

# Grundlagen elektrische Antriebe

## Kapitel 9: Gesteuerter Betrieb 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:** 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 9: Betrieb der Asynchronmaschine am Netz**

9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

9.2 Hochlaufen

9.3 Bremsen

9.4 Schleifringläufer

9.5 Polumschaltbare ASM

9.6 Energieeffizienz

## 9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

### Beispiel Typenschild Standardmaschine

Drehstrom - Asynchronmotor		
Hersteller/Typ EMK / HS280S-4-B3		
$\Delta/Y$ 400 / 690V	131 / 76A	
$P_N$ 75kW	S1	$\cos \varphi$ 0,88
$N_N$ 1485 min <sup>-1</sup>	$f_N$ 50Hz	
Isol.-Kl. F	IP 41	Gewicht: 591kg

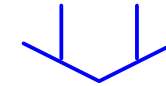
Prinzipiell:

Nennspannung Drehstromnetz = Außenleiterspannung

Strangspannung:  $\Delta$ -Schaltung  $\Rightarrow U_A = U_S = 400V$

Strangstrom: Y-Schaltung  $\Rightarrow I_A = I_S = 76A$

Leistungsangabe: Wellenleistung  $P_{N,W}$



Wirkleistungsaufnahme aus dem Netz:

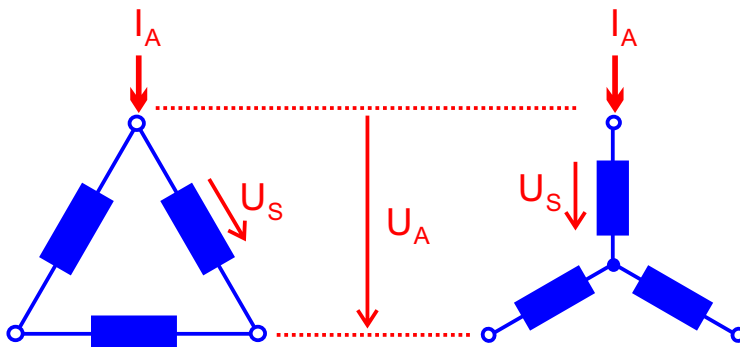
$$P_S = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi = 80kW$$

$\Delta$ - oder Y-Daten

$$\text{Wirkungsgrad: } \eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} = \frac{P_{N,W}}{P_S} = 93.8\%$$

Synchronpunkt:  $N_N = 1485 \text{Upm} \Rightarrow N_{\text{Syn}} = 1500 \text{Upm}$ ,  $p = 2$

$$\text{Nennschlupf: } s_N = \frac{N_{\text{Syn}} - N_N}{N_{\text{Syn}}} = 1\%$$



**Dreieck**

$$U_S = U_A$$

**Stern**

$$U_S = \frac{1}{\sqrt{3}} U_A$$

## 9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

### Ausführungsbeispiele für Asynchronmaschinen



200 kW - Maschine,  $p = 2$ , Stern-Dreieckanlauf



Pumpenantrieb, vertikal



Maschine für Umrichterbetrieb  
78 kW,  $p = 4$ ,  $N_N = 3600$  Upm



16 W - Versuchsmotor  
(Axialflussmaschine)



4 kW - Maschine, 80er-Jahre  
aus Niederbayern (Loher)



alter Schleifringläufer, 4 kW



55 kW- Standardmaschine, mit Kupplung

Bilder: A. Kleimaier, HS Landshut

# 9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

## Betriebsarten und Isolierstoffklassen

### Betriebsart...

- S1** Dauerbetrieb mit konstanter Belastung
- S2** Kurzzeitbetrieb mit konstanter Belastung
- S3** Aussetzbetrieb ohne Einfluss des Anlaufens auf die Temperatur
- S4** Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufens auf die Temperatur
- S5** Aussetzbetrieb mit Einfluss Anlauf/ E-Bremmung auf die Temperatur
- S6** Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung
- S7** Ununterbrochener Betrieb mit Anlauf und E-Bremmung
- S8** Ununterbrochener Betrieb mit periodischer Drehzahländerung

Zusätzlich:

Angaben über  
Einschaltdauer  
und Anzahl der  
Lastspiele / Zeiteinheit

### Wärmeklasse...

- B** Maximaltemperatur 130°C
- F** Maximaltemperatur 155°C
- H** Maximaltemperatur 180°C

Wicklung

## 9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

### IP-Schutzarten und Norm-Bauformen

#### IP- Kennziffer 1:

##### Schutz gegen...

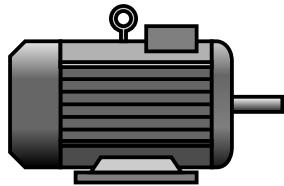
- 0 kein Schutz
- 1 Fremdkörper > 50mm
- 2 Fremdkörper > 12.5mm
- 3 Fremdkörper > 2.5mm
- 4 Fremdkörper > 1mm
- 5 Staub (staubgeschützt)
- 6 Staub (staubdicht)

#### Kennziffer 2:

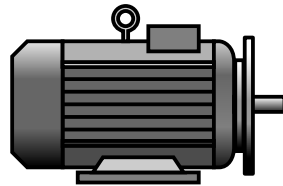
##### Schutz gegen...

- 0 kein Schutz
- 1 Tropfwasser
- 2 Tropfwasser 15°
- 3 Sprühwasser 60°
- 4 Spritzwasser aus allen Richtungen
- 5 Strahlwasser aus allen Richtungen
- 6 starkes Strahlwasser - 6K: Straßenfahrzeuge
- 7 Untertauchen / Überflutung zeitweilig
- 8 Untertauchen / Überflutung dauernd

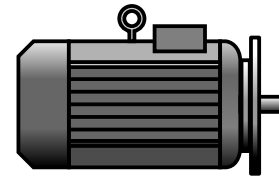
Bauform B3 mit Fuß



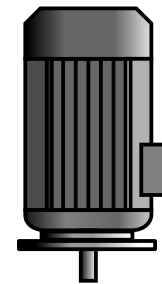
B3/B5 mit Fuß und Flansch



B5 mit Flansch



V1 vertikal



## 9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

### Normmotoren

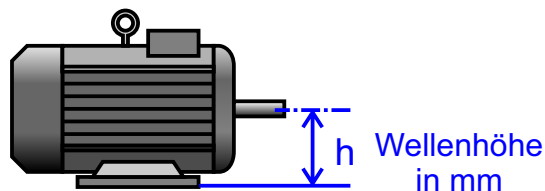
Ausführungsbeispiel  
6-polig 4kW



Katalogauszug (gekürzt und angepasst)

4-polige ASM 230/400V Bauform B3 Wirkungsgradklasse IE3

Bez. / h mm	$P_N$ kW	$N_N$ Upm	$\eta_N$ %	$\cos \varphi_N$ -	$I_{SN}$ A	$M_N$ Nm	$M_K/M_N$ -	$I_{SO}/I_{SN}$ -	m kg	ca.-Preis €
A 80	0,75	1420	82,5	0,74	1,77	5,04	2,3	6,5	12,9	150
A 90	1,50	1445	85,3	0,74	3,40	9,91	2,3	6,9	19,7	220
A 100	3,00	1435	87,7	0,78	6,33	20,0	2,3	7,6	31,3	320
A 112	4,00	1440	88,6	0,80	8,18	26,5	2,3	7,7	39,2	370
A 132	5,50	1460	89,6	0,80	11,1	36,0	2,3	7,5	53,2	560
A 132	7,50	1460	90,4	0,82	14,6	49,1	2,3	7,4	58,2	600
A 160	11,0	1465	91,4	0,82	21,2	71,7	2,3	7,5	96,5	800
A 160	15,0	1465	92,1	0,82	28,7	97,8	2,3	7,5	113	950
A 180	22,0	1470	93,0	0,85	40,2	143	2,3	7,7	184	1.400
M 200	30,0	1475	93,6	0,86	53,7	194	2,3	7,8	331	1.800
M 250	45,0	1485	94,2	0,87	79,1	289	2,3	7,3	443	2.400
M 250	55,0	1485	94,6	0,87	96,2	354	2,3	7,4	553	3.000
M 280	75,0	1486	95,0	0,87	131	482	2,3	7,4	730	3.600
M 315	110	1488	95,4	0,88	189	706	2,2	6,9	1.222	6.700
M 315	200	1490	96,0	0,88	342	1282	2,2	6,9	1.655	10.300



$M_K$ : Kippmoment

$M_N$ : Nenndrehmoment

$I_{SO}$ : Anlaufstrom (Stillst.)

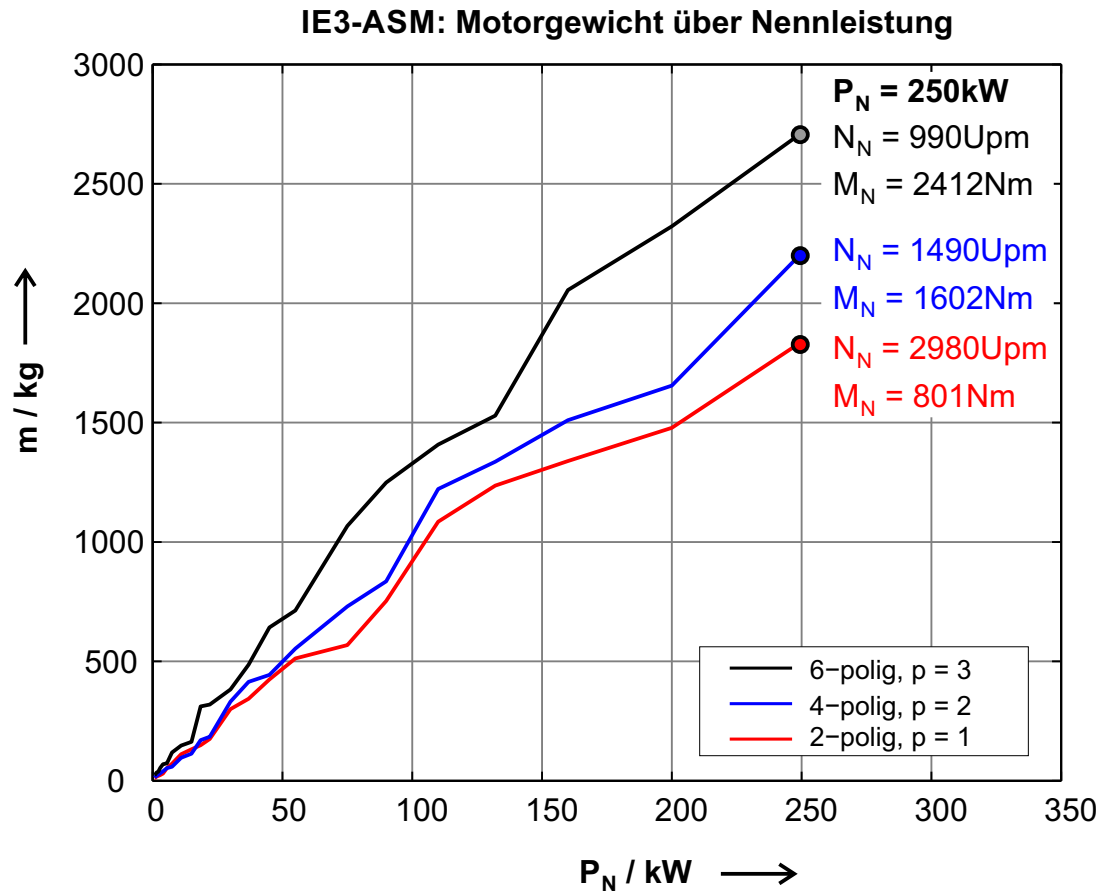
$I_{SN}$ : Nennstrom

Bild: A. Kleimaier / HS Landshut – Datenquelle (Tabelle wurde angepasst): Katalog Kemmerich Elektromotoren GmbH & Co. KG, mit freundlicher Genehmigung



## 9.1 Leistungsdaten und Kenngrößen

### Normmotoren



### Anmerkungen:

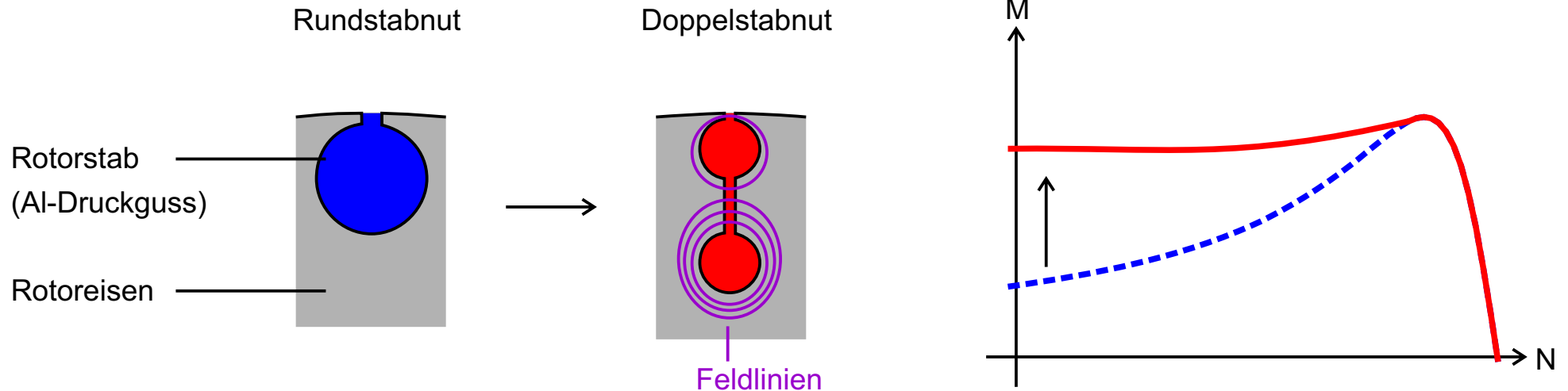
- luftgekühlte Normmotoren sind meist nur für den stationären Einsatz geeignet
- Das Drehmoment bestimmt die Baugröße, d.h. wieviel Kupfer und Eisen benötigt wird
- mit zunehmender Polpaarzahl kann jedoch der Eisenkreis kompakter gebaut werden  
⇒ reduziert die Gewichtszunahme

### Maschinen mit deutlich besserer Ausnutzung von Kupfer und Eisen:

- PMSM: bis zu 50% weniger Gewicht
- Maschinen mit höherer Nenndrehzahl
- wassergekühlte ASM, speziell für Traktion in Schienenfahrzeugen bzw. Kfz ausgelegt

## 9.2 Hochlaufen

### Erhöhung des Anlaufmomentes: Stromverdrängungsläufer



**Anlaufen: hoher Schlupf, großes  $\omega_R$ :**

- unterer Stab = hohe Gegeninduktivität
- Strom fließt bevorzugt im oberen Stab  $\rightarrow$  wirksames  $R'_R$  ist erhöht

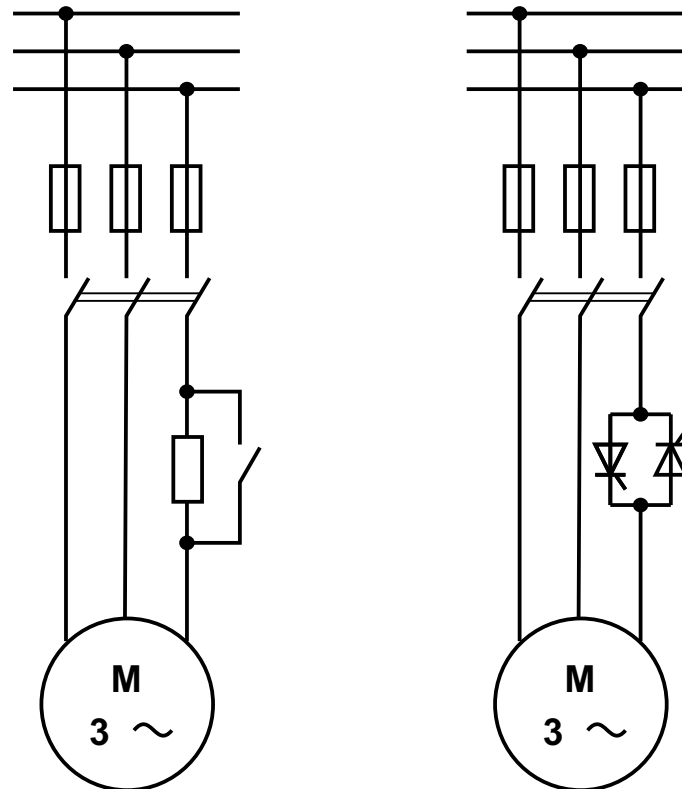
**Stationärer Betrieb: kleiner Schlupf, kleines  $\omega_R$ :**

- kaum Impedanzunterschied oben/unten
- Strom fließt in beiden Stäben  $\rightarrow R'_R$  entspricht Gesamtquerschnitt

## 9.2 Hochlaufen

### Verringerung des Anlaufstromes: **KUSA**-Schaltung

Bei Hochlauf ohne hohes Lastmoment: "**K**urzschlussläufer **S**anftanlauf"



das geht nur bei geringem Gegenmoment der Arbeitsmaschine im Anlauf, z.B. Pumpe / Lüfter

Kleine Maschinen:

Strom wird beim Anlaufen nur in einem Strang durch einen Vorwiderstand oder einen Wechselstromsteller begrenzt

unsymmetrischer Betrieb: "elliptisches Feld"

## 9.2 Hochlaufen

### Begrenzung des Anlaufstromes: Elektronischer Anlasser

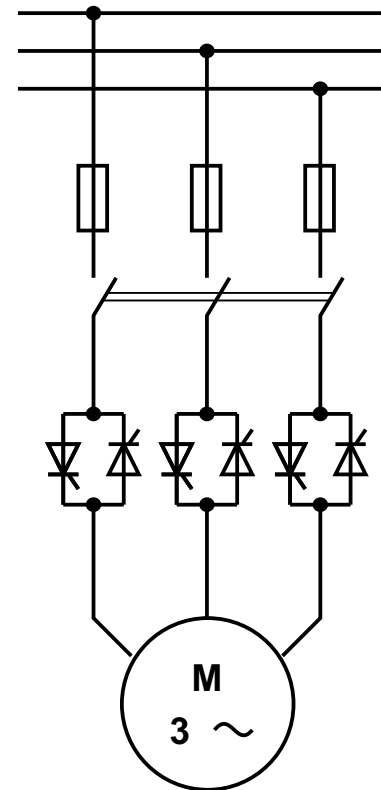
#### Sanftanlauf, Sanftstarter, Softstart:

Die Grundswingungs-Amplitude der Strangspannung wird beim Hochlaufen mit einer Rampe hochgefahren.

⚠ Das geht nur bei geringem Gegenmoment der Arbeitsmaschine im Anlauf (ab Stillstand), z.B. Pumpe / Lüfter

⚠ Die Grundfrequenz kann jedoch nicht verändert werden. Keine Drehzahlstellung auf diese Weise möglich!

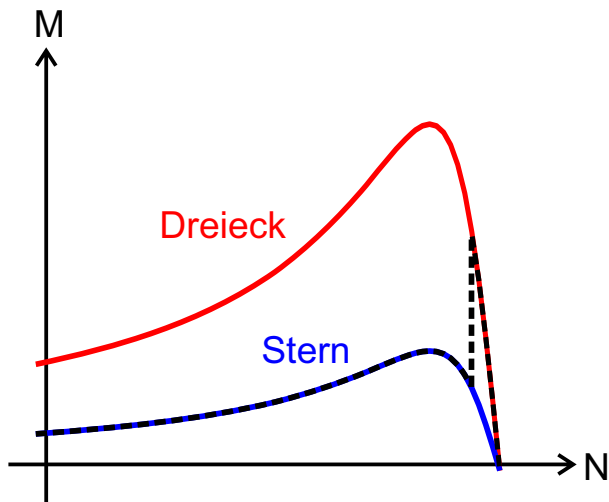
dreiphasige Ausführung  
für größere Maschinen



ggf. mit  
Überbrückungsrelais  
für Dauerbetrieb

## 9.2 Hochlaufen

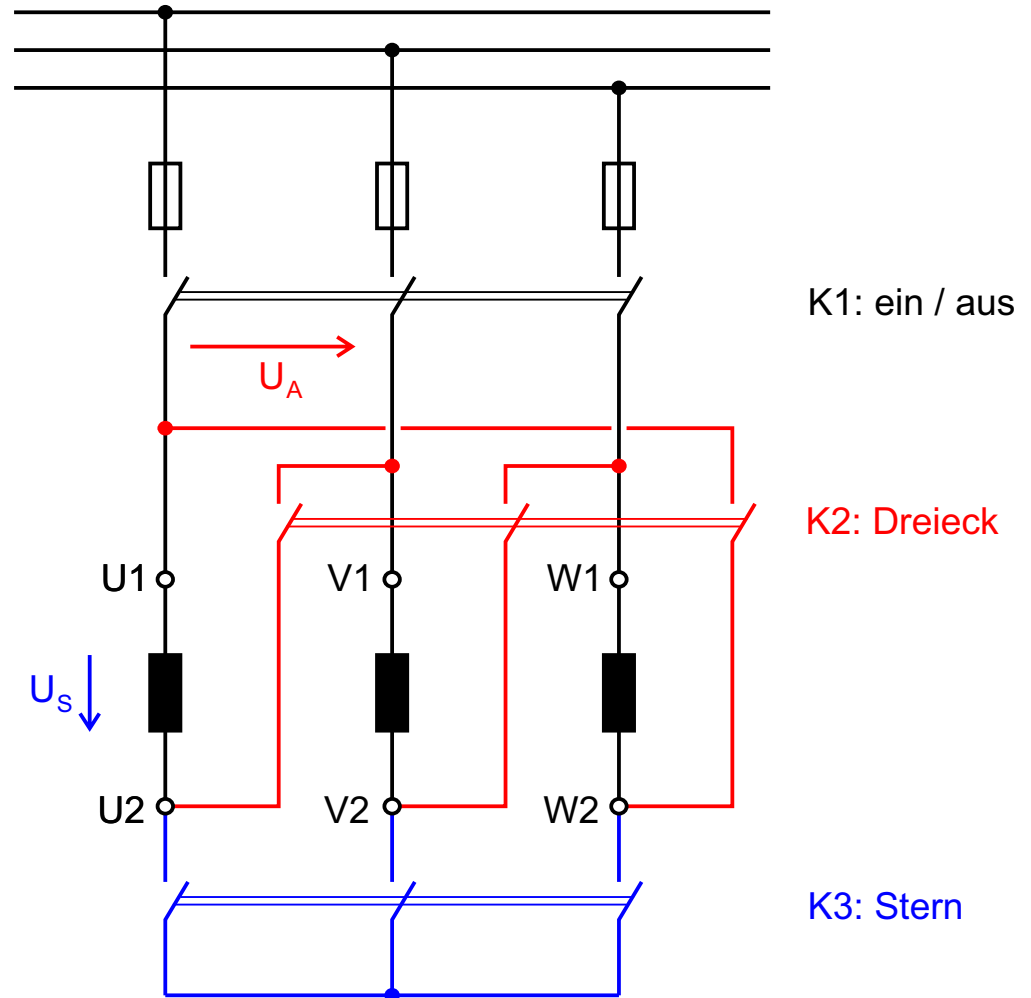
### Begrenzung des Anlaufstromes: Stern - Dreieck - Hochlauf



$$\text{Stern: } U_S = \frac{1}{\sqrt{3}} U_A$$

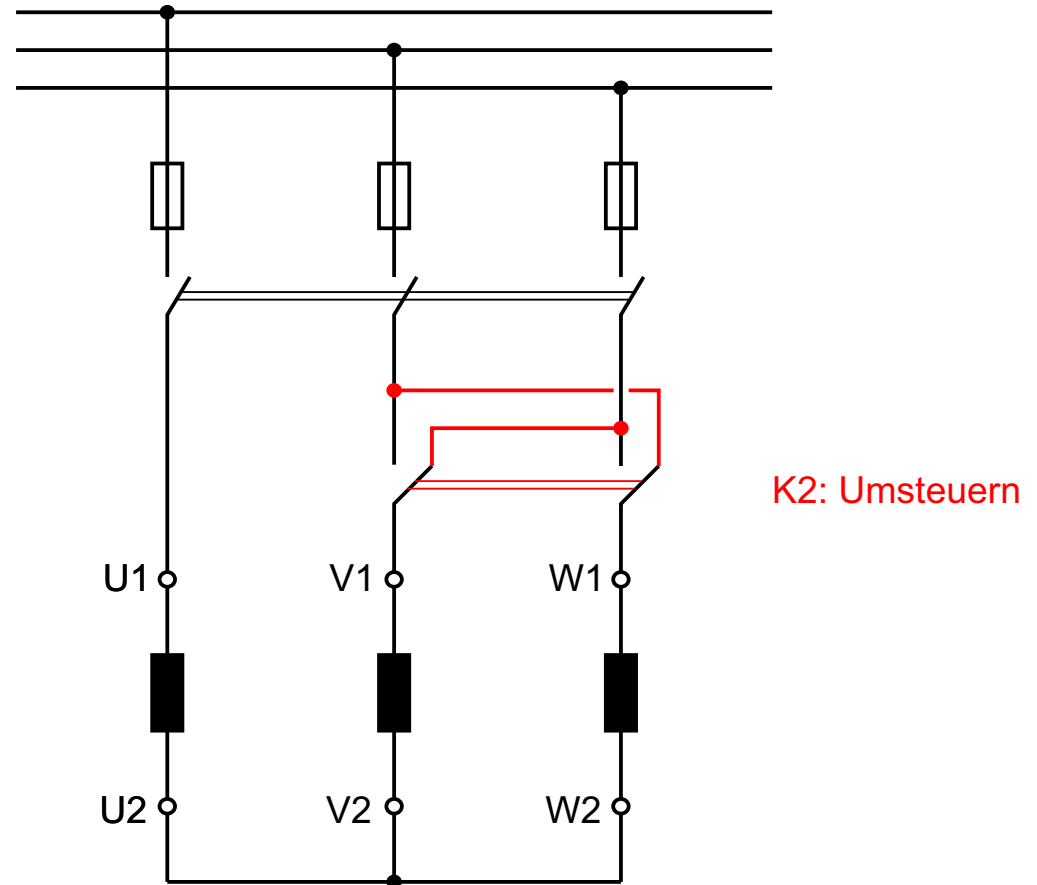
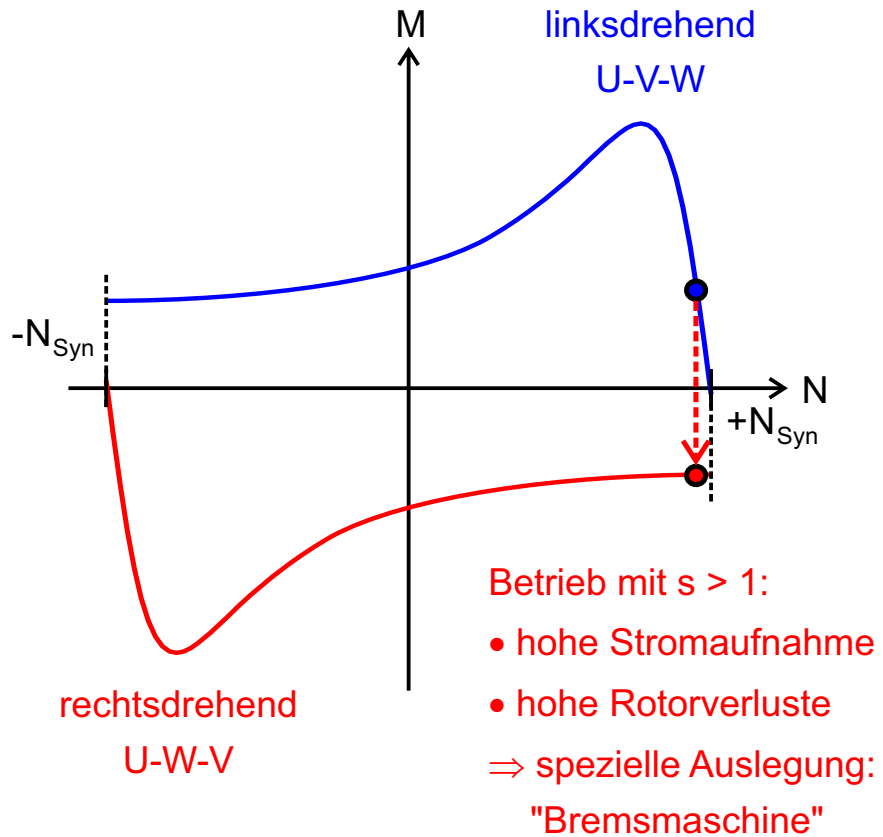
$$\text{Dreieck: } U_S = U_A$$

$$M_k \sim \left( \frac{U_S}{\omega_S} \right)^2$$



## 9.3 Bremsen

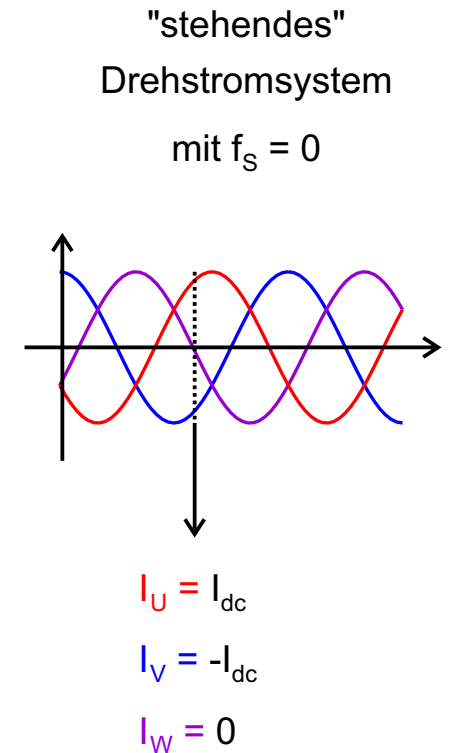
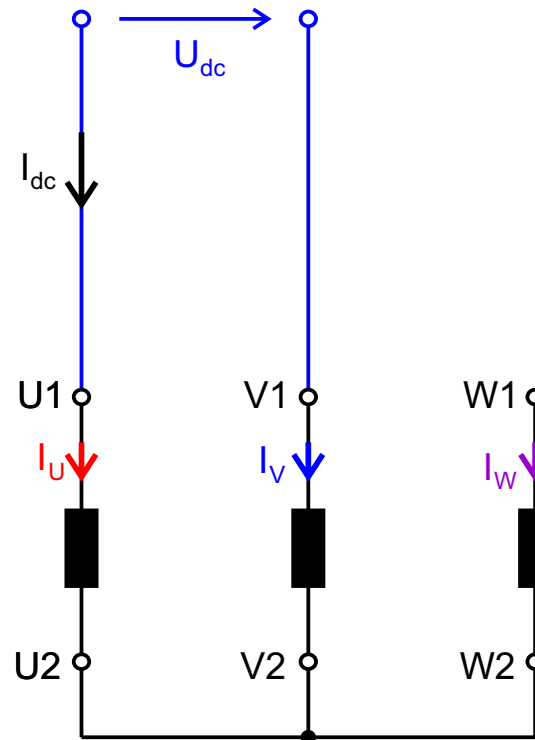
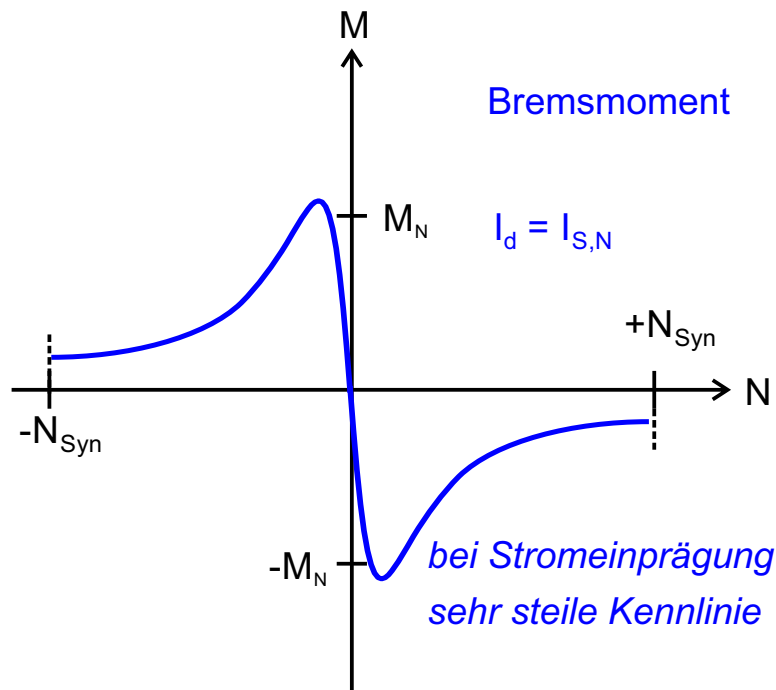
### Gegenstrombremsen



Nur zum Abbremsen der Maschine, nicht für Dauerbetrieb!

## 9.3 Bremsen

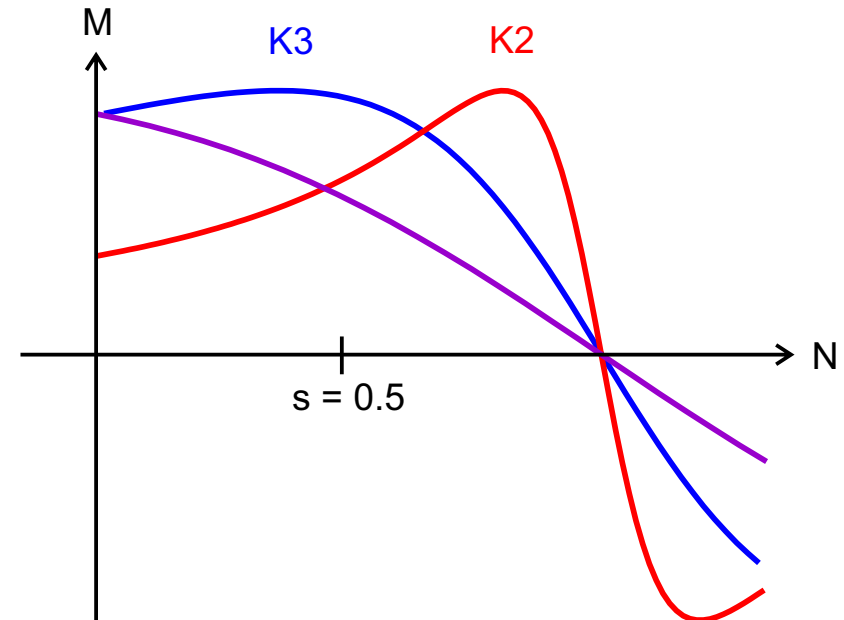
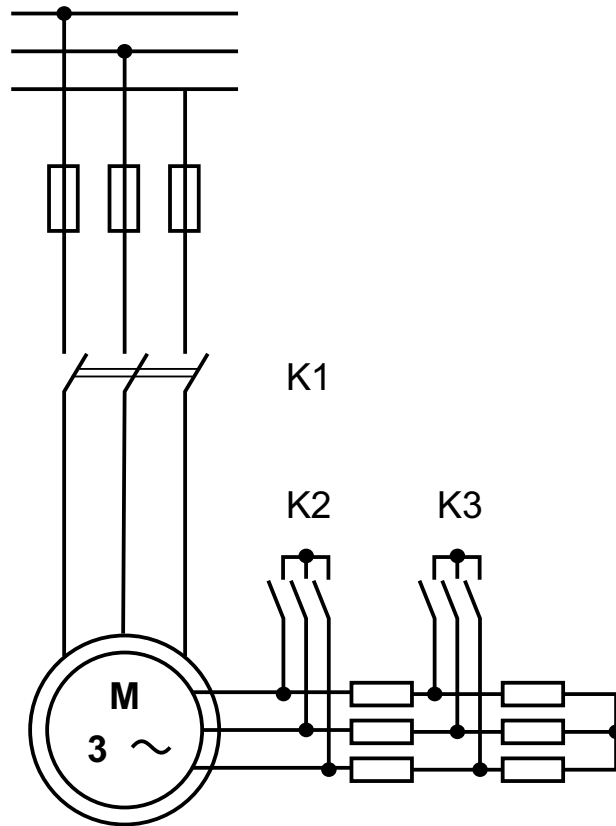
### Gleichstrombremsen



Nur zum Festhalten der Maschine im Stillstand. Bei Nenndrehzahl nur geringes Bremsmoment + hohe Rotorverluste

## 9.4 Schleifringläufer

Historisch: Betrieb mit Widerstandskaskade



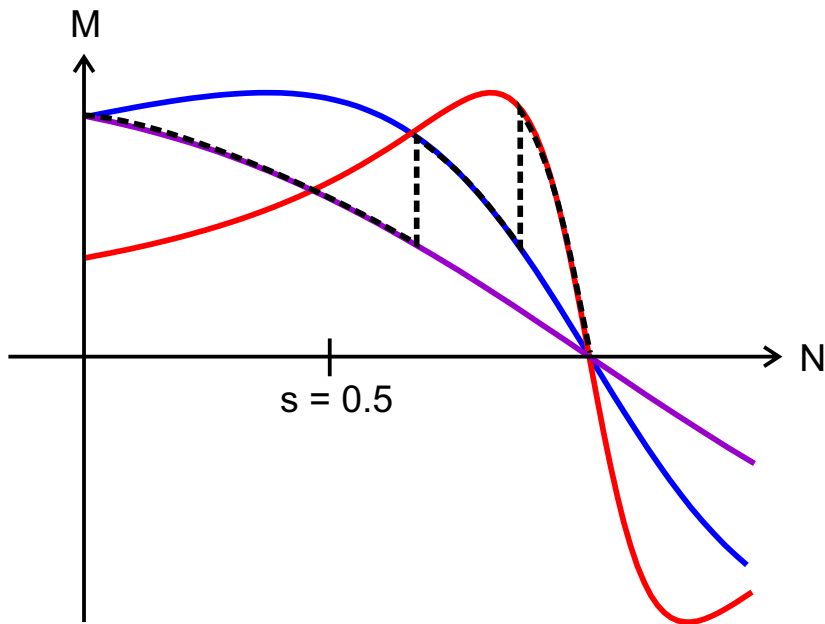
Verschieben von  $s_k$  durch Vergrößern von  $R_R$ :

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



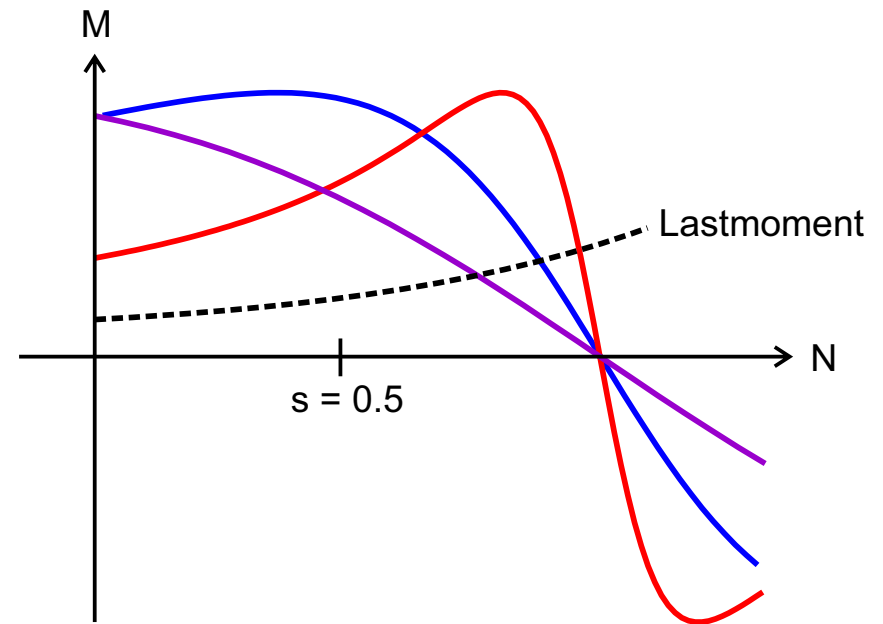
## 9.4 Schleifringläufer

### Betrieb mit Widerstandskaskade



Hochlauf mit entsprechenden  
Läufervorwiderständen

- bei hohem Lastmoment
- zur Begrenzung des Anlaufstromes



Drehzahlverstellung mit  
Läufervorwiderständen

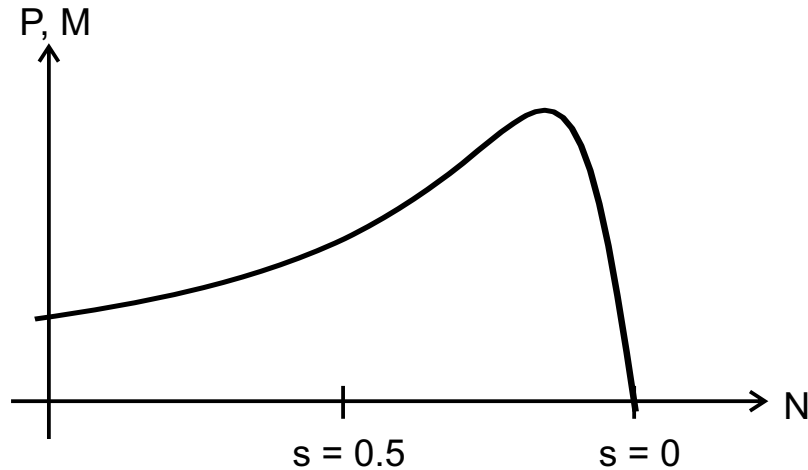
- nur mit kleinem Stellbereich sinnvoll
- aber: Rotorverluste  $P_{VR} = s \cdot P_D$

## 9.4 Schleifringläufer

Wiederholung: Energiebilanz Rotor

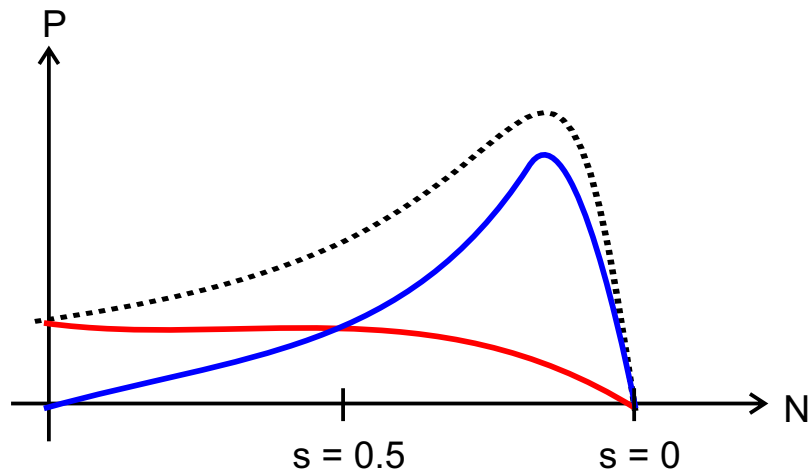
Drehfeldleistung  $P_D$

Drehmoment  $M_i$



Wellenleistung  $P_{\text{mech}} = (1-s) \cdot P_D$

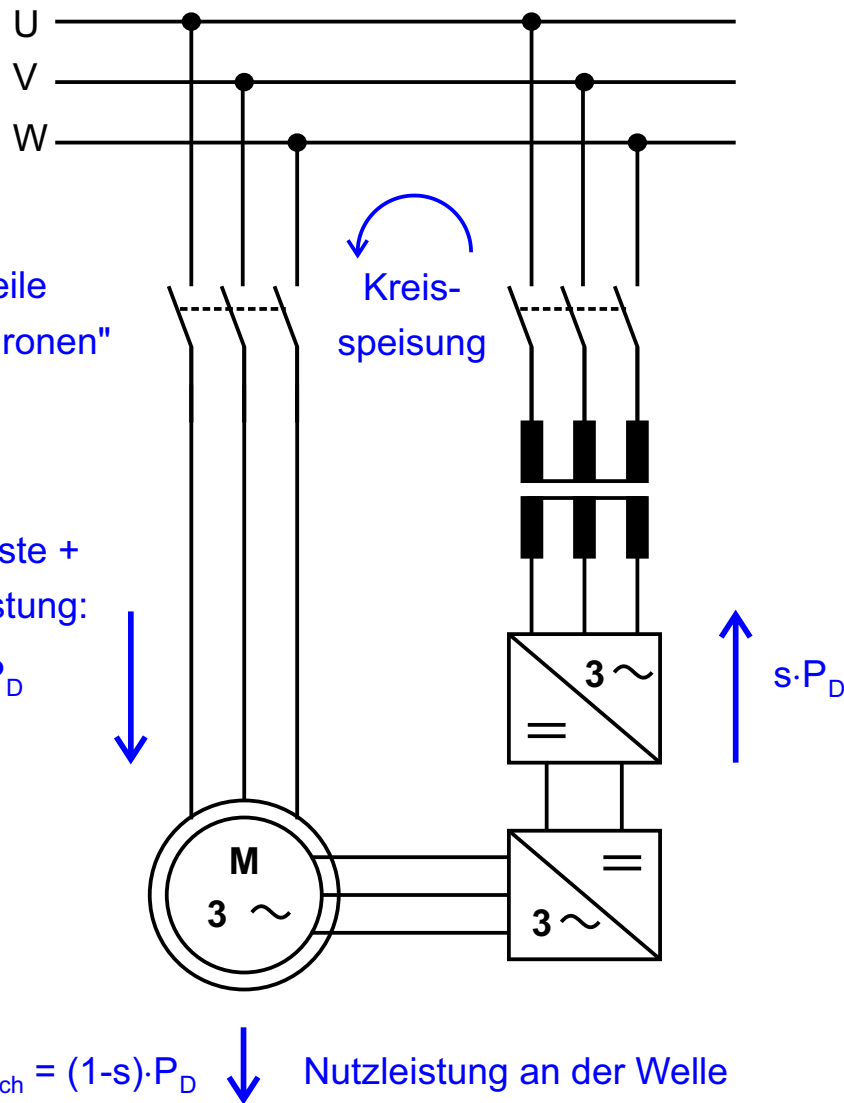
Rotorverluste  $P_{\text{VR}} = s \cdot P_D$



Prinzipskizze

## 9.4 Schleifringläufer

### Betrieb mit Stromrichter-kaskade



**Drehzahlverstellung** mit  
Rückspeisung der Läuferleistung  
durch eine Stromrichter-kaskade

- bei begrenztem Stellbereich sinnvoll
  - Vorteil: kleiner Umrichter
  - Nachteil: teure Maschine
  - auch: "doppelt gespeiste ASM"
- } abwägen

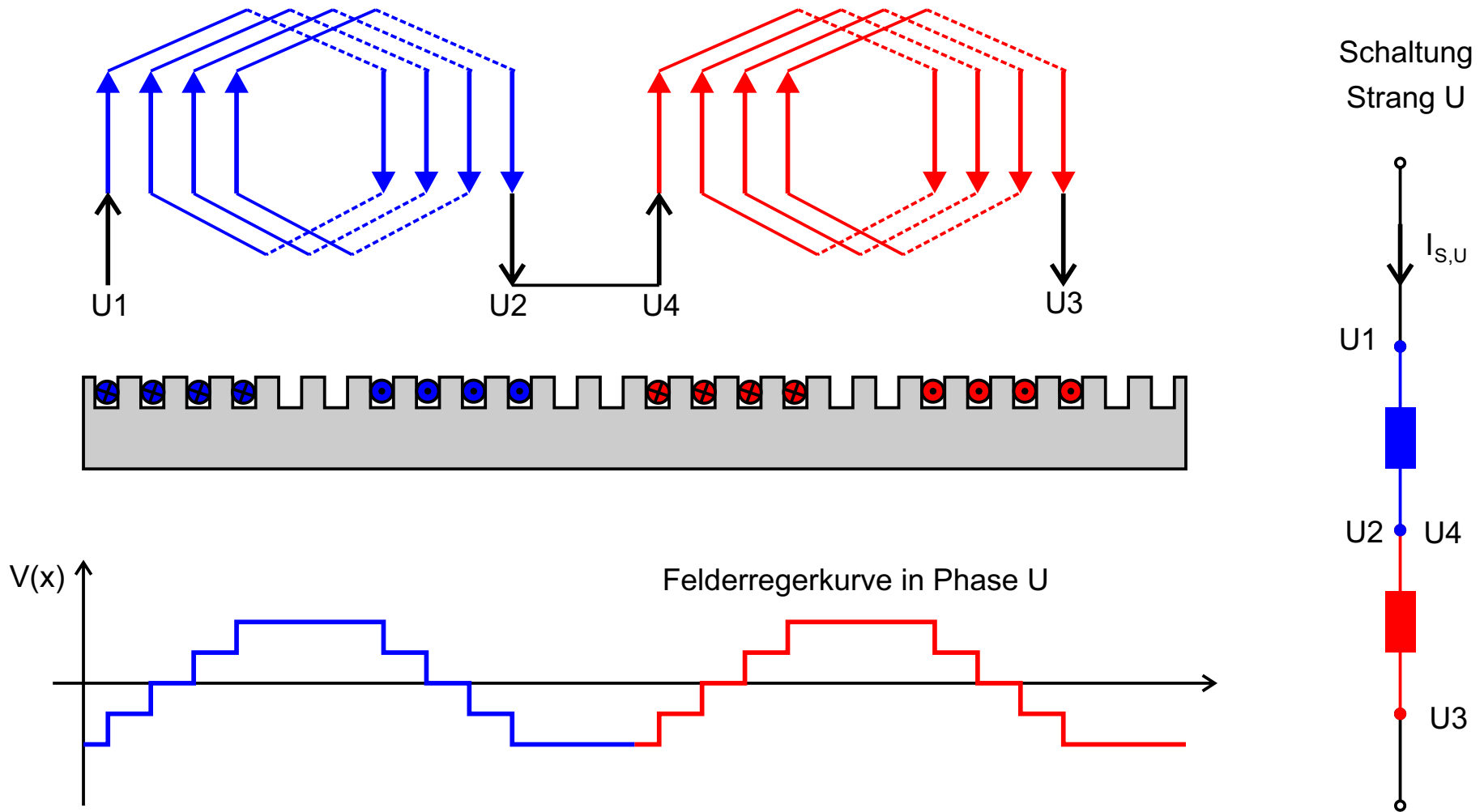
- aktueller Einsatz: Windkraftanlagen
- Generator: übersynchroner Betrieb möglich, d.h. Energie fließt in beiden Zweigen ins Netz (keine Kreisspeisung)

#### Alternative

- Kurzschlussläufer mit Umrichterspeisung des Stators
- Vorteil: Stellbereich = kompletter Drehzahlbereich
- Nachteil: viel größere installierte Umrichterleistung

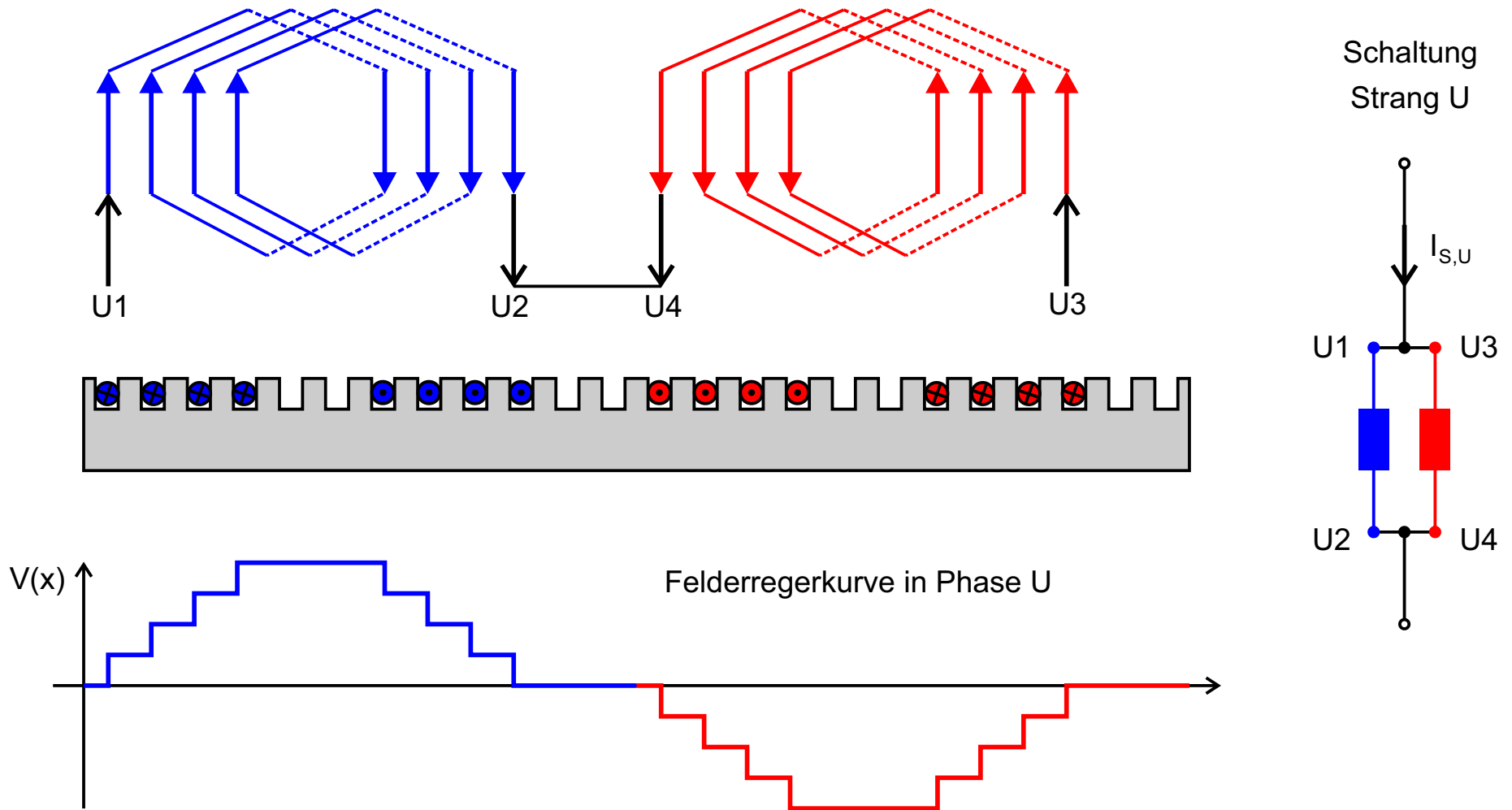
## 9.5 Polumschaltbare ASM

Dahlander-Schaltung: Variante für  $p = 2$



## 9.5 Polumschaltbare ASM

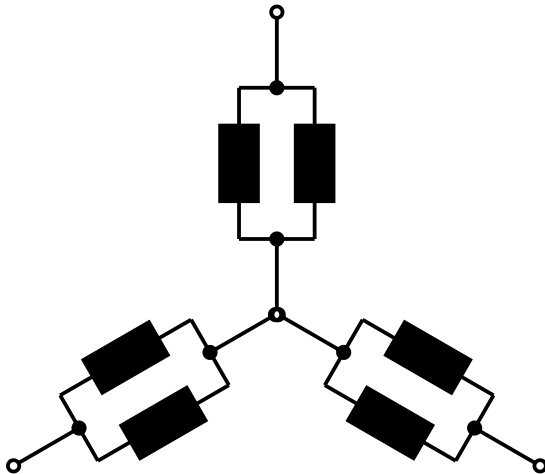
Dahlander-Schaltung: Variante für  $p = 1$



## 9.5 Polumschaltbare ASM

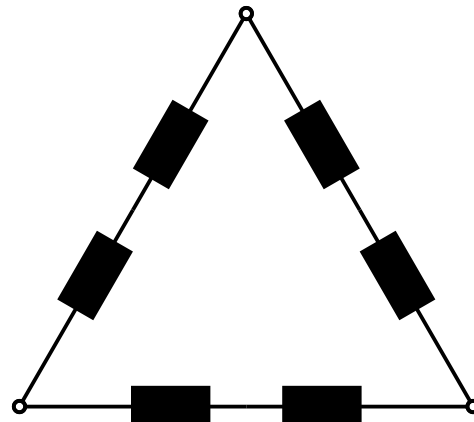
### Gegenüberstellung der Schaltungsvarianten

$p = 1$   
Doppelstern

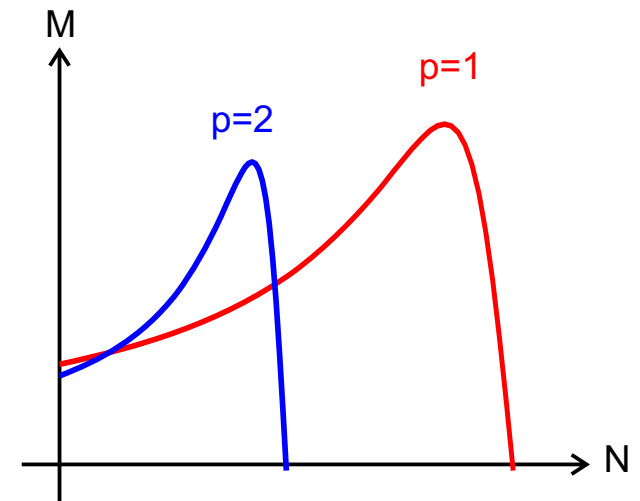


$$S = 2\sqrt{3} \cdot U_A \cdot I_S$$

$p = 2$   
Dreieck



$$S = 3 \cdot U_A \cdot I_S$$



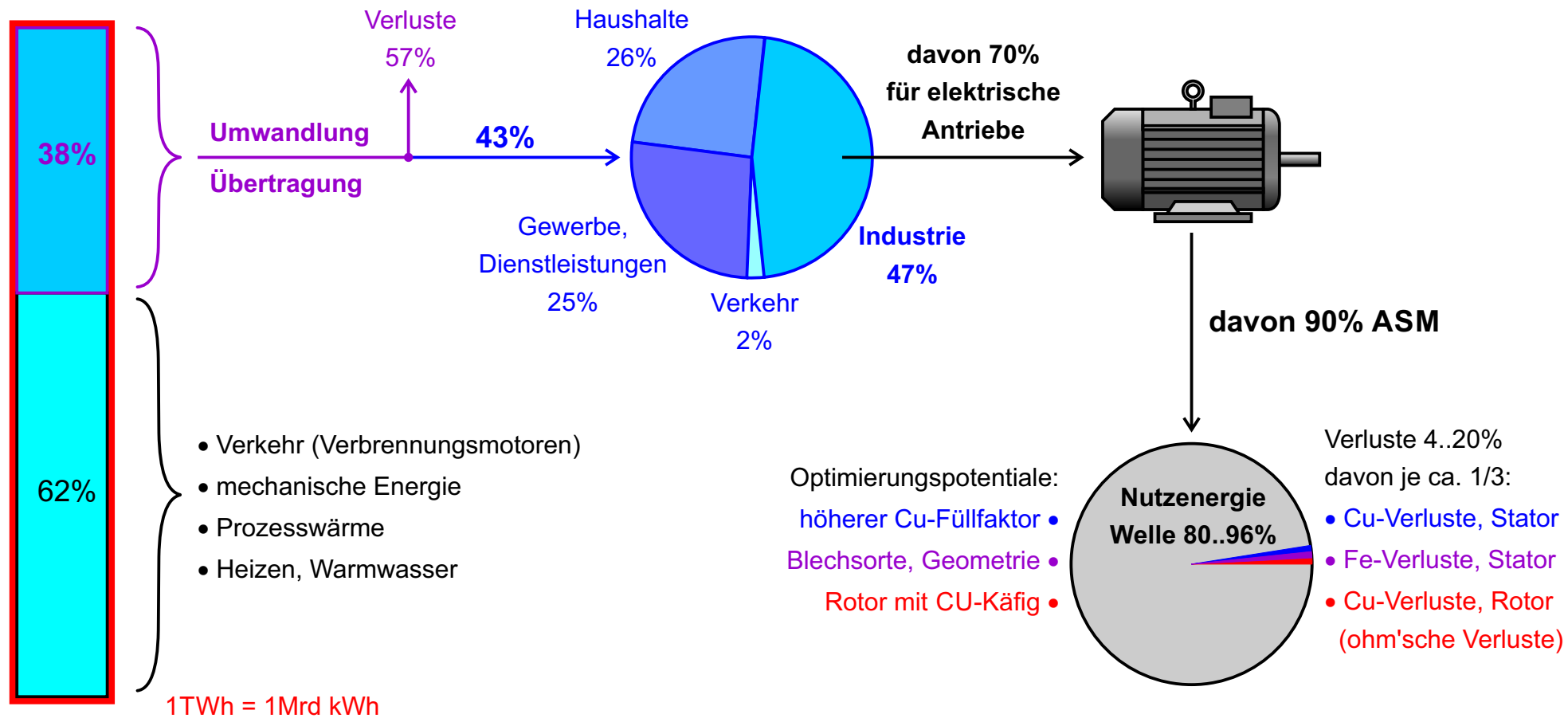
Fazit: 2 Synchrondrehzahlen  
⇒ 2 Drehzahlstufen bei Netzbetrieb

# 9.6 Energieeffizienz

## Energieverbrauch in Deutschland und die Rolle der ASM

**Primärenergieverbrauch 2015: 3700 TWh**

**Elektrischer Energieverbrauch: 600TWh**



## 9.6 Energieeffizienz

### Effizienzklassen

ASM 0.74 - 375kW = 90% des Energiebedarfs aller elektrischen Industrieantriebe (EU)

Altes System	Neues System	für Betriebsart S1, p = 1 bis 6
EFF3	-	Bestandsschutz für alte Maschinen
EFF2	IE1 Standard Efficiency	Bestandsschutz für alte Maschinen
EFF1	IE2 High Efficiency	ab 2011 Mindestanforderung
	IE3 Premium Efficiency	ab 2015 Mindestanforderung > 7.5kW
	IE4 (Super Premium Efficiency)	

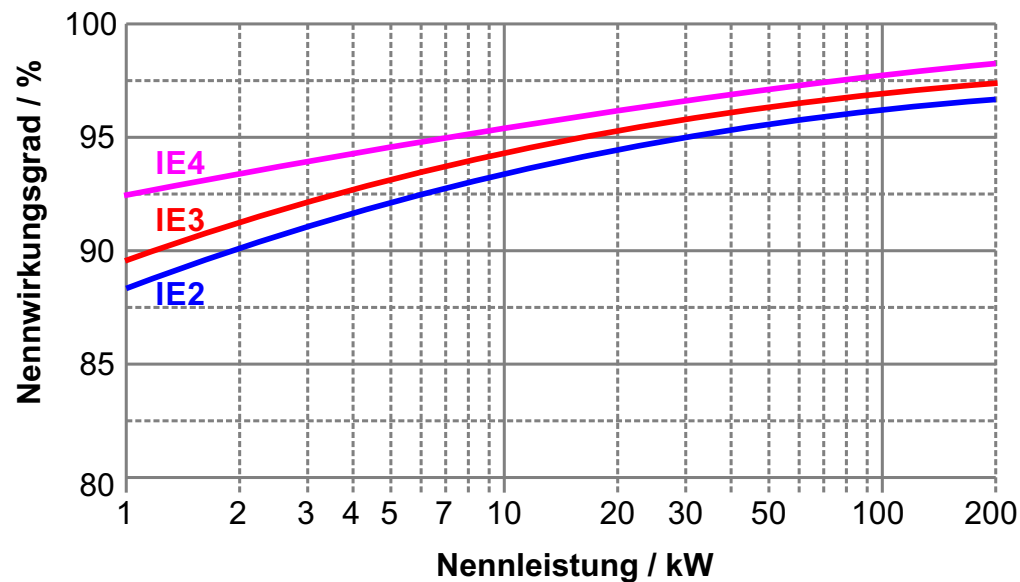


Tabelle sinngemäß nachgezeichnet

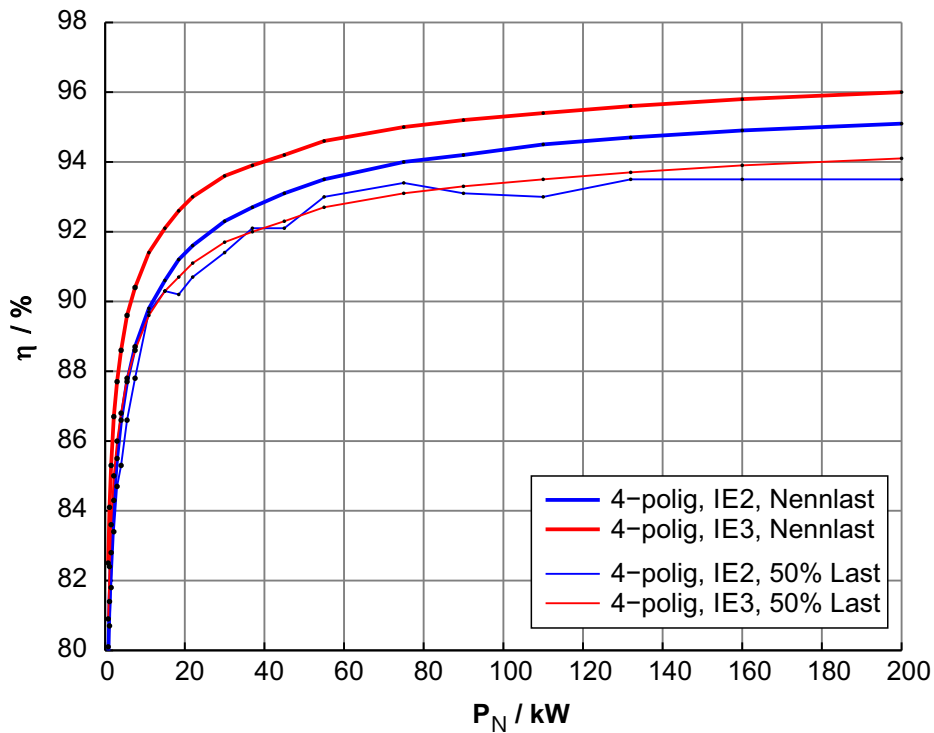


## 9.6 Energieeffizienz

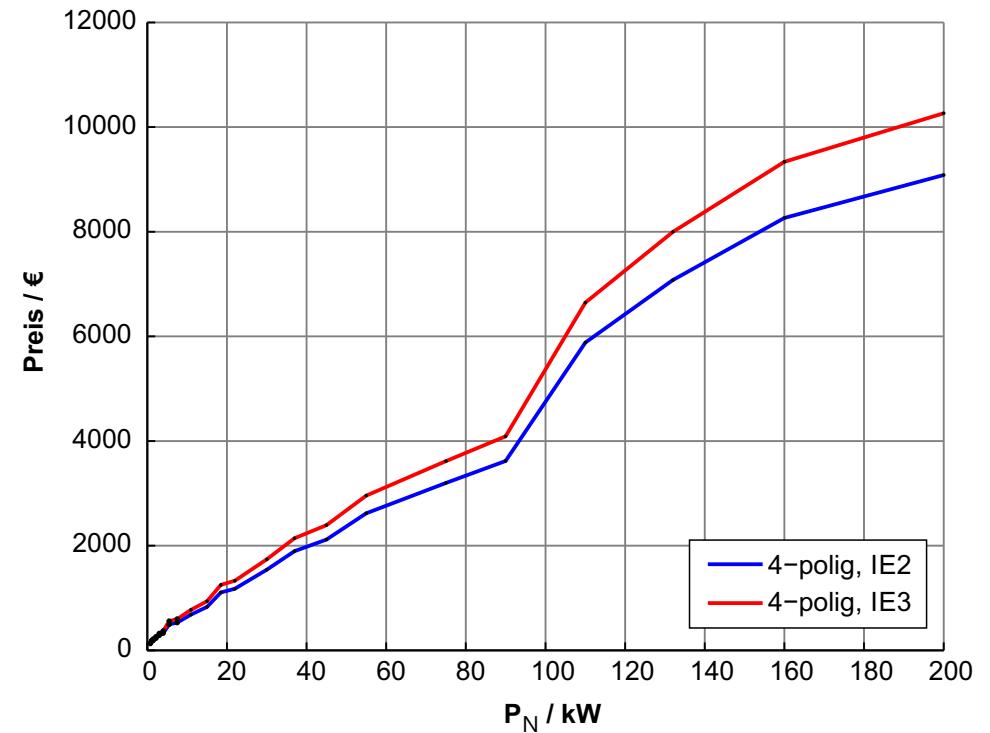
### Normmotoren

Daten realer Maschinen, über ihre Nennleistung aufgetragen – hier:  $p = 2$

Wirkungsgrad über Nennleistung



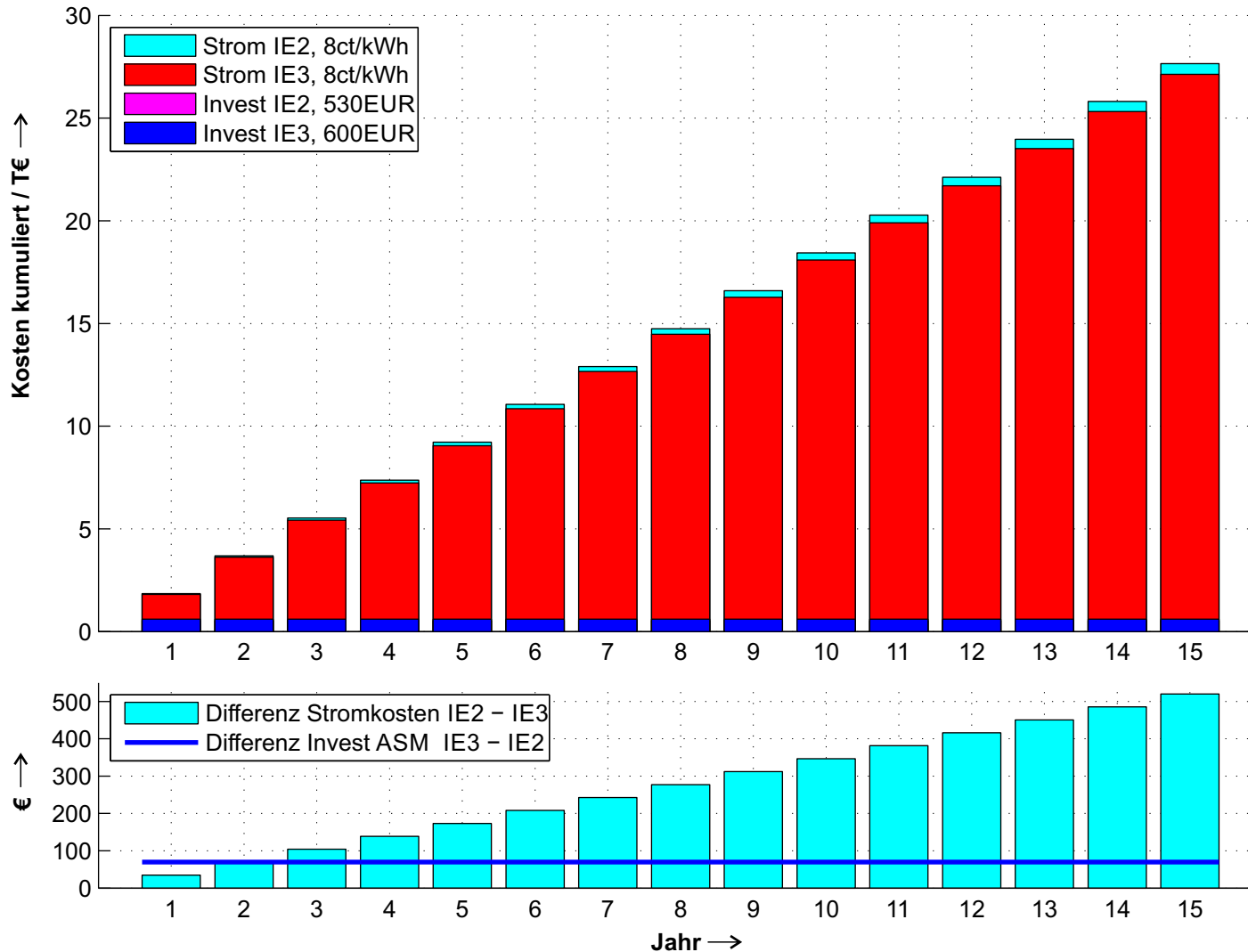
Preis netto über Nennleistung



## 9.6 Energieeffizienz

### Invest und Energiekosten 7.5kW-ASM

7.5kW-ASM Invest und Stromkosten



#### Vorgaben:

- Energiepreis 8ct/kWh
- Betrieb 8h/d = 2920h/a
- 15 Jahre

#### Maschinen:

- 4-polig,  $P_N = 7.5\text{kW}$
- IE2: 530€,  $\eta_N = 88,7\%$
- IE3: 600€,  $\eta_N = 90,4\%$

#### Energieverbrauch / a:

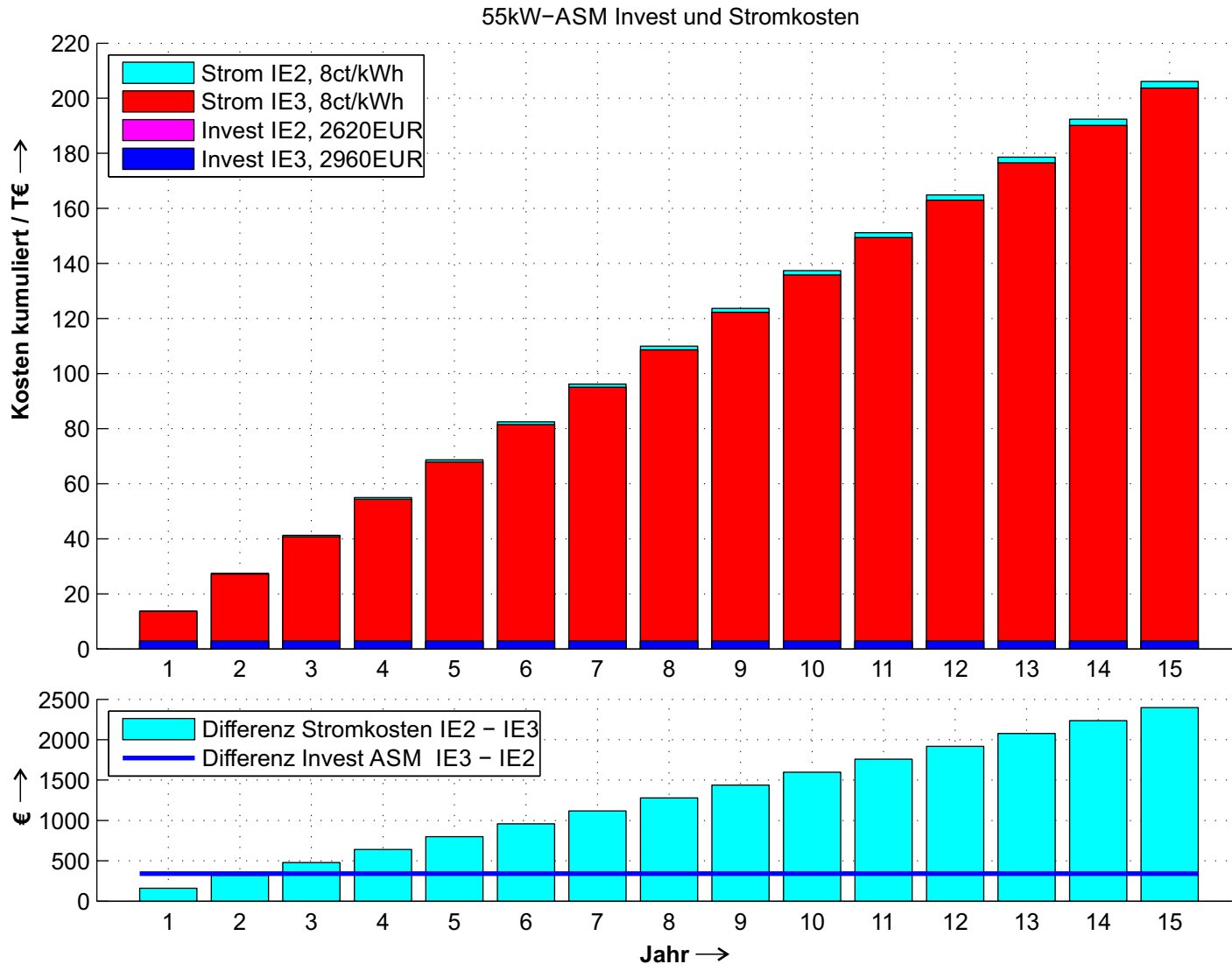
- IE2: 24.7MWh / 1975€
- IE3: 24.2MWh / 1938€

#### CO<sub>2</sub>-Ausstoß / a:

- Strommix 2015: 587g/kWh
- IE2: 14.5t
  - IE3: 14.2t

## 9.6 Energieeffizienz

### Invest und Energiekosten 55kW-ASM



#### Vorgaben:

- Energiepreis 8ct/kWh
- Betrieb 8h/d = 2920h/a
- 15 Jahre

#### Maschinen:

- 4-polig,  $P_N = 55.0\text{kW}$
- IE2: 2620€,  $\eta_N = 93,5\%$
- IE3: 2960€,  $\eta_N = 94,6\%$

#### Energieverbrauch / a:

- IE2: 171.8MWh / 13.7k€
- IE3: 169.8MWh / 13.6k€

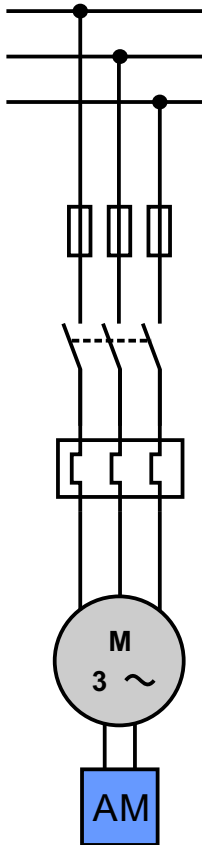
#### CO<sub>2</sub>-Ausstoß / a:

- Strommix 2015: 587g/kWh
- IE2: 100.8t
  - IE3: 99.7t

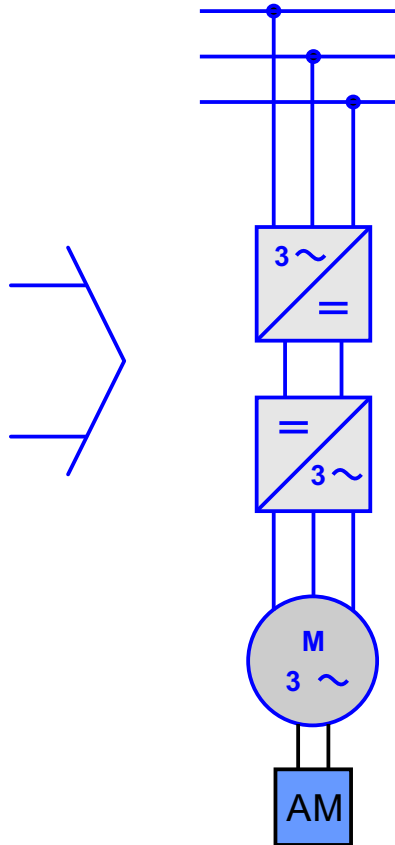
## 9.6 Energieeffizienz

### Weitere Einsparpotentiale

Netzbetrieb  
mit 50Hz und  
fester Drehzahl



Betrieb mit Frequenz-  
umrichter und  
variabler Drehzahl



#### Einsparpotential 1

- Drehzahl anpassen: bedarfsorientierte Drehzahlführung der Arbeitsmaschine
- aber: deutlich höherer Invest für den FU

#### Einsparpotential 2

- Maschine mit höherem Wirkungsgrad einsetzen:
  - PMSM (Permanenterregte Synchronmaschine)
  - Synchrone Reluktanzmaschine  
(beide können meist nur mit FU betrieben werden)
- aber: höherer Invest als bei ASM

je nach Anwendung sind bis zu 50%  
Energieeinsparung möglich.

- ⚠ Nicht auf Pauschalaussagen vertrauen!  
Jeder Fall muss für sich betrachtet werden.