

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

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 10: Drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10.1 Grundstruktur Antriebssystem

10.2 Auslegung Umrichter und Maschine

10.3 Energieeffiziente Antriebe

10.4 Steuerverfahren für Asynchronmaschinen

10.5 U/f-Kennliniensteuerung

10.6 Drehzahlregelung mit U/f-Kennlinie

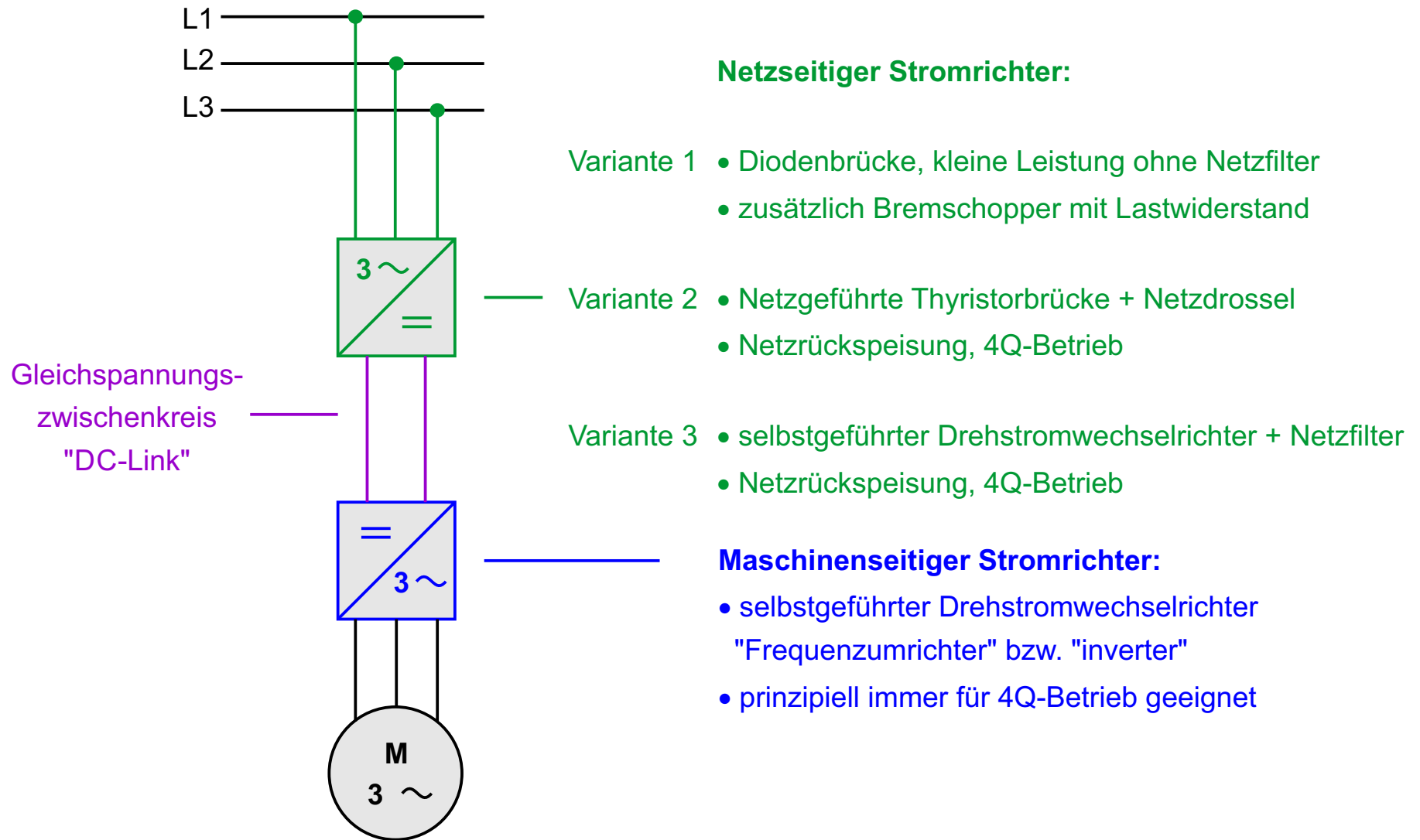
10.7 Drehmomentregelung mit FOR

10.8 Moderne Industrienetze

10.9 Elektrostraßenfahrzeuge

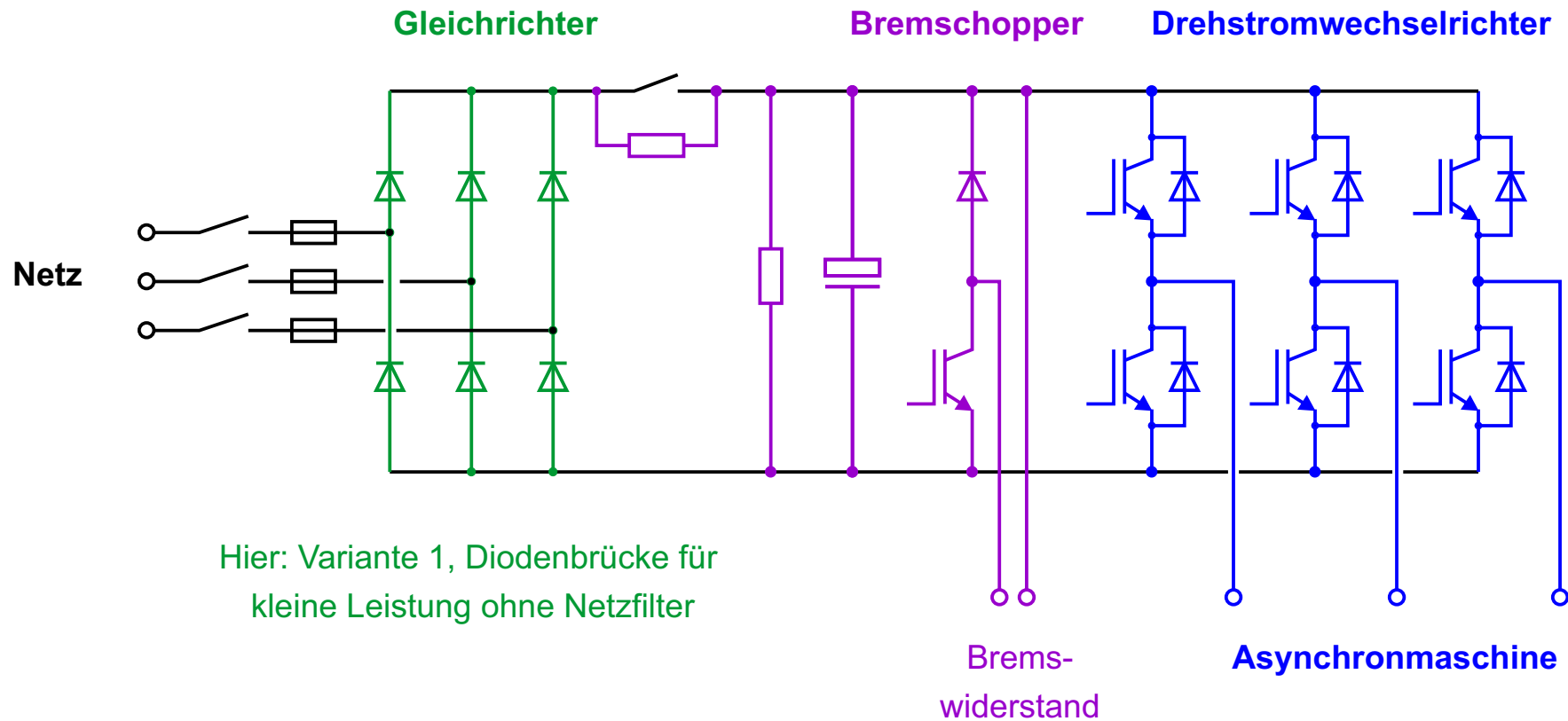
10.1 Grundstruktur Antriebssystem

Kurzschlussläufer mit Frequenzumrichter



10.2 Auslegung Umrichter und Maschine

Beispiel Leistungsteil Frequenzumrichter (FU)

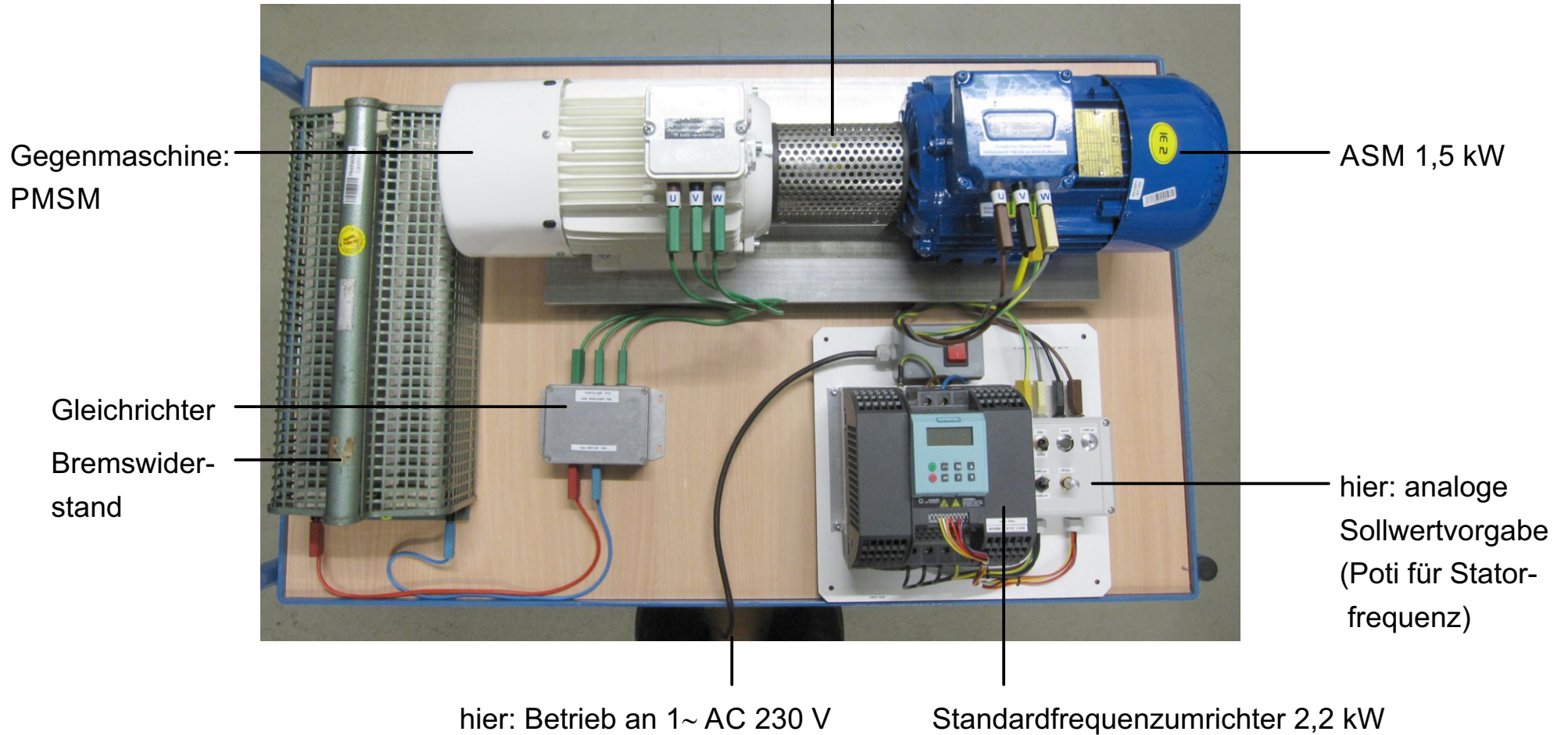


mehr dazu in Kapitel 10a

10.2 Auslegung Umrichter und Maschine

Beispiel Kleinantrieb (mobiler Prüfstand aus dem Labor)

unter der Wellenabdeckung: Kupplung



10.2 Auslegung Umrichter und Maschine

ASM für Frequenzumrichterbetrieb

Besonderheiten im FU-Betrieb

- Spannungen nicht sinusförmig, sondern gepulst (PWM). Hartes Schalten mit IGBTs / SiC-Mosfets: steile Flanken.

Motorrückwirkungen

- Kapazitive Effekte
 - ⇒ Lagerströme
 - ⇒ erhöhte Isolationsbelastung
- Oberwellen Strangstrom
 - ⇒ erhöhte Eisenverluste Stator
 - ⇒ erhöhte ohm'sche-Verluste Rotor
 - ⇒ Geräusche

Maßnahmen

FU-Ausgangsfilter / Lagerisolation
Wicklungsaufbau/Isolation anpassen

ggf. schlechteres η akzeptieren
ggf. Gesamtauslegung anpassen
ggf. FU-Taktfrequenz erhöhen

Statorgrundfrequenz frei einstellbar

- Betrieb oberhalb 3000Upm möglich ($N_{\max} = 6.000 \dots 12.000\text{Upm}$)
- Betrieb im Feldschwächbereich
- Betrieb bei sehr kleinen Drehzahlen

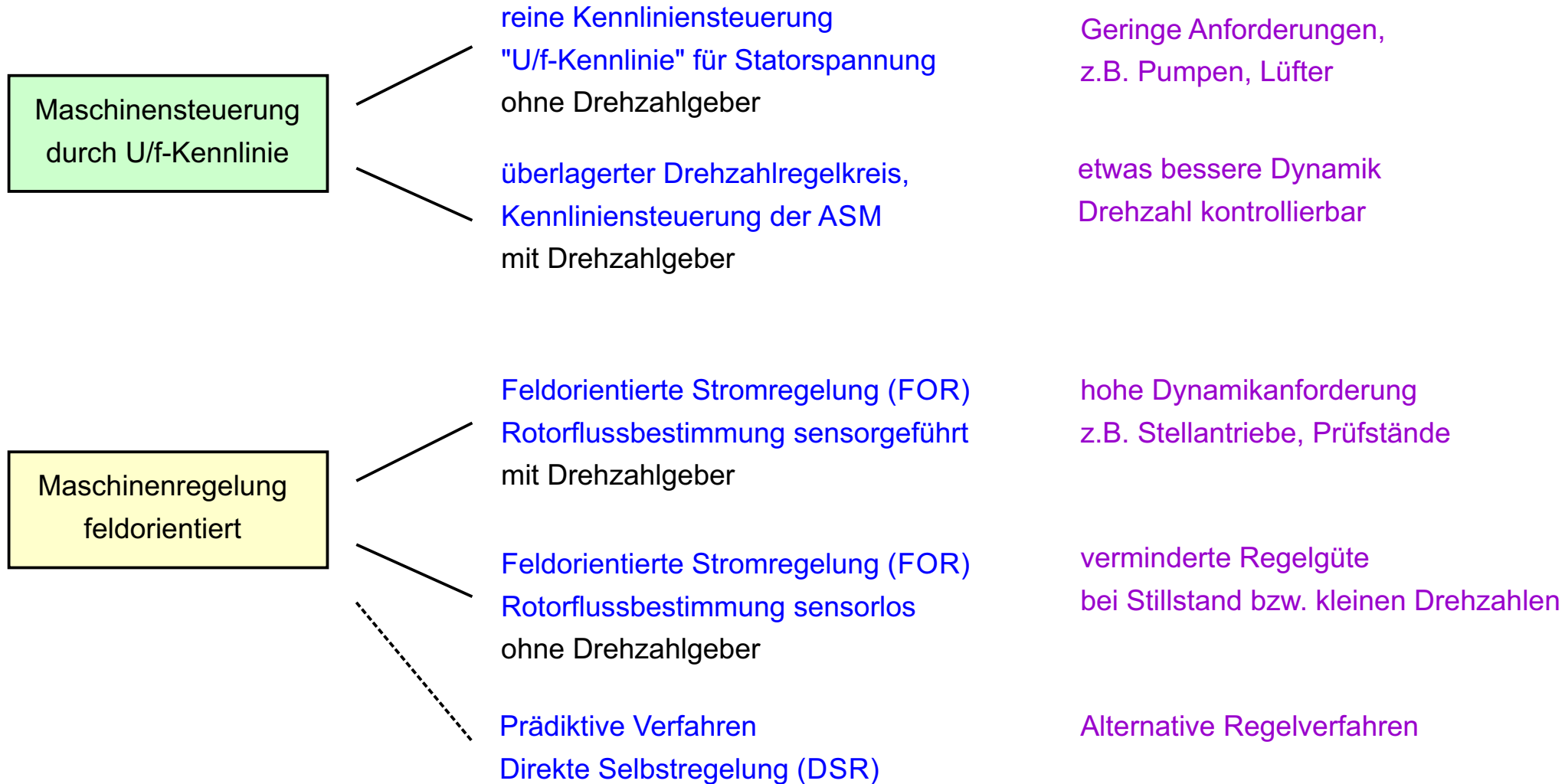
Auslegung auf höhere Grenzdrehzahl
Auslegung auf höheres Kippmoment
Fremdbelüftung

- **Kostenvergleich 75kW-Maschine:**

Standardmaschine 1500Upm: 3000 .. 4000€
ASM für FU-Betrieb, 6000Upm: 7000..15000€

10.4 Steuerverfahren für Asynchronmaschinen

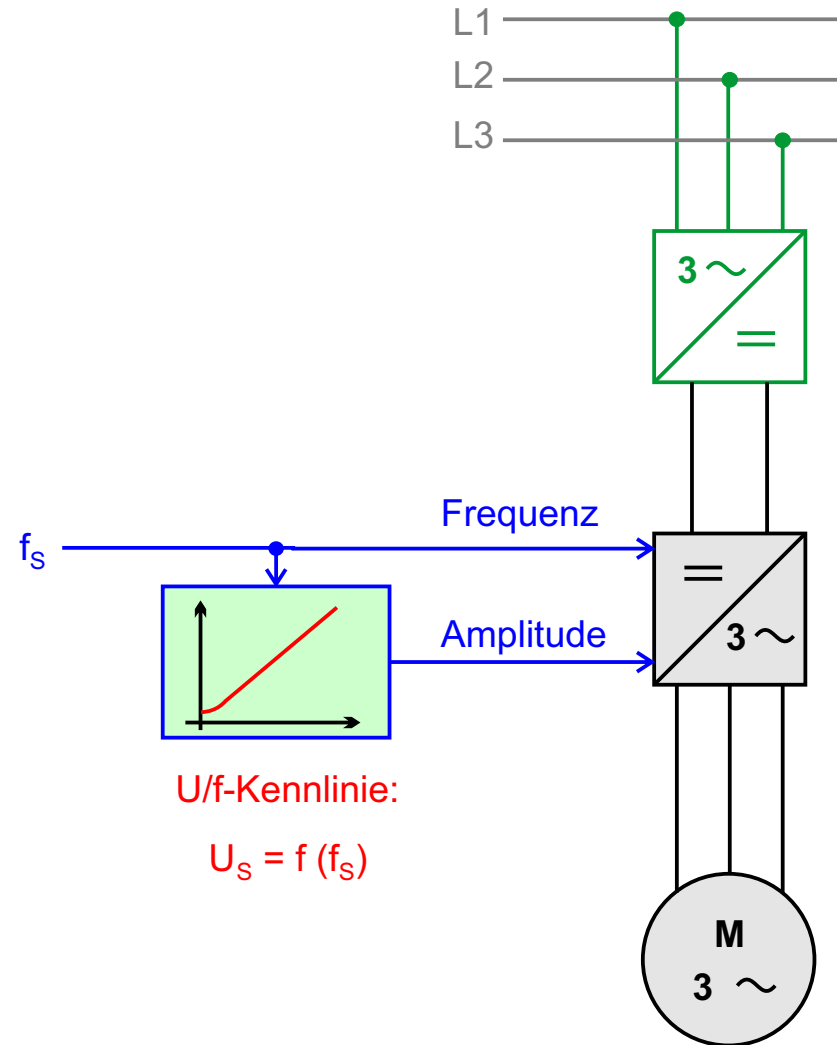
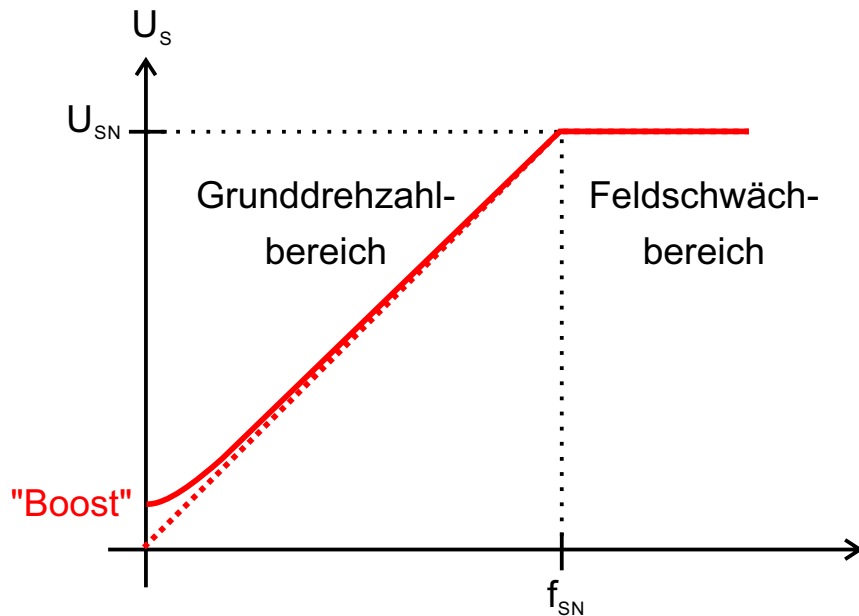
Gegenüberstellung



10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Kennlinie und Strukturbild

- Drehzahl wird mit der Statorfrequenz verstellt
- d.h. Betrieb wie am Netz, aber mit variablem f_s
- Schlupf stellt sich lastabhängig ein
- kleine Drehzahlen: Spannung anheben ("Boost")



10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Beispiel: Steuer-Gui im Labor elektrische Antriebe

Eckpunkt der Maschine:

(Nenndaten für Netzbetrieb an 230V / 50 Hz)

$$U_S = 230 \text{ V} \quad N_{\text{syn}} = 1000 \text{ Upm} \quad (p = 3)$$

$$f_S = 50 \text{ Hz} \quad N_N = 970 \text{ Upm}$$

U/f-Kennliniensteuerung

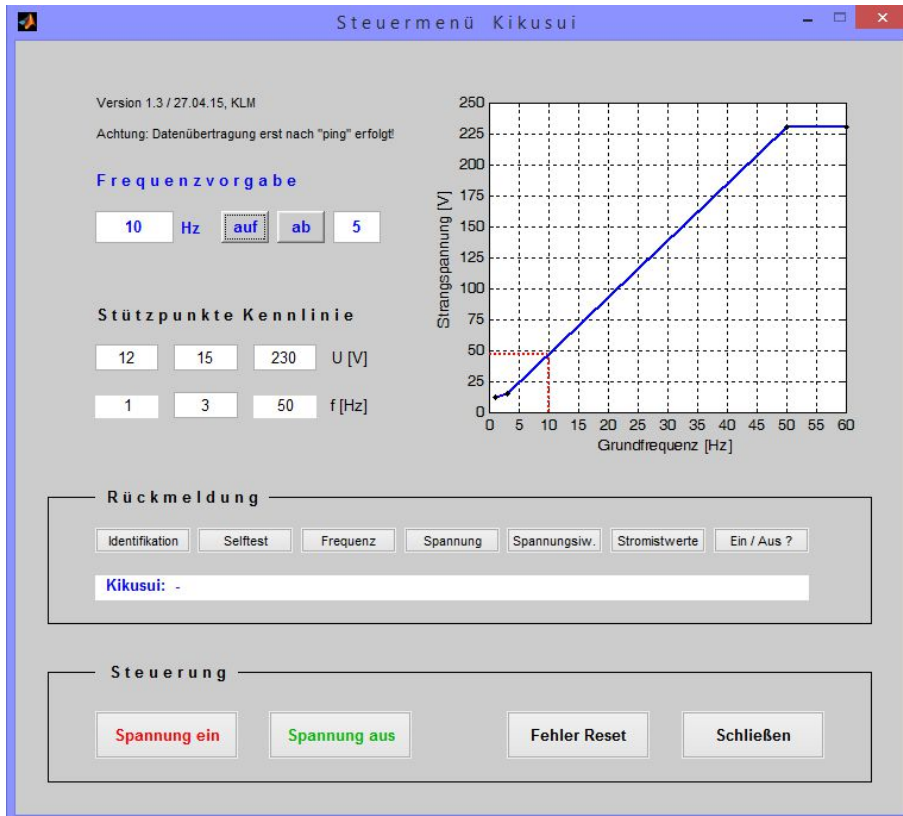
Beispiel: Betrieb mit 20% Nenndrehzahl gewünscht

manuelle Eingabe: $f_S = 10 \text{ Hz}$

aus Kennlinie: $U_S = 48 \text{ V}$

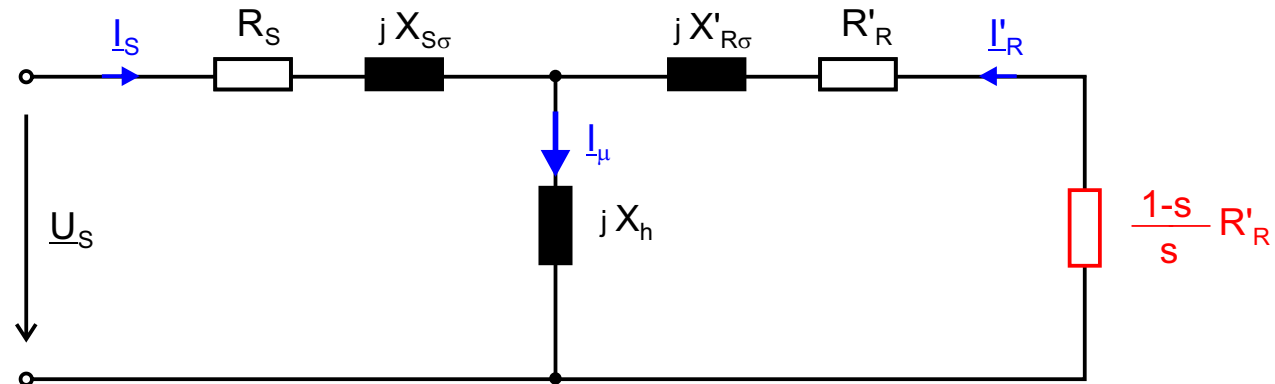
Dann stellt sich für die Maschine folgendes ein:

- $N_{\text{syn}} = 200 \text{ Upm}$ (Leerlaufdrehzahl ohne Belastung)
- Betrieb mit Belastung \Rightarrow z.B. 3% Schlupf
- Es stellt sich die Drehzahl $N = 194 \text{ Upm}$ ein.



10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Zur Erinnerung: Ersatzschaltbild aus Kapitel 8



Magnetisierungsstrom: $\underline{I}_\mu = \underline{I}_s + \underline{I}'_R$ vgl. GM: I_F

Grunddrehzahlbereich: $I_\mu \approx I_{\mu N}$ vgl. GM: $I_F = I_{FN}$

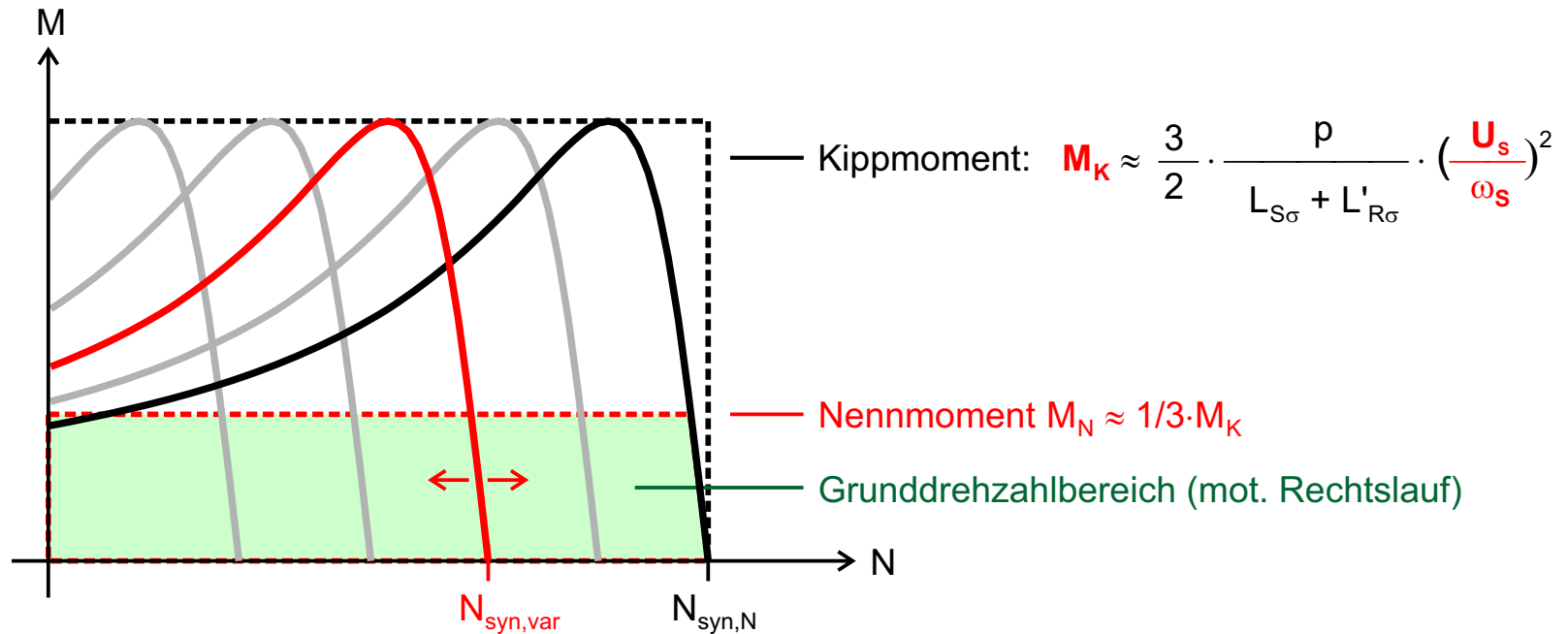
sehr kleine Statorfrequenz: ohm'scher Spannungsabfall signifikant \Rightarrow Boostanhebung

sonst: Reaktanzen dominierend: $X \sim f_s$ $\Rightarrow U \sim f_s$ führen

$$X = \omega_s \cdot L = 2\pi f_s \cdot L$$

10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Verschieben der Kennlinie

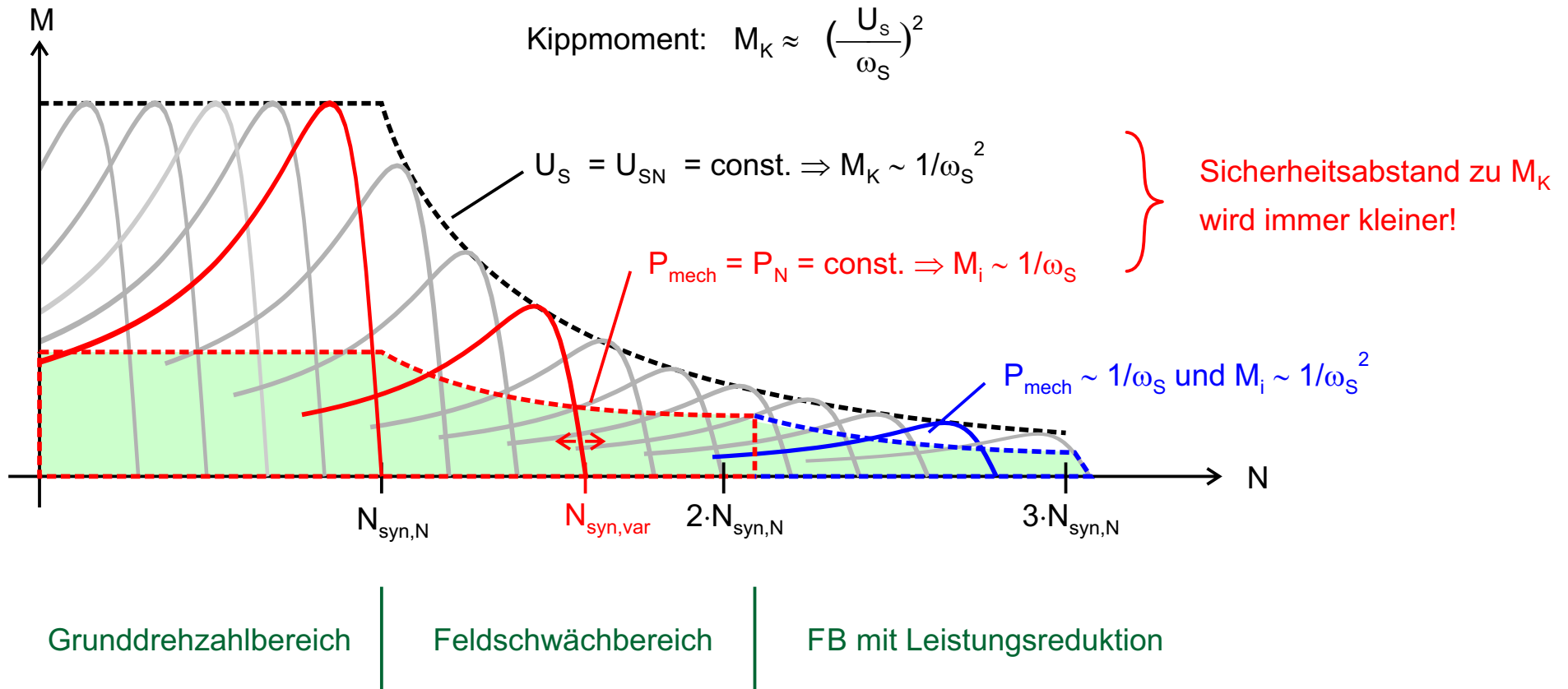


Prinzipiell:

- Schlupfkennlinie analog zur Arbeitsdrehzahl horizontal verschieben
- dazu f_s und U_s proportional zu $N_{\text{syn,var}}$ mit U/f-Kennlinie verstellen
- Drehzahl gibt bei Belastung nach, vgl. spannungsgesteuerte GM

10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Feldschwächbereich

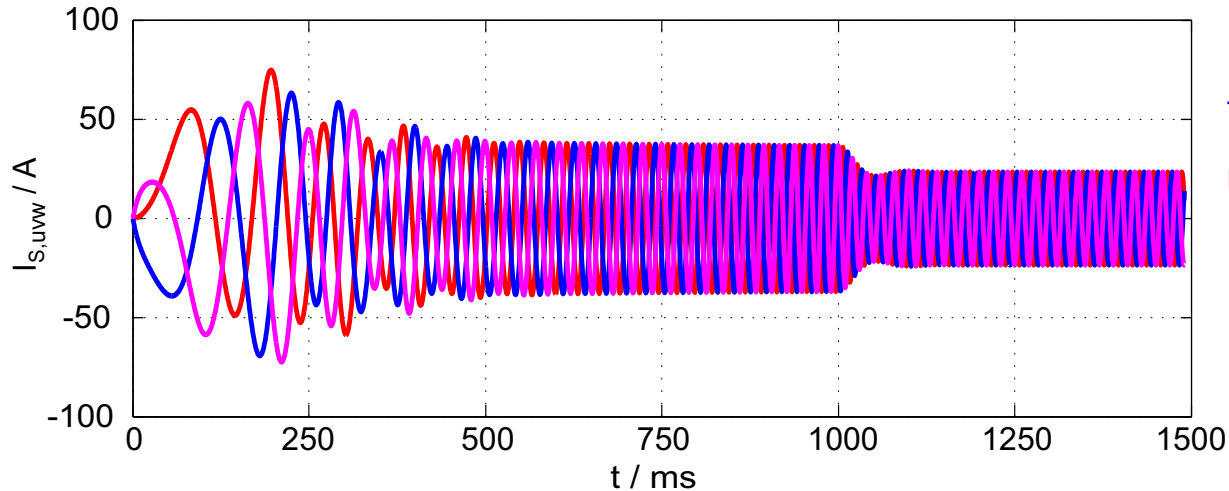


- Im Feldschwächbereich (FSB) will man $P = \text{const.}$ und $M \sim 1/N$ bzw. $M \sim 1/\omega$ fahren
- Da man aber U_s nicht weiter erhöhen kann, gilt für das Kippmoment $M_K \sim 1/\omega_s^2$
- Im Nennpunkt ist noch $M_N \approx 1/3 \cdot M_K$. Dieser Sicherheitsabstand wird im FSB jedoch immer kleiner!

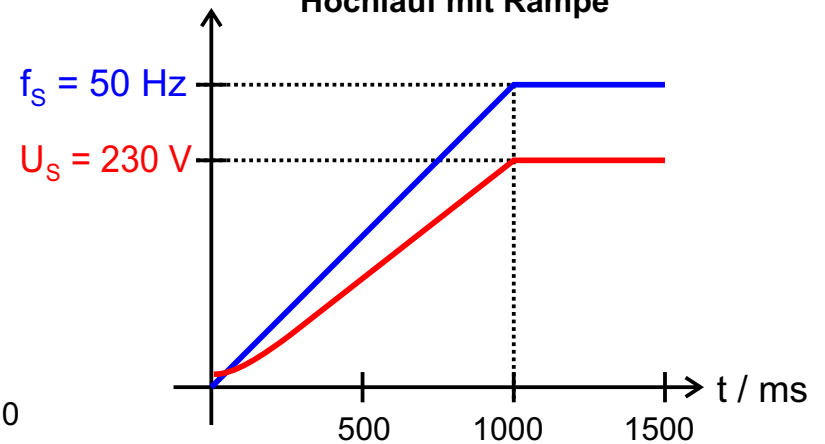
10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Ungeregelter Hochlauf mit Frequenzrampe: Problematik

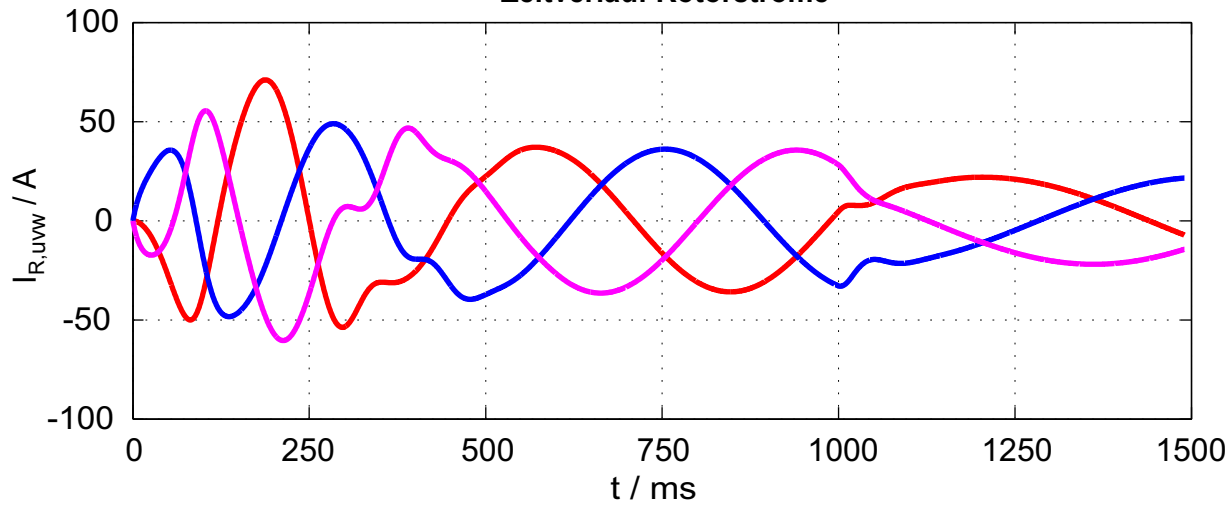
Zeitverlauf Statorströme



Hochlauf mit Rampe



Zeitverlauf Rotorströme

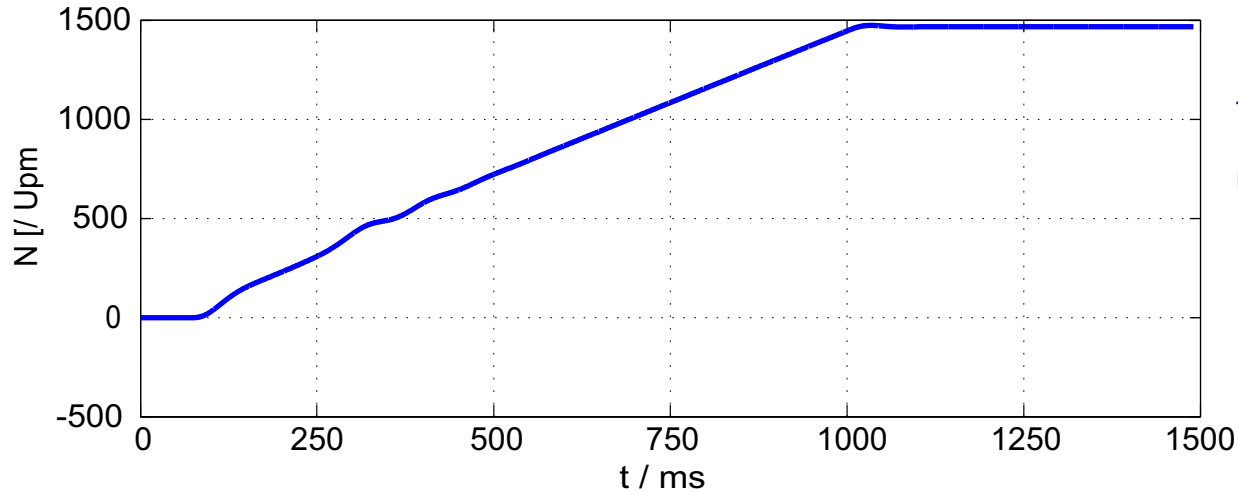


- Einschwingvorgang beim Aufschalten der Spannung
- Resonanz der ASM im unteren Drehzahlbereich (mech. \leftrightarrow magn.)

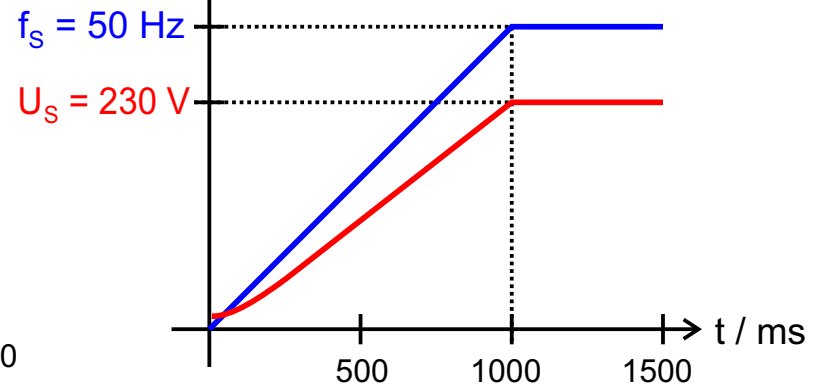
10.5 U/f-Kennliniensteuerung

Ungeregelter Hochlauf mit Frequenzrampe: Problematik

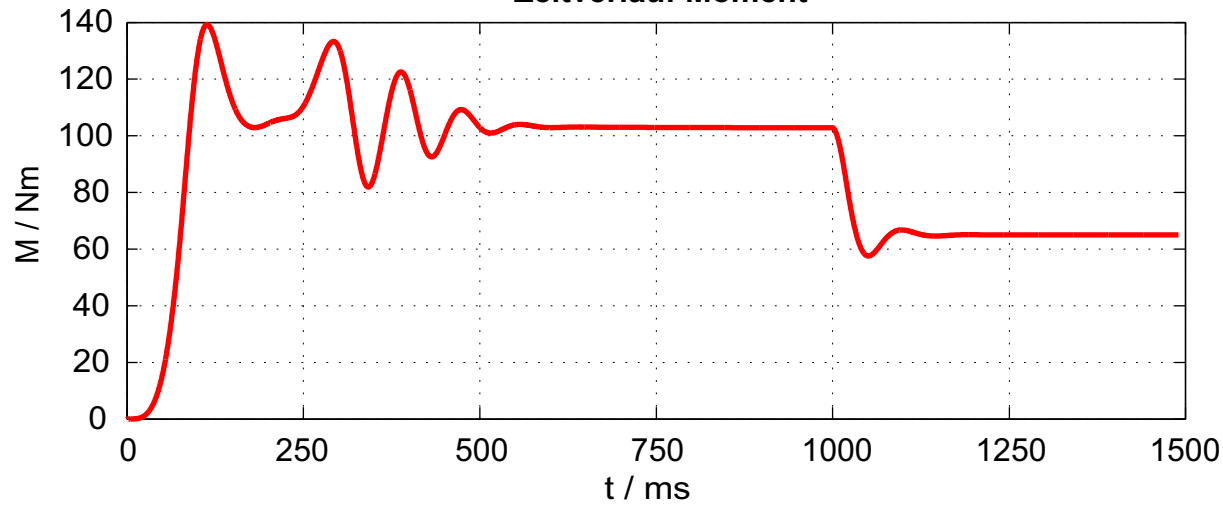
Zeitverlauf Drehzahl



Hochlauf mit Rampe



Zeitverlauf Moment



Problematik:

- Durchlaufen von Resonanzstellen beim Hochlauf
- Betrieb bei ca. $1/3 N_N$ ggf. instabil, gilt für viele ASM

Notlösung: Spannung reduzieren

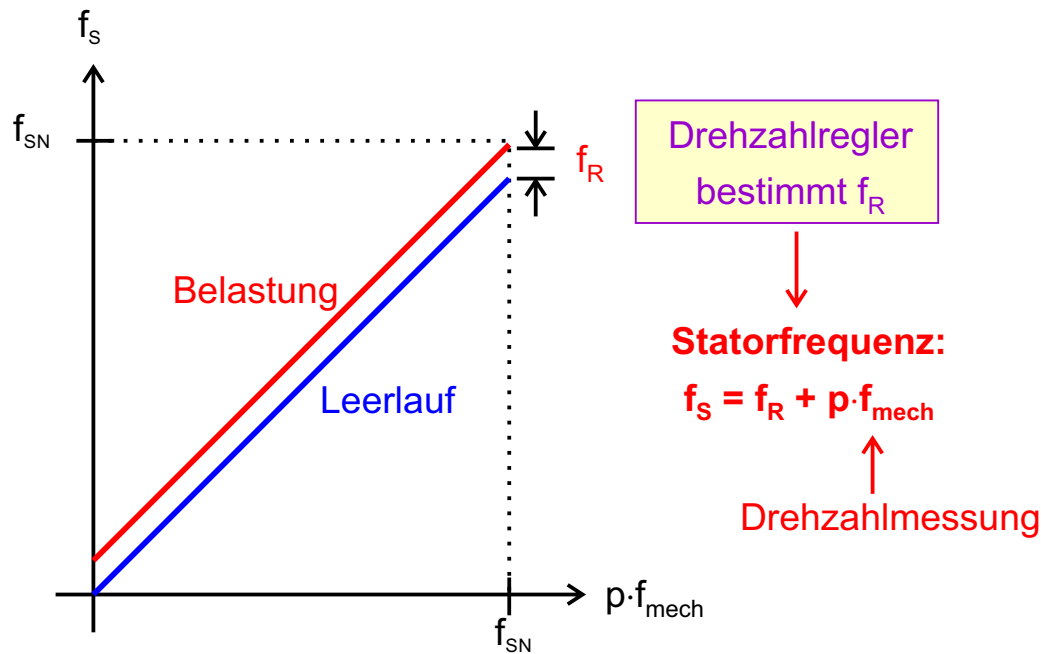
10.6 Drehzahlregelung mit U/f-Kennlinie

Grundanforderungen bei Drehzahlregelung

Kompensation der lastabhängigen Rotorfrequenz:

- im linearen Bereich der Schlupfkennlinie gilt: $f_R \sim M_i$
- bei Belastung steigen Schlupf s und Rotorfrequenz f_R , womit die Drehzahl sinkt, wenn man f_s nicht anpasst

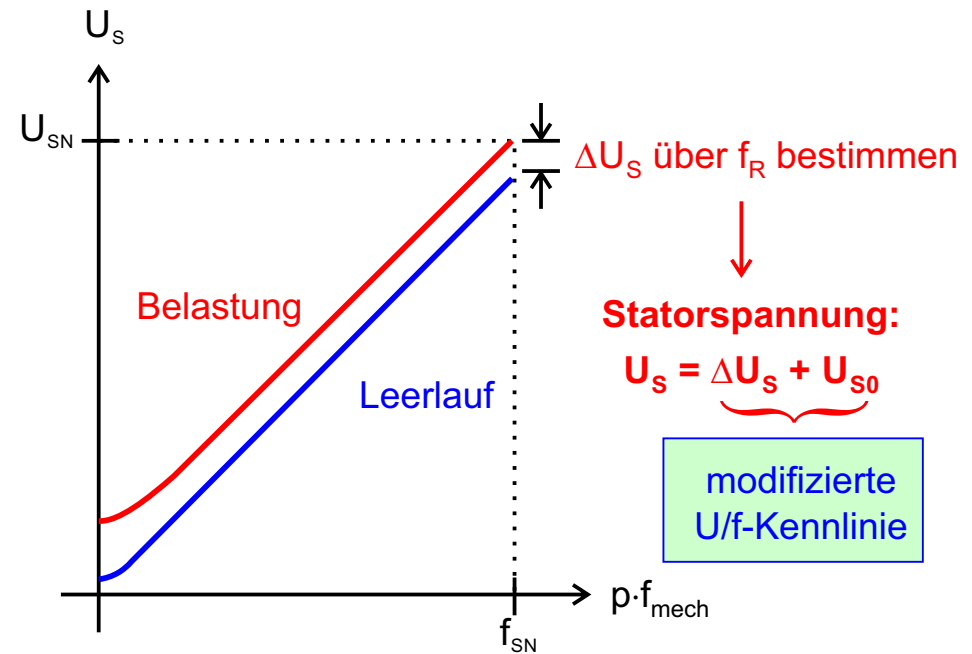
⇒ Regelung muss f_R kompensieren



Betrieb mit Nennmagnetisierung

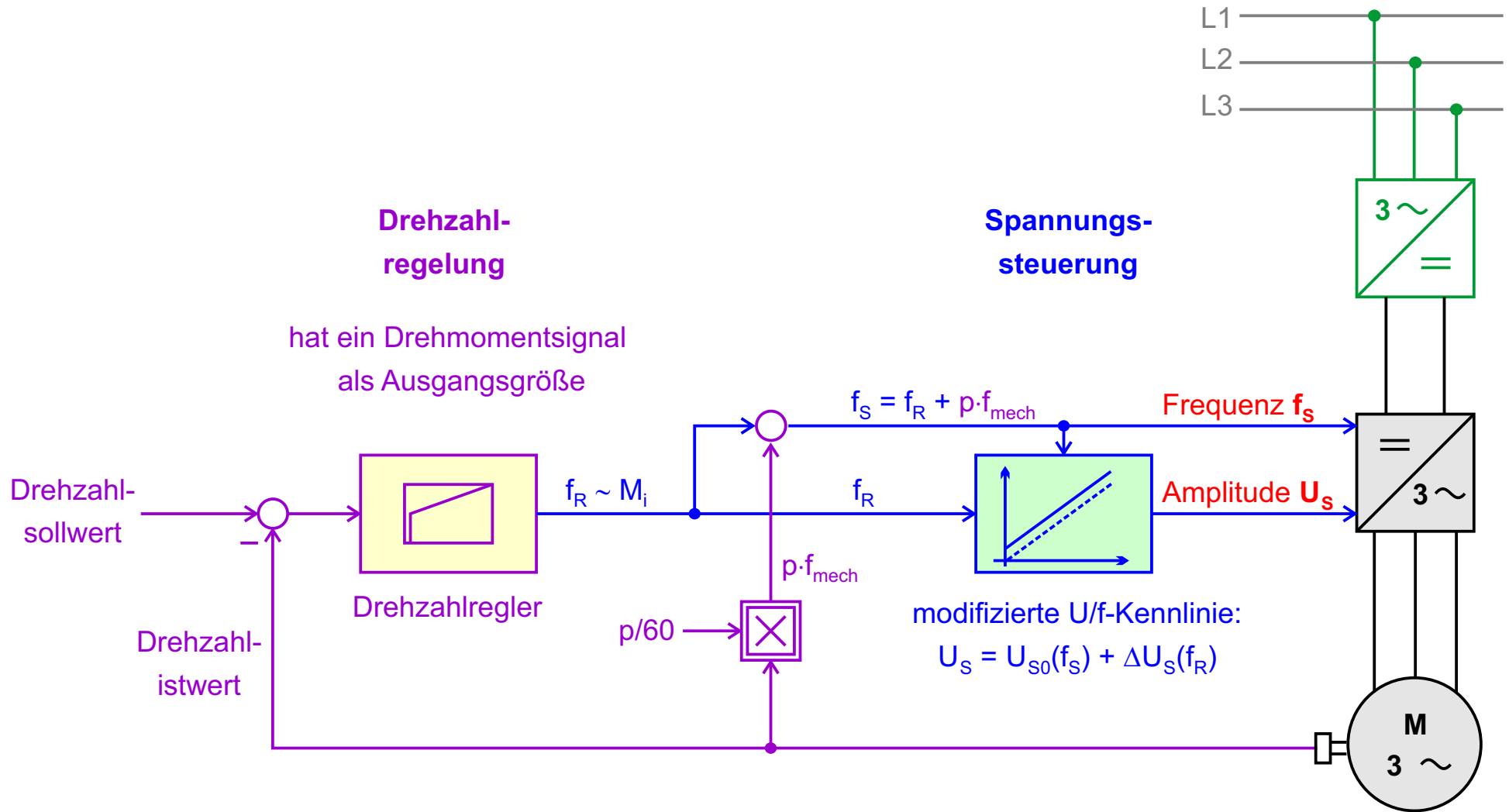
- Nennmagnetisierungsstrom: $I_\mu \approx I_{\mu N}$
- bei Belastung steigt der Spannungsfall
 $\Delta \underline{U}_S = (R_S + j \cdot X_{S\sigma}) \cdot \underline{I}_S$, so dass I_μ kleiner wird

⇒ Kennlinie muss ΔU_S kompensieren



10.6 Drehzahlregelung mit U/f-Kennlinie

Strukturbild



10.7 Drehmomentregelung mit FOR (Mastervorlesung)

Grundidee

Raumzeigertransformation:

- 3/2-Wandlung (Clarktransformation): Transformation der Strangstromistwerte in das $\alpha\beta$ -System

$$I_U, I_V \text{ und } I_W \Rightarrow I_\alpha \text{ und } I_\beta \quad (\text{statorfestes Koordinatensystem, siehe Kap. 7})$$

- dq-Wandlung (Parktransformation): Transformation der Strangstromistwerte in das dq-System

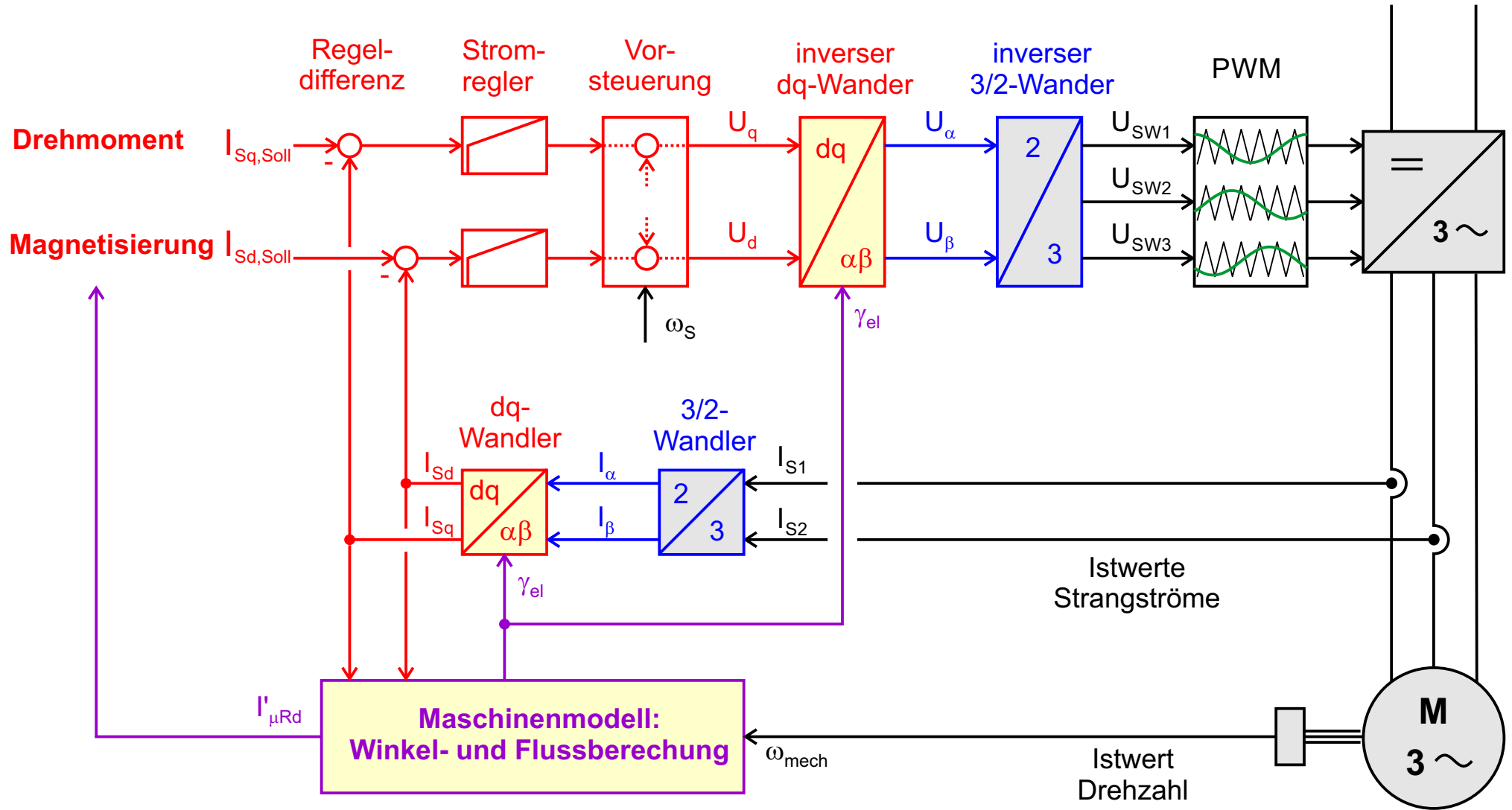
$$I_\alpha \text{ und } I_\beta \Rightarrow I_q \text{ und } I_d \quad (\text{mitdrehendes Koordinatensystem})$$

FOR = Feldorientierte Regelung:

- (Rotor-) Feldorientierung: die d-Achse des dq-Systems ist am Rotorfluss ausgerichtet
- ASM: da man die Rotorflussposition nicht messen kann, muss sie durch ein Maschinenmodell berechnet werden
- mit der q-Komponente I_q kann man das Drehmoment einprägen vgl. GM: Ankerstrom
- mit der d-Komponente I_d kann man den Magnetisierungsstrom steuern vgl. GM: Erregerstrom
- auch: "Vektorregelung", da je ein PI-Regler für q- und d-Seite benötigt wird
- die Stromregler bestimmen die erforderlichen Statorspannungskomponenten U_d und U_q
- Rücktransformation von U_d und U_q in das uvw-System und Pulsmustererzeugung für den Wechselrichter

10.7 Drehmomentregelung mit FOR (Mastervorlesung)

Reglerstruktur für die ASM



10.7 Drehmomentregelung mit FOR (Mastervorlesung)

Bsp. für ein Maschinenmodell: "Strommodell"

Beziehungen:

$$\gamma_{el} = \int_0^t \omega_S dt$$

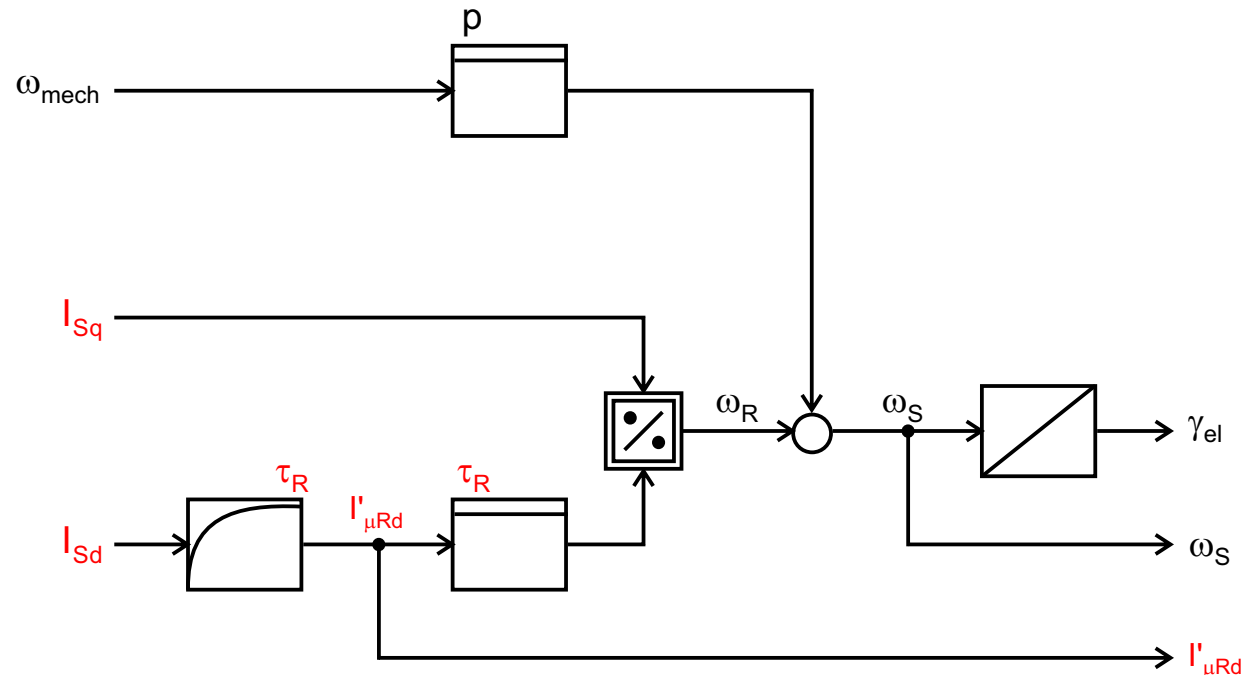
$$\omega_S = p \cdot \omega_{mech} + \omega_R$$

ω_{mech} gemessen

$$\omega_R = \frac{I_{Sq}}{\tau_R \cdot I'_{\mu Rd}}$$

$$I'_{\mu Rd} = I_{Sd} - \tau_R \cdot \frac{dI'_{\mu Rd}}{dt}$$

$$\tau_R = \frac{L_h + L'_{R\sigma}}{R'_R}$$

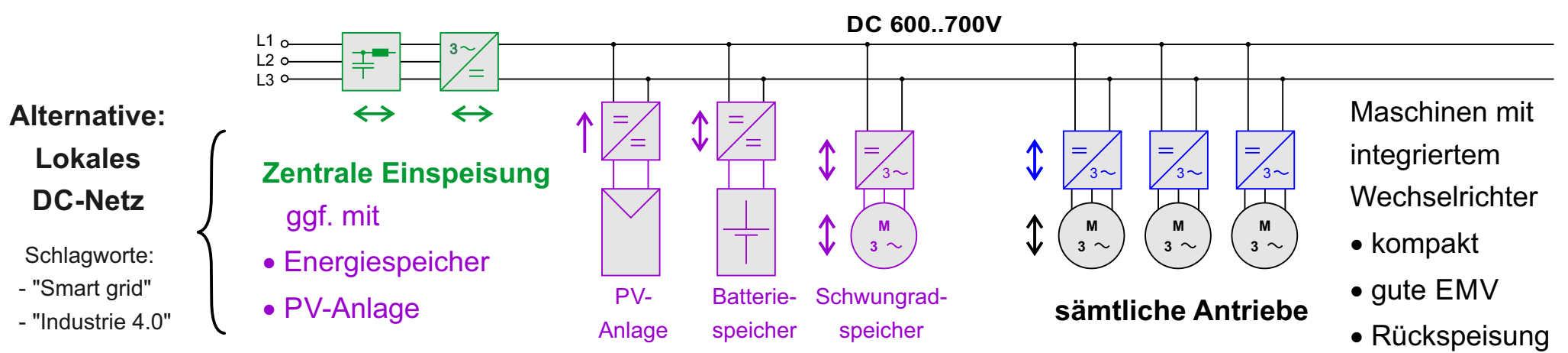
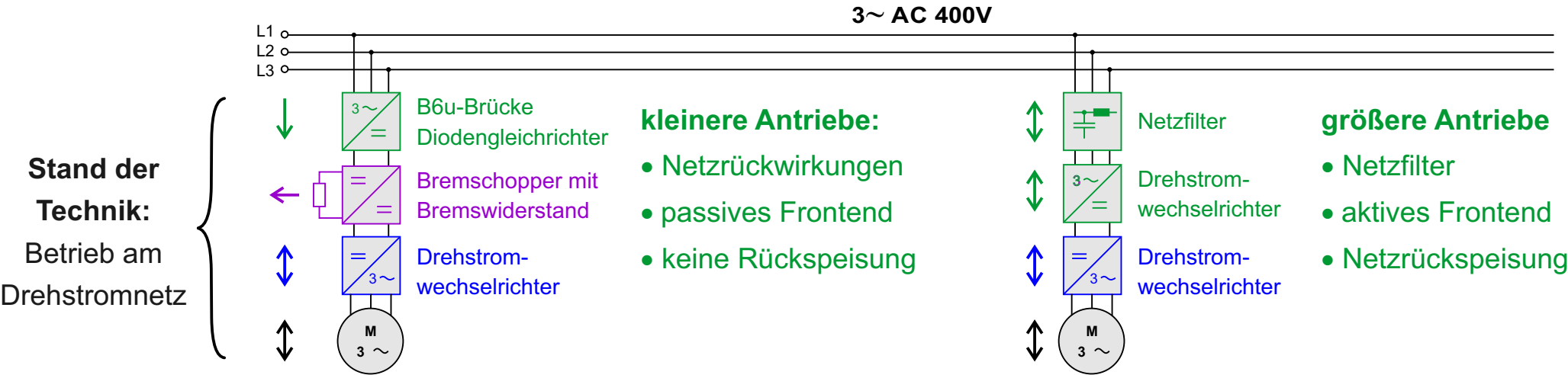


Baustellen:

- Eingangsgröße = Ergebnis der dq-Wandlung mit γ_e (Rückkopplung)
- Rotorzeitkonstante: abhängig von L_h (Sättigungseffekte Eisenkreis) und Rotorwiderstand R'_R (Temperatur, Stromverdrängung)

10.8 Moderne Industriennetze

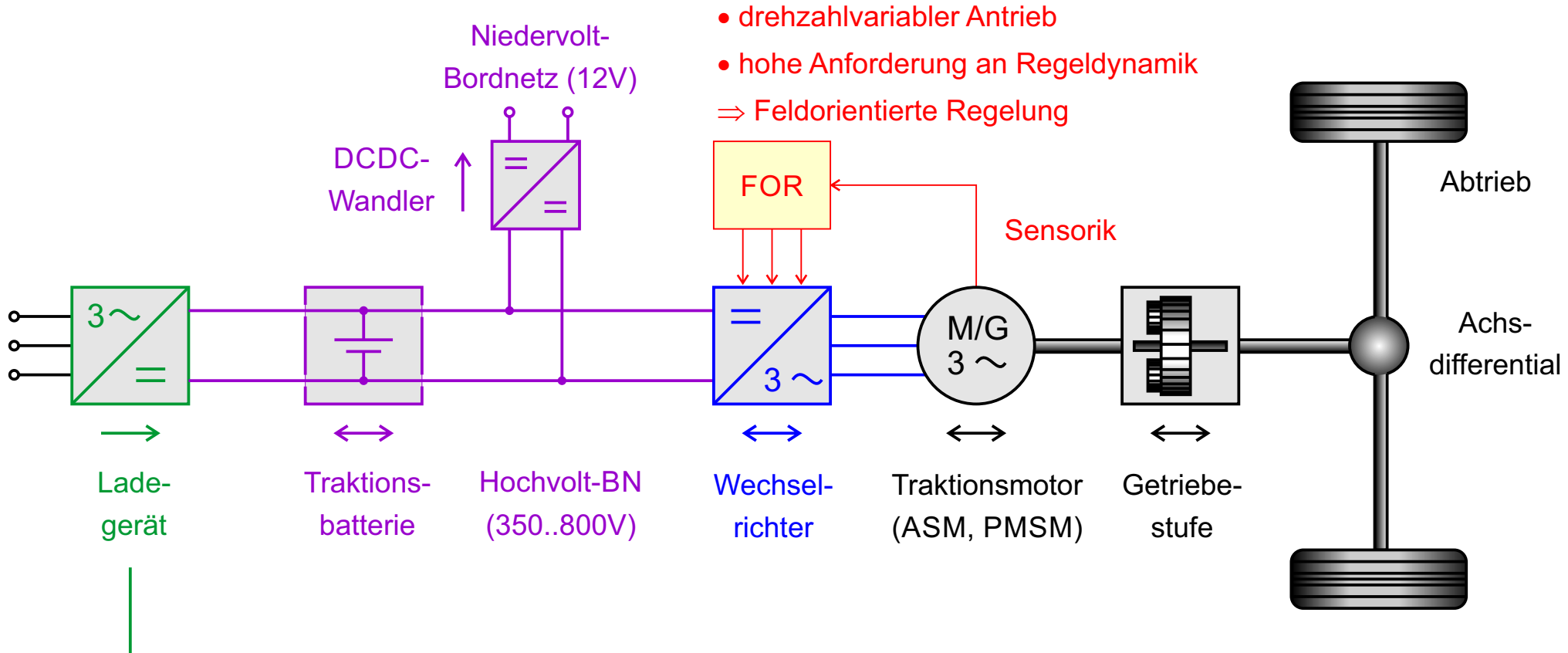
Lokale DC-Netze für Industrieanlagen?



Quelle und weitere Infos: Forschungsprojekt "DC-INDUSTRIE", Broschüre "Gleichspannungsnetze in der industriellen Produktion" – die Inhalte sind hier neu aufbereitet und erweitert dargestellt

10.9 Elektrostraßenfahrzeuge

Struktur Elektroantriebsstrang



Typischer Energieverbrauch ab Ladegerät клемme: 15..20kWh/100km

CO₂-Bilanz dt. Strommix: 500g/kWh ⇒ rechn. CO₂-Ausstoß 75..100g/km