Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

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: Drehzahlgeregelter 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 8: Aufbau und Betriebsverhalten Asynchronmaschine

8.1 Wicklungsaufbau Rotor

8.2 Definition Schlupf

8.3 Ersatzschaltbild

8.4 Energiebilanz und Drehmoment

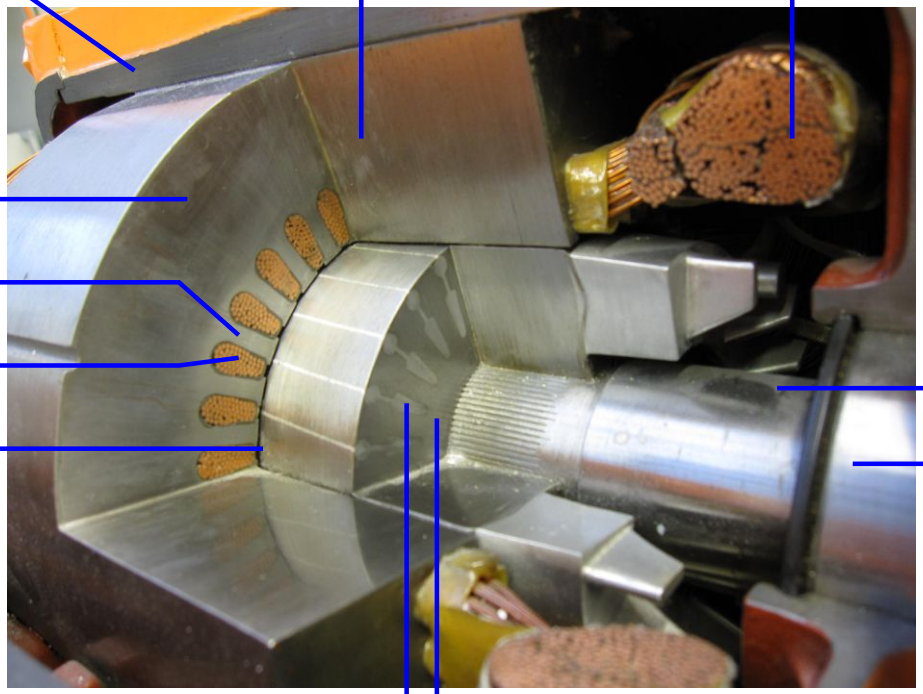
8.5 Statisches Betriebsverhalten

8.6 Dynamisches Betriebsverhalten

8.7 Zusatzwissen

8.1 Wicklungsaufbau Rotor

Asynchronmaschine: Grundsätzlicher Aufbau



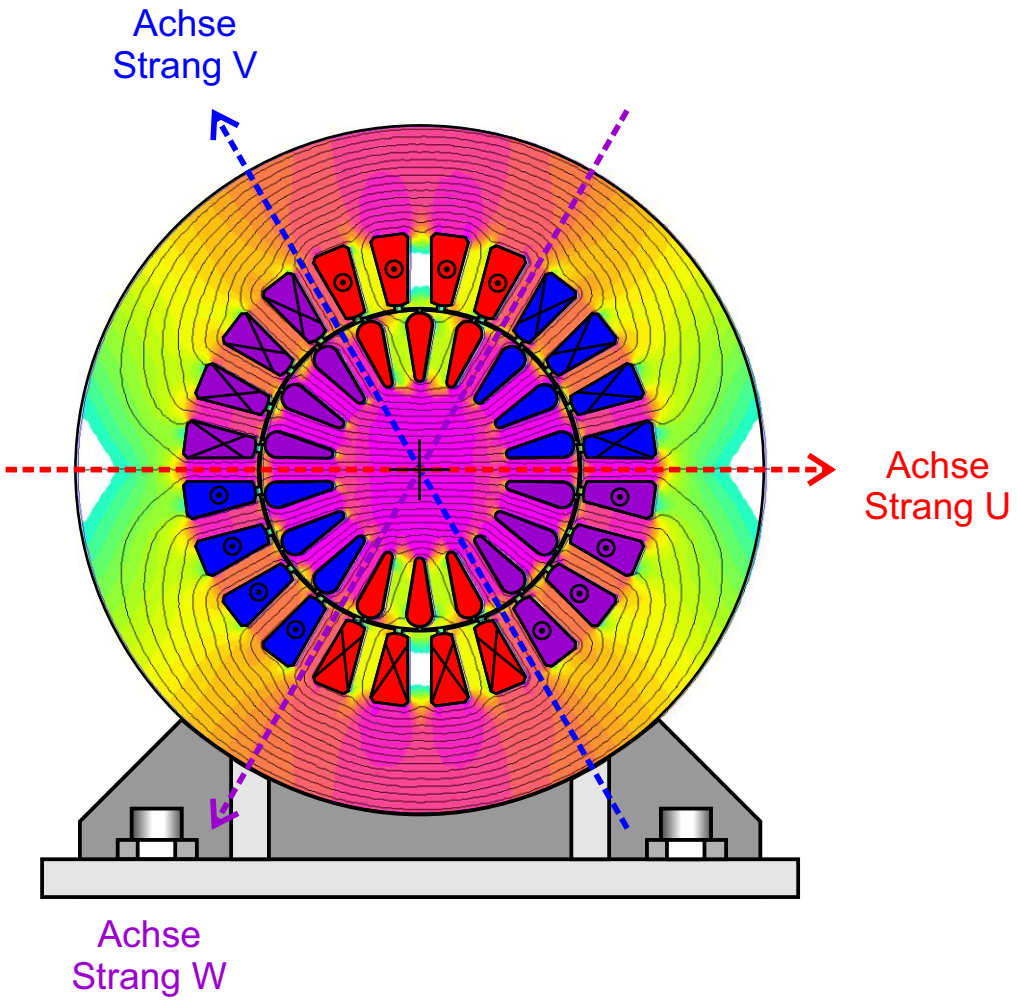
hier:
2-polige Maschine
(Polpaarzahl p = 1)
⇒ großer Wickelkopf
⇒ breiter Statorrücken
(hoher Materialbedarf)

Bild: A. Kleimaier, HS Landshut

8.1 Wicklungsaufbau Rotor

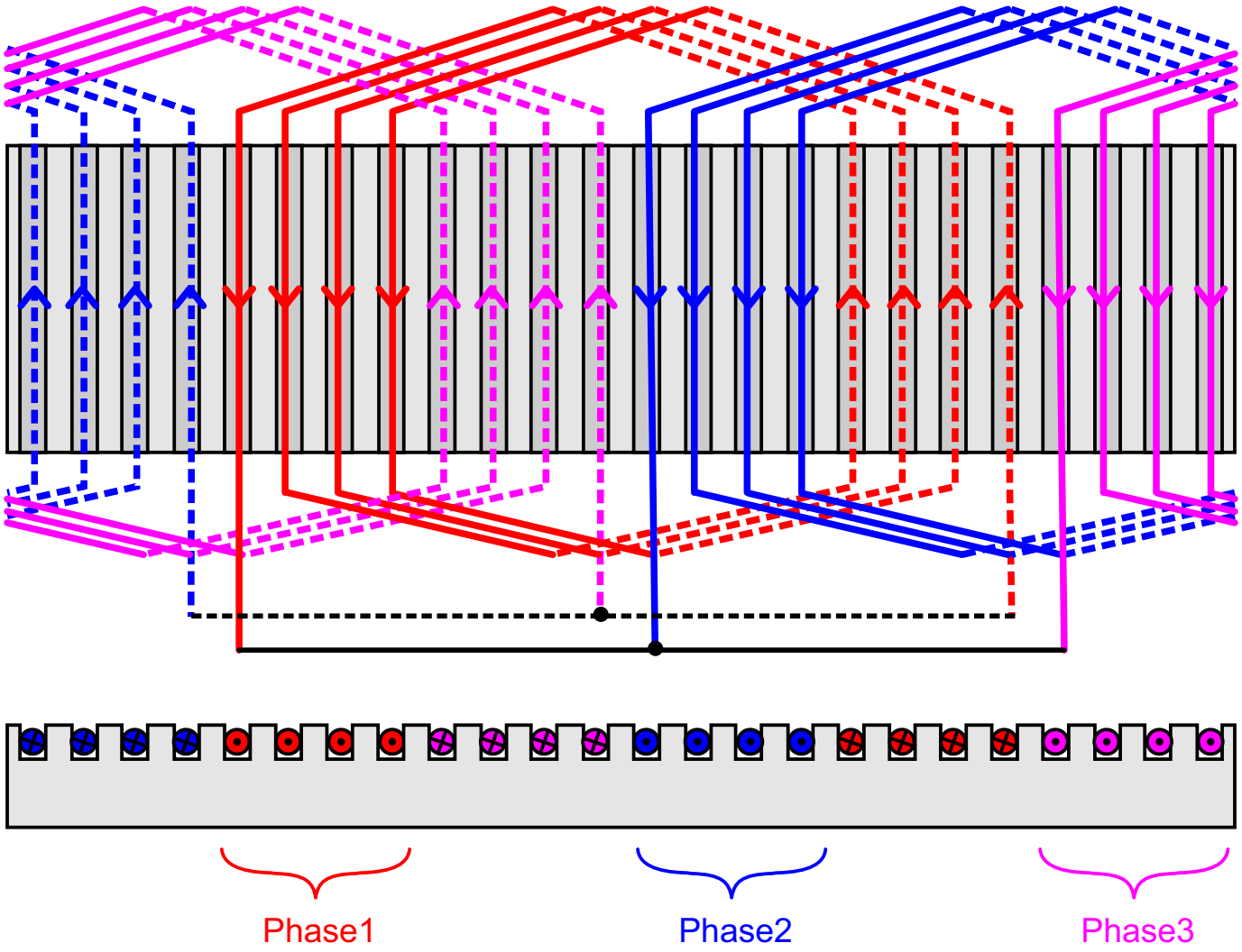
Asynchronmaschine: Stator und Rotor mit Drehfeldwicklung

- Statorfluss induziert Spannungen in der Rotorwicklung: "Induktionsmaschine"
- Bedingung: Rotor läuft asynchron zum Statorfeld "Asynchronmaschine"
- Rotorwicklung kurzgeschlossen: Rotorströme $\Rightarrow$ Tangentialkräfte
- Rotor festgebremst: Drehstromtransformator



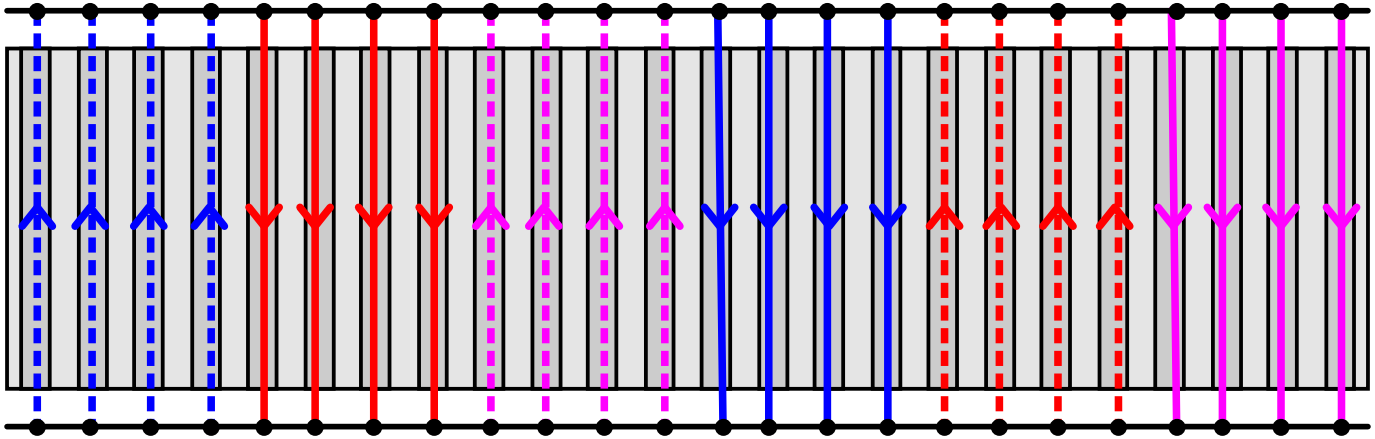
8.1 Wicklungsaufbau Rotor

Kurzgeschlossene Drehfeldwicklung im Rotor

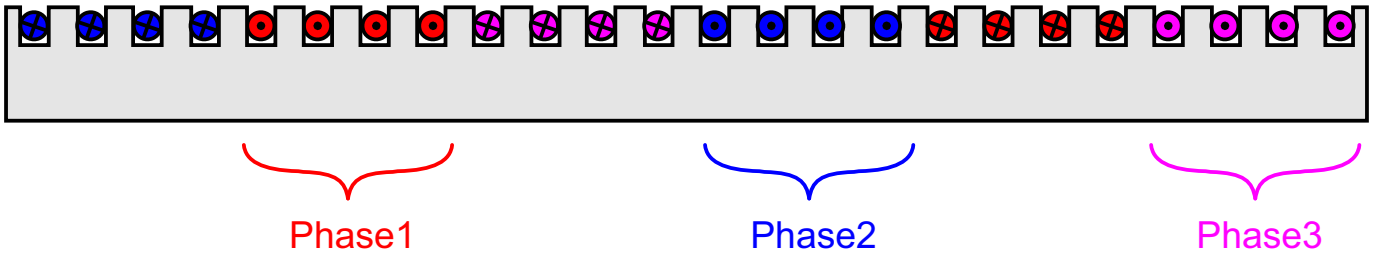


8.1 Wicklungsaufbau Rotor

"Umformung" der Rotorwicklung: Käfigläufer

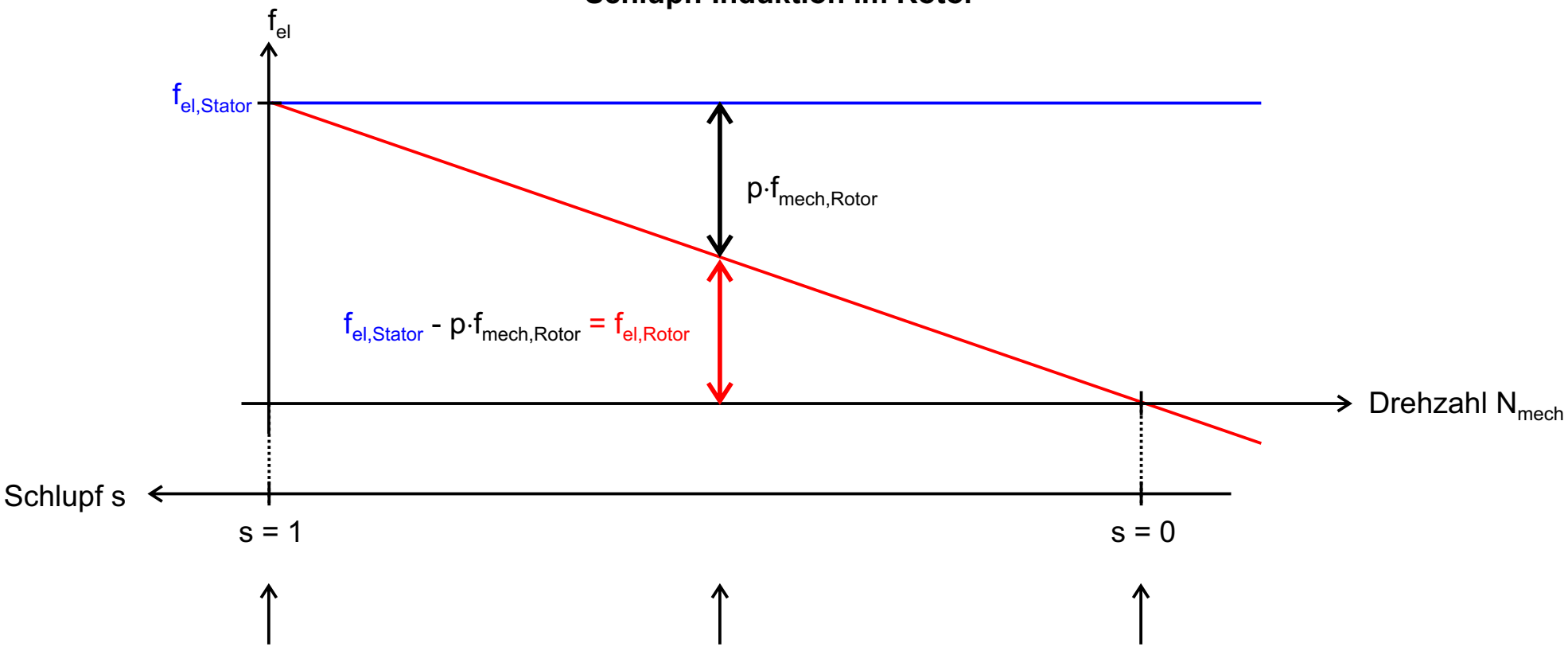


entspricht Parallelschaltung aller Stäbe jeder Phasenwicklung



8.2 Definition Schlupf

Schlupf: Induktion im Rotor



Stillstand:

$$f_{el,Rotor} = f_{el,Stator}$$

Schlupf:

$$s = \frac{f_{el,Rotor}}{f_{el,Stator}} = \frac{N_{Syn} - N_{mech}}{N_{Syn}}$$

Synchrondrehzahl:

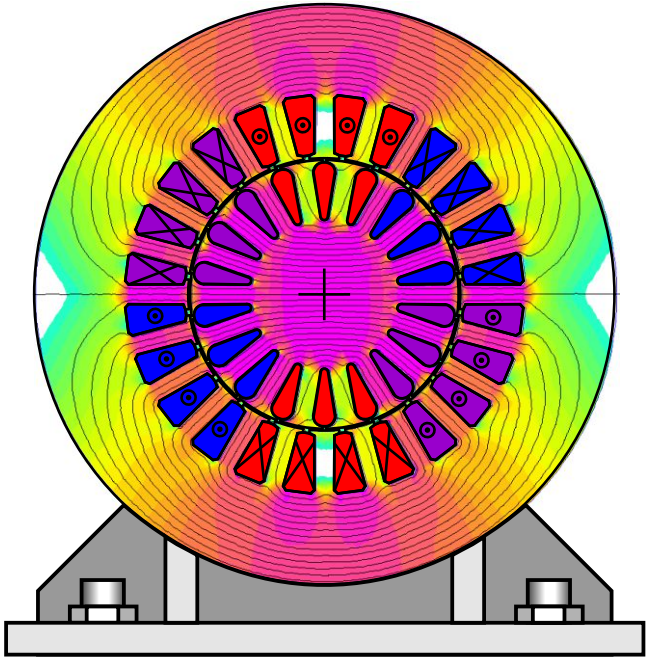
$$N_{Syn}\,[Upm] = \frac{f_{el,Stator}}{p} \cdot 60$$

Beispiel: p=3, f_{el}=50Hz $\rightarrow$ N_{Syn}=1000Upm

8.3 Ersatzschaltbild

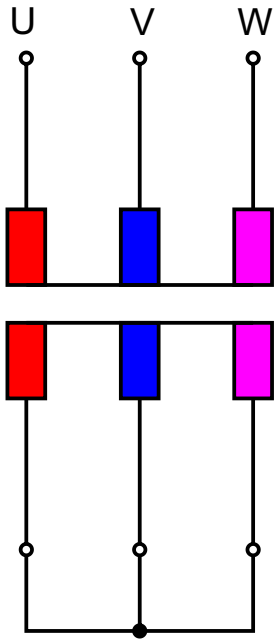
Ausgangsüberlegung: Rotor festgebremst

ASM



s = 1

Netz / Umrichter



Stator = Primärseite

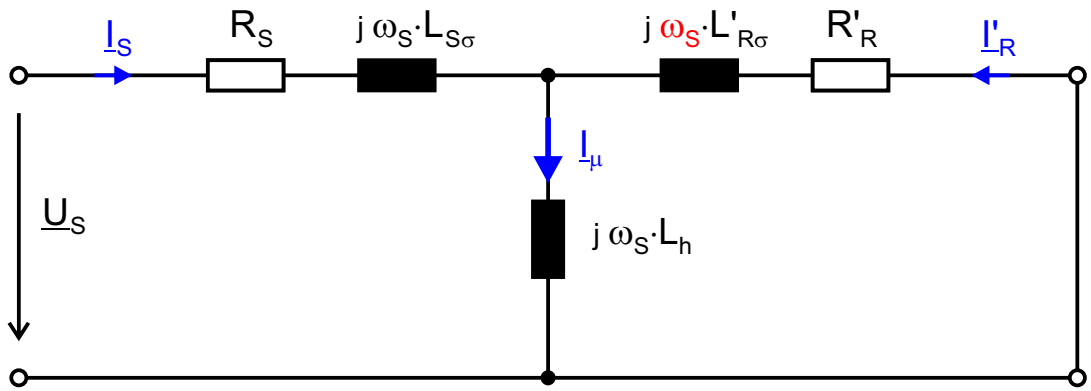
Rotor = Sekundärseite

kurzgeschlossen

8.3 Ersatzschaltbild

Rotor festgebremst

⇒ einphasiges Trafo - Ersatzschaltbild



Primärseite:
Drehstromnetz

Sekundärseite: kurzgeschlossen

Stillstand: $s = 1 \rightarrow \omega_R = \omega_S$

Primärseite: $\underline{I}_S$: Statorstrom

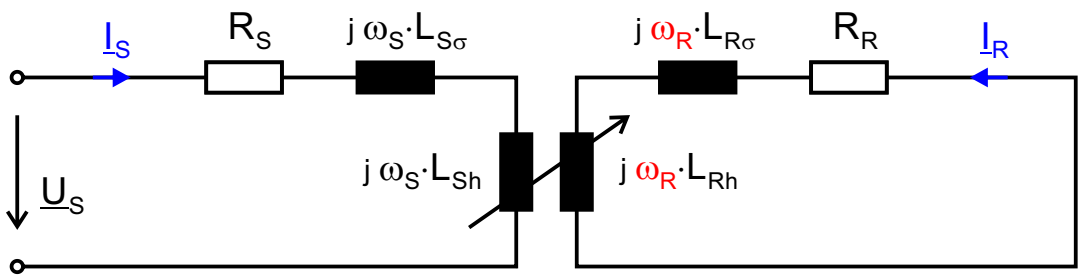
Sekundärseite: $\underline{I}'_R$: Rotorstrom, mit dem Windungszahlenverhältnis umgerechnet auf die Primärseite

Querzweig: $\underline{I}_\mu$: Magnetisierungsstrom, magn. Kopplung Stator ↔ Rotor

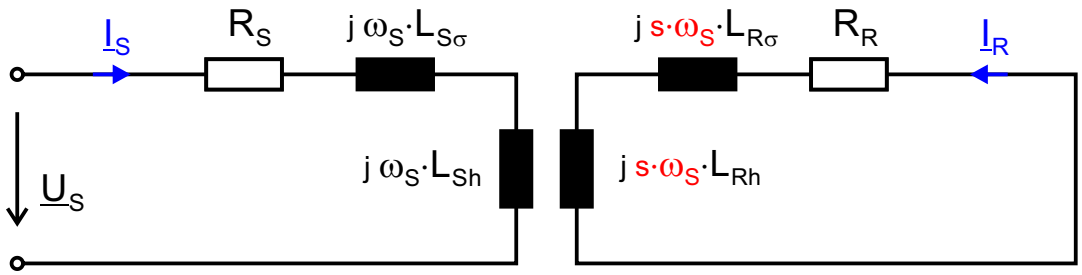
8.3 Ersatzschaltbild

Rotor nicht festgebremst:

s ≠ 1

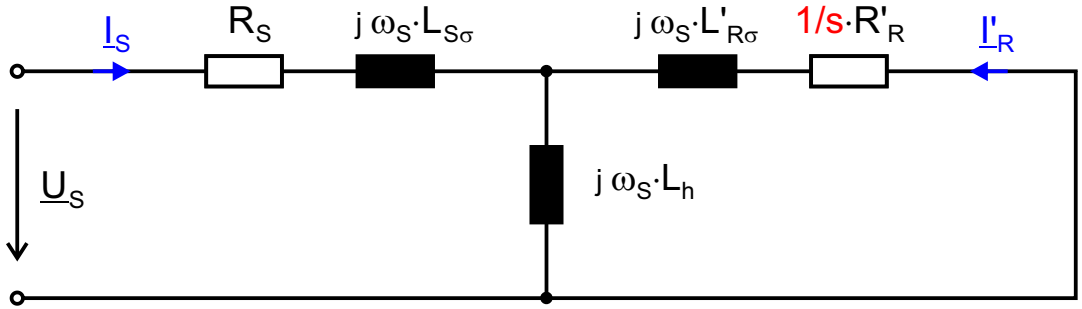


Rotorstrom läuft mit ω_R



$\omega_R = s \cdot \omega_S$

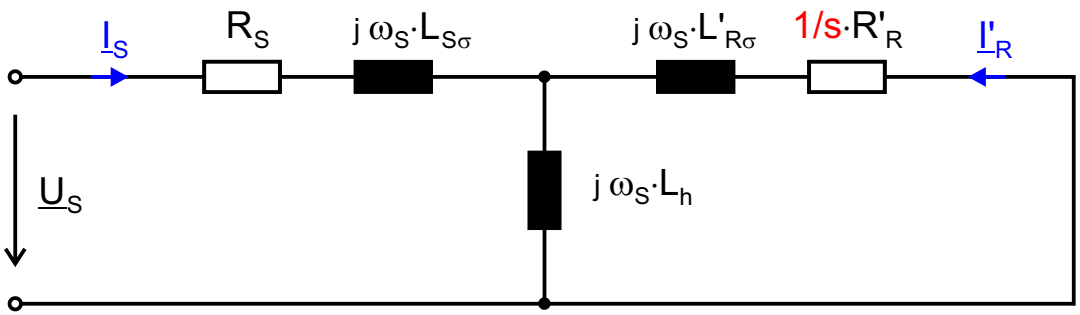
Ersatzschaltbild der ASM



Umformung: Rotorseite × 1/s

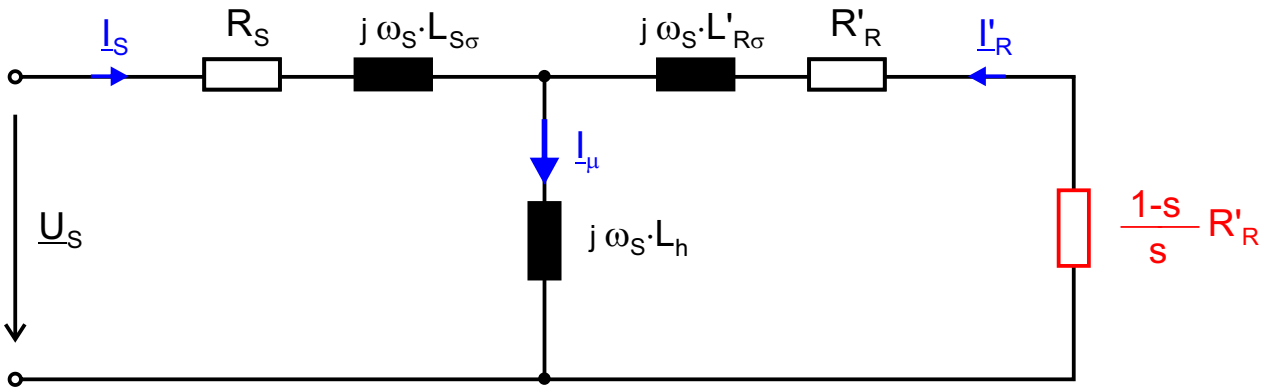
8.3 Ersatzschaltbild

weitere Umformung



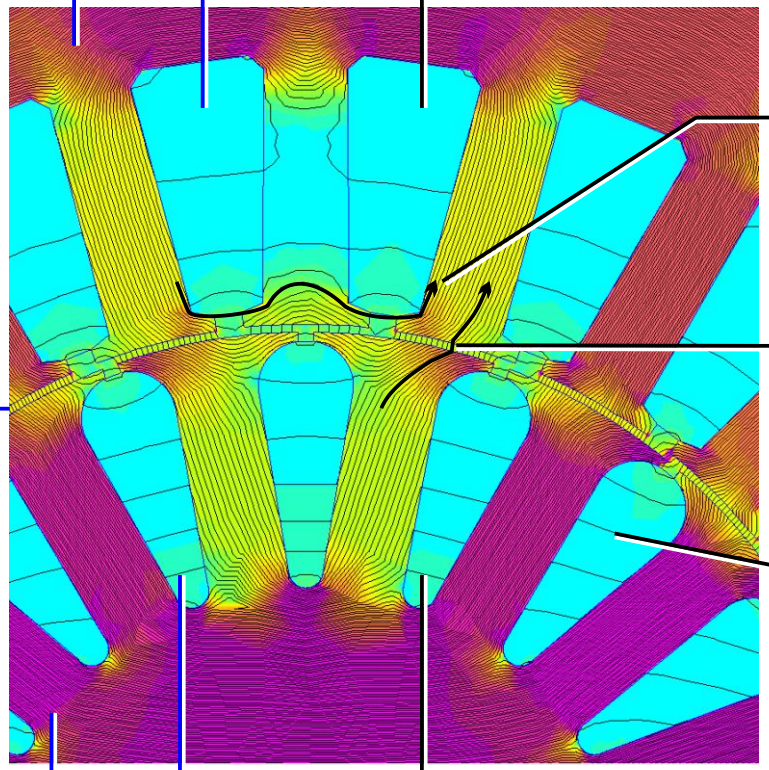
weitere Umformung
auf der Rotorseite:

$$1/s \cdot R'_R = R'_R + \frac{1-s}{s} \cdot R'_R$$



8.3 Ersatzschaltbild

Zuordung Ersatzschaltbildelemente – Eisenkreis



Flussverkettung Stator ↔ Stator: Statorstreuinduktivität $L_{S\sigma}$

magn. Kopplung Stator ↔ Rotor via Luftspalt: Hauptinduktivität·L_h

Flussverkettung Rotor ↔ Rotor: Rotorstreuinduktivität $L_{R\sigma}$

Bei großen Maschinen:

$L_h >> L_{S\sigma} + L'_{R\sigma}$

8.4 Energiebilanz und Drehmoment

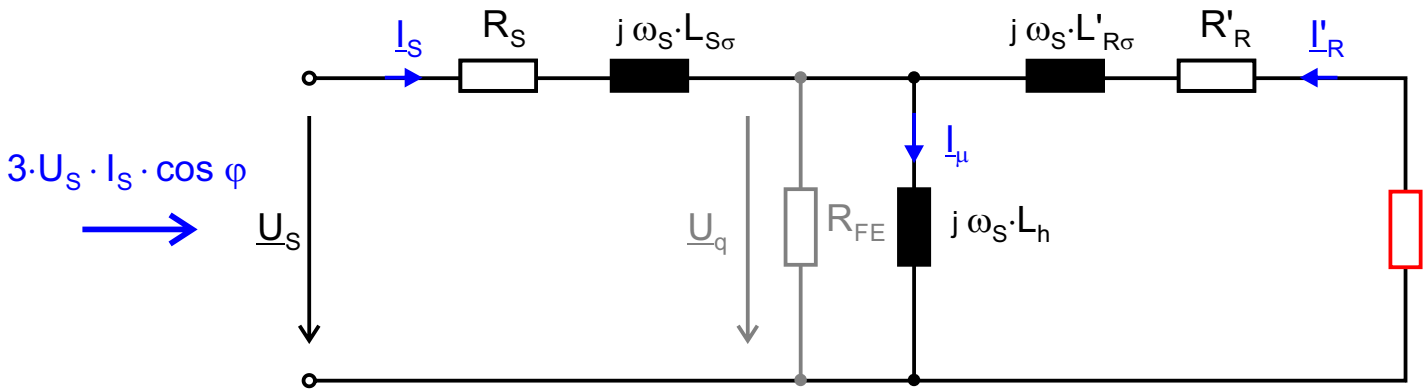
Wirkleistungsbilanz für alle 3 Stränge

Cu-Verluste Stator: $3 \cdot I_S^2 \cdot R_S$

FE-Verluste Stator: $3 \cdot U_q^2 / R_{FE}$

Cu-Verluste Rotor: $3 \cdot I'^2_R \cdot R'_R$

FE-Verluste Rotor:
vernachlässigbar bei kleinen Schlupfwerten.
f_r beträgt dann nur 1..2 Hz
Eisenverluste sind stark frequenzabhängig!



$\rightarrow 3 \cdot I'^2_R \cdot \frac{1-s}{s} R'_R$

$\downarrow$

elektro-mechanische Energiewandlung

$\downarrow$

$M_i \cdot \omega_{mech} \rightarrow$

Pauschale Berücksichtigung der Eisenverluste über einen Widerstand parallel zur Hauptinduktivität.
$\underline{U}_q$ ist die Spannung, die durch das Hauptfeld induziert wird.

Ersatzschaltbild: einphasig, repräsentiert jedoch alle 3 Stränge
Voraussetzung: identische Effektivwerte, jeweils 120° Phasenverschiebung

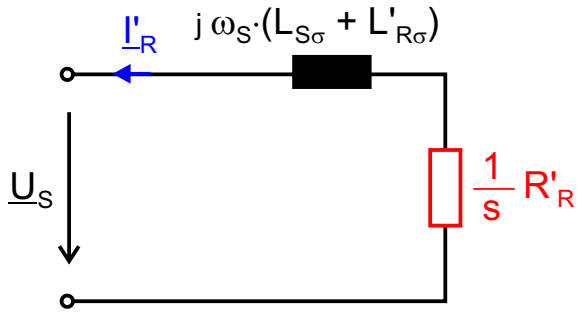
8.4 Energiebilanz und Drehmoment

Drehmomentenverlauf aus Kloß'scher Formel

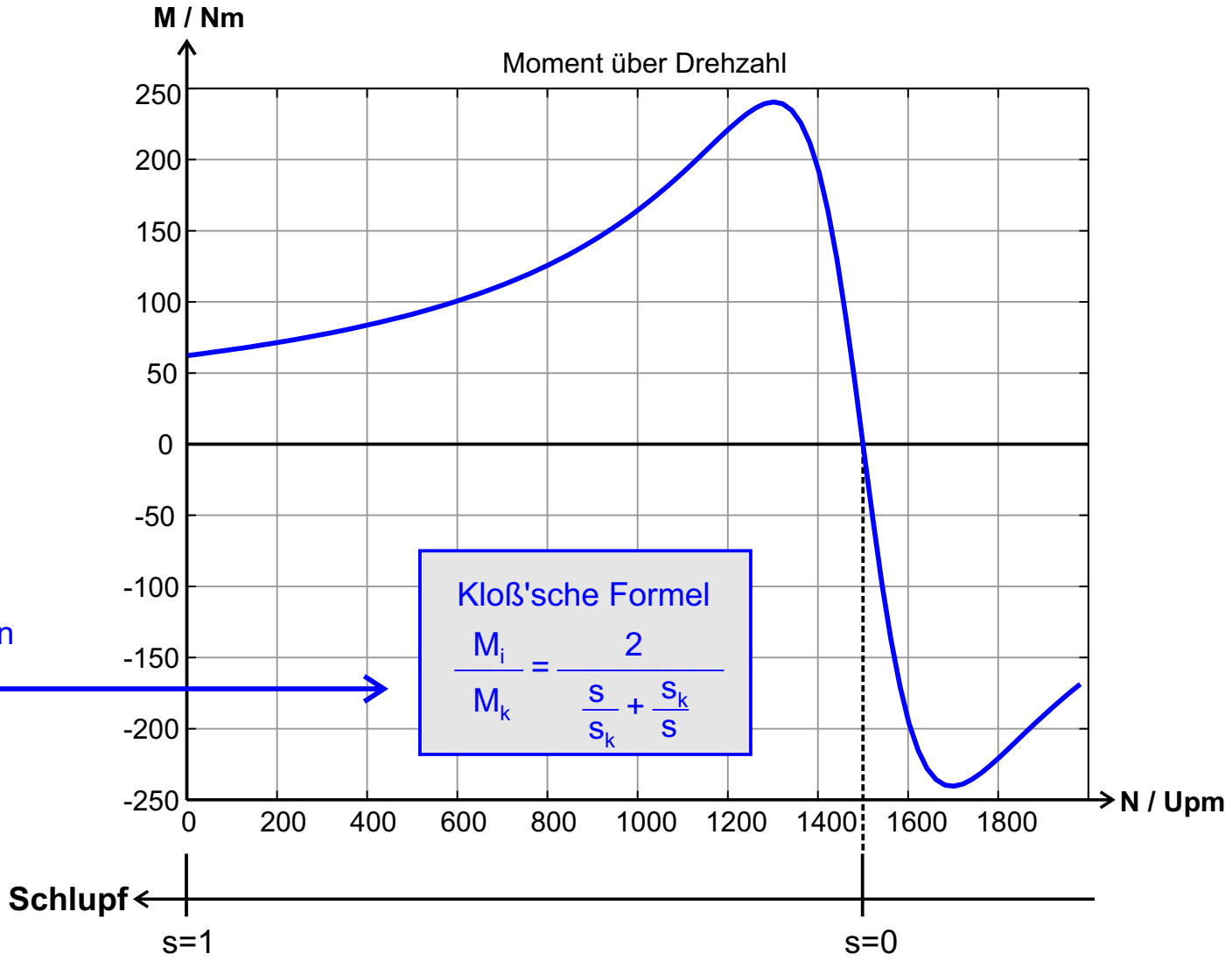
$$\rightarrow \quad M_i \cdot \omega_{mech} = 3 \cdot I'^{\,2}_R \cdot \frac{1-s}{s} R'_R$$

$\downarrow$

- ESB vereinfachen ($I_\mu = 0$, $R_S = 0$)



- $\underline{I}'_R$ berechnen, Gleichung umstellen
- Parameter zusammenfassen



8.4 Energiebilanz und Drehmoment

Drehmomentenverlauf aus Kloß'scher Formel

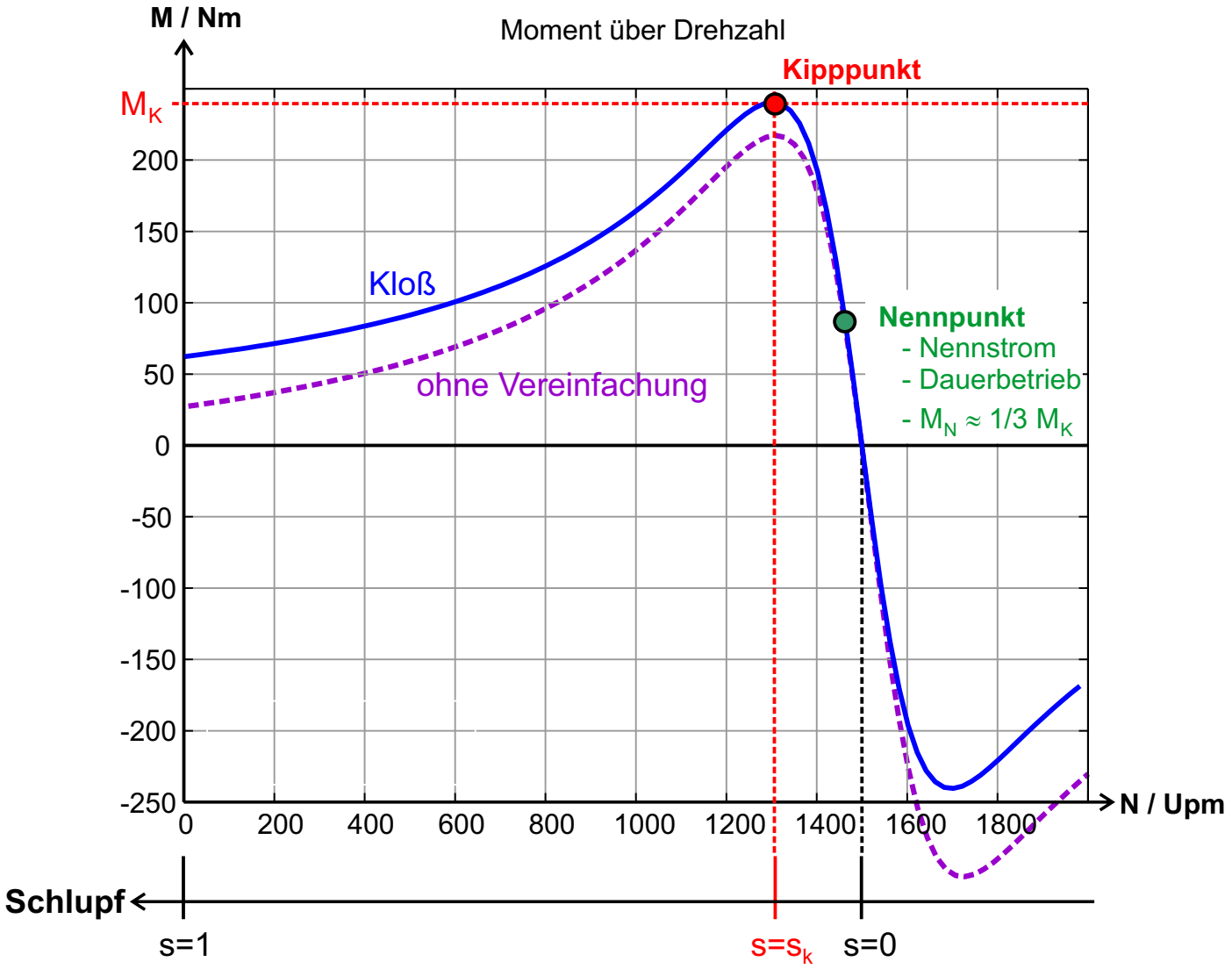
Kippmoment:

$$M_k \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{L_{S\sigma} + L'_{R\sigma}} \cdot \left(\frac{U_s}{\omega_S}\right)^2$$

Kippschlupf:

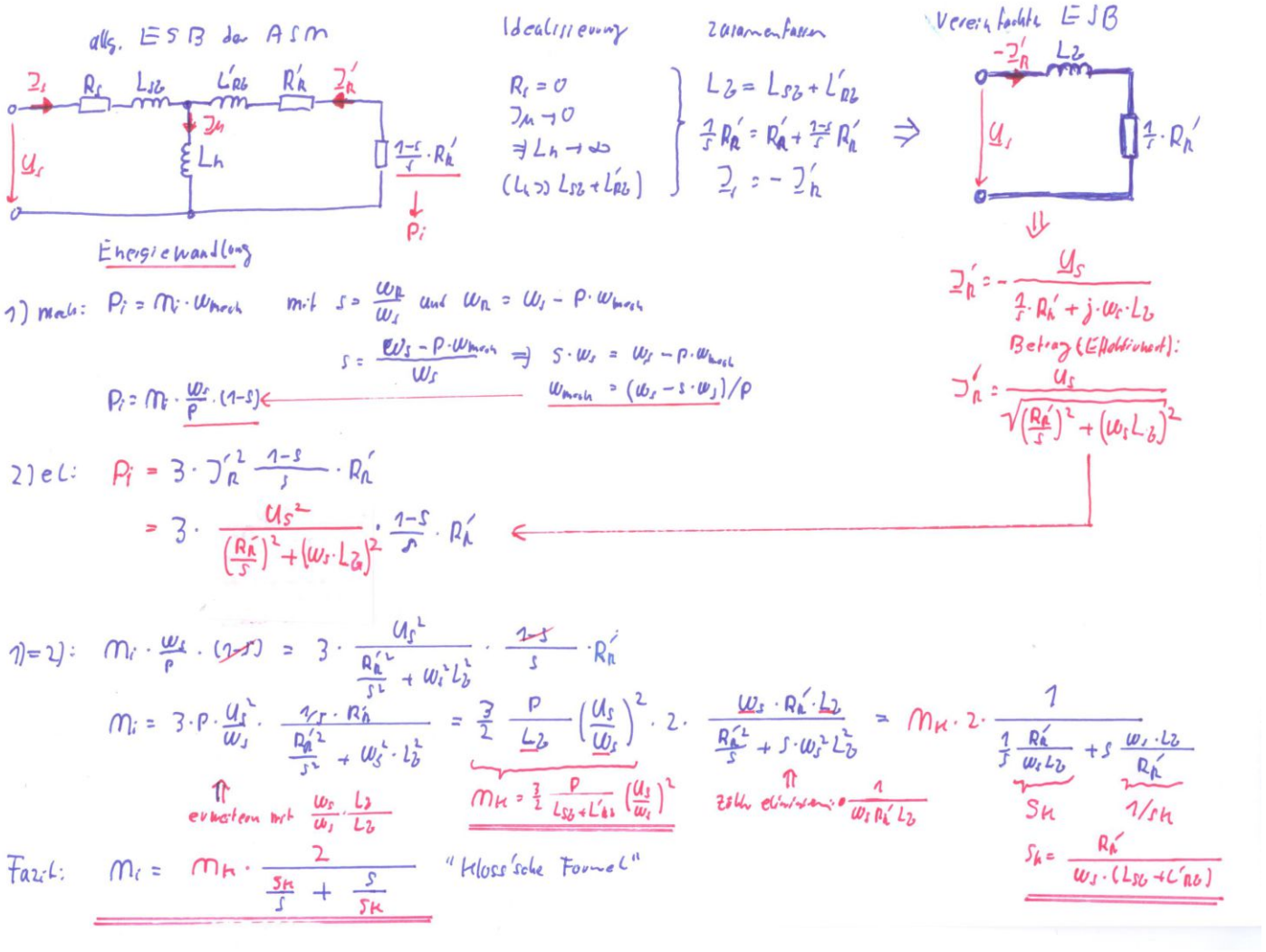
$$s_k \approx \frac{R'_R}{\omega_S \cdot (L_{S\sigma} + L'_{R\sigma})}$$

die Vereinfachung $I_\mu = 0$, $R_S = 0$ ist nur für große ASM zulässig, bei kleinen ASM Abweichungen zur realen Drehmomentkurve!



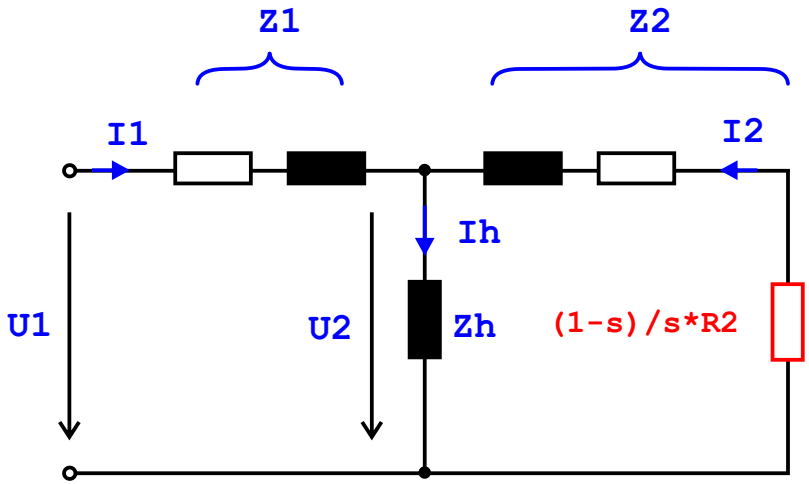
8.4 Energiebilanz und Drehmoment

Exkurs: Herleitung Kloß'sche Formel



8.4 Energiebilanz und Drehmoment

Alternative: Matlab-Skript anaASM.m



Indices hier:

"1" = Stator

"2" = Rotor

"s" = Strang

"h" = Haupt-

"i" = innere ...

Schlupfabhängigkeit:

z.B. s = [0:0.01:1] (Vektor!)

```
% Berechnung Stromaufnahme Stator
% ------------------------------------------------

% Statorlängs-, Rotorlängs- und Hauptimpedanz
Z1    = R1 + j*2*pi*f1*L1s;
Z2    = R2 + j*2*pi*f1*L2s + (1-s)./s*R2;
Zh    = j*2*pi*f1*Lh;

% Gesamtimpedanz: Z1 in Serie mit (Z2 parallel Zh)
Zges = Z1 + (Z2.*Zh)./(Z2+Zh);

I1    = U1./Zges;

% Berechnung Rotor- und Magnetisierungsstrom
% ------------------------------------------------

% Spannung Rotorkreis = Spannung an Hauptreaktanz
U2    = U1 - I1.* Z1;

% Rotorstrom
I2    = U2./Z2;

% Magnetisierungsstrom
Ih    = U2./Zh;

% Berechnung Drehmoment mit Hilfe Rotorstrom
% ------------------------------------------------
Pi    = 3*abs(I2).^2 .* (1-s)./s*R2;
Mi    = Pi./N * 30/pi;
```

8.5 Statisches Betriebsverhalten

Einflussmöglichkeiten auf den Drehmomentenverlauf

blau: Ausgangskurve

rot: R_R verdoppelt —

R_R vervierfacht ---

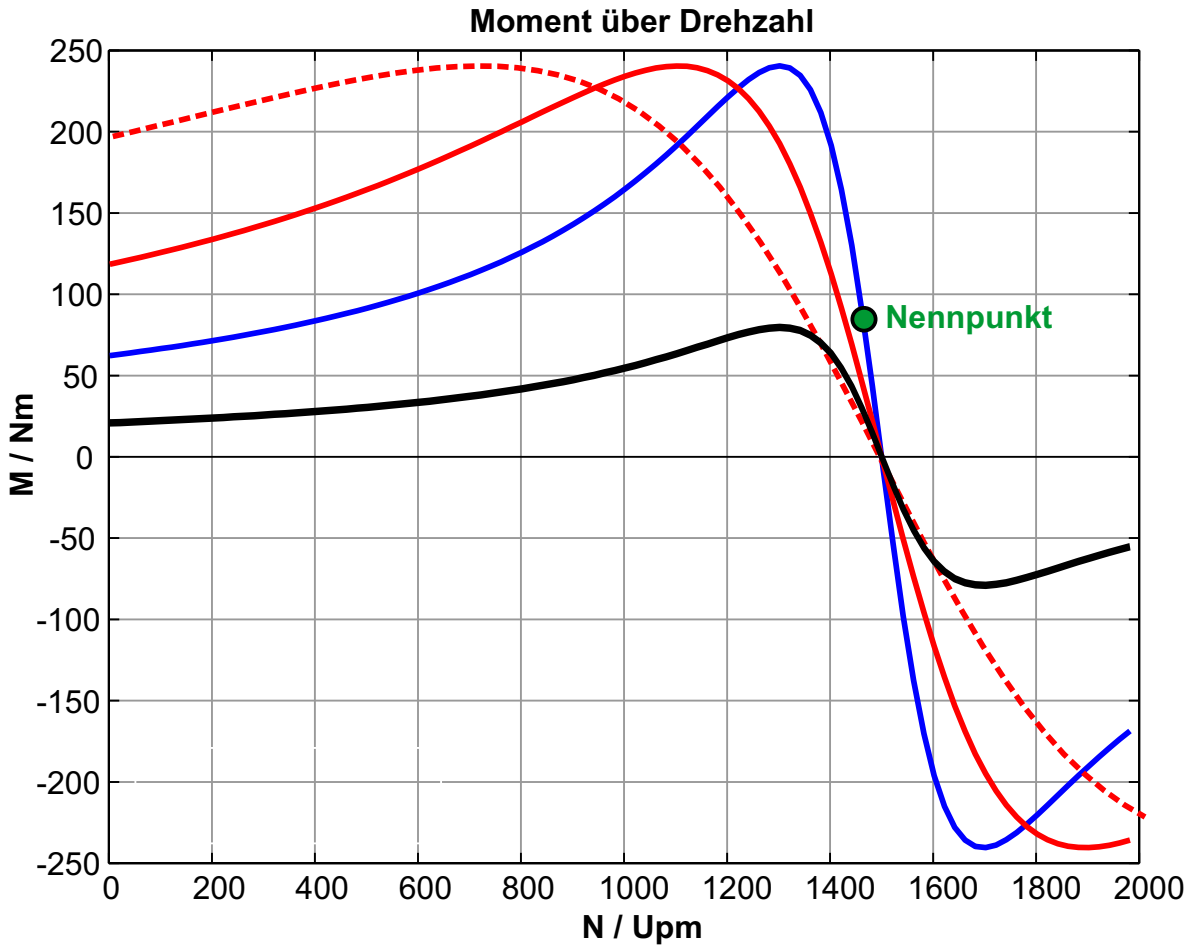
$$s_k \approx \frac{R'_R}{\omega_S \cdot (L_{S\sigma} + L'_{R\sigma})}$$

sw: U_S um den Faktor $\sqrt{3}$ reduziert

z.B. 230V anstatt 400V Strangspannung,

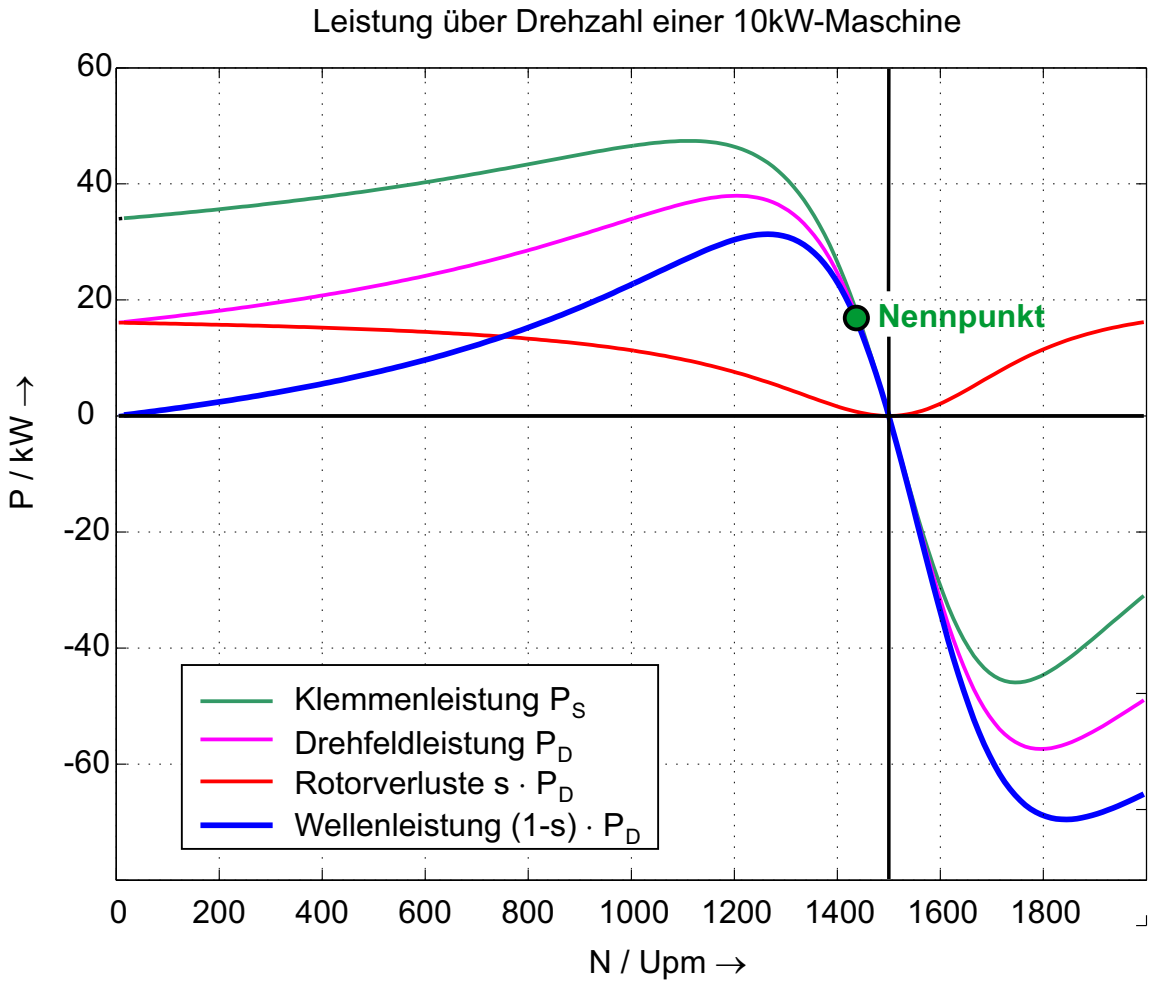
da Maschine falsch angeschlossen

$$M_k \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{L_{S\sigma} + L'_{R\sigma}} \cdot \left(\frac{U_s}{\omega_S}\right)^2$$



8.5 Statisches Betriebsverhalten

Drehmoment aus Leistungsbilanz



Klemmenleistung

$$P_S = 3\, U_S \cdot I_S \cdot \cos\varphi$$

- $P_{VCu,S} = 3 \cdot I_S^2 \cdot R_S$
- $P_{VFe,S} = 3 \cdot U_q^2 / R_{FE}$

Drehfeldleistung

$$P_D = P_S - P_{V,S}$$

- $P_{VCu,R} = s \cdot P_D$
- $P_{VFe,R} \approx 0$

Wellenleistung

$$P_i = P_D - P_{V,R}$$
$$= P_D \cdot (1-s)$$
$$= M_i \cdot \omega_{mech}$$

Drehmoment:

$$M_i = P_D \cdot \frac{p}{\omega_s}$$

8.5 Statisches Betriebsverhalten

Verlauf der Stromaufnahme über Drehzahl

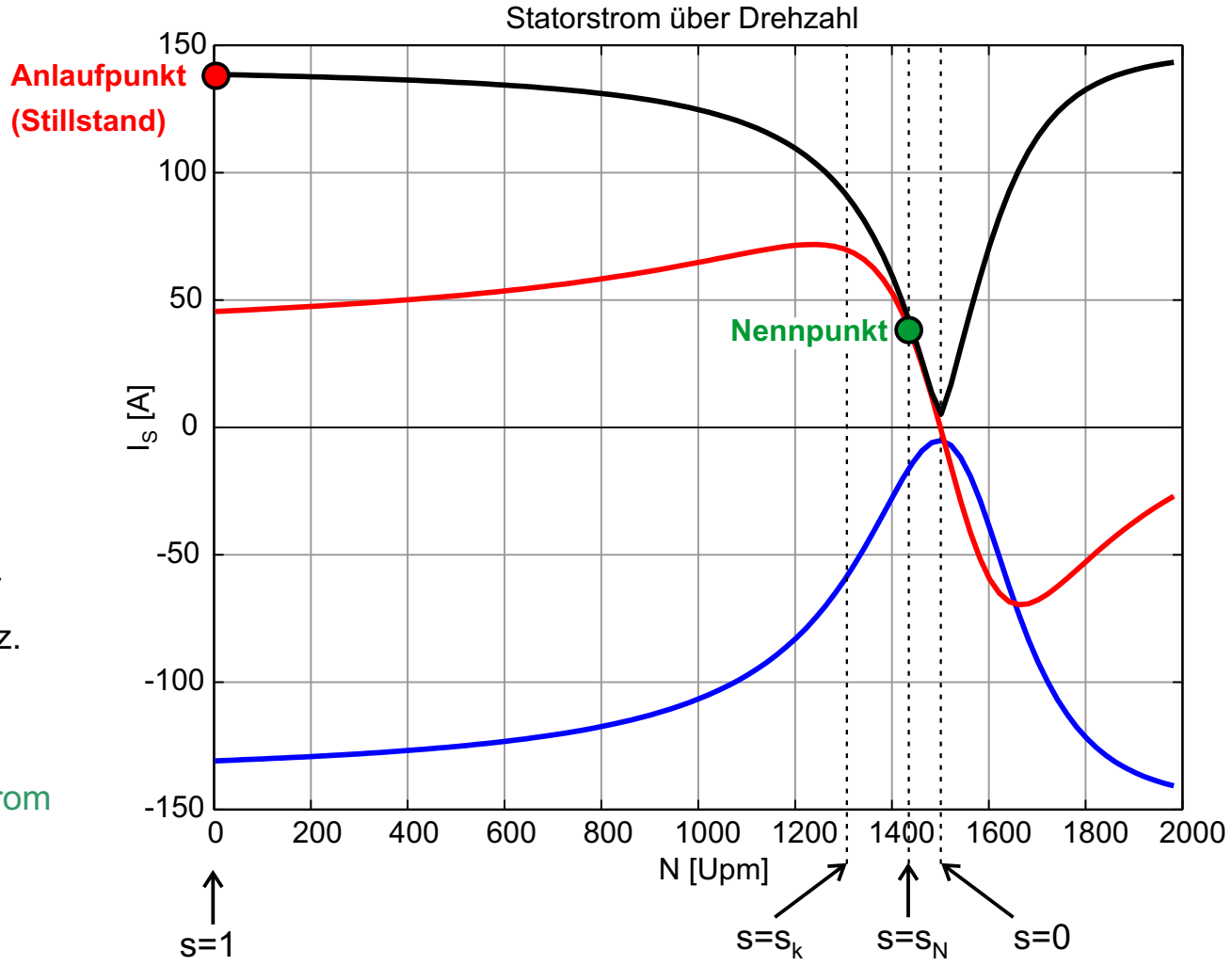
rot: Realteil
→ Wirkleistung

blau: Imaginärteil
→ Blindleistung

sw: Betrag
→ Klemmenstrom

Fazit: hoher, aber letztlich begrenzter Anlaufstrom der ASM am starren Netz.
⇒ Start am Netz prinzipiell möglich.

Typisch: Anlaufstrom = 6..7 × Nennstrom



8.5 Statisches Betriebsverhalten

Zur Stabilität von Betriebspunkten

Momentenbilanz:

$M_i = M_{Last} + J \cdot d\omega/dt$

Momentenüberschuss:

$M_i > M_{Last}$

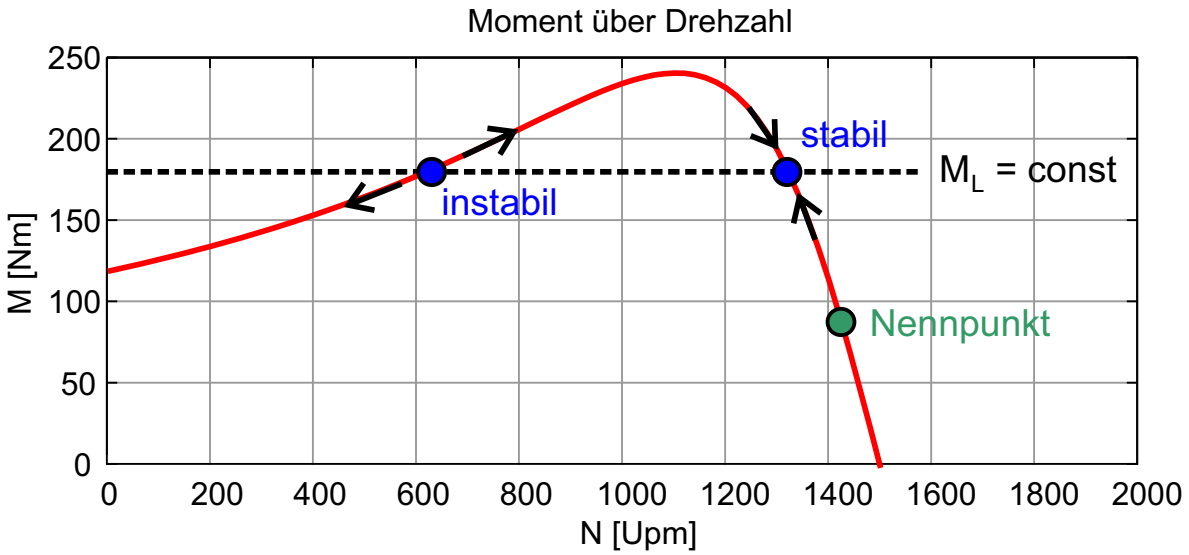
$d\omega/dt > 0$: N steigt

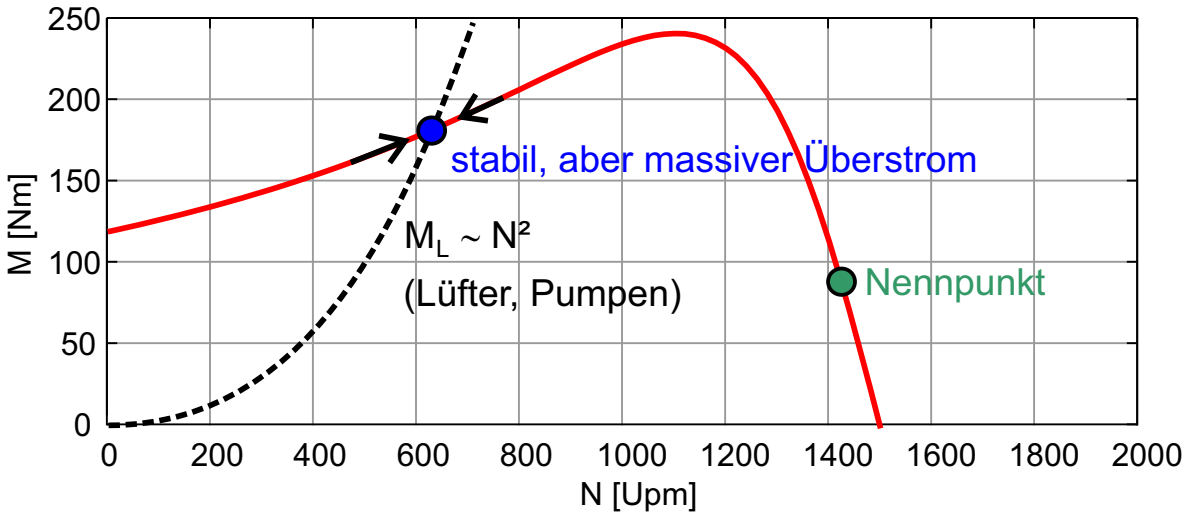
Momentendefizit:

$M_i < M_{Last}$

$d\omega/dt < 0$: N fällt

----- Lastkennlinie (Gegenmoment)

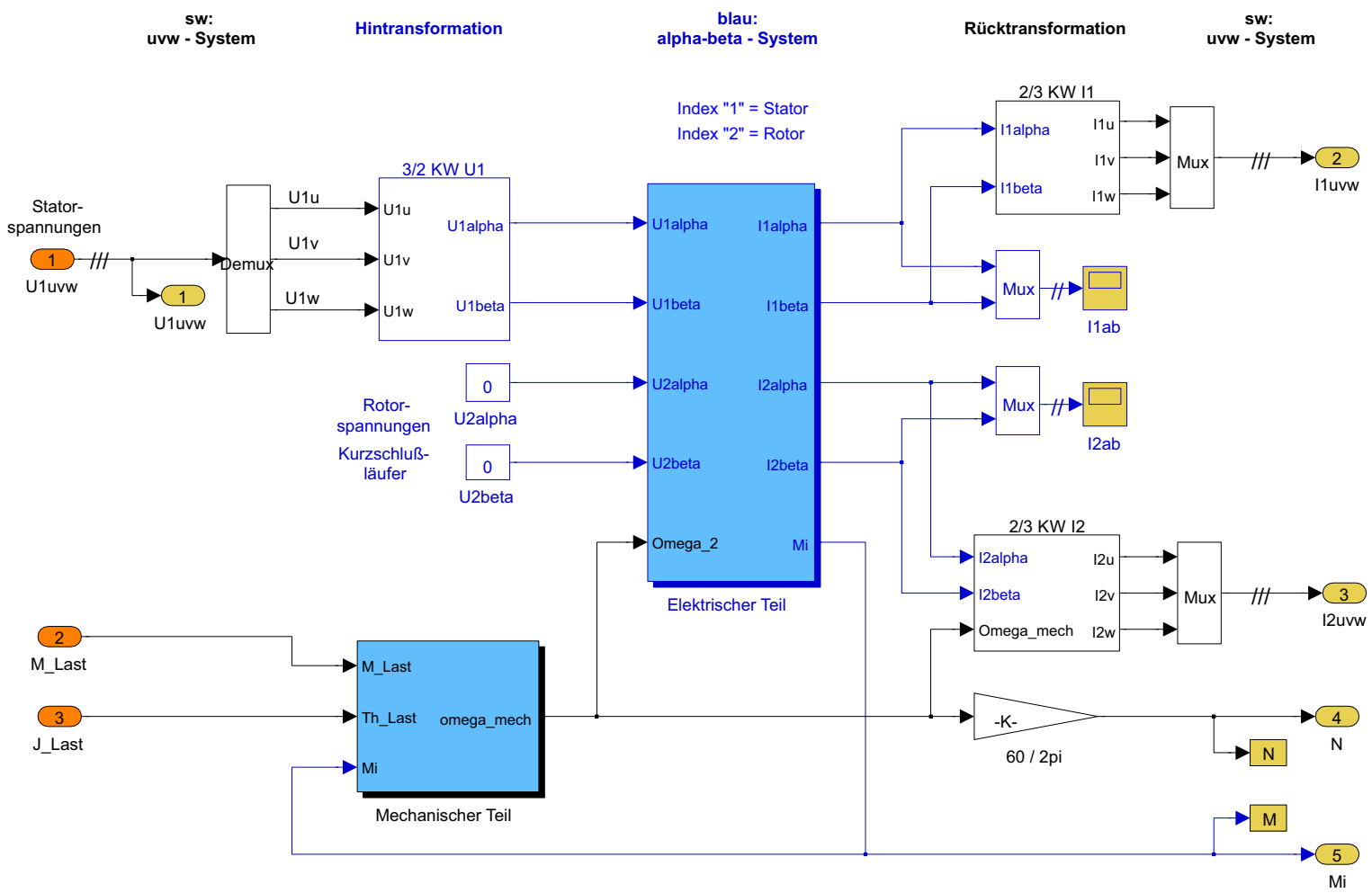




8.6 Dynamisches Betriebsverhalten

Analysewerkzeug: Simulinkmodell

ASM-Modell im statorfesten alpha-beta-System



Rechenweg:

Hintransformation
in das α-β-System

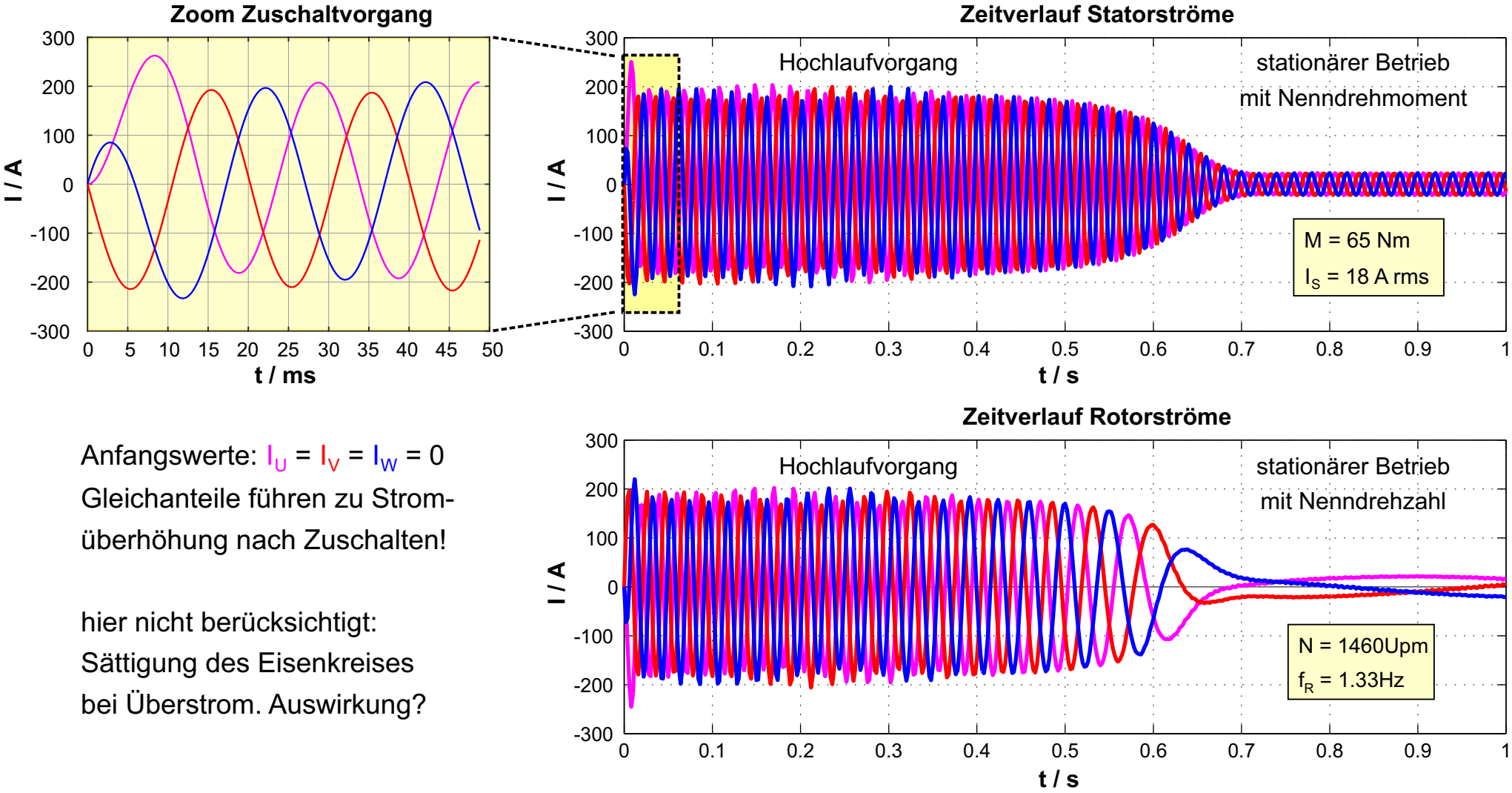
Lösung der
Differentialgleichungen
"Elektrischer Teil"

Rücktransformation
in das UVW-System

mehr dazu:
Mastervorlesung
Elektrische Antriebe

8.6 Dynamisches Betriebsverhalten

Simulation Hochlaufvorgang am starren Netz → Analyse Zeitverläufe

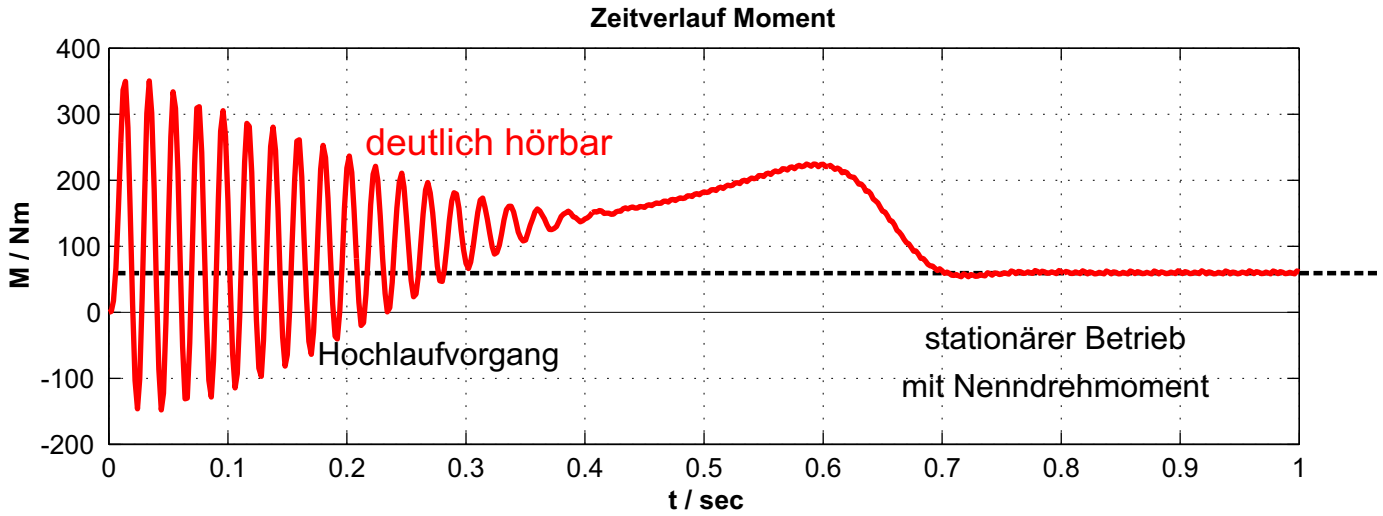


Anfangswerte: $I_U = I_V = I_W = 0$
Gleichanteile führen zu Strom-überhöhung nach Zuschalten!

hier nicht berücksichtigt:
Sättigung des Eisenkreises bei Überstrom. Auswirkung?

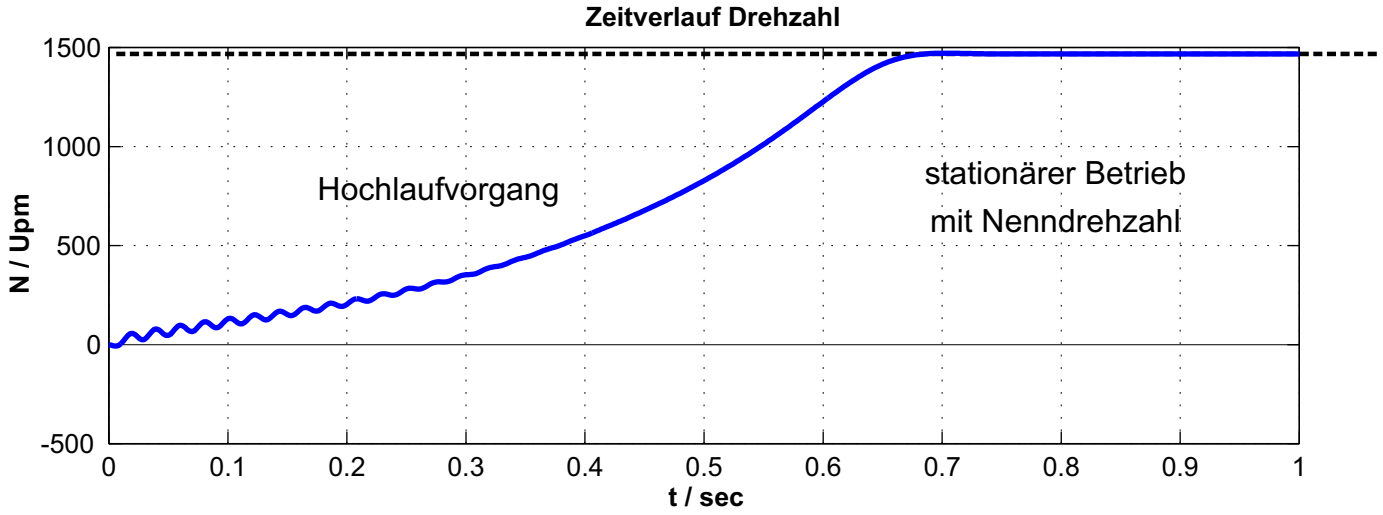
8.6 Dynamisches Betriebsverhalten

Simulation Hochlaufvorgang am starren Netz → Analyse Zeitverläufe



Belastung der Maschine
konstant mit Nennmoment:

$M_L = M_N = 65Nm$



stationär, nach Hochlauf:

$N = N_N = 1460Upm$

daraus Leistung:

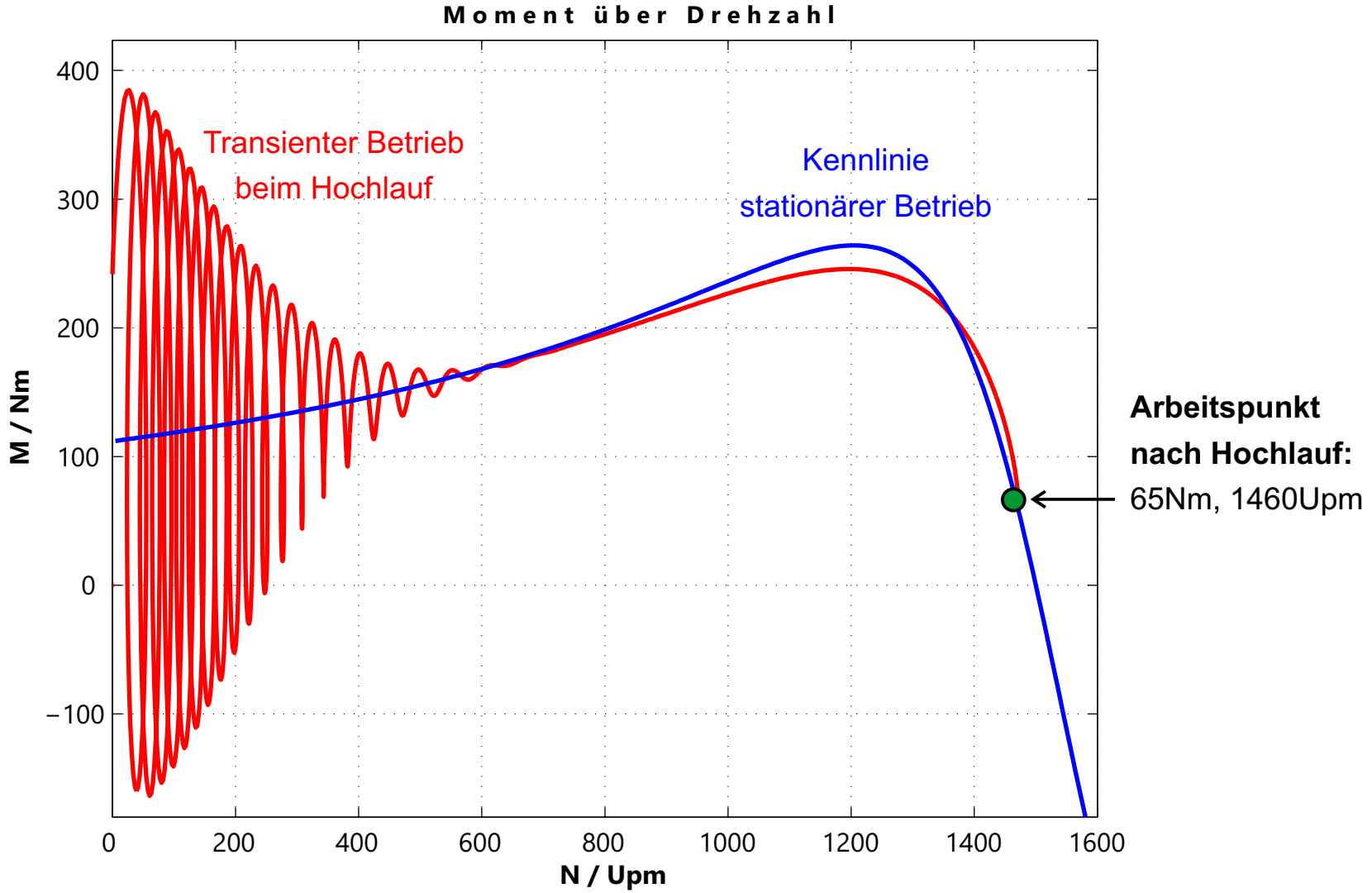
$P = M_L \cdot \omega = 10kW$

Schlupf:

$s = 2{,}67\ \%$

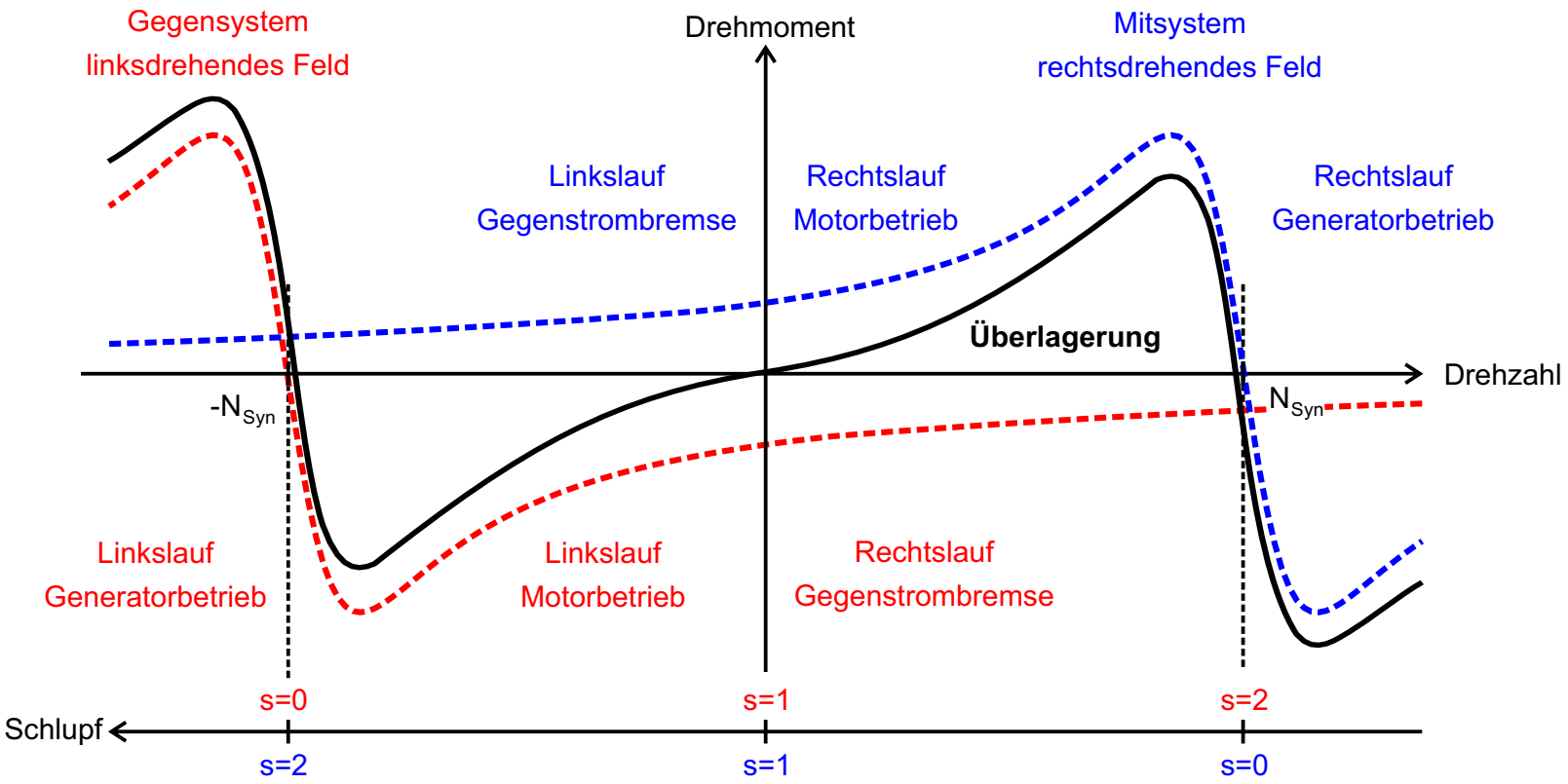
8.6 Dynamisches Betriebsverhalten

Simulation Hochlaufvorgang am starren Netz in xy-Darstellung



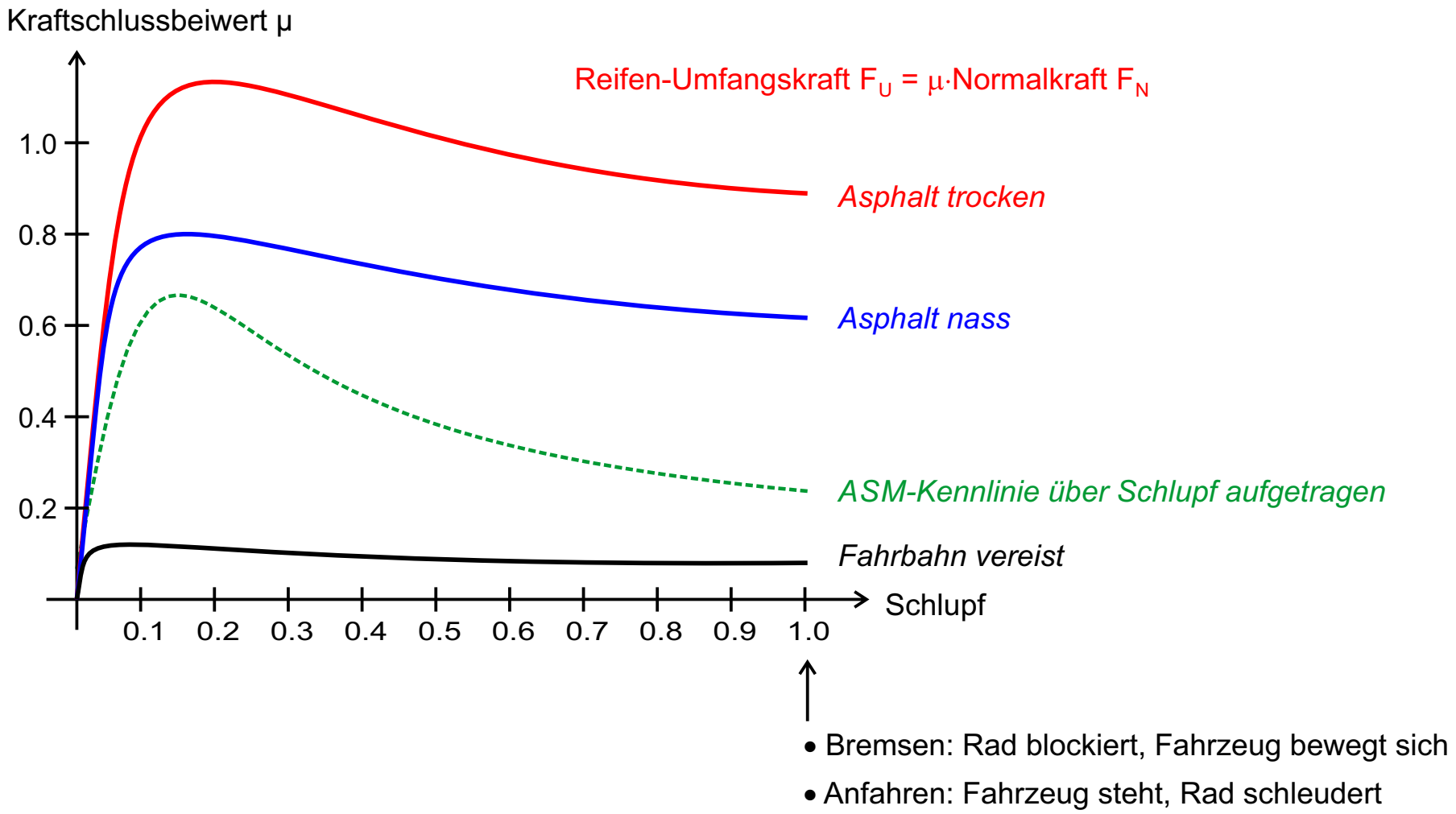
8.7 Zusatzwissen

Einphasenbetrieb = Überlagerung von Mit- und Gegensystem (siehe Abschn. 7.6)



Fazit:

- kein Anlaufmoment: man kann die Maschine nach rechts oder links "anwerfen"
- Betrieb im Nennpunkt mit reduziertem Wirkungsgrad möglich
- Kondensatormotor: Anlauf mit Hilfsphase (Phasendrehung durch Anlaufkondensator)

8.7 Zusatzwissen

Rad-Schiene und Reifen-Straße: Kraftübertragung nur mit Schlupf möglich