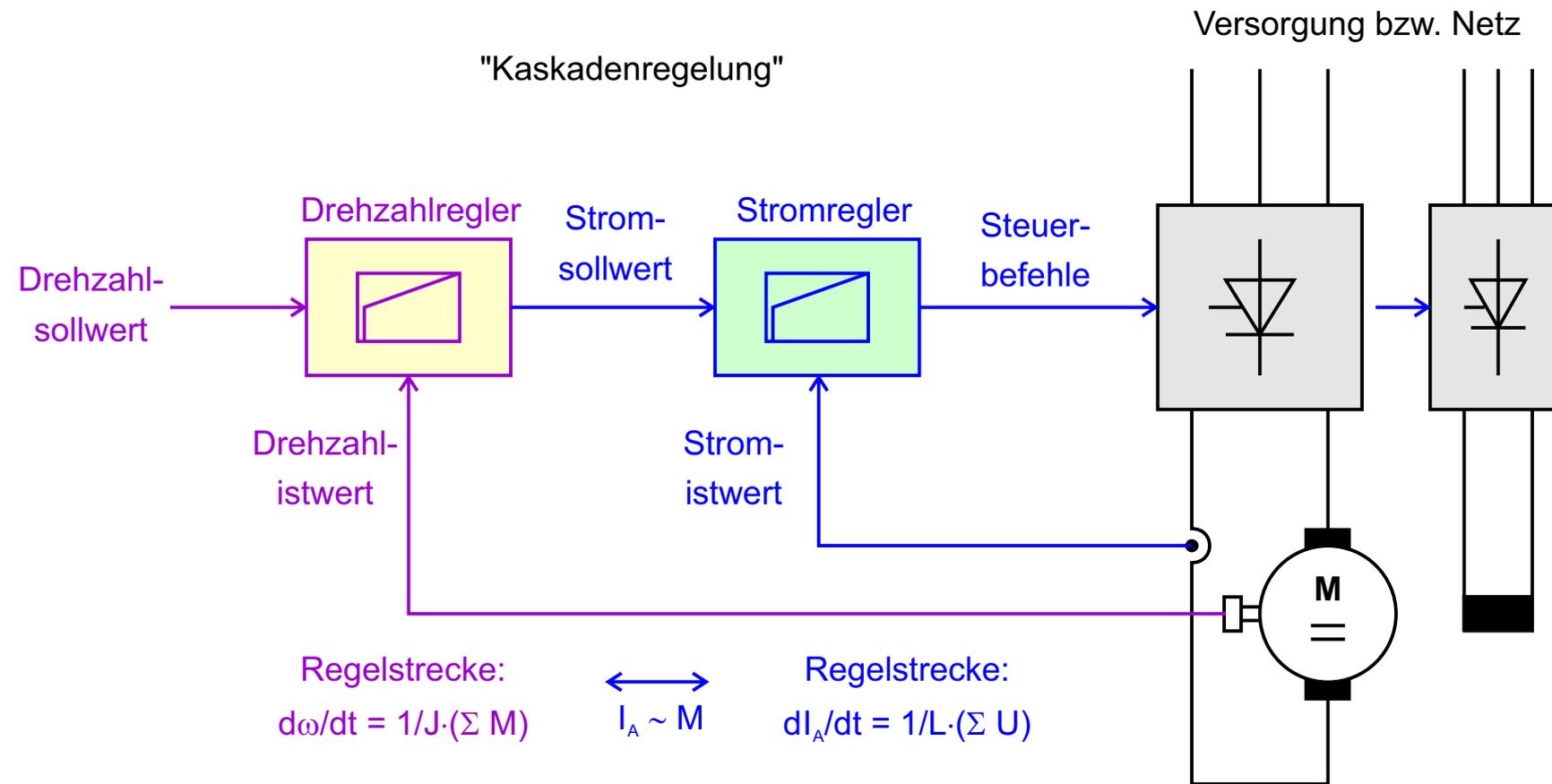
- Stationär: Drehzahl ist lastabhängig
- Transient: Systemverhalten bestimmt Betriebspunktänderung (Einschwingvorgänge etc.)
- *Kennliniendarstellung: Drehzahl über Drehmoment*

Strom geregelter Betrieb

- Grundprinzip: Strom und damit Drehmoment werden eingepreßt
- Stationär: Drehzahl kann fest eingepreßt werden (überlagerter Drehzahlregler)
- Transient: Drehmoment wird kontrolliert, hochdynamische Regelung möglich
- Leistungselektronisches Stellglied ("Umrichter") zwingend erforderlich
- *Kennliniendarstellung: Drehmoment über Drehzahl*

4.4 Betriebsbereiche

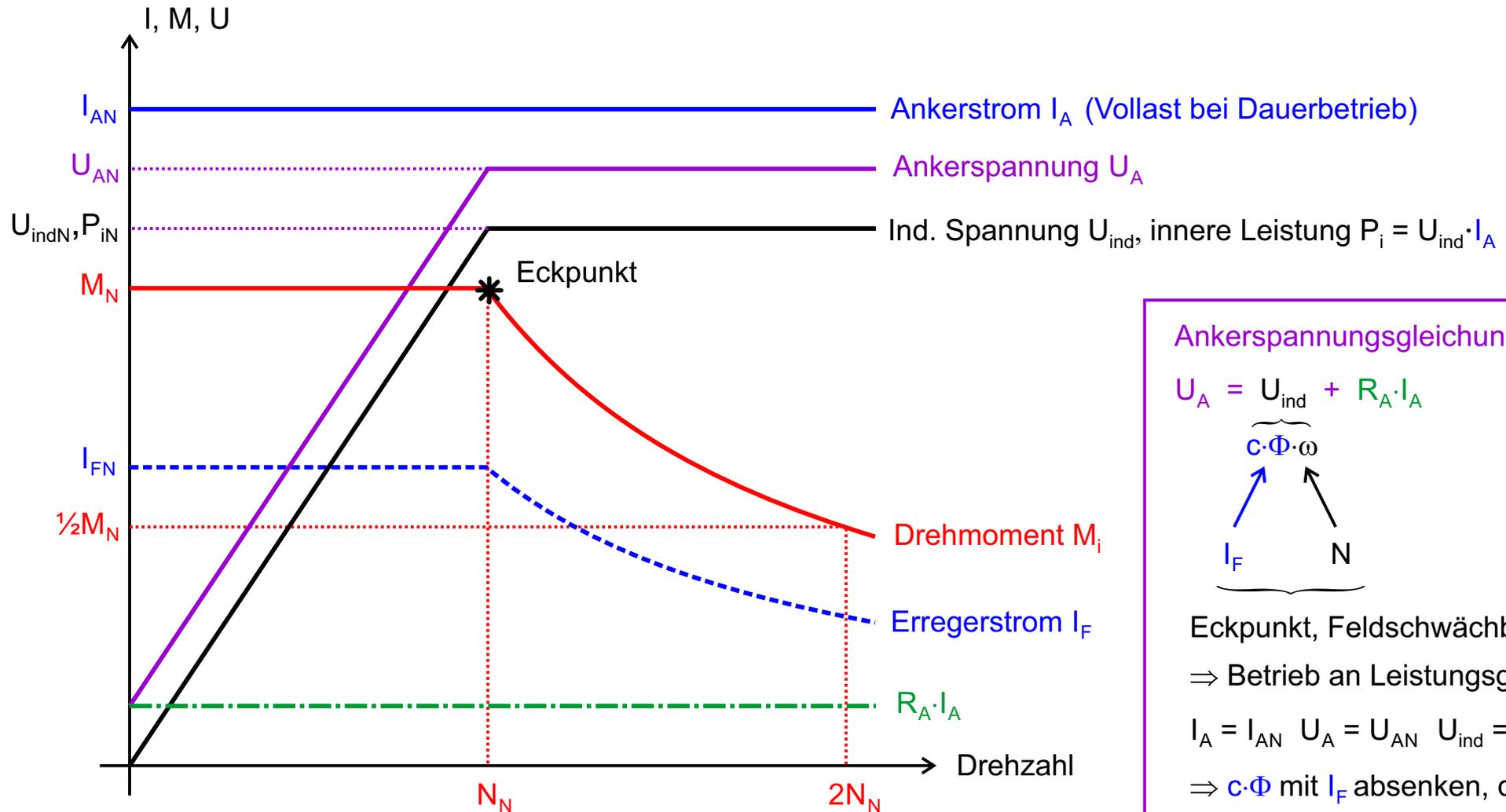
Grundstruktur drehzahl geregelter elektrischer Antrieb mit GM



mehr dazu in Kapitel 5

4.4 Betriebsbereiche

Feldschwächbetrieb: Erklärung



Ankerspannungsgleichung:

$$U_A = U_{ind} + R_A \cdot I_A$$

$$\underbrace{c \cdot \Phi \cdot \omega}_{\substack{I_F \quad N}}$$

Eckpunkt, Feldschwächbereich

⇒ Betrieb an Leistungsgrenze:

$$I_A = I_{AN} \quad U_A = U_{AN} \quad U_{ind} = U_{indN}$$

⇒ $c \cdot \Phi$ mit I_F absenken, damit

N bzw. ω wachsen kann

4.4 Betriebsbereiche

Feldschwächbetrieb: Nomenklatur

Beispiel:

Traktionsmotor Elektrofahrzeug

Nenn Daten

$$M_N = 160 \text{ Nm}$$

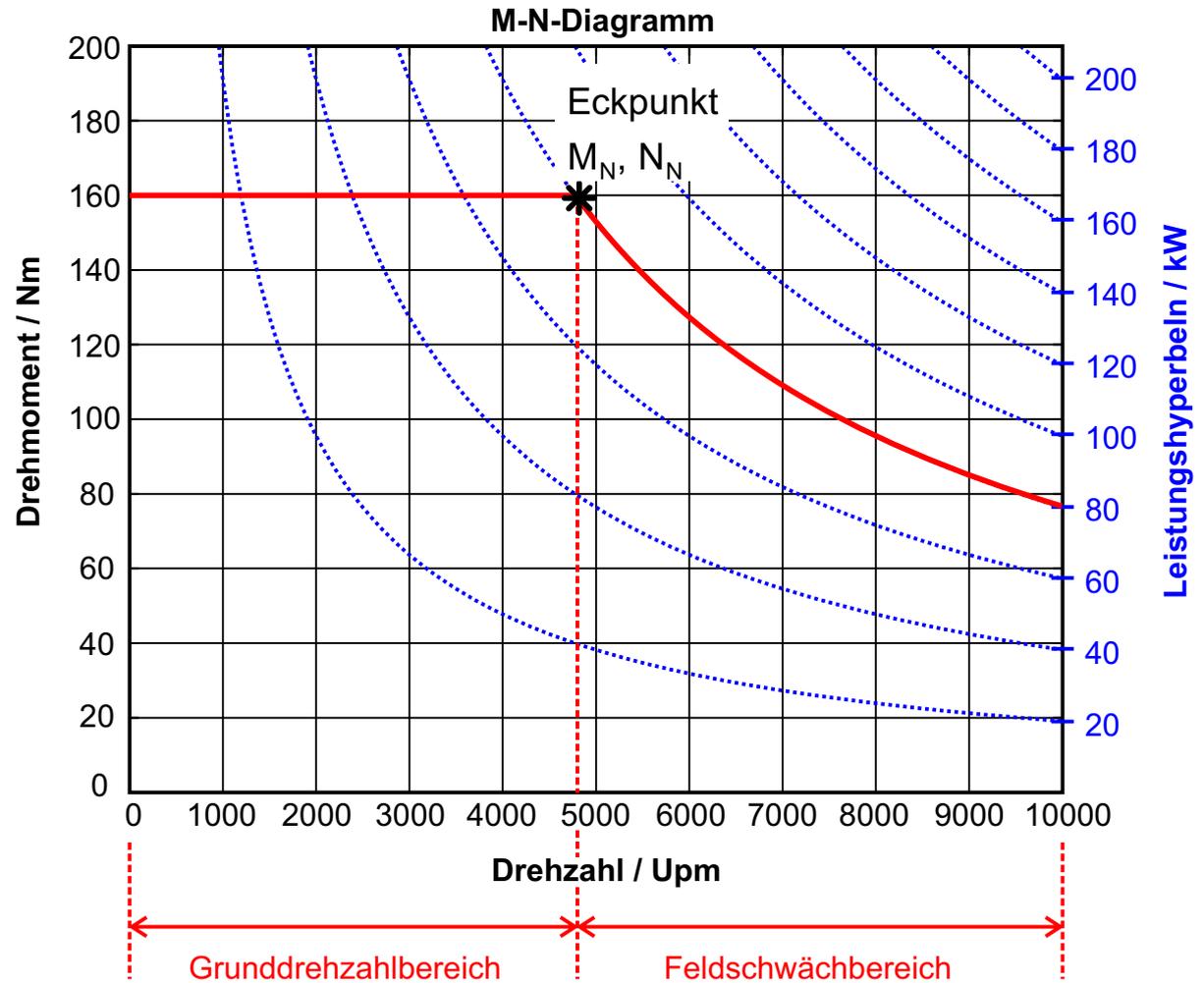
$$N_N = 4800 \text{ Upm}$$

$$P_N = 80 \text{ kW}$$

Betriebsbereichsgrenzen:

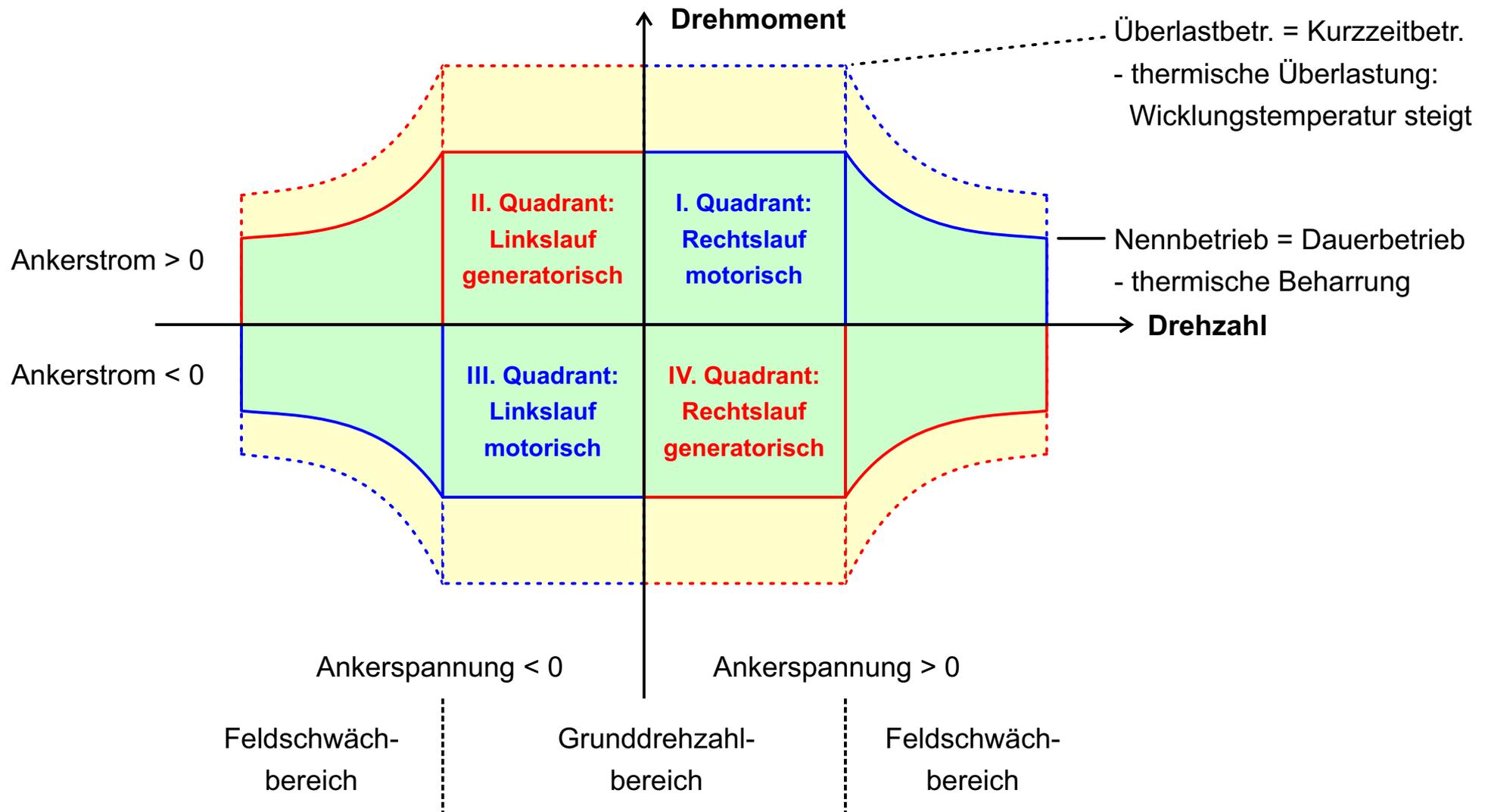
$$M_{\text{Max}} = 1.5 \cdot M_N \text{ (nicht eingezeichnet)}$$

$$N_{\text{Max}} = 10.000 \text{ Upm}$$



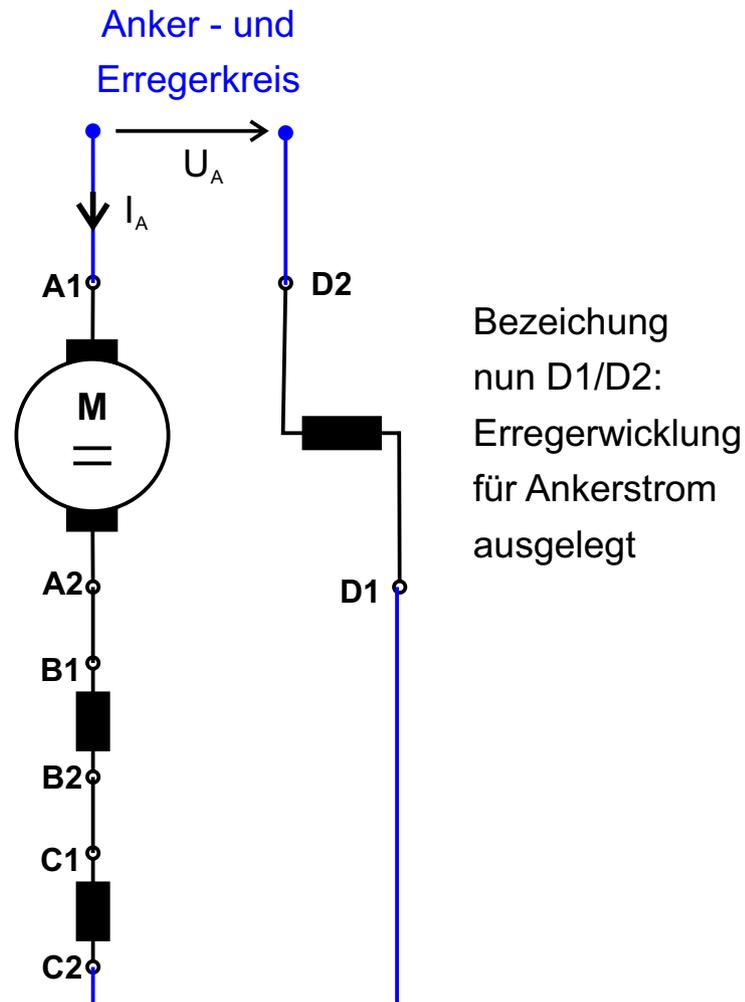
4.4 Betriebsbereiche

Betriebsbereiche der Maschine im 4-Quadrantbetrieb



4.5 Reihenschlussmaschine

Schaltbild und Drehmoment



- Erregerstrom = Ankerstrom
mit Näherung Luftspaltgerade:
 $\Rightarrow \Phi \sim I_A$
- Ankerstrom: Lorentzkräfte im Anker erzeugen ein Drehmoment
mit $M_i \sim I_A$ und $M_i \sim \Phi$
 $\Rightarrow M_i \sim I_A^2$
- d.h. M_i ist unabhängig vom Stromvorzeichen

4.5 Reihenschlussmaschine

Betriebsverhalten

Inneres Drehmoment: $M_i = c \cdot \Phi(I_A) \cdot I_A$

Induzierte Spannung: $U_{\text{ind}} = c \cdot \Phi(I_A) \cdot \omega$

Ankerspannungsgl.: $U_A = U_{\text{ind}} + R_A \cdot I_A$

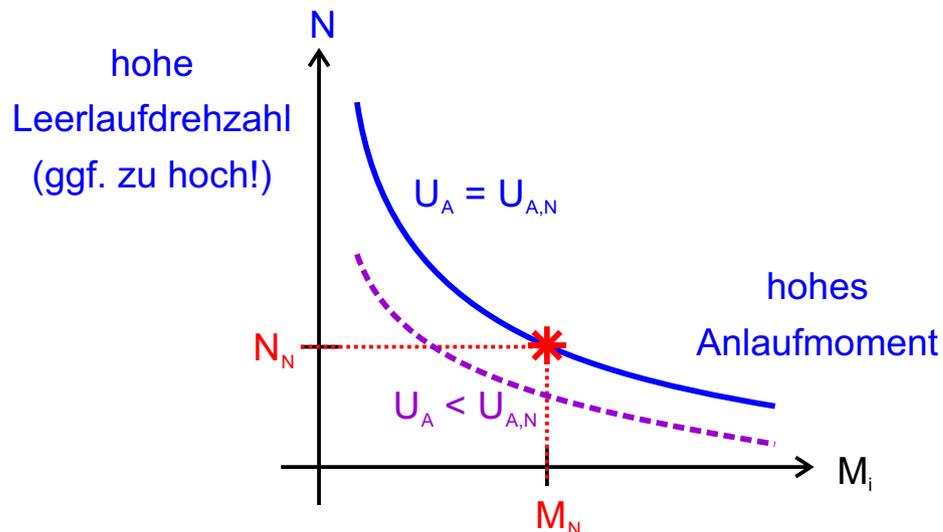
$$\left. \begin{array}{l} M_i = c \cdot \Phi(I_A) \cdot I_A \\ U_{\text{ind}} = c \cdot \Phi(I_A) \cdot \omega \end{array} \right\} c \cdot \Phi(I_A) = c_R \cdot I_A \Rightarrow$$

$$M_i = c_R \cdot I_A^2 \quad (1)$$

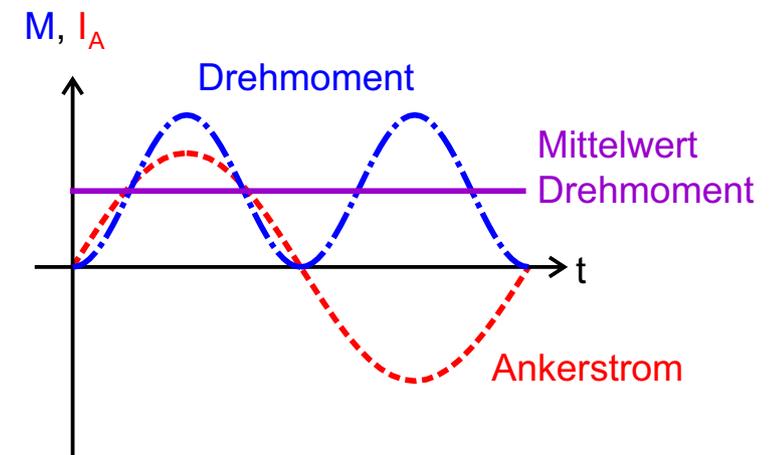
$$U_{\text{ind}} = c_R \cdot I_A \cdot \omega \quad (2)$$

$$\text{mit (1) und (2)} \Rightarrow \omega = \frac{U_A}{\sqrt{M_i \cdot c_R}} - \frac{R_A}{c_R} \quad (3)$$

Drehmomentcharakteristik



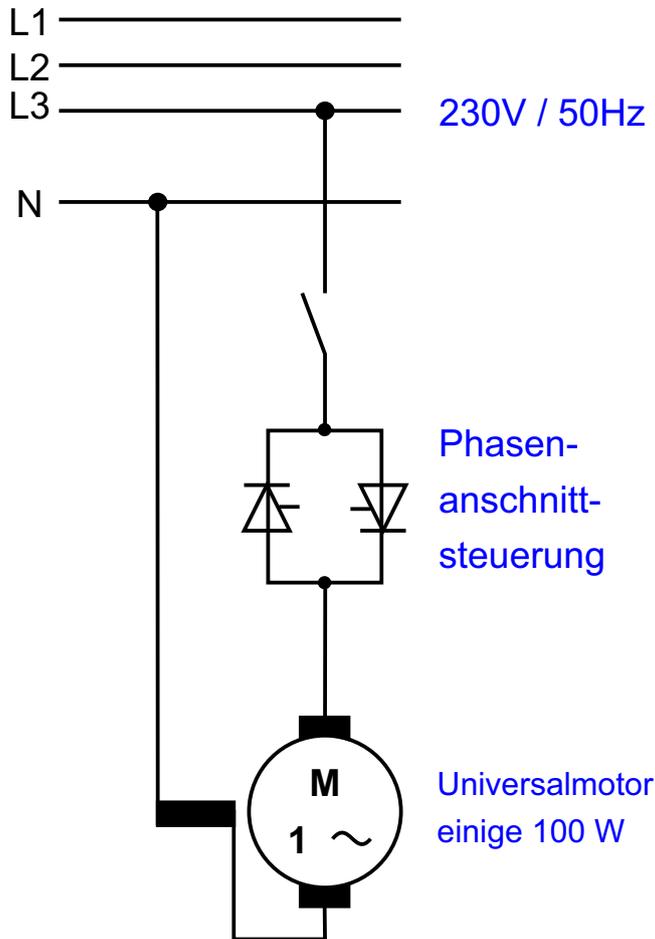
Wechselstrombetrieb



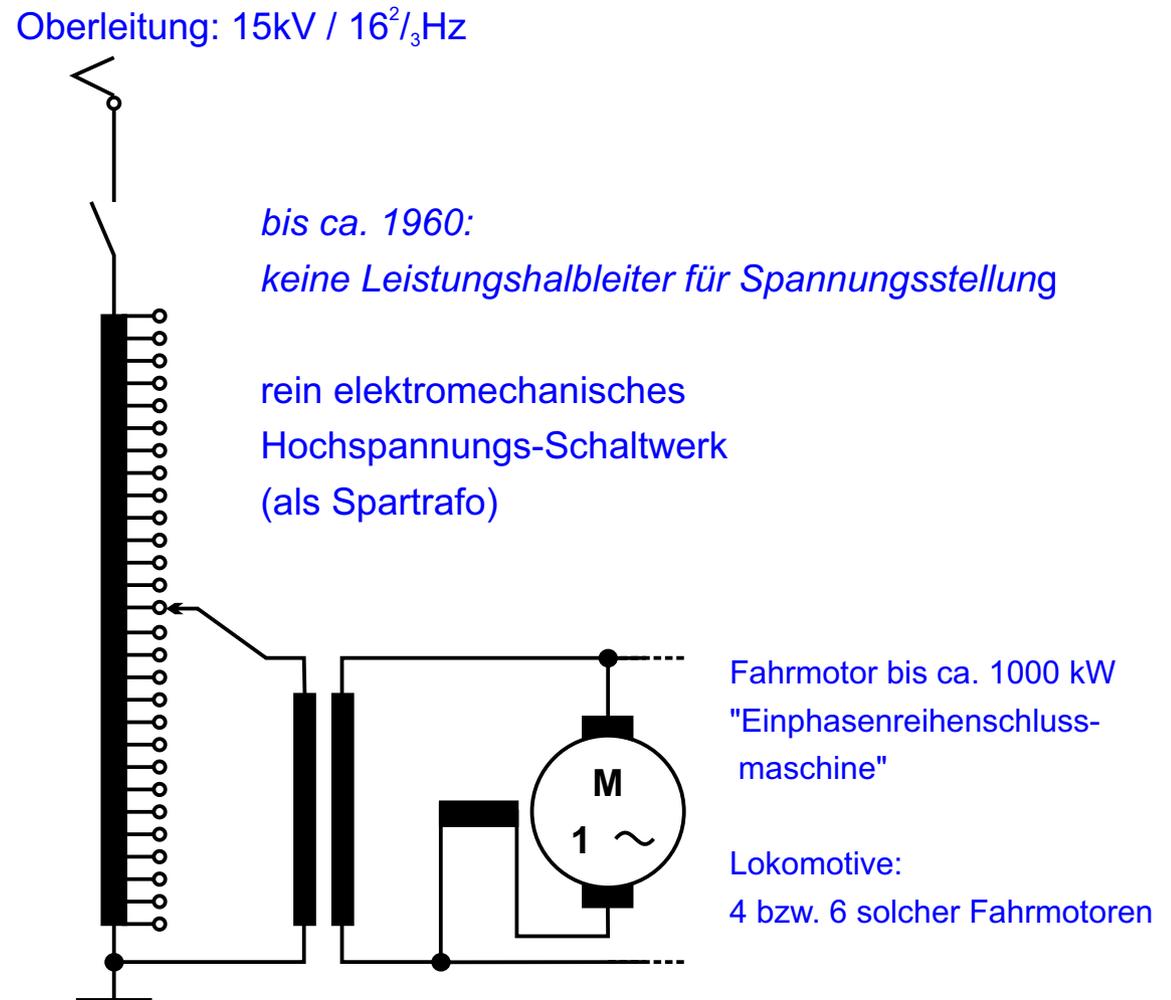
4.5 Reihenschlussmaschine

Reihenschlussmaschine: elektronische bzw. elektromechanische Spannungssteuerung

Haushaltsgeräte, Elektrowerkzeuge

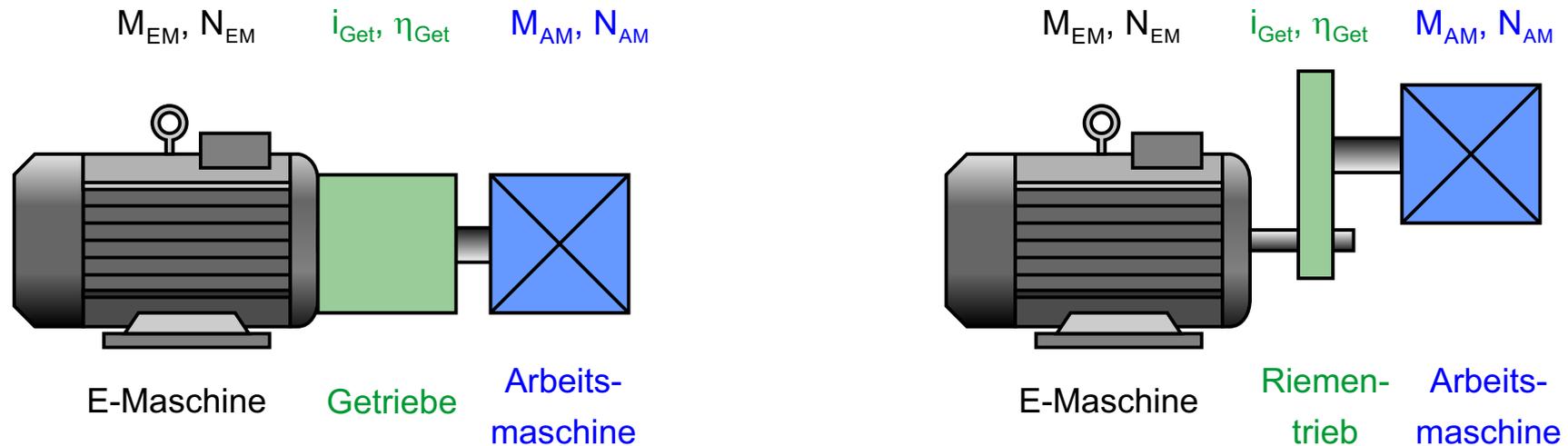


Elektrische Triebfahrzeuge (Bahntechnik)



4.6 Arbeitsmaschinen

Getriebe und Riementrieb



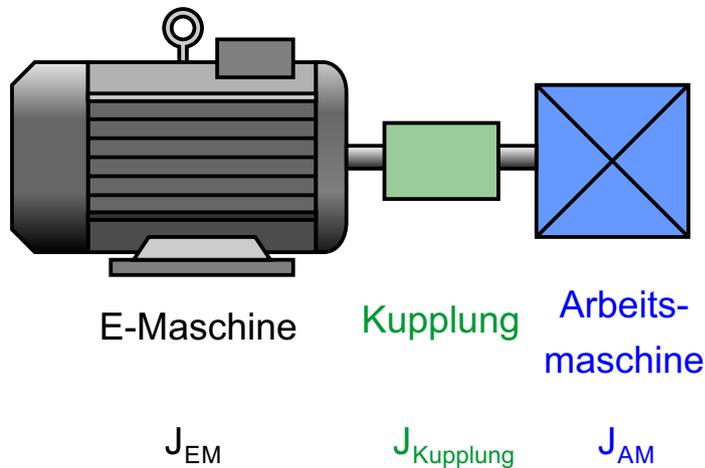
- meist: "Reduziergetriebe", d.h. Übersetzung ins langsame
- entsprechend größeres Drehmoment

$$\Rightarrow N_{AM} = N_{EM} / i_{Get}$$

$$\Rightarrow M_{AM} = M_{EM} \cdot i_{Get} \cdot \eta_{Get}$$

4.6 Arbeitsmaschinen

Dynamischer Betrieb: Hochlauf



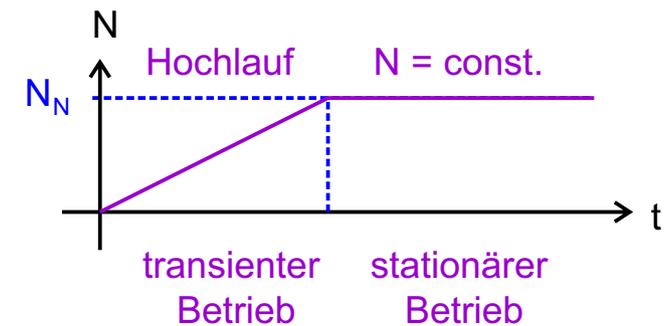
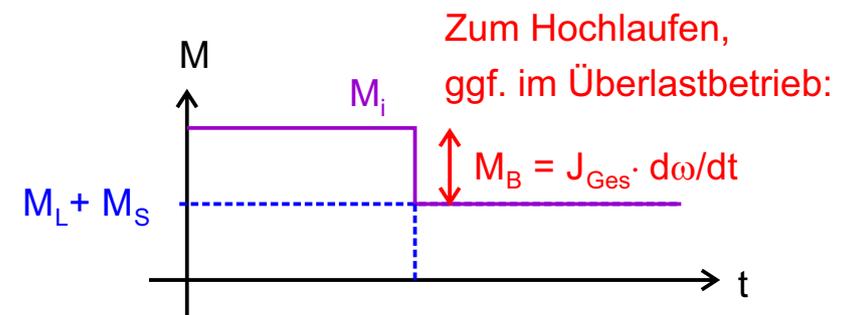
- hier: Arbeitsmaschine 1:1 mit E-Maschine gekoppelt.
- Kupplung erforderlich, sonst Lagerung überbestimmt (beide Wellen sind nie exakt ausrichtbar)

Trägheitsmoment Antrieb gesamt:

$$J_{Ges} = J_{EM} + J_{Kupplung} + J_{AM}$$

Momentenbilanz:

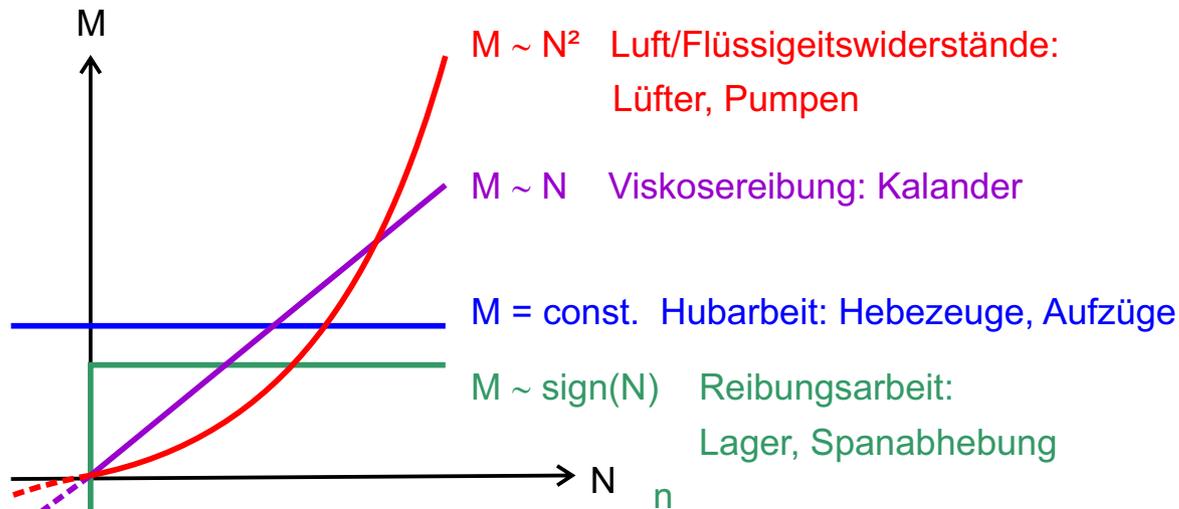
$$M_i = M_L + M_S + J_{Ges} \cdot d\omega/dt$$



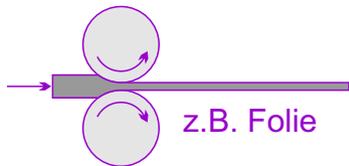
4.6 Arbeitsmaschinen

Kennlinien von Arbeitsmaschinen und Traktionsantrieben

Arbeitsmaschinen



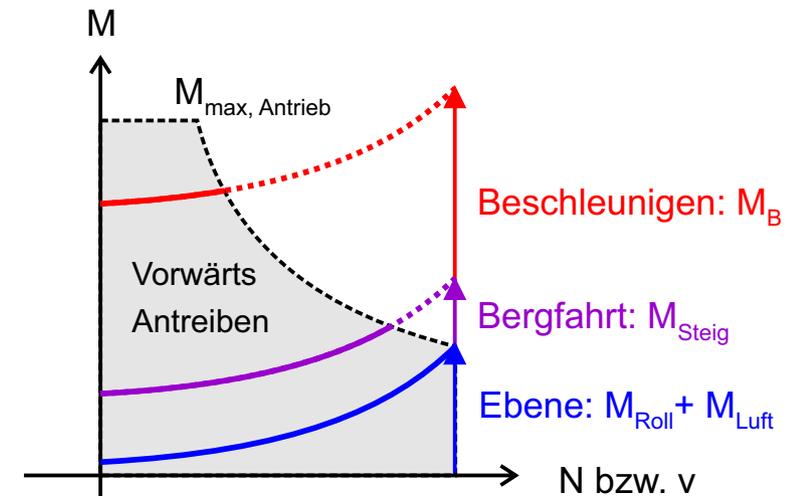
Kalander



Spanabhebende Werkzeugmaschine



Traktionsantriebe

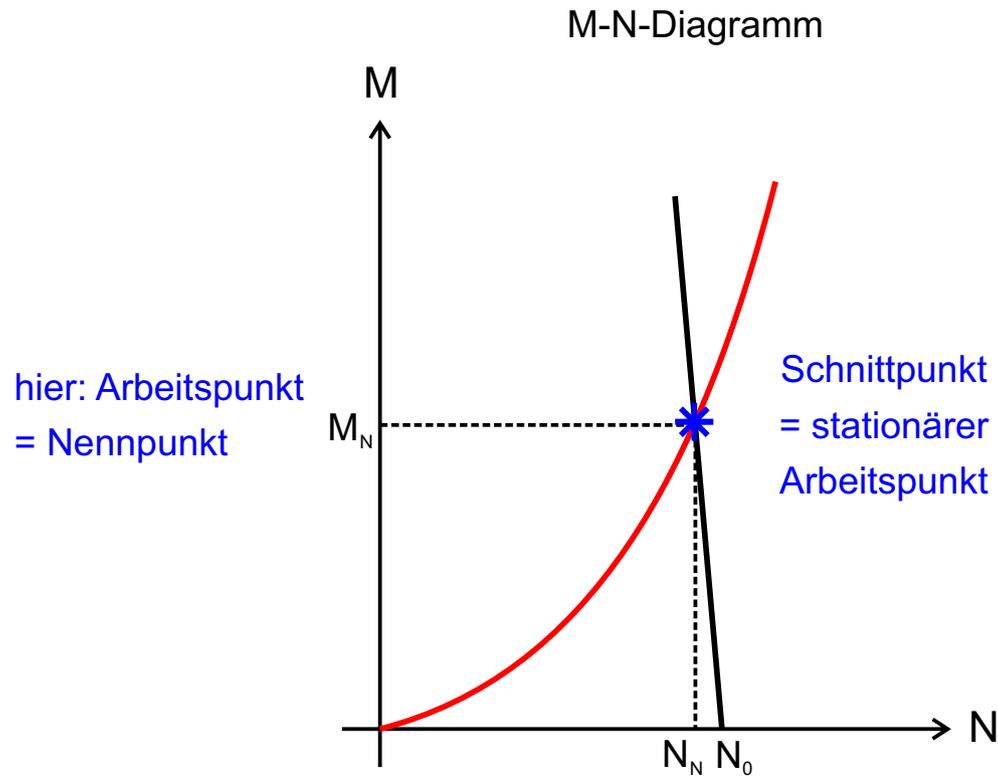


Dynamischer Betrieb
ist auslegungsrelevant:

- stationär: $M_{\text{Roll}} + M_{\text{Luft}} + M_{\text{Steig}}$
- transient: M_B

4.6 Arbeitsmaschinen

Stationäre Arbeitspunkte



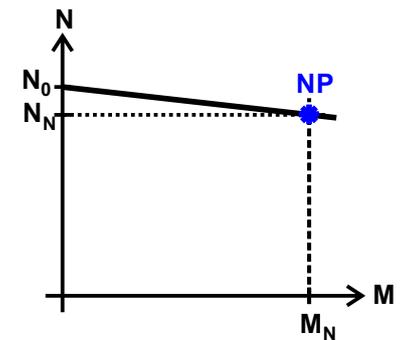
Beispiel: Pumpenkennlinie

Kennlinie fremderregte Gleichstrommaschine



Abszisse \leftrightarrow Ordinate getauscht

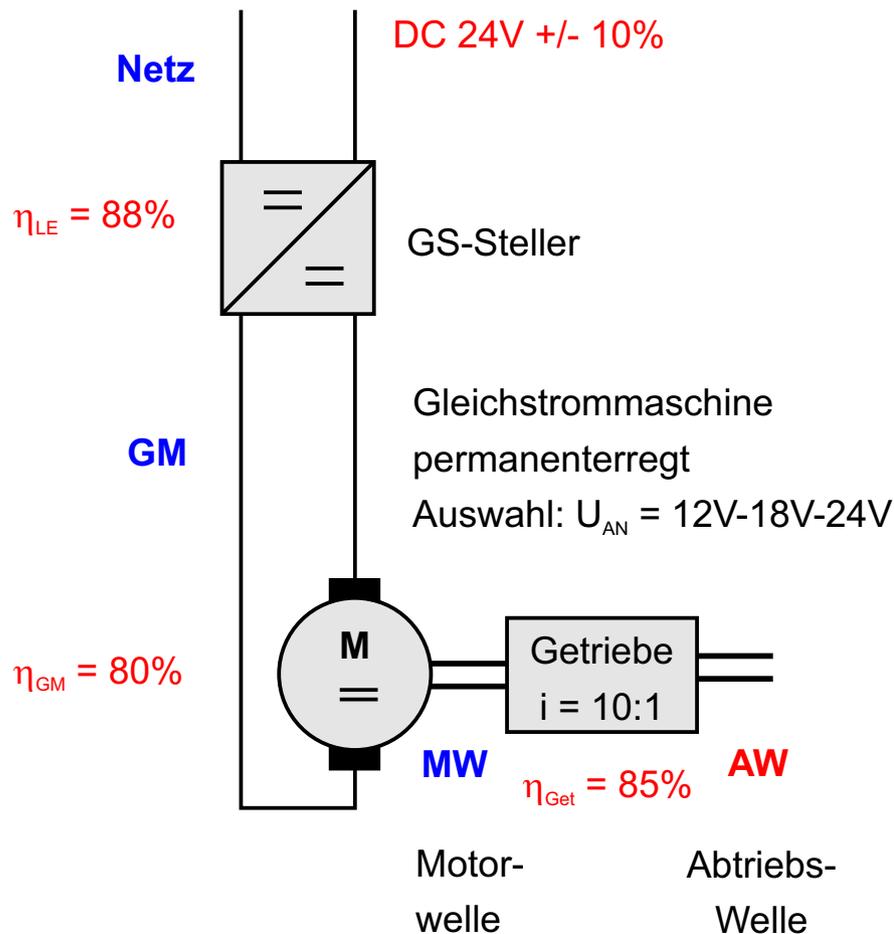
Abschnitt 4.2: N-M-Kennlinie



4.6 Arbeitsmaschinen

Auslegungsbeispiel: Permanentterregte GM an DC-Netz

Vorab-Spezifikation



AW Gegeben: $M_{AW} = 50Nm$, $N_{AW} = 200Upm$
Gesucht: Strombedarf, Maschinendaten

MW: $N_{MW} = N_{AW} \cdot i = 2000Upm$
 $M_{MW} = \frac{M_{AW}}{i \cdot \eta_{Get}} = 5.88Nm$ } $P_{MW} = 1232W$

GM: $N_N = 2000Upm$ bei $U_{AN} = 18V$
 $P_{GM} = P_{MW} / \eta_{GM} = 1540W$
 $I_{AN} = 1540W / 18V = 85.6A$
 $k = 5.88Nm / 85.6A = 68.7mNm/A$ (Welle)

Netz: $P_{Netz} = P_{GM} / \eta_{LE} = 1750W$
 $I_{Netz,max} = \frac{1750W}{24V \cdot 0.9} = 81A$

4.6 Arbeitsmaschinen

Problem: Maschine mit 18V 1.3kW 2000Upm nicht verfügbar

Daten verfügbare Ersatzmaschine:

Spannung:	24V DC	d.h. Überdimensionierung	
Bemessungsstrom	110 A	Nennmoment: 7.5Nm, $k = 68.2\text{mNm/A}$	} i.O.
Bemessungsleistung	2,2 kW	Leistung bei 2000Upm: 1571W	
Bemessungsdrehzahl	2800 U/min	Drehzahl bei 18V: 2100Upm	
Wirkungsgrad	0.82	> 0.8	
IEC-Baugröße	100L	$L_{\text{Ges}} = 370$, $D_{\text{Ges}} = 198$, $H = 100$ (Wellenhöhe)	
Schutzart	IP54	Staubgeschützt - Spritzwassergeschützt	
Betriebsart	S1	Dauerbetrieb	
Bauform	B3	liegend, Fußaufstellung	
Wellenende (dxL)	28x60 mm	mit Konstruktion abklären	
Gewicht	25,00 kg	wegen Überdimensionierung ggf. zu schwer/zu groß	
Preis:	1.103,00 EUR	ca. 10% über einer 1.5kW-Maschine - Stückzahl?	
Lieferzeit:	ca. 4 Wochen	i.O.	

Fazit: Auslegungsdaten können eingehalten werden,
jedoch Klärungsbedarf Baugröße/Gewicht (Projektleitung, Konstruktion)