

Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

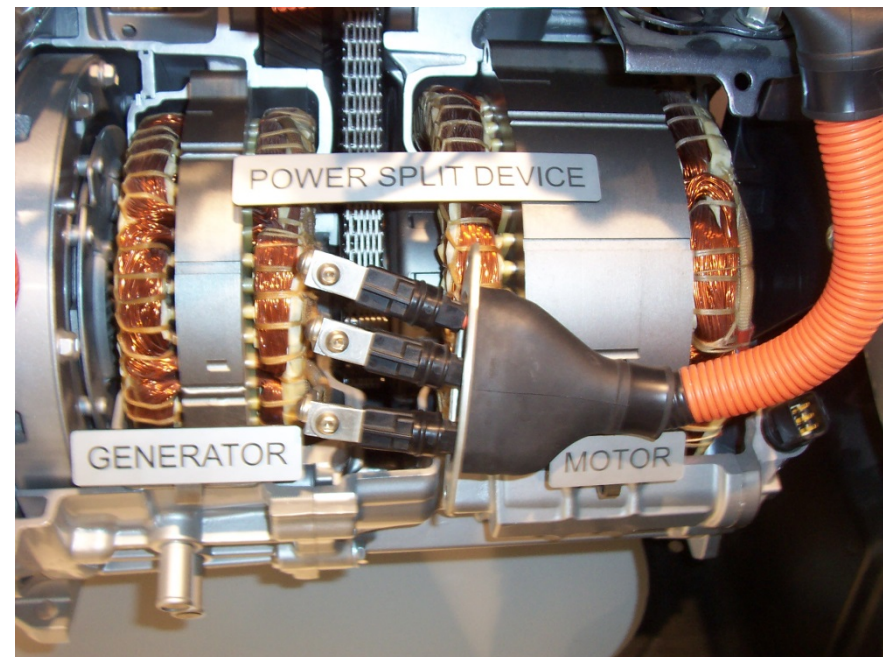


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

VDI Wissensforum "Hybrid- und Elektroantriebe für Kraftfahrzeuge"
9.-10. Juni 2010 Frankfurt/Main

Andreas Binder
Thomas Knopik

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung
abinder@ew.tu-darmstadt.de



Quelle: Toyota



Inhalt

- Grundlagen E-Motoren
- Bauweisen
- Steuerung und Betriebsbereiche
- Verluste, Wirkungsgrade
- Zusammenfassung

Quelle: BMW

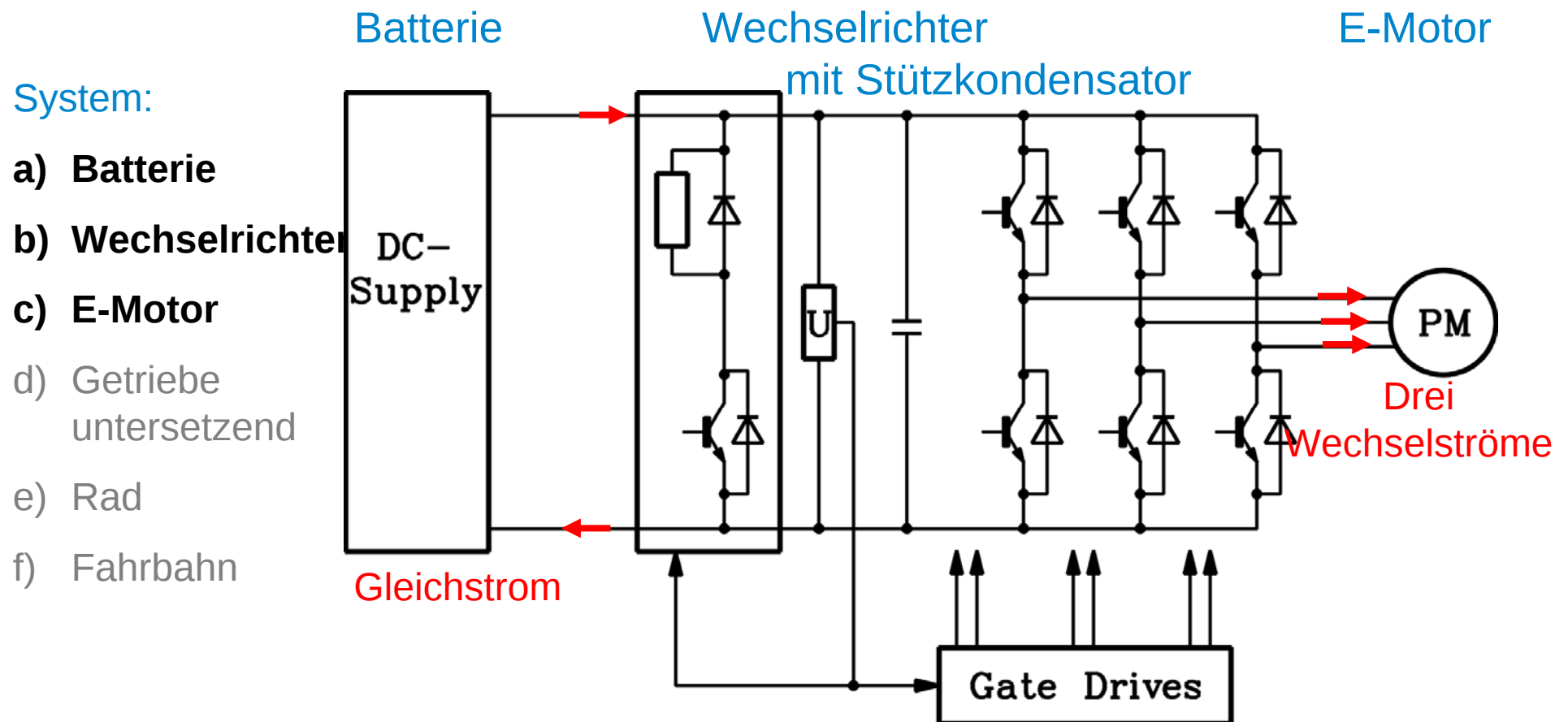


Grundlagen E-Motoren

Beispiel: Batteriebetriebene Fahrzeuge



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

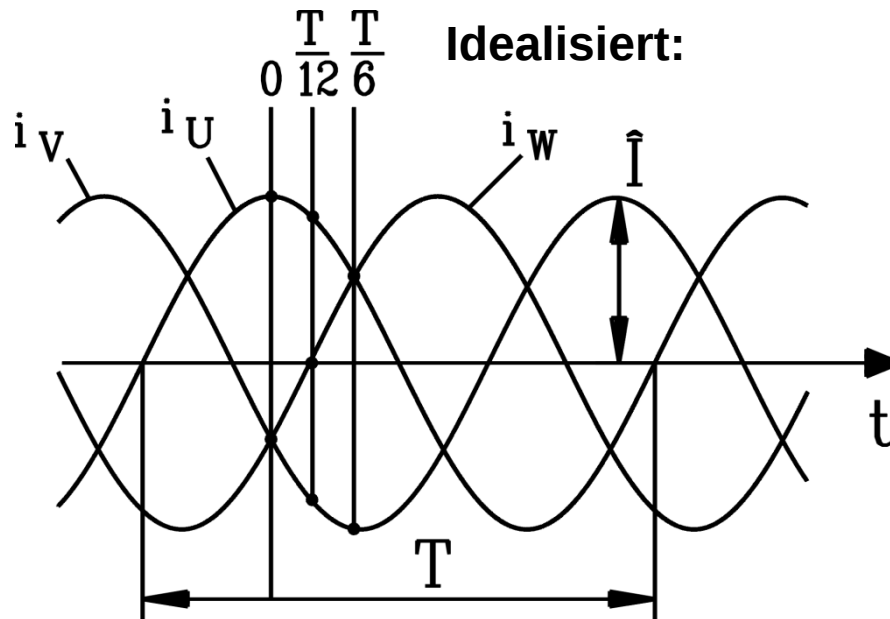


PM: Permanentmagnet-Synchronmotor



Grundlagen E-Fahrzeuge

Dreiphasen-Wechselströme



- Amplitude $\hat{I}$
- Frequenz $f = 1/T$ ($\omega = 2\pi \cdot f$)
- Phasenfolge U, V, W
od. U, W, V

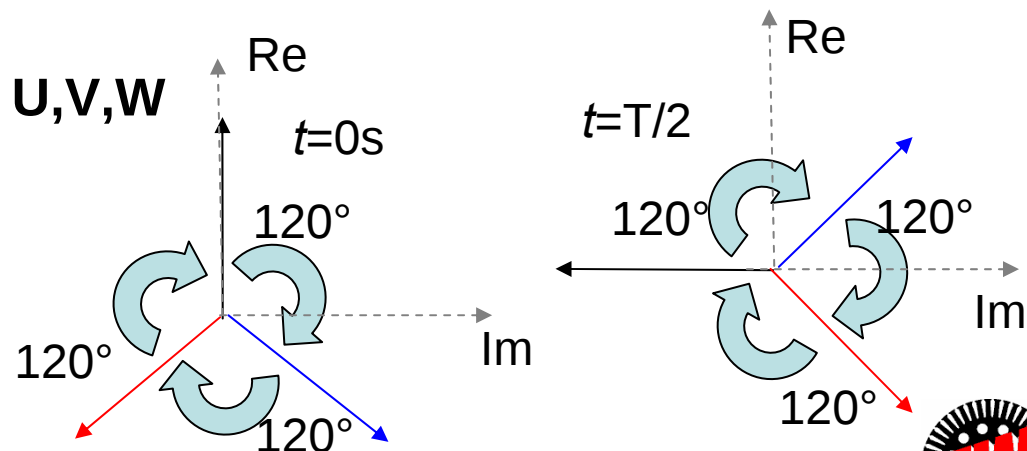
über **Wechselrichter** einstellbar

Phasenlage bei $m = 3$ Strängen U,V,W

$$I_U(t) = \hat{I} \cos(\omega t + 0^\circ)$$

$$I_V(t) = \hat{I} \cos(\omega t + 120^\circ)$$

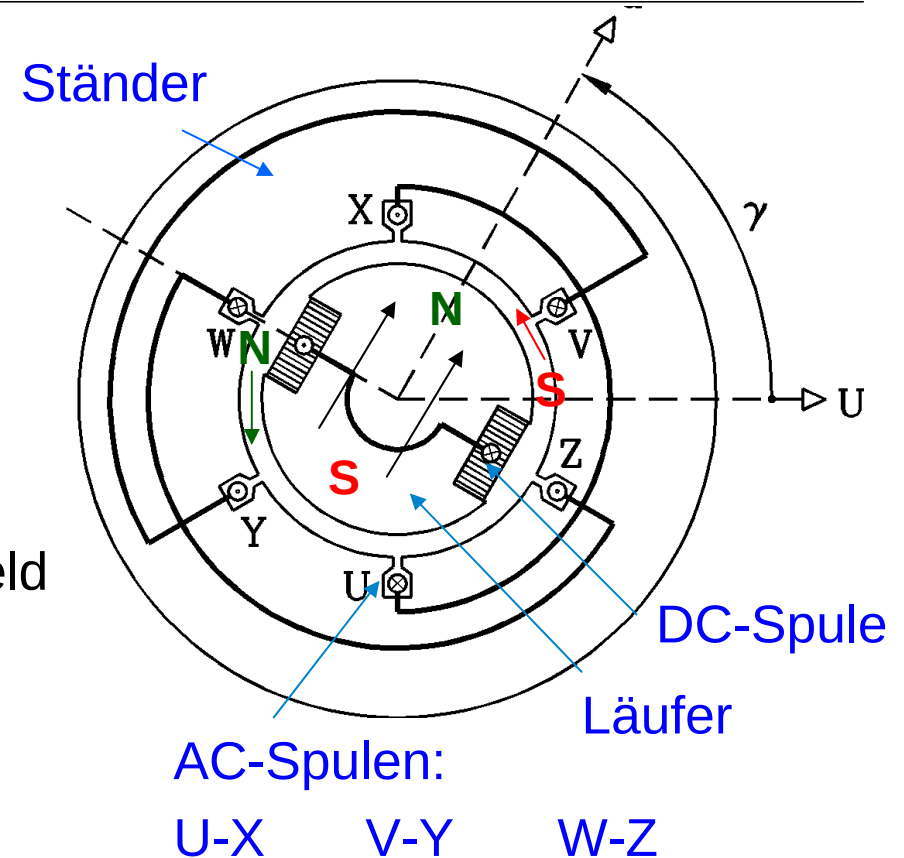
$$I_W(t) = \hat{I} \cos(\omega t + 240^\circ)$$



Grundlagen E-Fahrzeuge

Synchronmaschinen

- **Läufer:** konstantes Magnetfeld
 - a) Permanentmagnete
 - b) Gleichstrom-Spulen
(Zwei Schleifringe + Bürsten)
- **Ständer:** “Drehfeldwicklung”
mit Wechselströmen:
Erregen Drehfeld
- **LORENTZ-Kraft** vom Läufer-Magnetfeld
auf Strom-Leiter der Ständerwicklung:
Tangentialkraft $\Rightarrow$ Drehmoment M_e
- Läufer rotiert **SYNCHRON** mit dem
Ständerdrehfeld $n_{\text{syn}} = f / p$

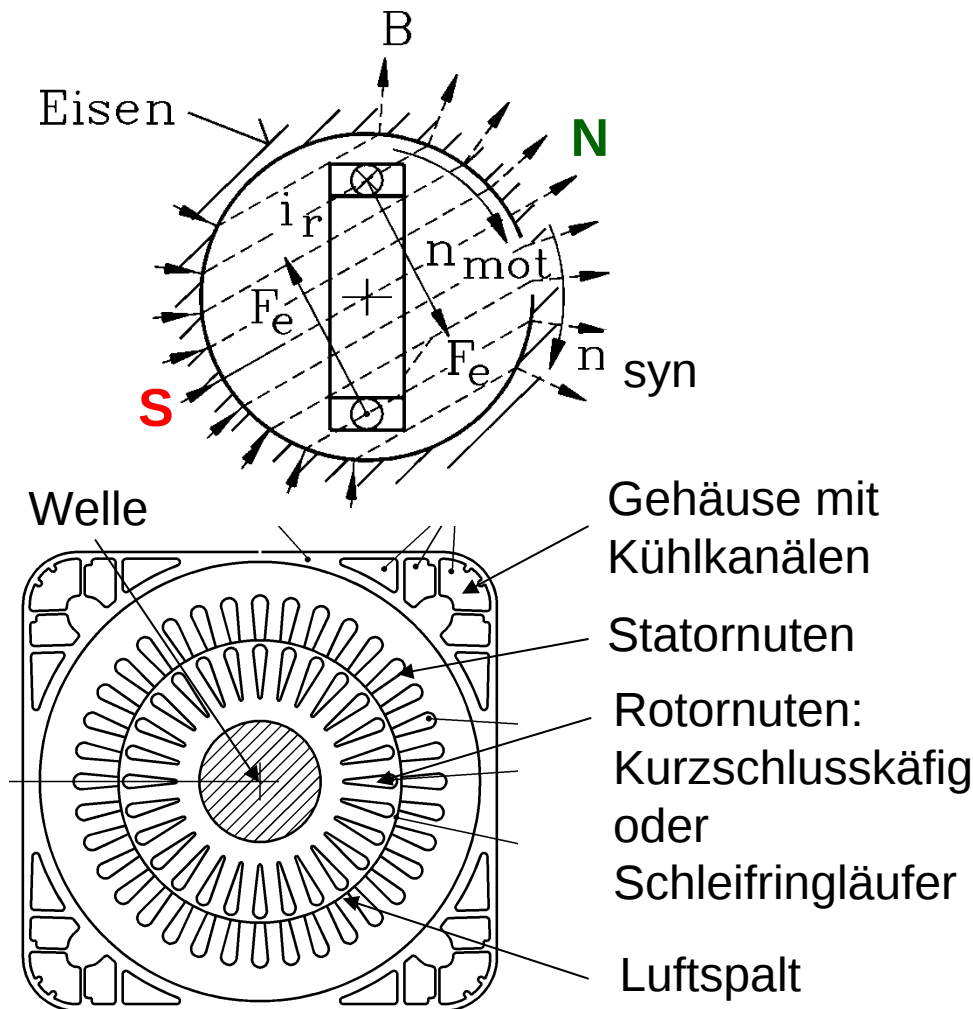


Zweipolige ($2p = 2$) elektrisch
erregte Synchronmaschine



Grundlagen E-Fahrzeuge

Asynchronmaschinen



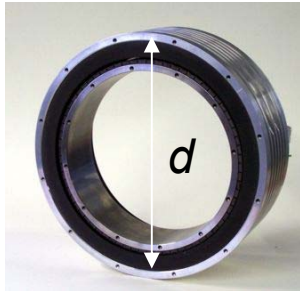
- Läufer trägt **Kurzschlusswindung**
- Läufer dreht langsamer als Ständer-Drehfeld B , erfährt **Feldänderung**: $n_{mot} < n_{syn}$
- **FARADAY** sches Induktionsgesetz: **Spannung** u in Kurzschlusswindung erzeugt
- Spannung u treibt **Kurzschlussstrom** i_r .
- Strom i_r bildet mit B eine **LORENTZ-Kraft** F_e , die den Läufer antreibt.

Bauform: Scheibe vs. Zylinder

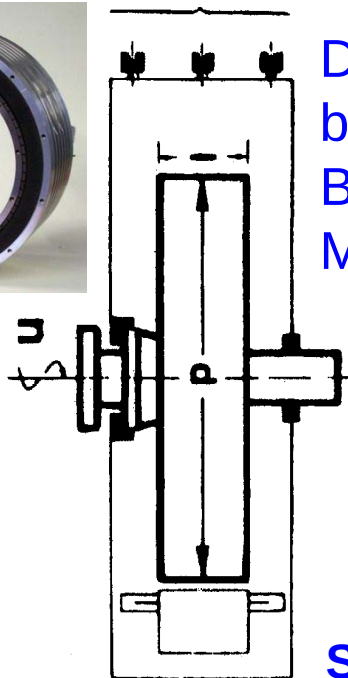
(Beispiel: Gleiche Leistung P)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: EMT
 $M=800\text{Nm}$
 $n=120\text{rpm}$



Das Drehmoment
bestimmt die
Baugröße des
Motors!

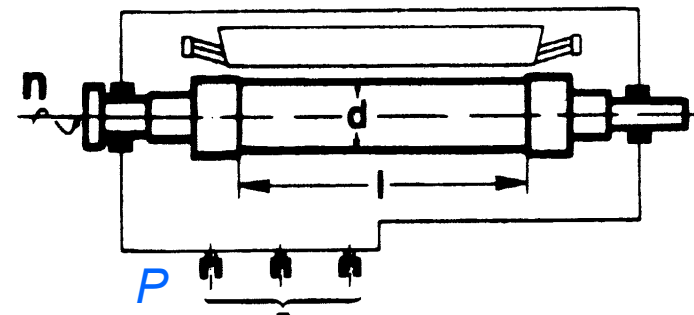
Scheibe

Drehzahl n	klein
Drehmoment M	groß
Durchmesser d	groß
Länge l	klein
Polzahl $2p$	groß

$$n_{\text{syn}} = f / p$$

$$P = 2\pi \cdot n \cdot M \sim d^2 \cdot l \cdot n$$

$$M \sim d^2 \cdot l$$



Zylinder

groß
klein
klein
groß
klein

Quelle: TUD
 $M=0,08\text{Nm}$
 $n=60000\text{rpm}$



Beispiel: PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschinen

■ Technische Daten Elektrische Maschinen

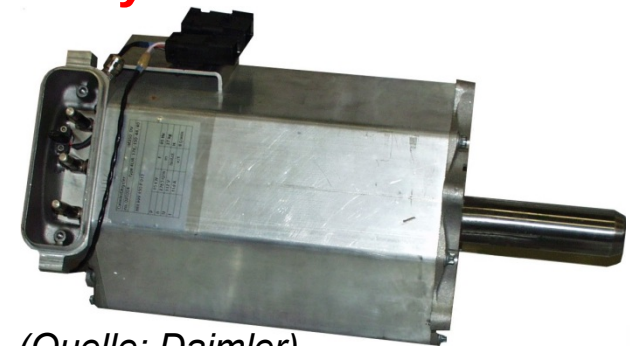
	PSM M1	ASM M2
Bemessungsleistung P_N	20,5 kW	15 kW
Nenndrehzahl n_N	1500 min ⁻¹	2765 min ⁻¹
Maximaldrehzahl n_{max}	6000 min ⁻¹	12500 min ⁻¹
Nenn-Drehmoment M_N	130 Nm	52 Nm
Außendurchmesser $d_{s,a}$	286 mm	150 mm
Eisenlänge l_{fe}	95 mm	180 mm
Bauweise	Scheibe	Zylinder

Kühlmittel: Durchfluss: 8 l/min, Vorlauftemperatur: 85 °C

PM-Synchronmaschine



Käfigläufer-Asynchronmaschine

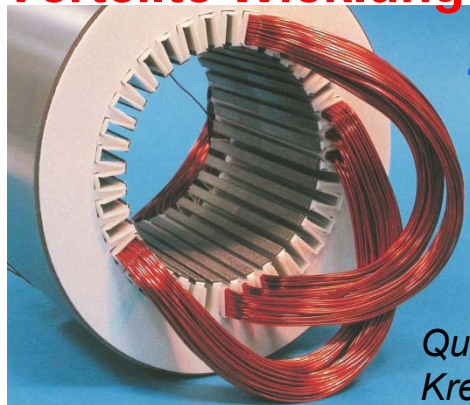


(Quelle: Daimler)

Bauformen: Ständerwicklung

Außen- und Innenläufer

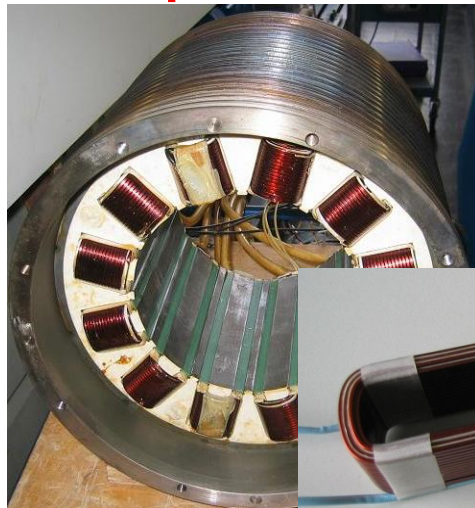
Verteilte Wicklung 2-polig



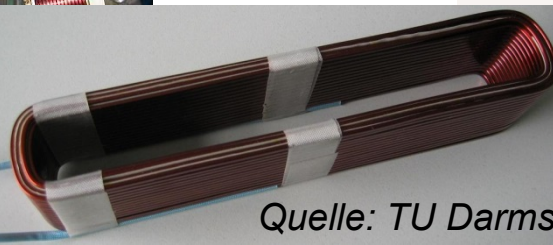
Quelle:
Krempel

Zweipoliger Ständer
Runddraht-
Einziehwicklung

Zahnspulenwicklung 16-polig

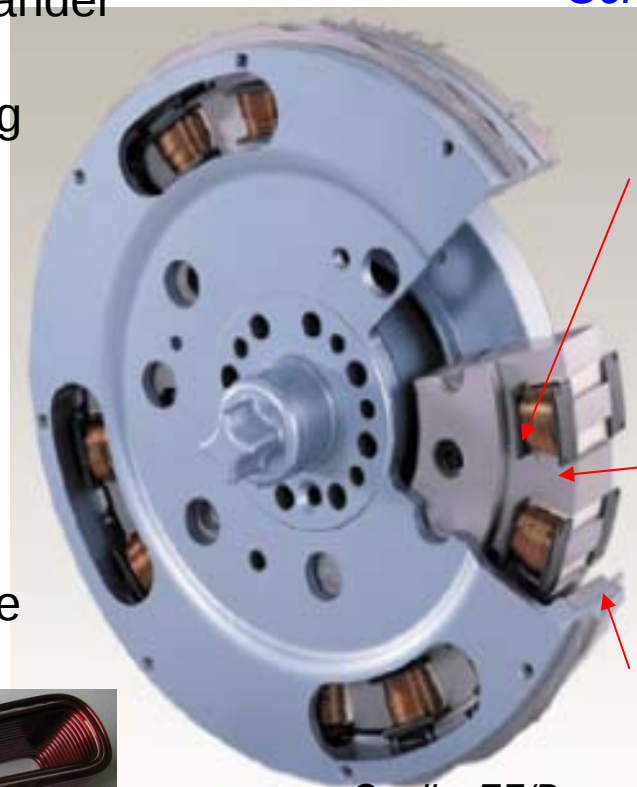


Zahnspule
als einfache
Aufsteckspule



Quelle: TU Darmstadt

Außenläufer-PM-Synchronmaschine Scheibentyp



Zahnspulen mit
Zwischenzähnen auf
Innenstator

Zwischenzähne
unbewickelt

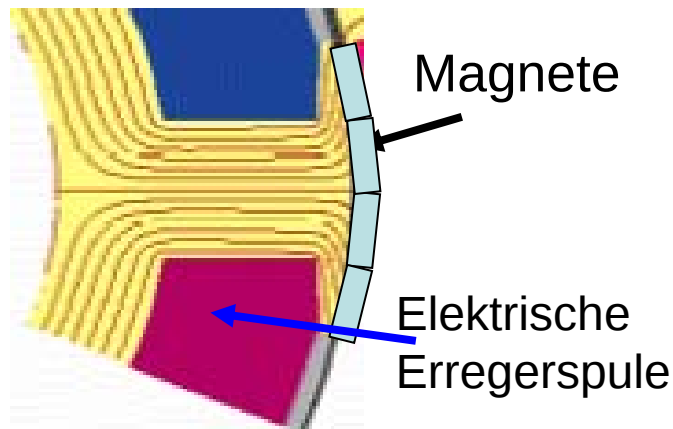
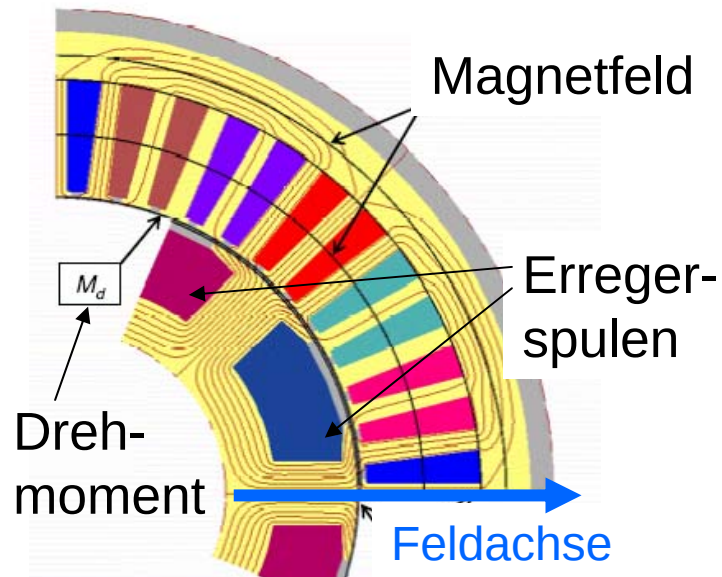
Permanentmagnete
auf Außen-
Läuferglocke

Quelle: ZF/Dr.
Müller, Fichtel &
Sachs

Bauformen: Beispiel für 8-polige elektrisch und hybrid erregte Synchronmaschine



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



- Zwei Schleifringe, Kohlebürsten: kleiner DC-Erregerstrom $< 16\text{ A}$
- Verteilte Ständerwicklung
- Läufermagnetfeld kann verringert oder erhöht werden
- Wassermantelkühlung; 60 kW, 3500/min; max. 12000/min

Quelle:

Conti, Dr. Hackmann

- Grunderregung permanentmagnetisch
- Zusatzerregung elektrisch

- Zwei Schleifringe, Kohlebürsten: kleiner DC-Erregerstrom

Quelle:

Dissertation Hadji-Minaglou,
RWTH Aachen

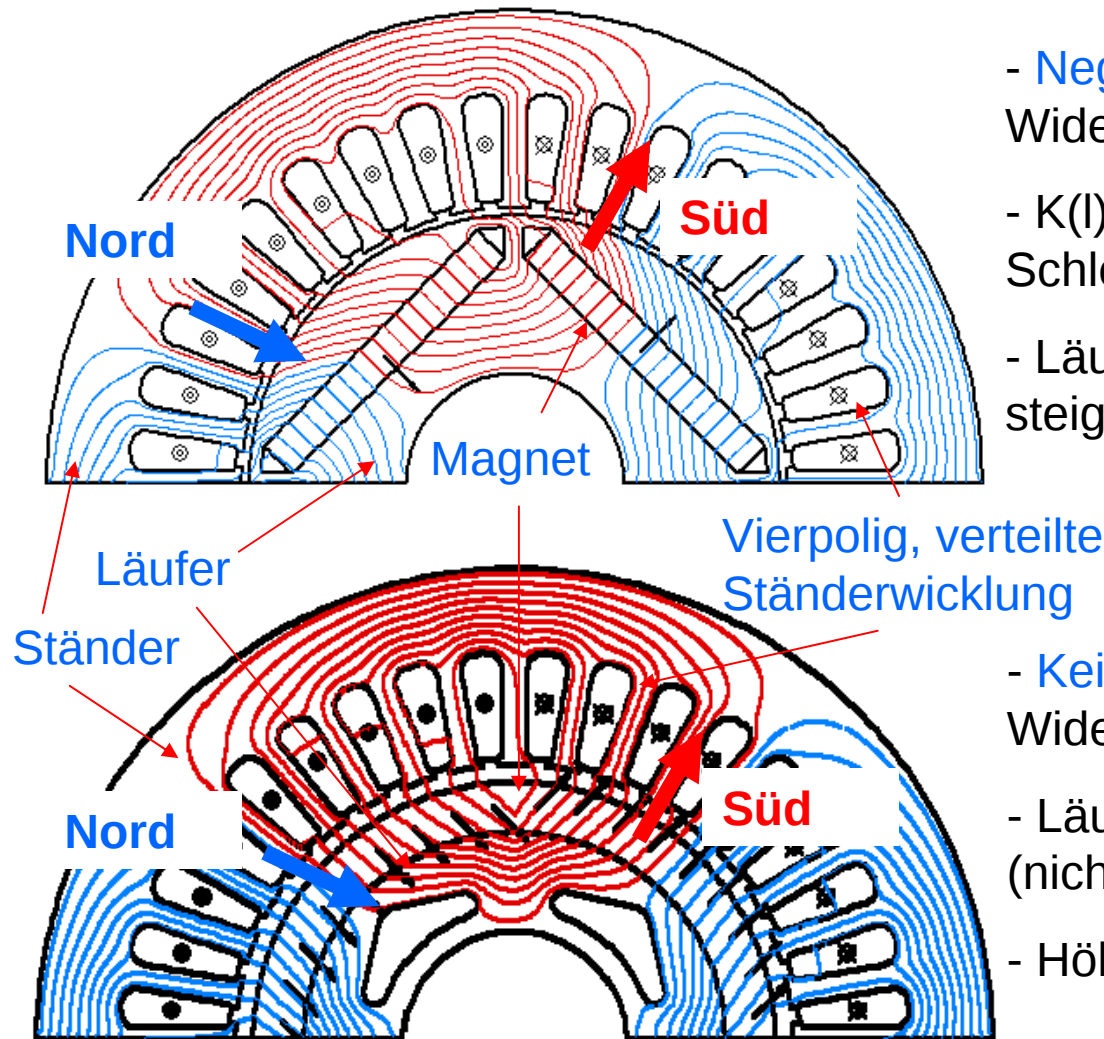
- Läufermagnetfeld kann in Grenzen verringert oder erhöht werden



Permanentmagnet-Synchronmaschine mit vergrabenen/Oberflächen-Magneten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



- **Negative Reluktanz** = Magnetischer Widerstand in der Feldachse kleiner

- K(l)eine Läuferverluste, keine Schleifringe

- Läufermagnetfeld **konstant**, sinkt mit steigender Temperatur

- **Kein Reluktanzeffekt** = Magnetischer Widerstand ist konstant am Umfang

- Läufermagnete müssen fixiert werden (nichtleitfähige **Bandage**)

- Höherer Bedarf an Magnetmaterial

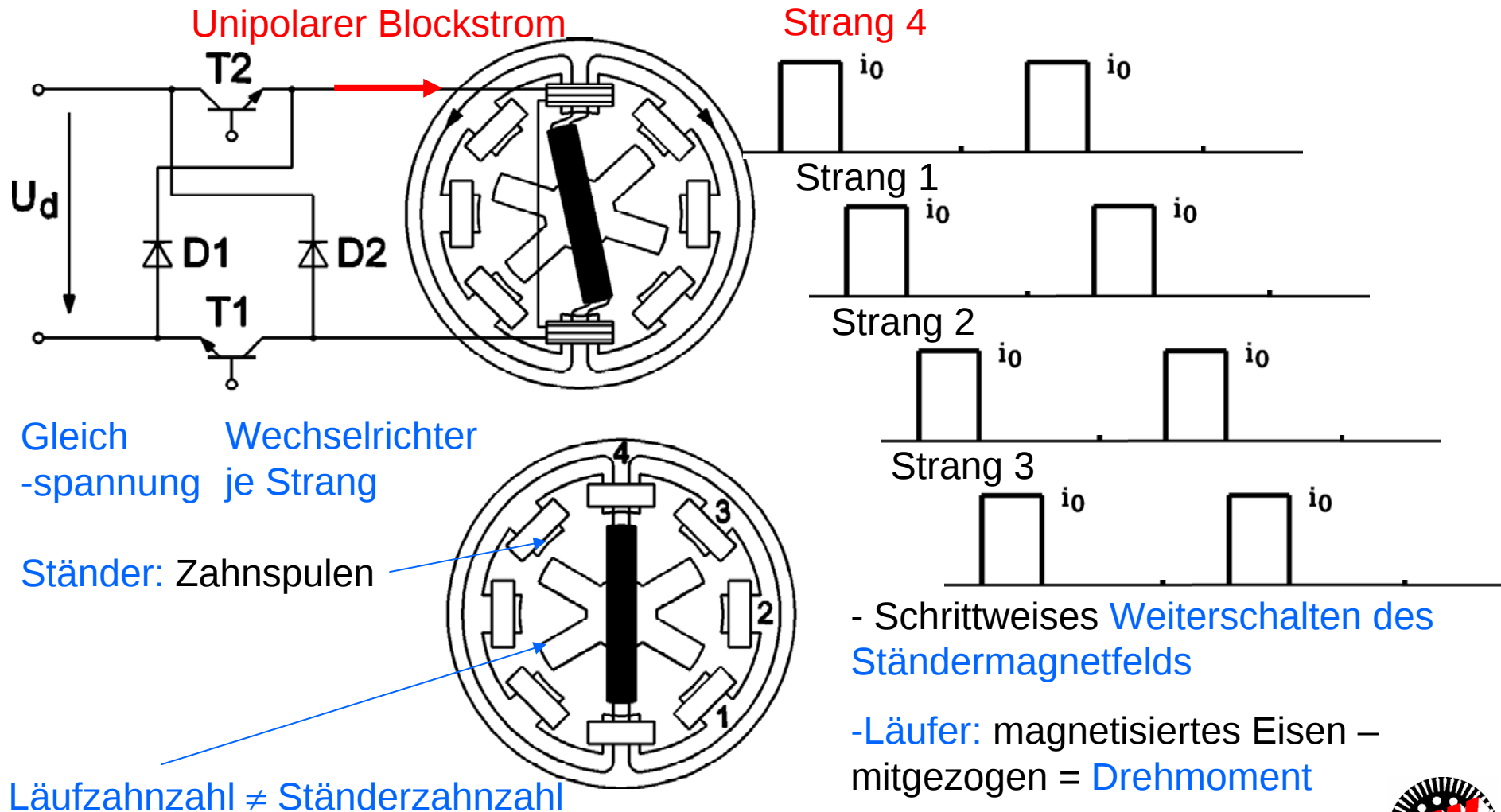


Geschaltete Reluktanzmaschine

(Beispiel: viersträngiger Ständer, zweipoliger Motor)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Geschaltete Reluktanzmaschine

(Beispiel: dreisträngiger Ständer, vierpoliger Motor)

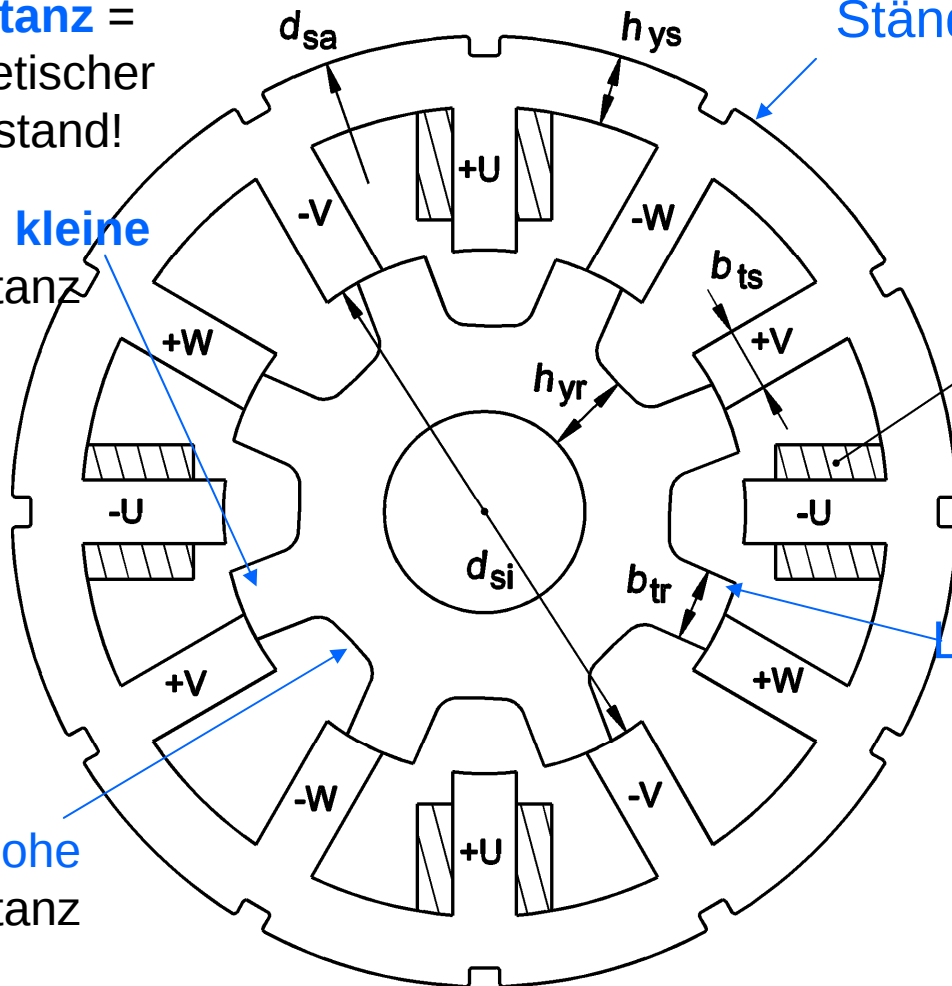


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

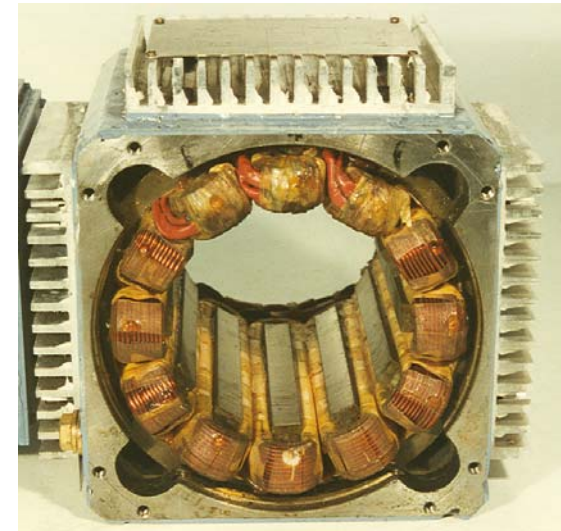
Reluktanz =
magnetischer
Widerstand!

Eisen: **kleine**
Reluktanz

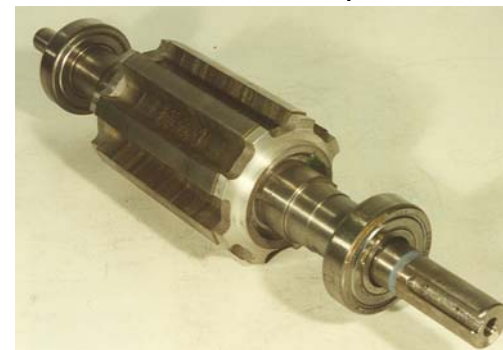
Luft: **hohe**
Reluktanz



Ständer: 3 Stränge U, V, W; 12 Zähne



Läufer: 8 Zähne; robust (nur Eisen)



Quelle:
SICME, Italien



Übersicht: E-Maschinen für Hybrid-/E-Automobile



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Permanentmagnet-Synchronmaschine (PMSM):

- A) Verteilte Wicklung, Oberflächenmagnete, kein Reluktanzmoment
- B) Verteilte Wicklung, Vergrabene Magnete, Reluktanzmoment
- C) Zahnspulenwicklung, Oberflächen-/Vergrabene Magnete, niedrigere Drehzahl

- Fremd-/Hybriderregte Synchronmaschine: Verteilte Wicklung, Läuferfeld verstellbar, Reluktanzmoment wirkt leider negativ

- Käfigläufer-Asynchronmaschine (KLASM): Verteilte Wicklung, Läuferverluste = heißer Läufer, geringere Ausnützung, sehr kleiner Luftspalt

- Geschaltete Reluktanzmaschine: Zahnspulenwicklung, nur Reluktanzmoment, geringere Ausnützung, sehr kleiner Luftspalt, vergleichsweise laut

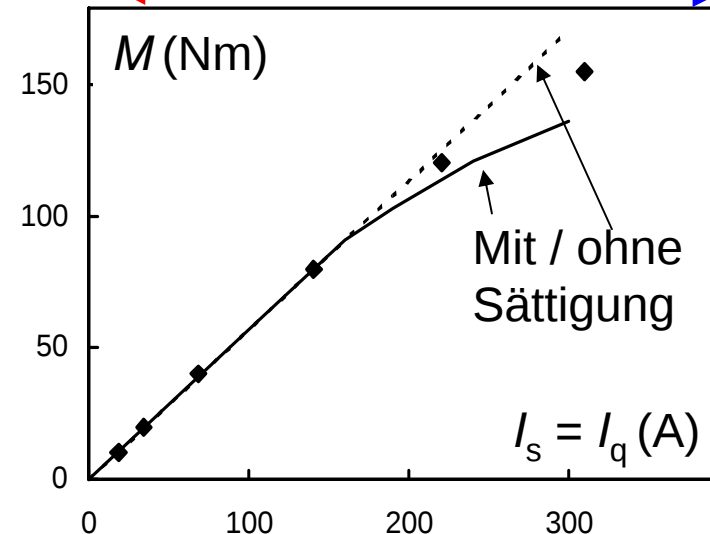
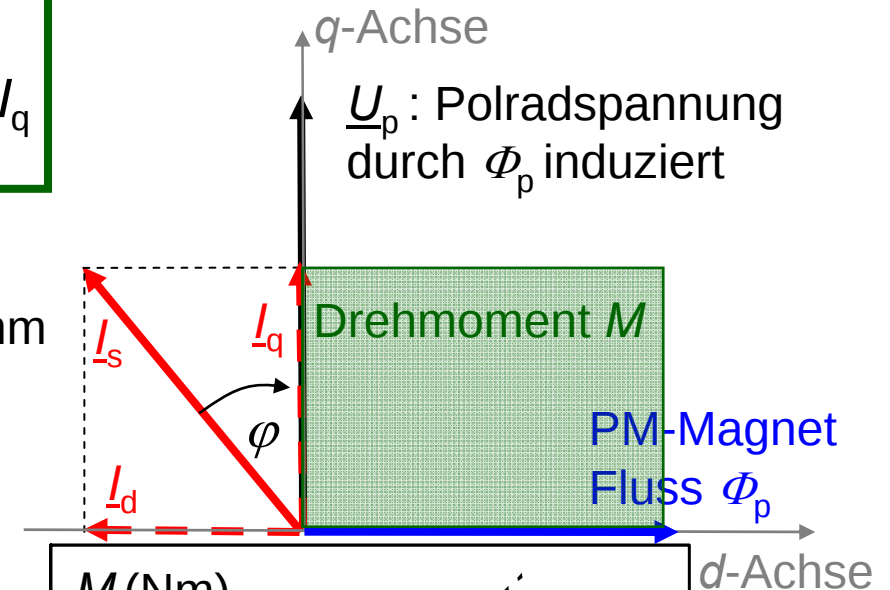
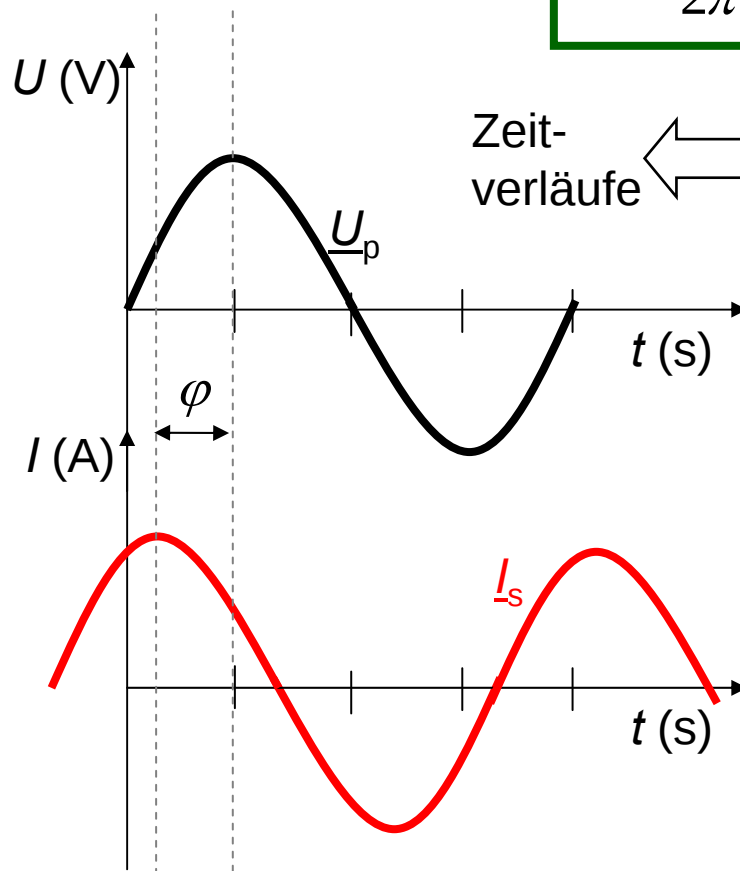


Drehmomenterzeugung in Drehfeldmaschinen (hier PMSM)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

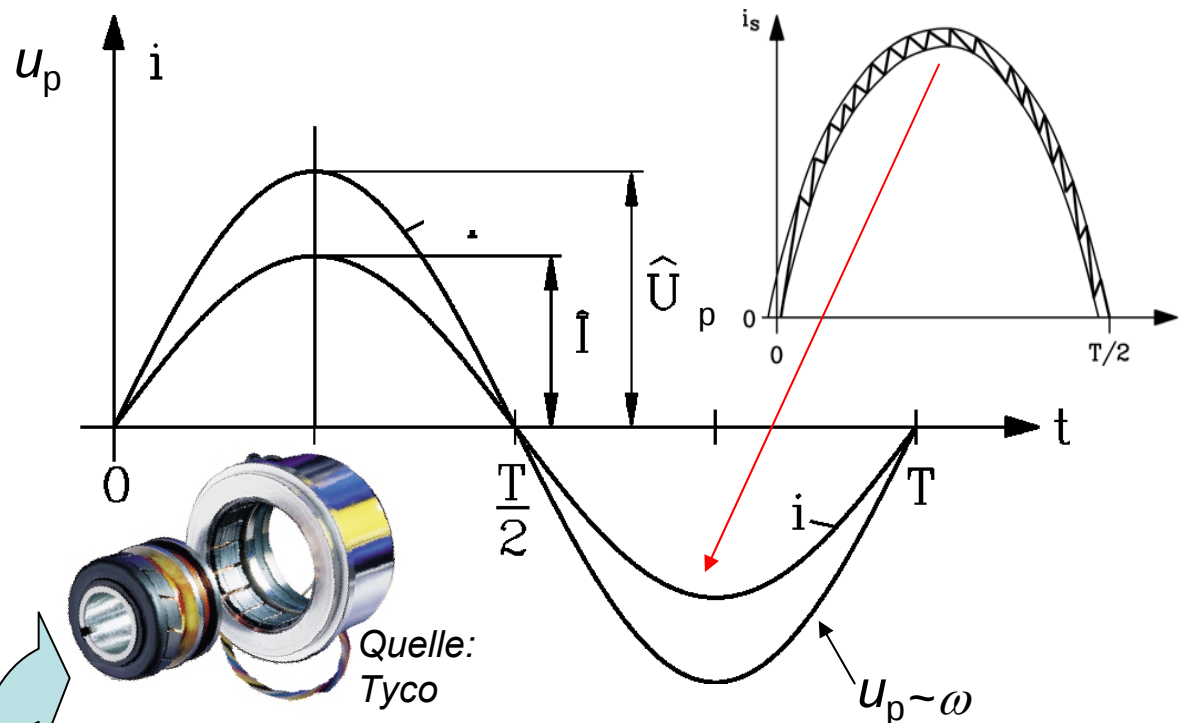
$$M = \frac{3U_p I_q}{2\pi \cdot n_{\text{syn}}} \sim \Phi_p \cdot I_q$$



Feldorientierter Betrieb bei Drehfeldmaschinen – Umrichter (hier PMSM)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



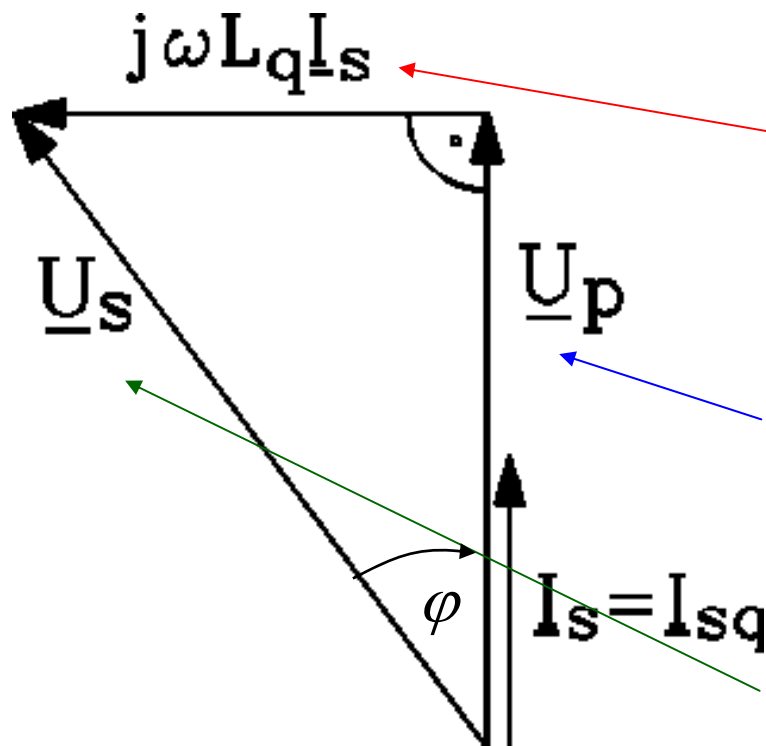
- **Sinusförmig**
eingprägter Strom über
Sinus-Hystereseband-
Stromregler
- Strom hat „feinen“
pulsfrequenten
Sägezahnverlauf auf
Grund des taktenden
Umrichters
(im Bild oben sichtbar)

- Strom **in Phase** mit der induzierten Spannung (Polradspannung) $u_i = u_p$ über den Umrichter eingepägt: $i_s = i_q$ („**Querstrom**“) >> **Rotorposition messen**
- „**Kommutierung des Motorstroms**“: Nulldurchgänge des Motorstroms vom Umrichter festgelegt, der als Referenz die Rotorposition (gemessen über einen **Polradlagewinkel-Geber**) verwendet

Erforderliche Umrichterausgangsspannung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



- Ströme und Spannungen sinusförmig,
als (rotierende) Zeiger dargestellt

- Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$

- Ständerdrehfeld induziert in Ständer-
wicklung **Selbstinduktionsspannung**
(Selbstinduktivität L_q)

- Ohmscher Spannungsabfall vernachlässigt

- Polradspannung und Strom **in Phase**

$$U_s = \sqrt{(\omega L_q I_q)^2 + U_p^2} \sim \omega \sim n_{syn}$$

- **Resultierende Spannung U_s** muss vom
Umrichter eingespeist werden.

- **U_s** steigt proportional zur Drehzahl!



Vergleich: PMSM Ohne vs. Mit Feldschwächung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Ständerspannung $U_s = \text{konst.} = \text{maximal!}$

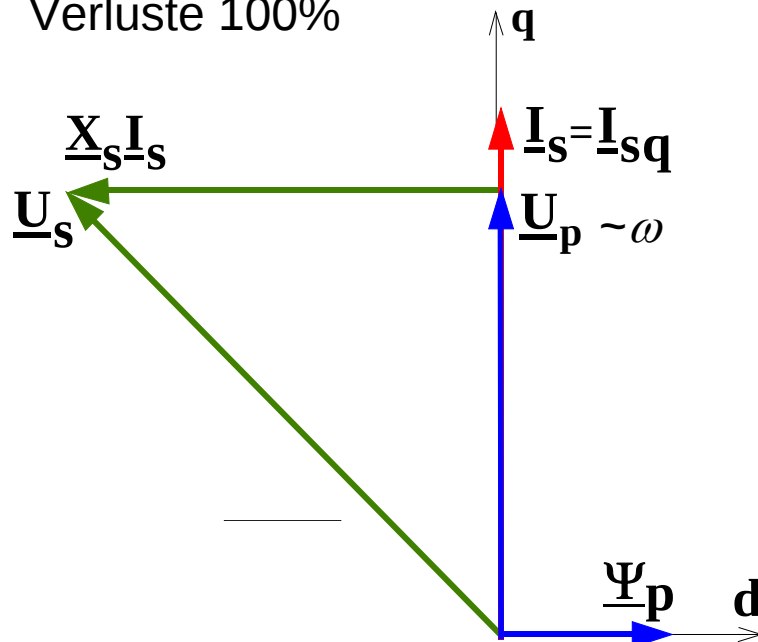
Leistung 100%

Drehzahl 100%,

Drehmoment 100%

Strom 100%

Verluste 100%



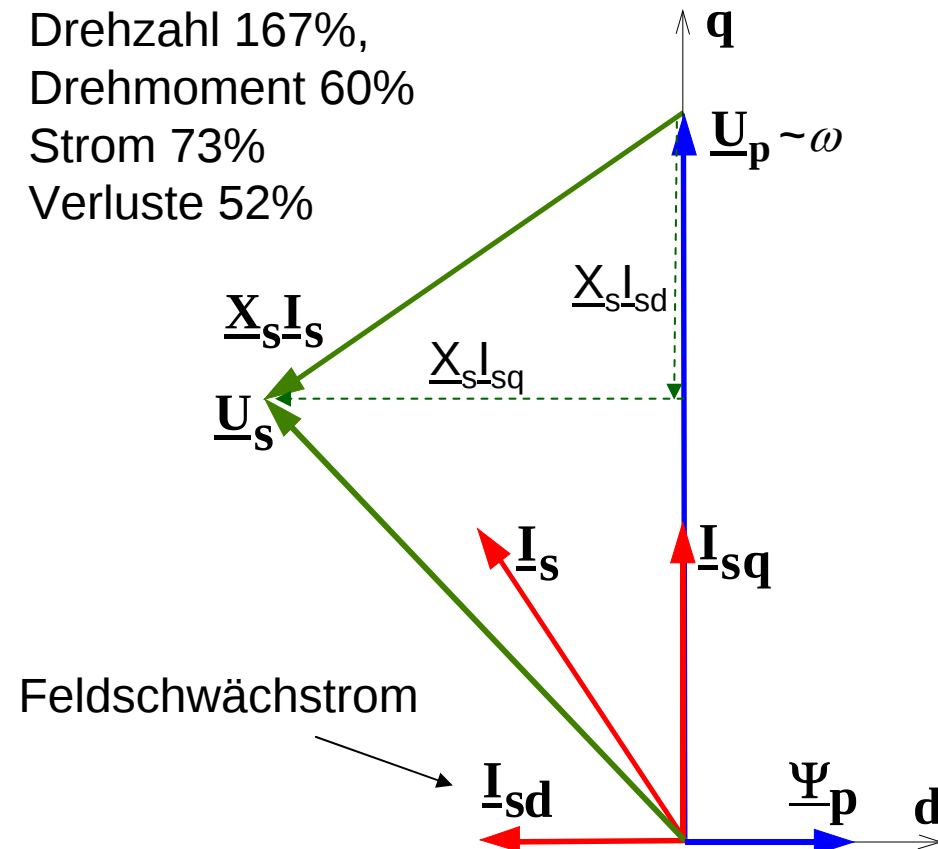
Leistung 100%

Drehzahl 167%,

Drehmoment 60%

Strom 73%

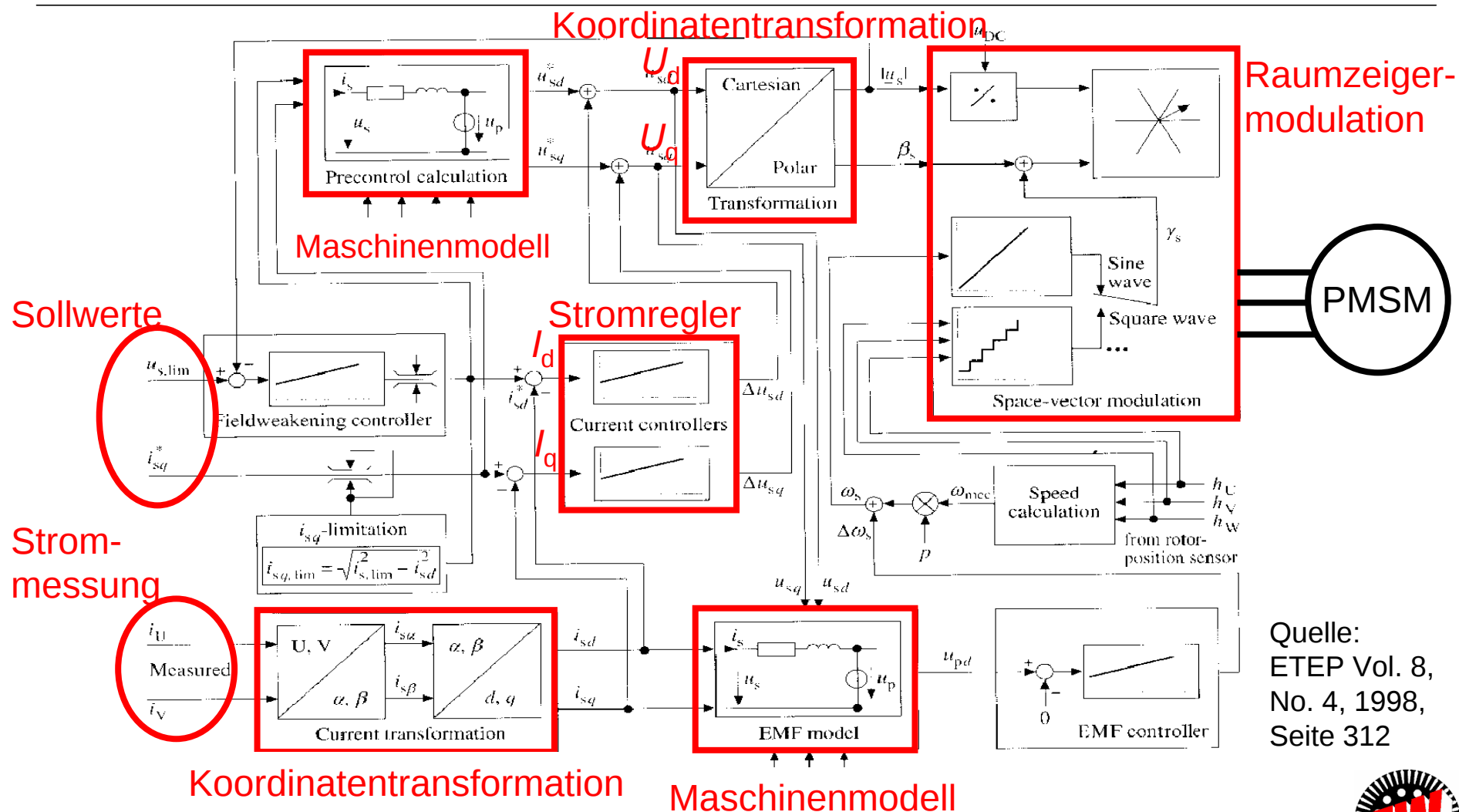
Verluste 52%



Regelstruktur Drehfeldmaschinen (hier PMSM)



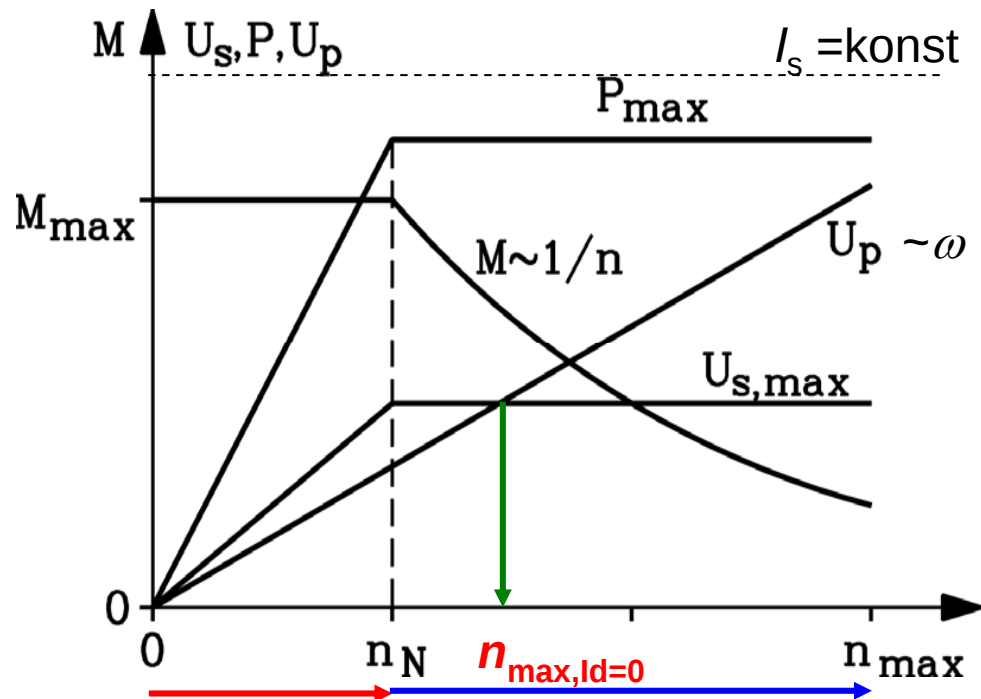
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle:
ETEP Vol. 8,
No. 4, 1998,
Seite 312



Feldschwächung bei PM-Synchronmaschinen (PMSM)

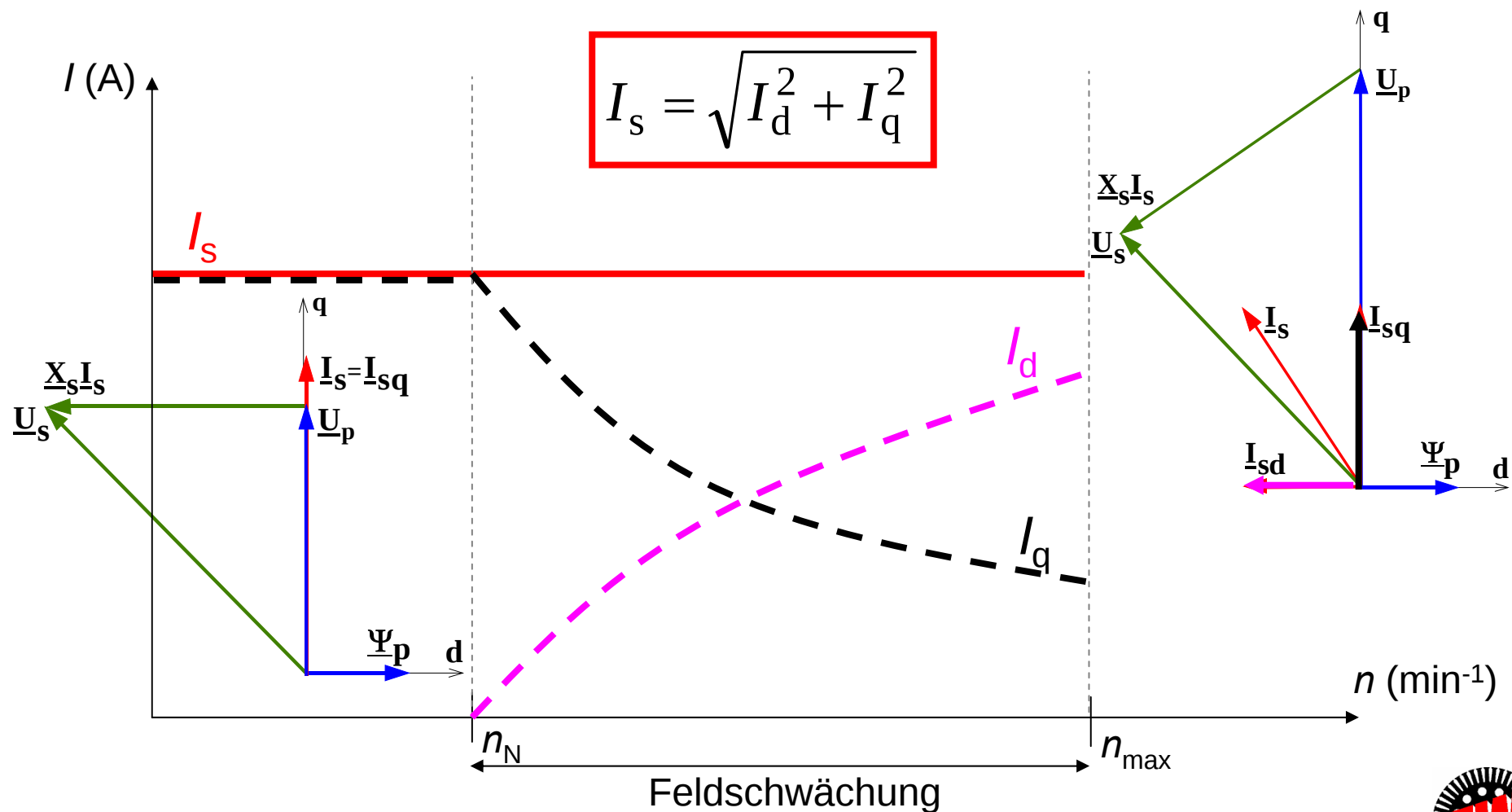


Grunddrehzahlbereich Feldschwächbereich

- Ab **Nenn**drehzahl n_N : Spannungsgrenze $U_{s, \max}$ erreicht.
- Einprägen eines **negativen d -Stroms**: in der Ständerwicklung Gegenspannung zu U_p induziert, so dass U_s konstant bleibt.
- d -Strom erzeugt **kein PM-Drehmoment**, nur Reluktanzmoment bei PMSM mit vergrabenen PM!
- Konstanter Gesamtstrom I_s : Wegen erforderlichem d -Strom muss der q -Strom verringert werden, so dass das **Moment M sinkt** („Feldschwächbereich“).

Statt $n_{\max, Id=0}$ (bei $U_s = U_p$) wird ein höheres $n_{\max}$ erreicht, aber bei verringertem Moment, das nicht mehr zu I_s proportional ist.

Feldschwächung bei PM-Synchronmaschinen (PMSM): Stromverläufe



Asynchronmaschine: Drehmoment und Strom vs. Drehzahl



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Betrieb bei:

- konstanter Spannung

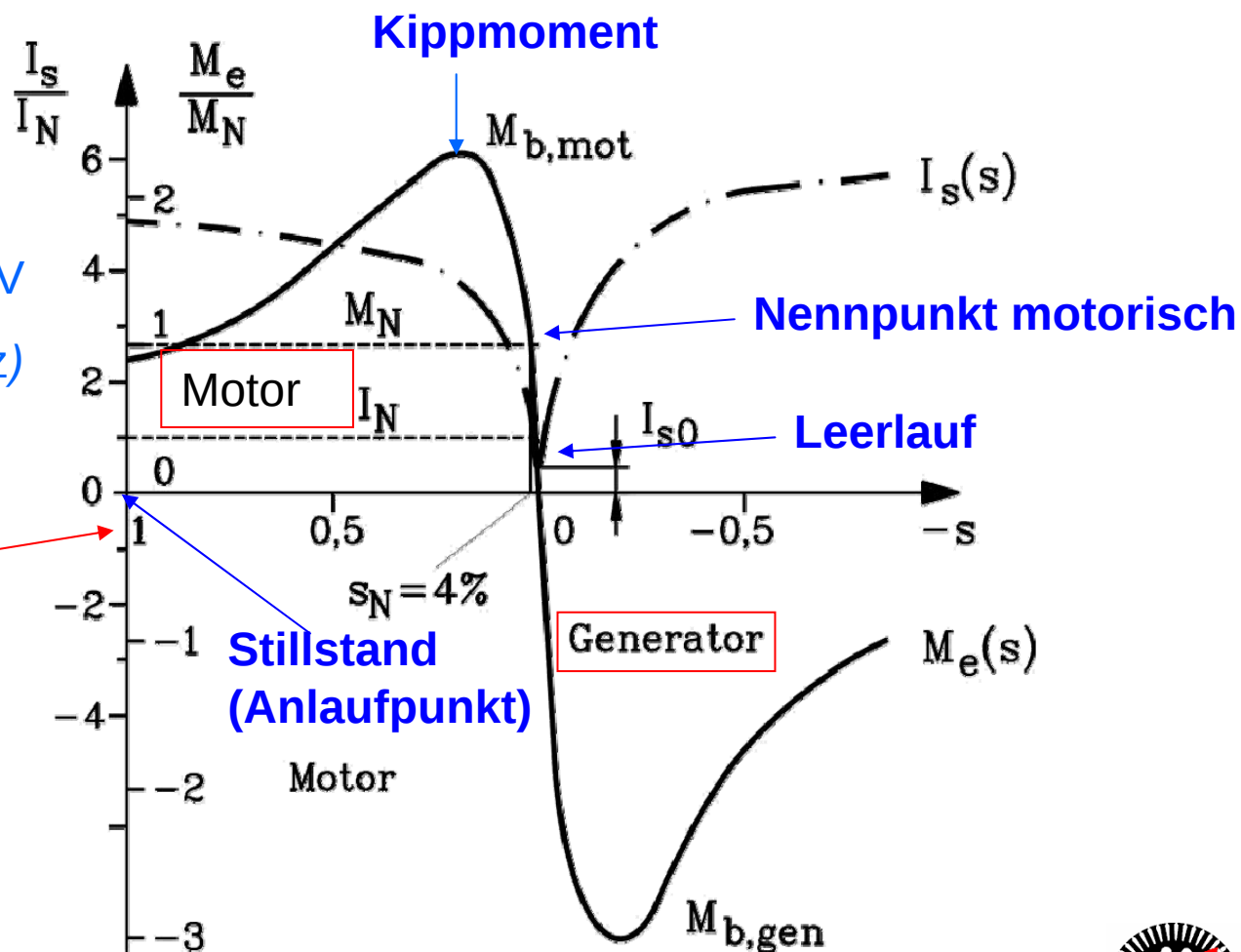
- konstanter Frequenz

(z. B. Netzbetrieb: $U_s = 220V$

$f_s = 50Hz$)

Schlupf s

$$S = \frac{n_{syn} - n_{mot}}{n_{syn}}$$

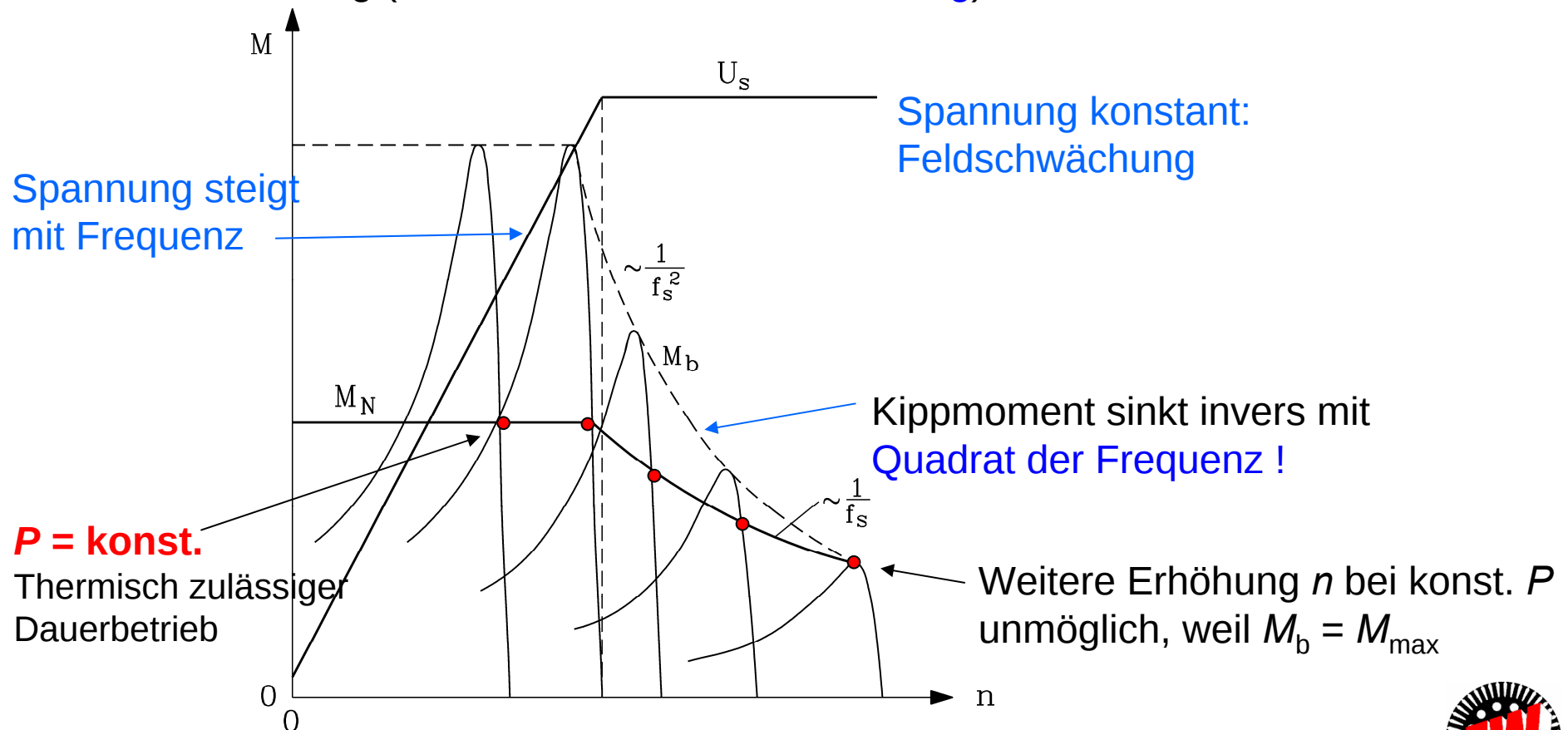


Asynchronmaschine – Betrieb bei veränderlicher Spannung und Frequenz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Umrichterspannung steigt linear mit Frequenz und Drehzahl!
- Ab maximaler Umrichterspannung $U_{s,max}$: Magnetfeld sinkt selbsttätig bei weiterer Drehzahlerhöhung („**automatische**“ **Feldschwächung**).



Wirkungsgrad und Verlustgruppen: PMSM vs. KLASM

PM-Synchron-Maschine (PMSM)	Käfigläufer-Asynchron- Maschine (KLASM)
Stator-Stromwärmeverluste	Stator-Stromwärmeverluste
Ummagnetisierungsverluste	Ummagnetisierungsverluste
	Rotor-Stromwärmeverluste
Verluste in den Magneten und Läufer	Zusatzverluste bei Sinusstrombetrieb
Ventilations- u. Lagerreibungsverluste	Ventilations- u. Lagerreibungsverluste
Zusatzverluste bei WR-Betrieb	Zusatzverluste bei WR-Betrieb

WR: Wechselrichter

- Bei KLASM ist auch im Leerlauf Strom zur Magnetisierung der Bleche nötig $\approx 30\%$ vom Nennstrom I_N
- Beim PMSM ist Strom im Leerlauf Null !!

➔ Magnetisierungsstrom sorgt für größere Stromwärmeverluste bei KLASM

Beispiel: E-Auto (PMSM-Motor M3) Wirkungsgrad-Kennfeld gerechnet



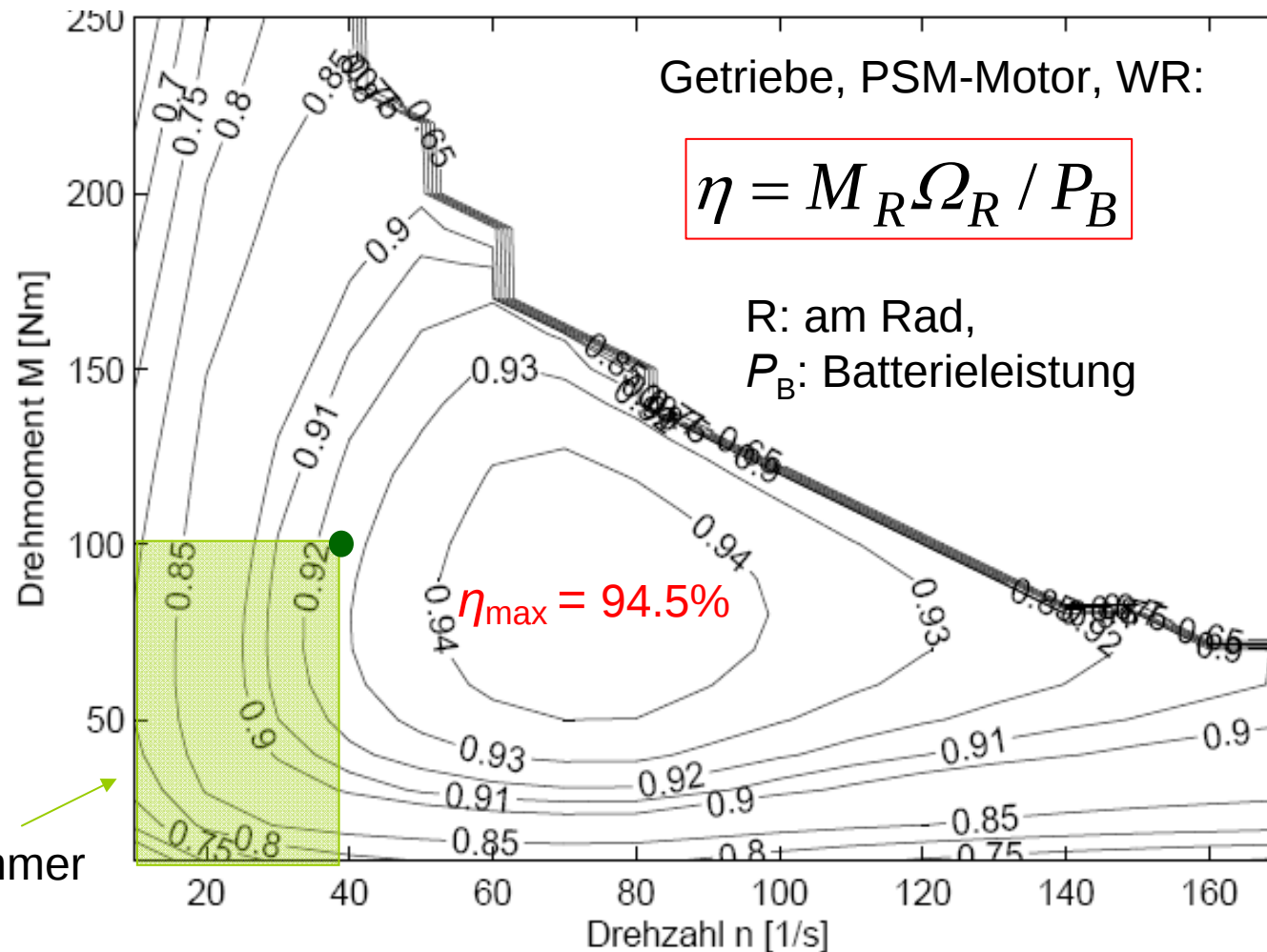
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Bemessungs- Betrieb:

$$\eta_{WR} = 98,5\%$$
$$\eta_{\text{Getriebe}} = 98,5\%$$
$$\eta_{\text{PMSM}} = 94,8\%$$

$$\eta_{\text{ges}} = 92\%$$

Teillastbereich immer
noch rel. effizient



Beispiel: Asynchronmaschine mit Wechselrichter (gemessen)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

KLASM M2 im Bemessungs-Betrieb:

$$\eta_{WR} = 98,5\%$$

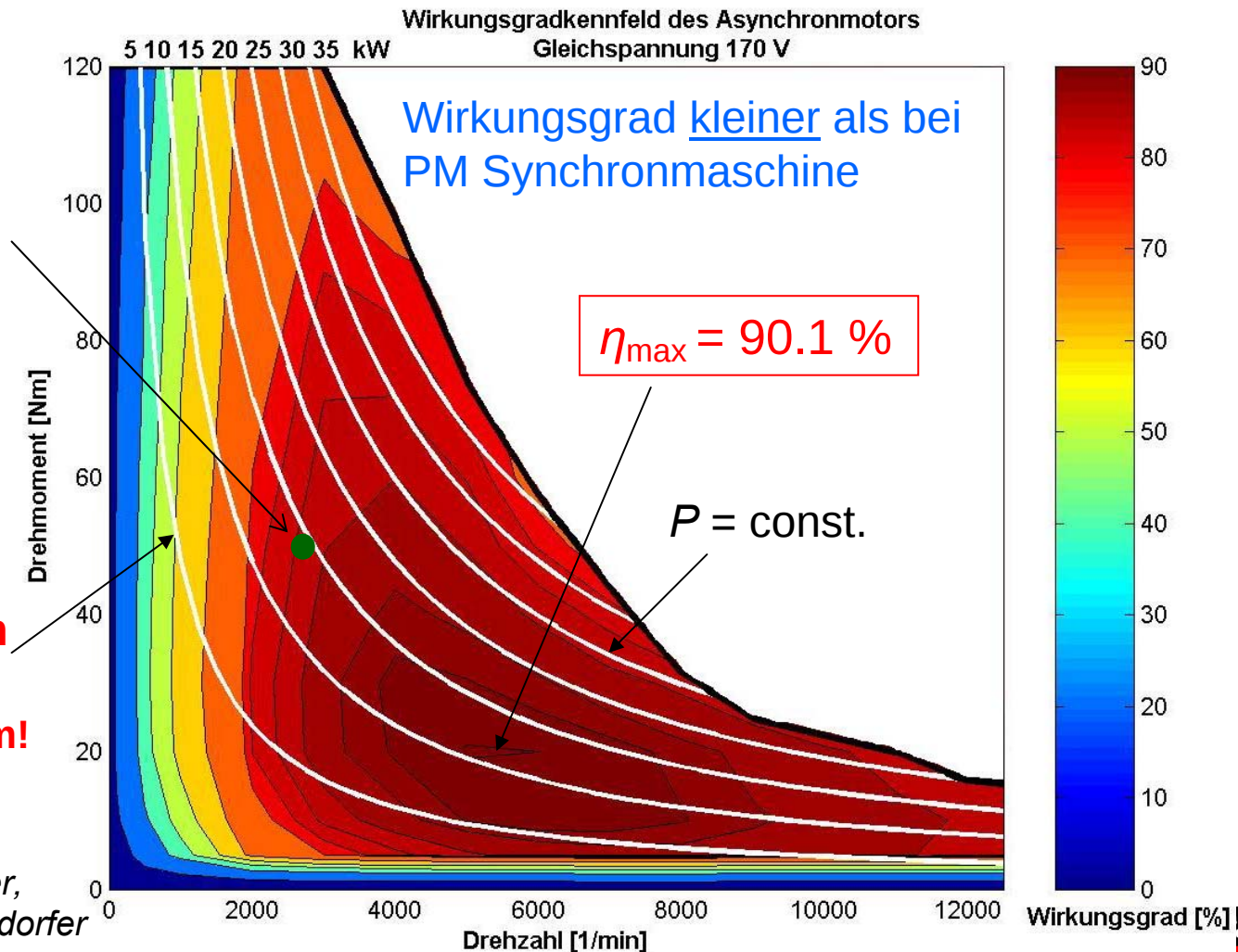
$$\eta_{\text{Getriebe}} = 98,5\%$$

$$\eta_{\text{KLASM}} = 88,5\%$$

$$\eta_{\text{ges}} = 85,8\%$$

Deutlich schlechter im Teillastbereich im Vgl. zu PMSM !
- Magnetisierungsstrom!
- Zus. Verluste !

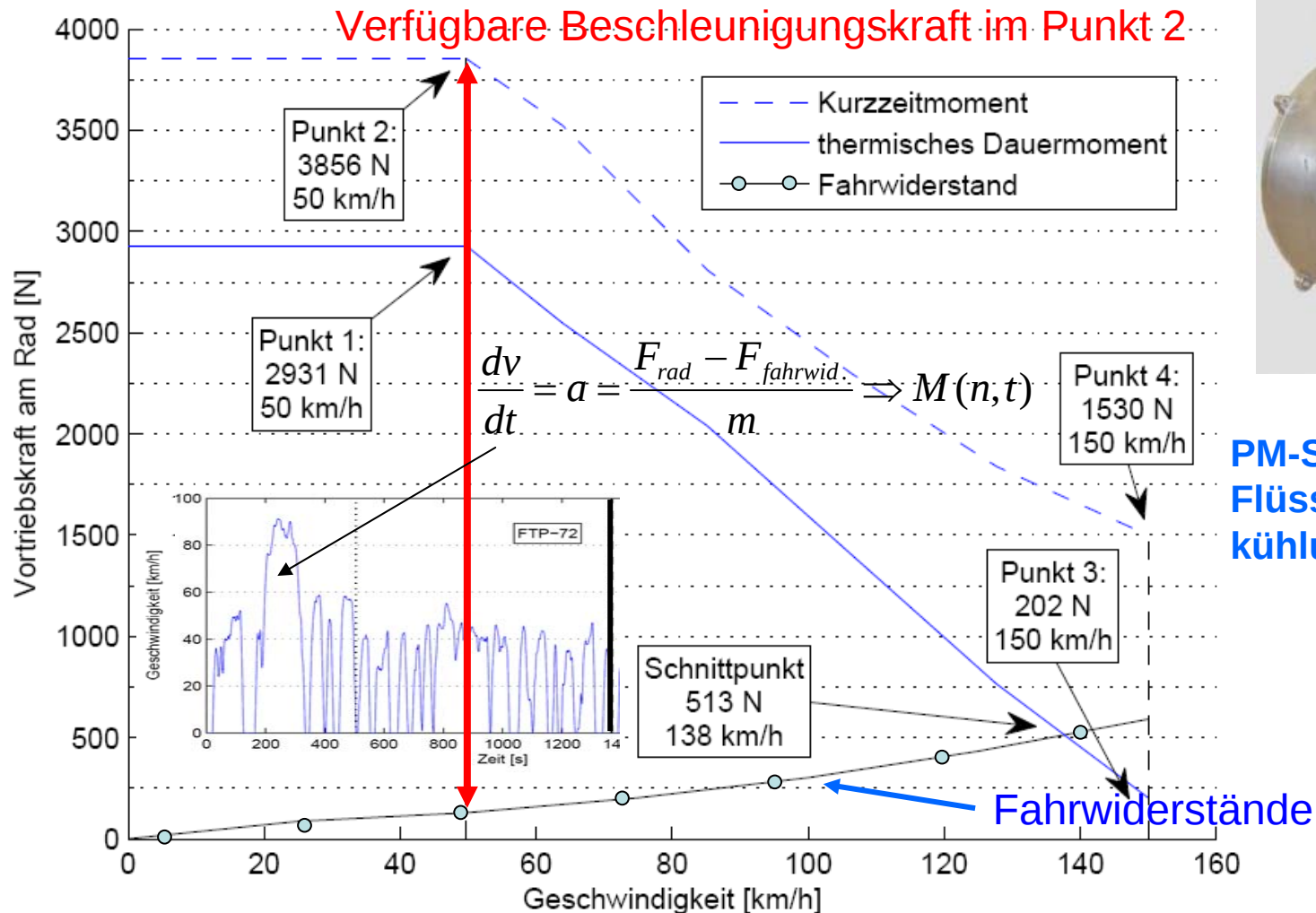
Quelle: Daimler,
TSA/DDr. Neudorfer



Beispiel: E-Auto und Motorkennfeld (PSM Motor M3)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: Brusa

**PM-Synchronmotor mit
Flüssigkeitsmantel-
kühlung**

40 kW

4500/min

85 Nm

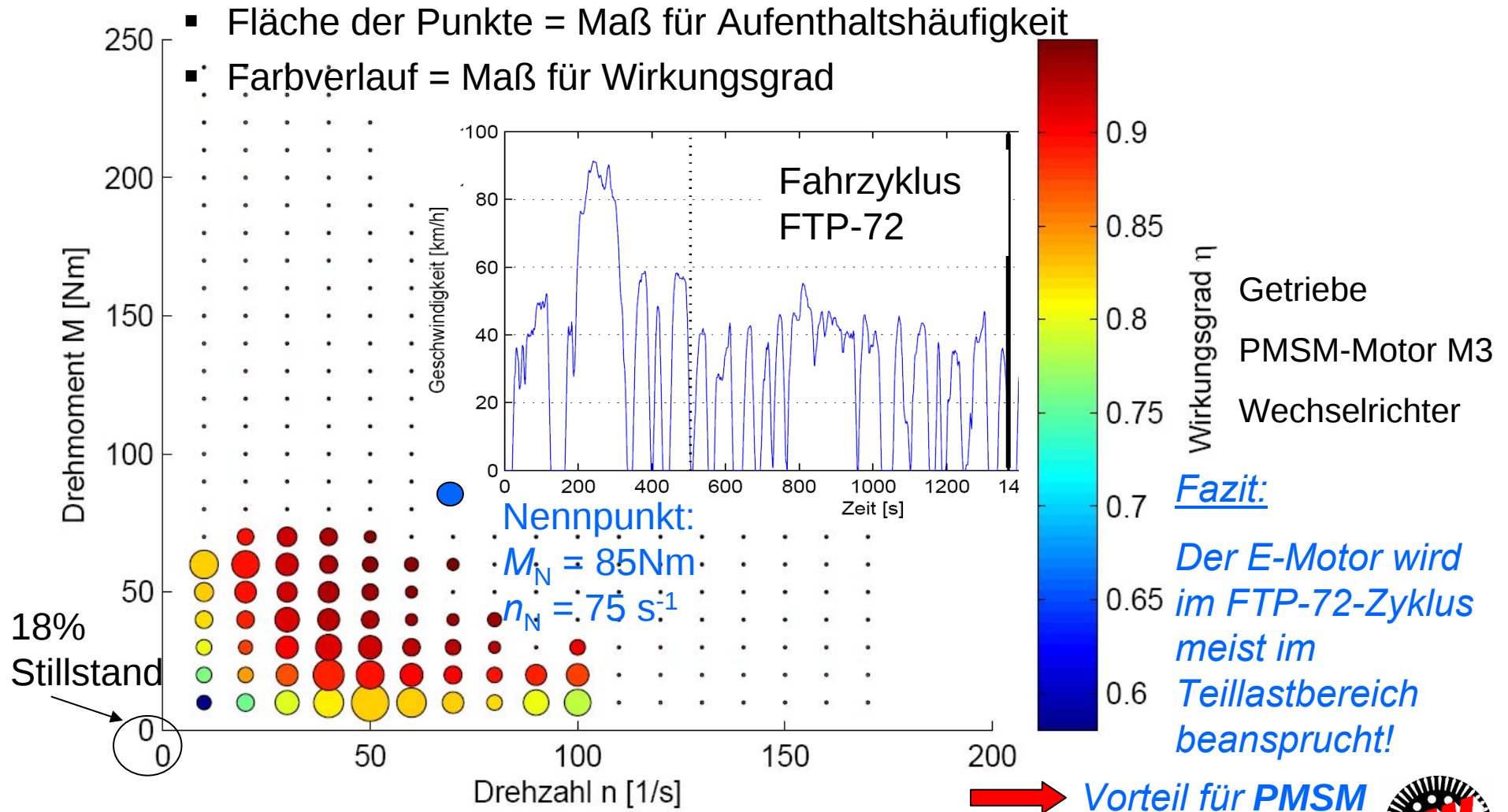
96 A

164 V

$\cos \varphi = 0.89$



Beispiel: E-Auto: Häufigkeit der vorkommenden Wirkungsgrade im FTP-72 Zyklus **Ermittlung des Energieverbrauchs**



Zusammenfassung – Vergleich unterschiedlicher E-Motorkonzepte



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

E-Maschine	ASM	PSM	SRM	
Momentendichte	+/-	++	+	
Wirkungsgrad	+/-	++	+/-	<i>Wahl hängt stark vom Fahrzyklus ab</i>
Masse	+	++	+	
Stand der Technik	++	+	+/-	
Wechselrichter	+	+/-	-	<i>KLASM lange schon Massenprodukt</i>
Kosten Maschine	+/-	-	+	<i>PM sehr teuer, Verfügbarkeit !?!</i>
Kosten System	+/-	+/-	-	<i>Teurer Umrichter bei SRM</i>
Fertigung	+	-	++	<i>PM spröde</i>
Geräusch	+	++	-	<i>SRM neigt zum Schwingen</i>

Quelle:

TSA / DDr. Neudorfer

ASM: Asynchronmaschine

PSM: Permanentmagnet-Synchronmaschine,

SRM: Geschaltete Reluktanzmaschine (Engl.: **Switch Reluctance Machine**)



Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

**Danke
für Ihre Aufmerksamkeit!**

Quelle: BMW

