



Fremderregte Synchronmaschinen im Einsatz als Achshybridantriebe

TU Darmstadt, 27.06.2008

Dr. W. Hackmann

tel.: +49 30 34008-221; e-mail: wilhelm.hackmann@contiautomotive.com

Übersicht

- **Allgemeines** (Kundennutzen, Hybridkonzepte)
- **Motivation** zum Einsatz fremderregter Synchronmaschinen als Achshybridantriebe
- **Projektierung** eines Hybridantriebssystems
- **FE-Berechnung** und Auslegung der Synchronmaschinen
- Realisierung der **Motorregelung**
- **Prüfstandsmessungen** an einem Prototypmotor
- **Zusammenfassung / Ausblick**

Allgemeines

- **Definition**

- ein Hybridfahrzeug besitzt zwei unterschiedliche Antriebssysteme, d.h. mindestens zwei Energiespeicher und -wandler
- durch geeignete Kombination müssen die Vorteile der einzelnen Antriebe genutzt und die Schwachstellen vermieden werden

- **Aufwand**

- zusätzliche Bauteile auf dem Fahrzeug
- zusätzliches Gewicht und beanspruchtes Bauvolumen
- u. U. erhöhte Kosten des gesamten Antriebssystems

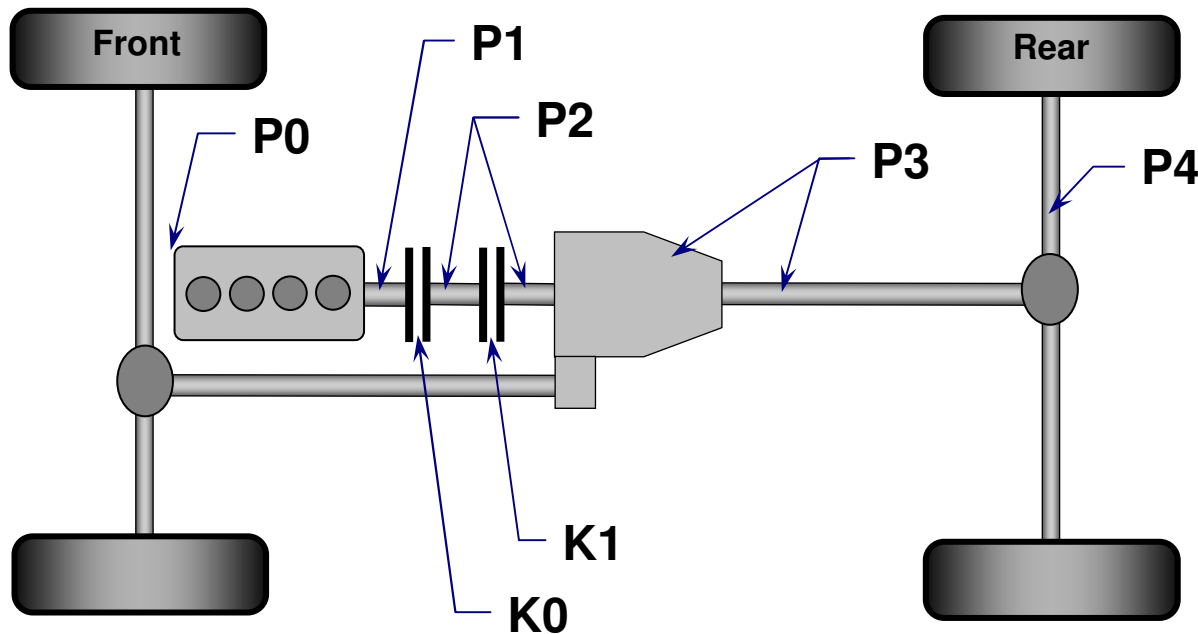
Kundennutzen von Hybridantriebssystemen (Auswahl)

- **Funktionalität**
 - Boostbetrieb (vor allem bei Allrad-Funktion)
 - elektrisches Fahren (Rangieren, Kriechen, ‚Segeln‘)
 - Start / Stop
- **Kraftstoffverbrauch**
 - Lastpunktverschiebung des Verbrenners
 - Rekuperation (Rückspeisung der Bremsenergie)
 - hoher Systemwirkungsgrad im Generatorbetrieb
- **Sicherheit**
 - (ggf.) redundantes Antriebssystem
 - (ggf.) Allrad-Funktion
- **Marketing**
 - Imagegewinn durch Performance-Steigerung / Senkung des Verbrauchs

Antriebsanordnung bei Hybridfahrzeugen

- **Serieller Hybridantrieb**
 - das Fahrzeug wird ausschließlich elektrisch angetrieben
 - ein vom Verbrennungsmotor angetriebener Generator lädt die Batterie auf
 - Antriebskonzept mit geringsten Emissionen
- **Paralleler Hybridantrieb**
 - Verbrennungsmotor und/oder Elektromotor können das Fahrzeug antreiben
 - ‚down-sizing‘ des Verbrenners möglich
 - Antriebskonzept mit geringstem Kraftstoffverbrauch
- **Leistungsverzweigter Hybridantrieb**
 - ein Teil der Leistung des Verbrenners wird direkt mechanisch übertragen
 - der restliche Teil wird zum Antreiben eines Generators verwendet, ...
 - verbesserter Wirkungsgrad, aber höherer Bauteileaufwand

Positionen von E-Maschine und Kupplungen



- P0 = Riemen-Startergenerator (RSG)
- P1 = E-Maschine auf der Kurbelwelle (KSG)
- P2 = E-Maschine auf der Getriebeeingangswelle
- P3 = E-Maschine auf der Getriebeausgangswelle, „im Getriebe“ oder Kardanwelle (ESG)
- P4 = E-Maschine auf der Achse

- K0 = Trennkupplung
- K1 = Anfahrkupplung (auch Wandler etc.)

Verwendete Motortypen für Hybridantriebe

↪ **Permanenterregte Synchronmaschine (MPSM)**

- Konzentrierte Wicklung im Stator (Bruchlochwicklung); Oberflächenmagnete im Rotor; kein Reluktanzmoment

↪ **Permanenterregte Synchronmaschine (MPSM)**

- Konzentrierte Wicklung im Stator (Bruchlochwicklung); vergrabene Magnete im Rotor; positives Reluktanzmoment \Rightarrow gute Feldschwächung

↪ **Asynchronmaschine (ASM)**

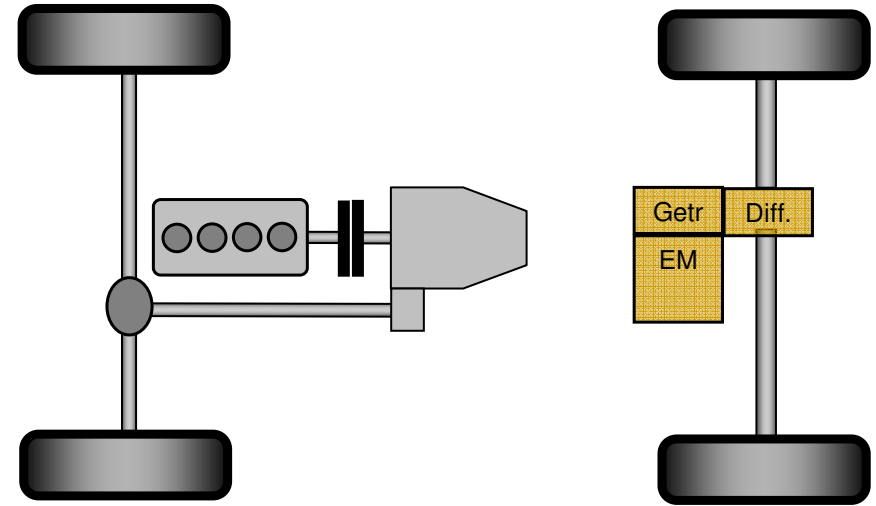
- Verteilte Wicklung (häufig: Einschichtwicklung mit $q = 2$); Aluminiumkäfigläufer (ungeschrägt)

↪ **Fremderregte Synchronmaschine (SM)**

- Verteilte Wicklung; Schenkelpollläufer; Betrieb mit jeweils optimalem Erregerstrom; aber: negatives Reluktanzmoment

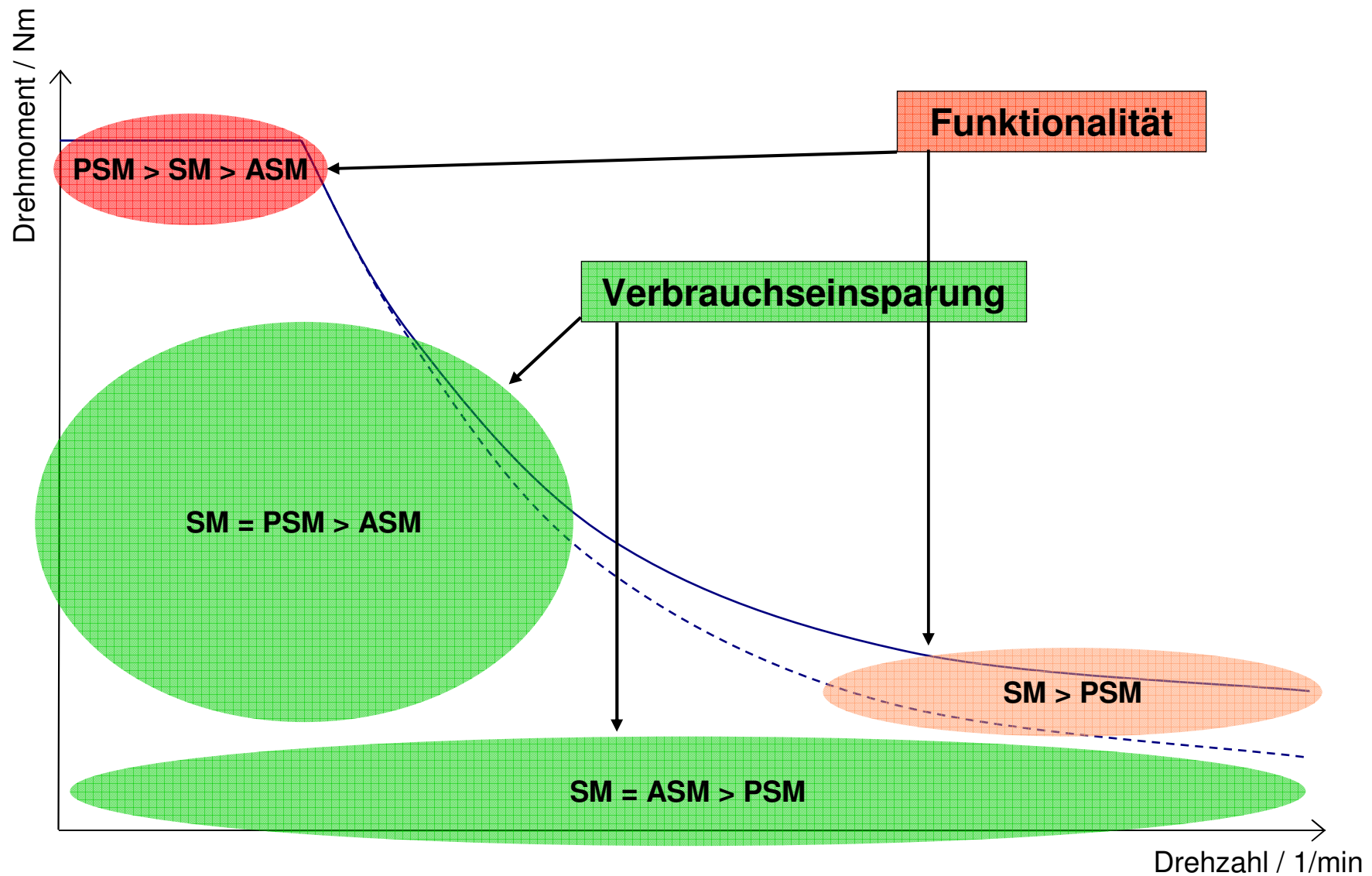
Motivation zum Einsatz von Synchronmaschinen in Achshybridantriebssystemen

- **hier betrachtete mechanische Anordnung:** achsparallel angeordneter Elektromotor, der über ein zweistufiges Stirnradgetriebe mit dem Achsdifferential verbunden ist

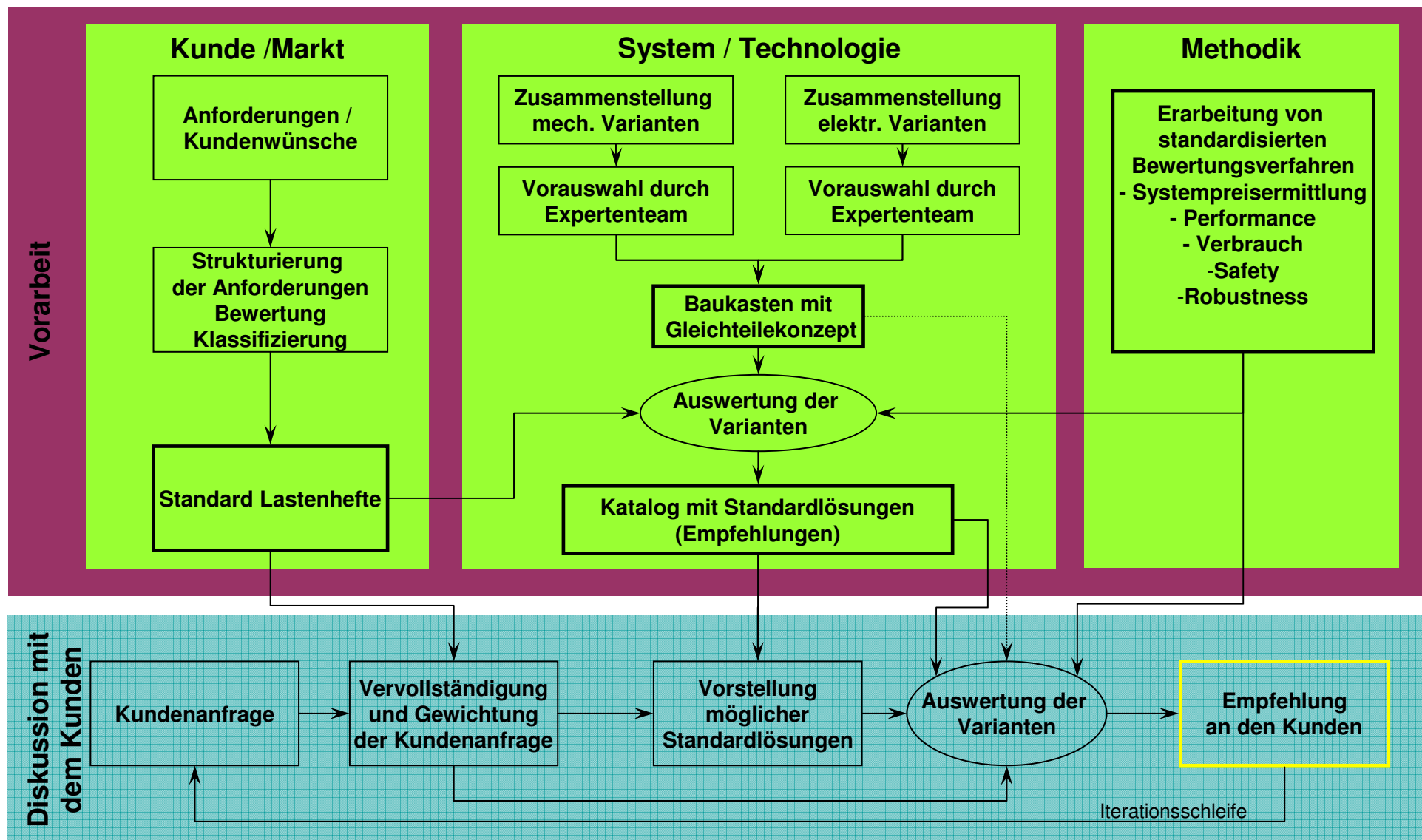


- **kein Einfluss auf VKM/Getriebe Kombin.**
- **Elektrische Allradfunktion**
- **Auswahlkriterien** (Vgl. Asynchronmaschine (ASM), perm.erregte Synchronmaschine (MPSM) und fremderregte Synchronmaschine (SM))
 - Axiale Baulänge von geringer Bedeutung
 - Abschaltbarkeit des Motor (zur Erreichbarkeit höchster Sicherheitsstufen)
 - Geringe Systemverluste in allen Betriebsbereichen (⇒ Fahrzyklusverluste)

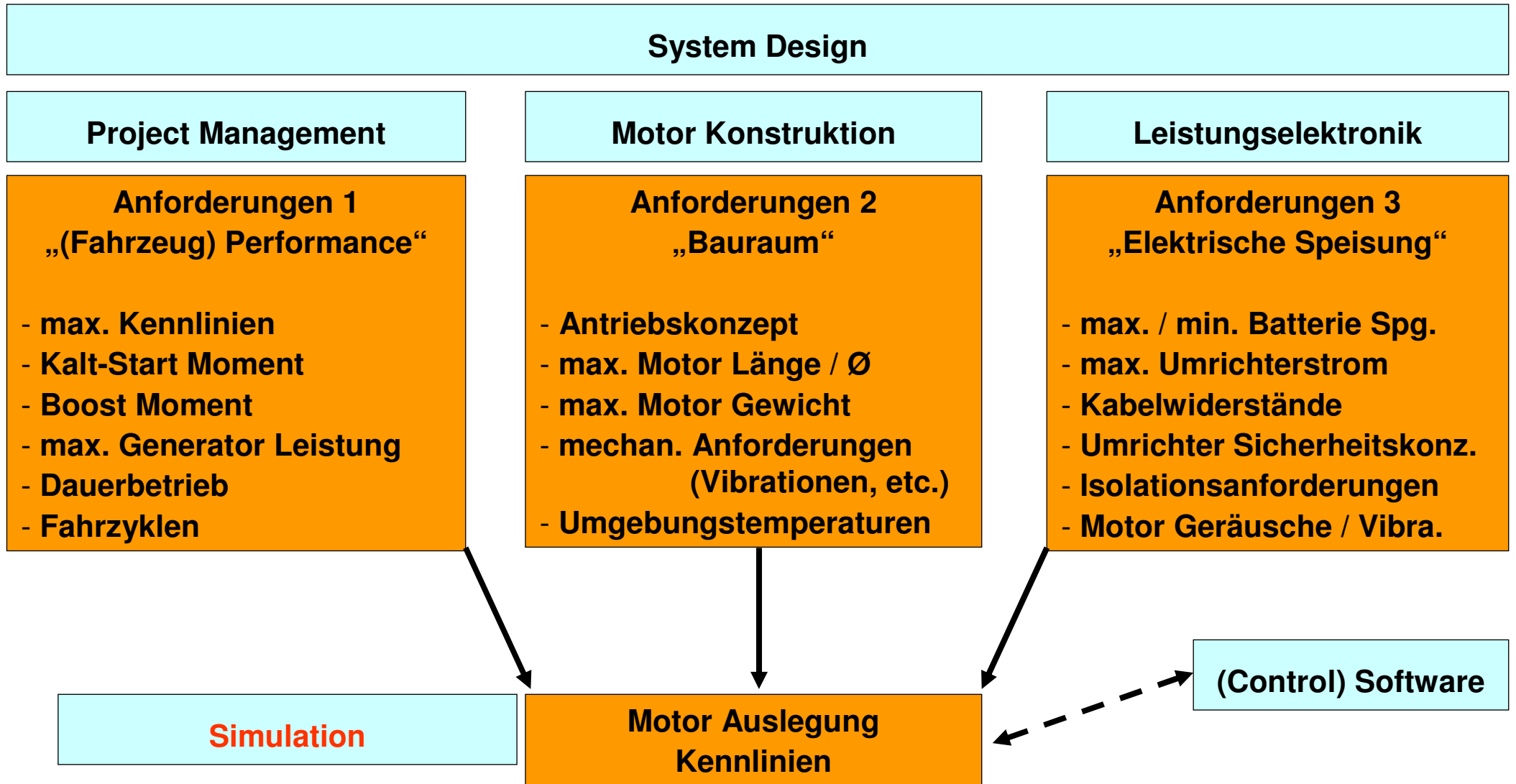
Vergleich der Systemwirkungsgrade der verschiedenen Maschinentypen ASM, PSM und SM



Projektierung eines Hybridantriebssystems: Prozessstruktur



Projektierung eines Hybridantriebssystems: Anforderungen



Berechnung der Synchronmaschine

- ↳ **Analytische Berechnung schwierig aufgrund**
 - Rotorpolzahnsättigung abhängig von Strang- und Erregerstrom
 - Kreuzkopplung zwischen d- und q-Achse
- ↳ **Numerische Berechnung sinnvoll**
 - Reihe von magnetostatischen FE-Berechnungen
- ↳ **Motor- / Leistungsdaten:**

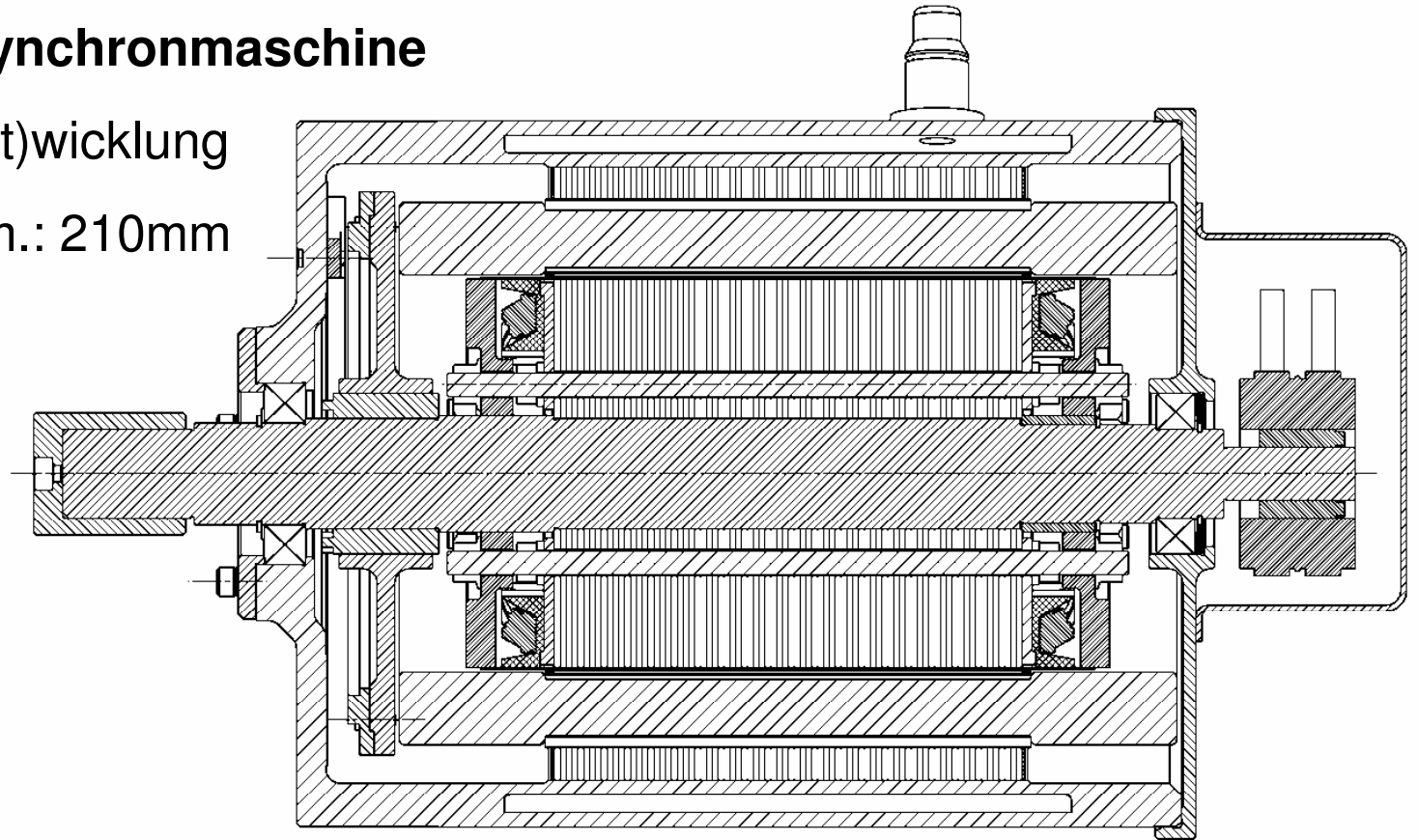
Ausführung der Synchronmaschine

- **8polige Schenkelpol-Synchronmaschine**

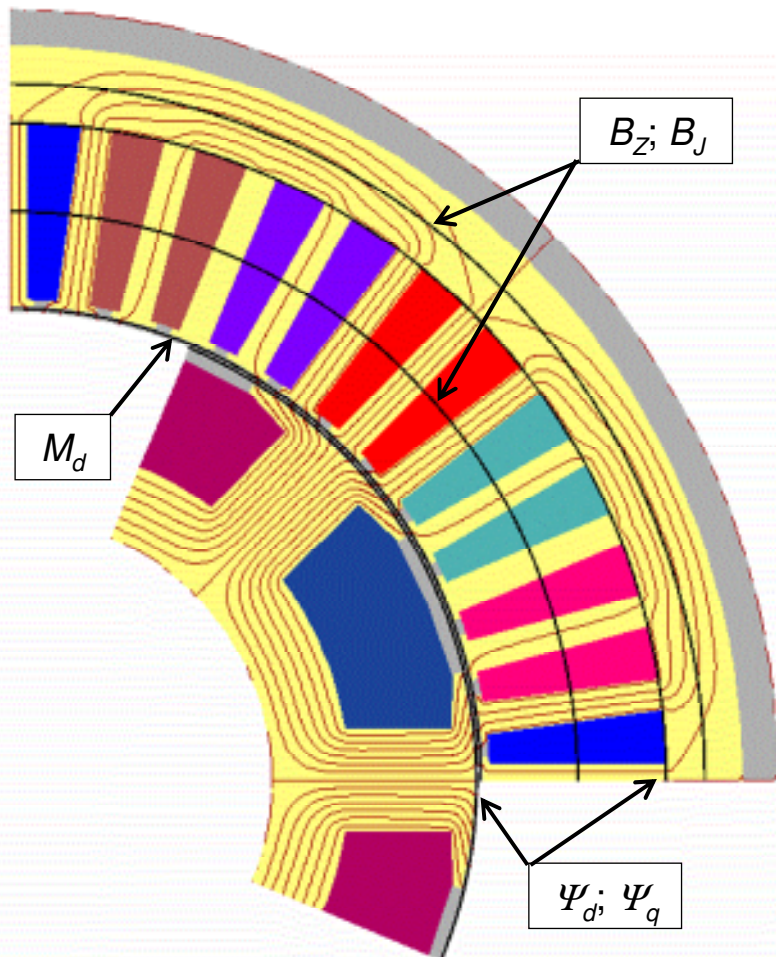
- verteilte Stator(einschicht)wicklung
- Statorpaketaußendurchm.: 210mm
- Wassermantelkühlung

- Luftspaltweite: 1mm
- Rotorbandagierung
- $n_{\max} = 12000 \text{ 1/min}$

- max. Erregerstrom: 16A



FE-Berechnung / Auslegung der Synchronmaschine



↪ **FE-Berechnung** einer 2D-Kontur unter Vorgabe Stator-/Rotordurchflutung, Rotorposition

↪ **Auswertung** von

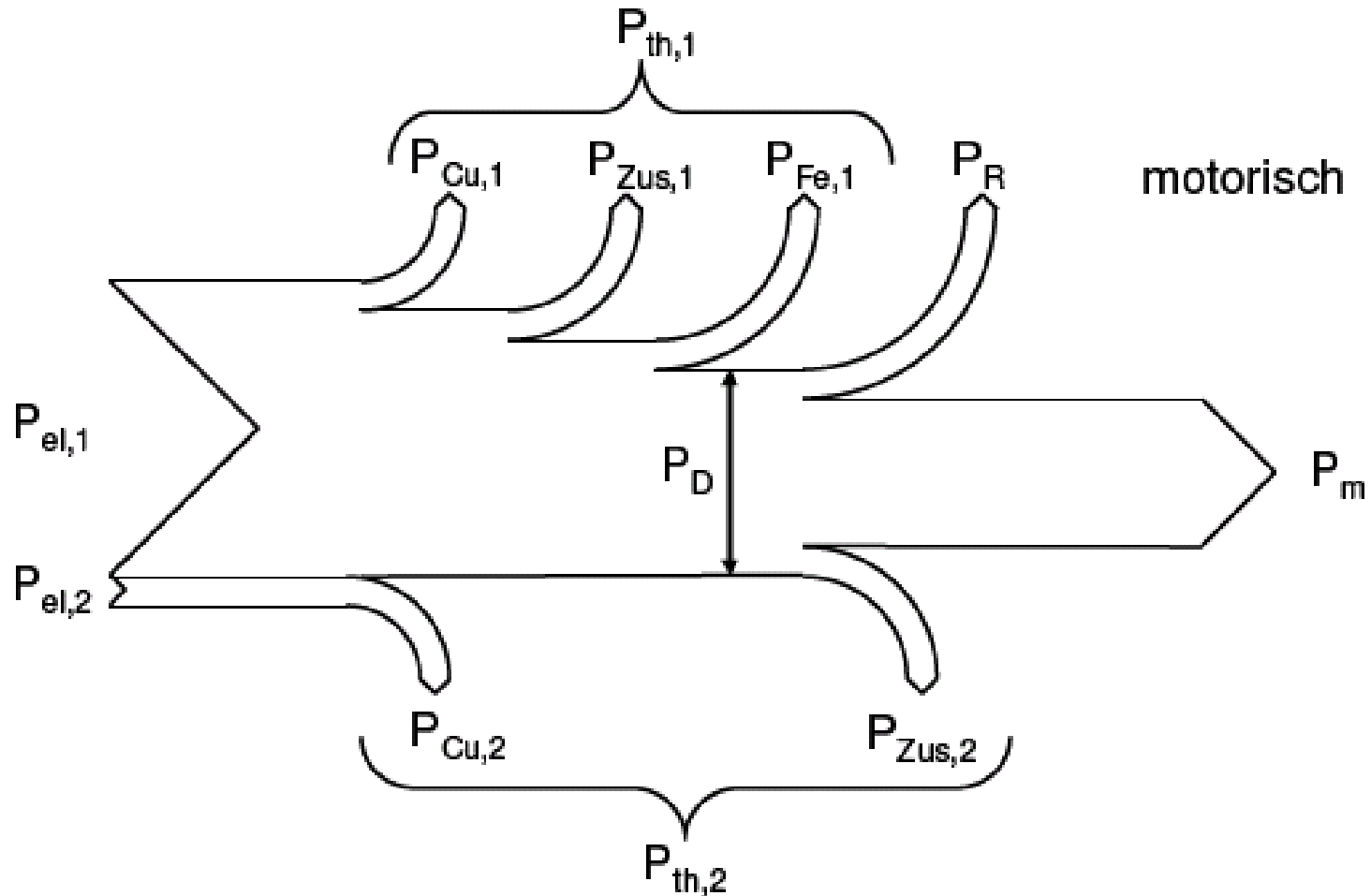
- Luftspaltdrehmoment
- Magnetischen Flüssen (d, q)
- Flussdichte (in Statorzähnen/-joch)

↪ **Anpassung** an unterschiedliche Drehmomentenanforderungen und Leistungselektroniken durch Variation von

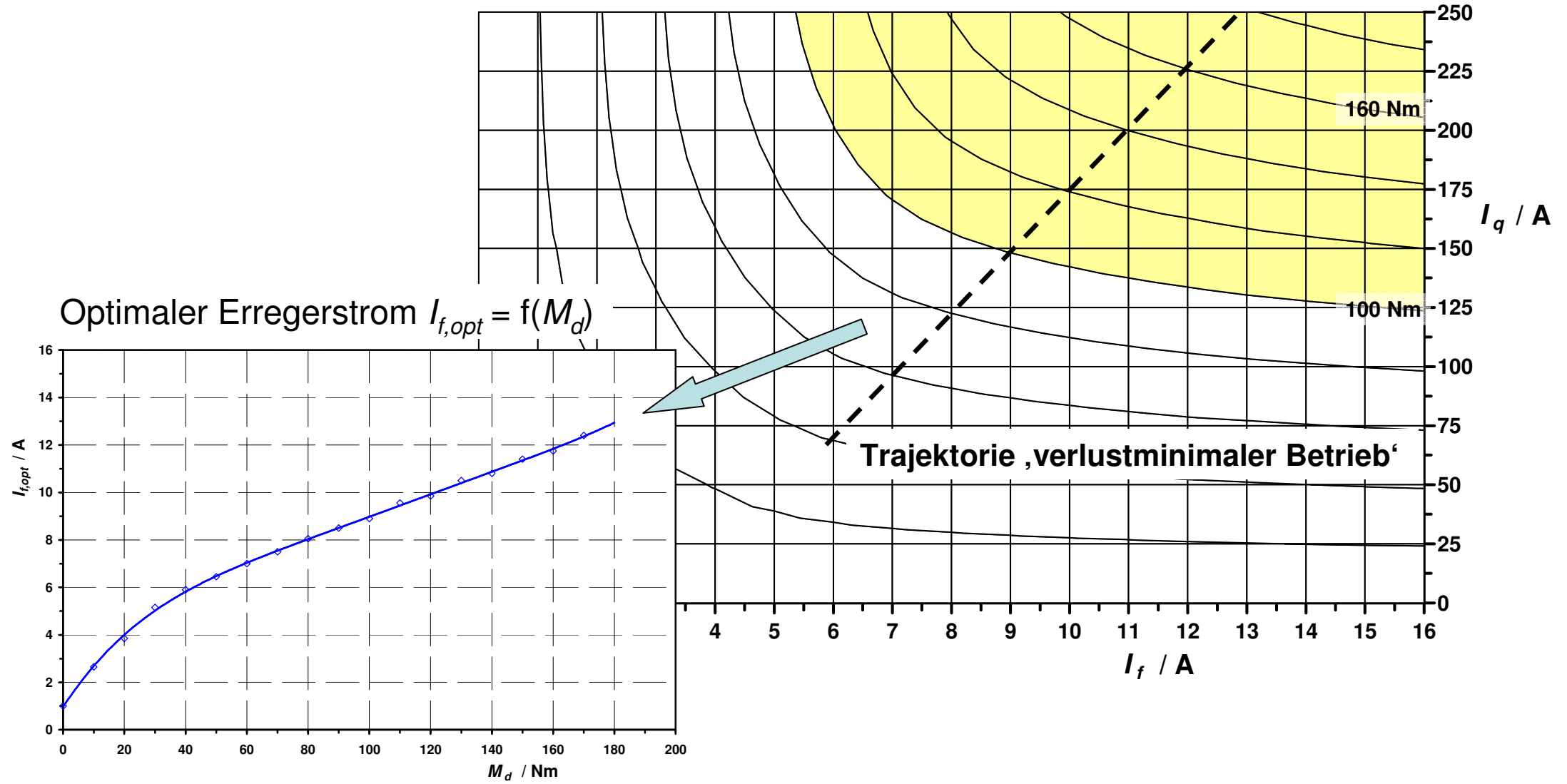
- Eisenlänge l_{fe}
- Effektive Statorwindungszahl w_1

↪ **Ermittlung** der Motor-Kennlinien (drehzahlabhängig) unter Berücksichtigung sämtlicher Verlustanteile

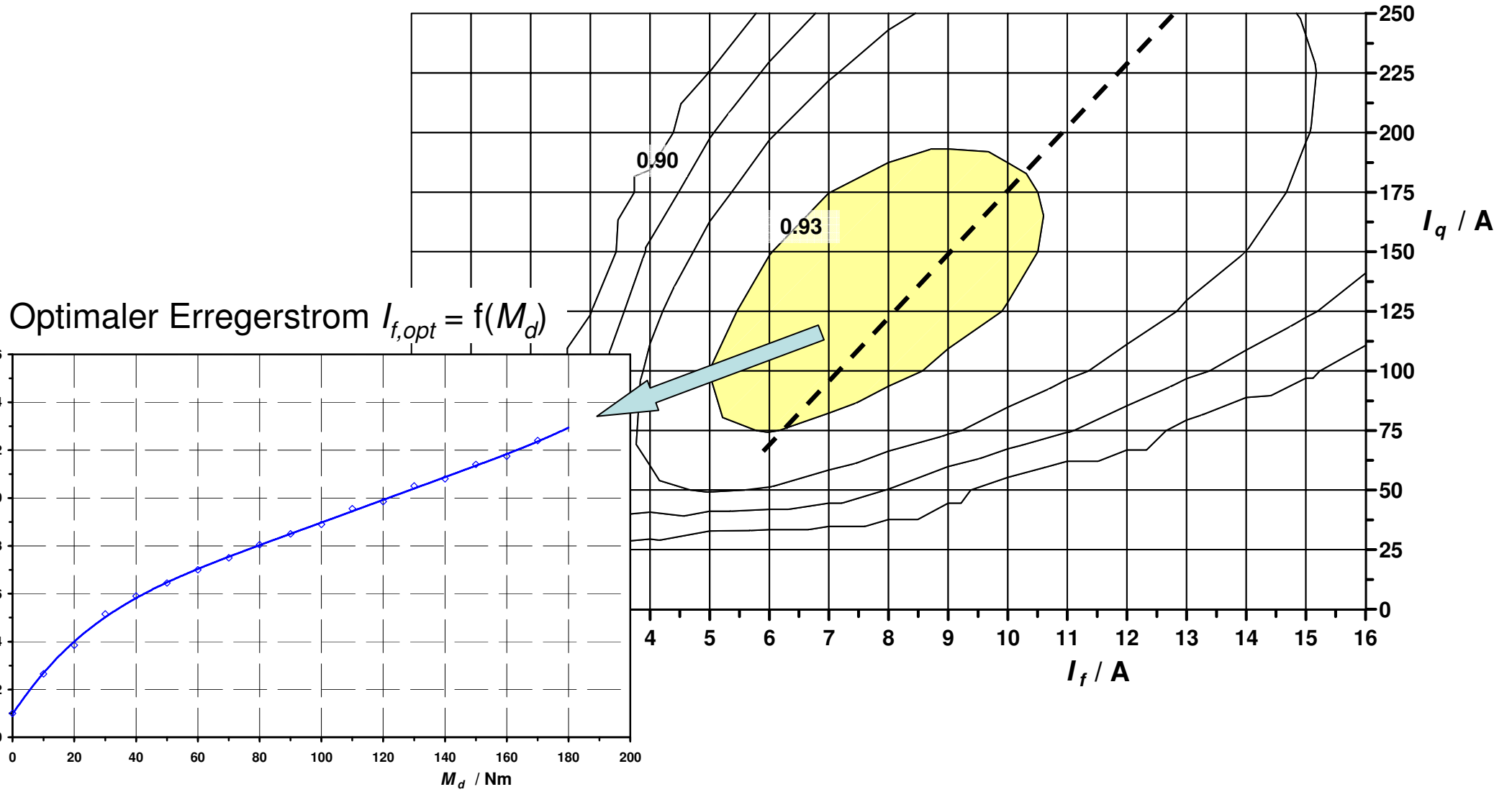
Einzelverluste der Synchronmaschine



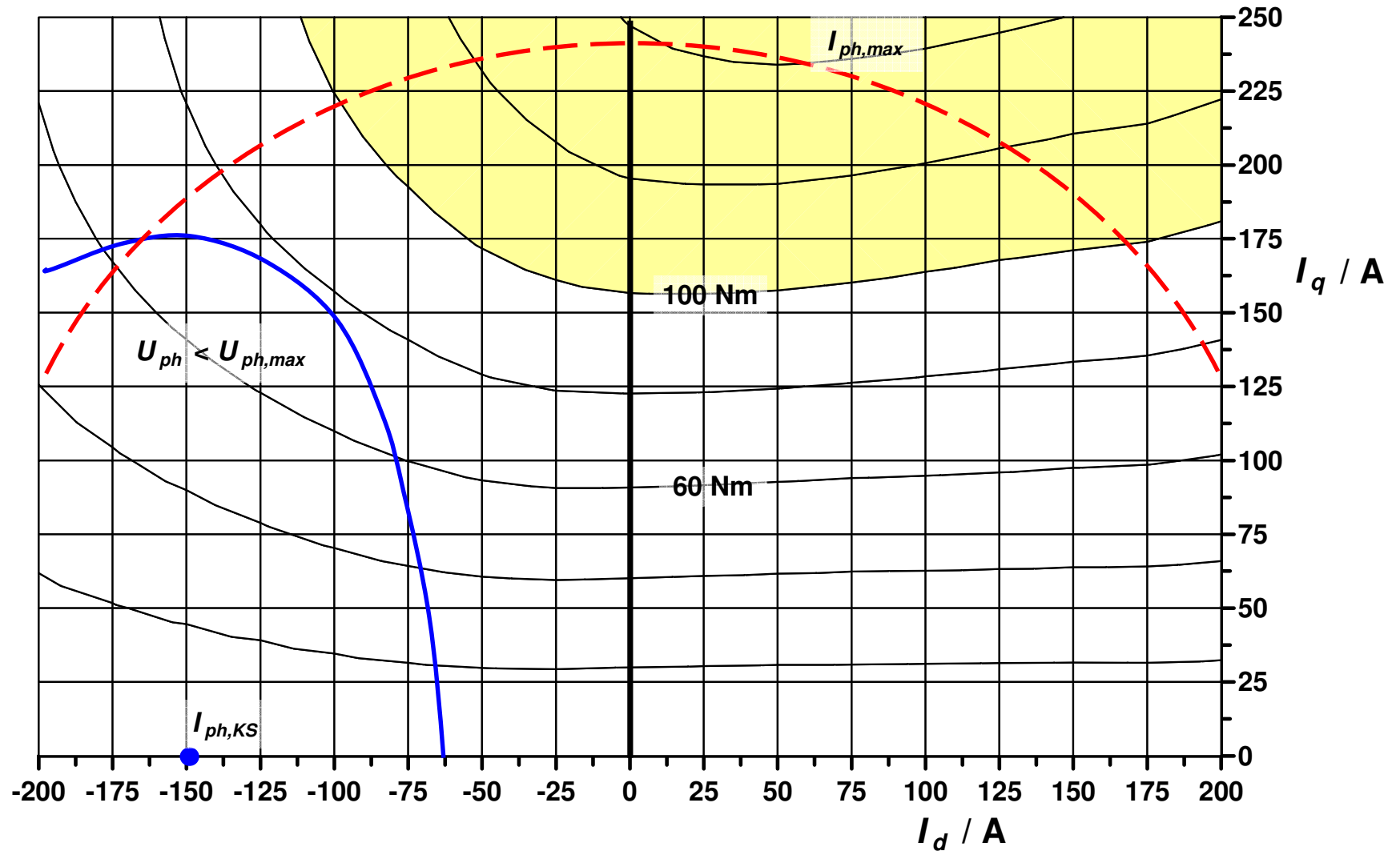
SM Kennfeld ‚Drehmoment‘ / verlustminimaler Betrieb (reiner q-Strom-Betrieb)



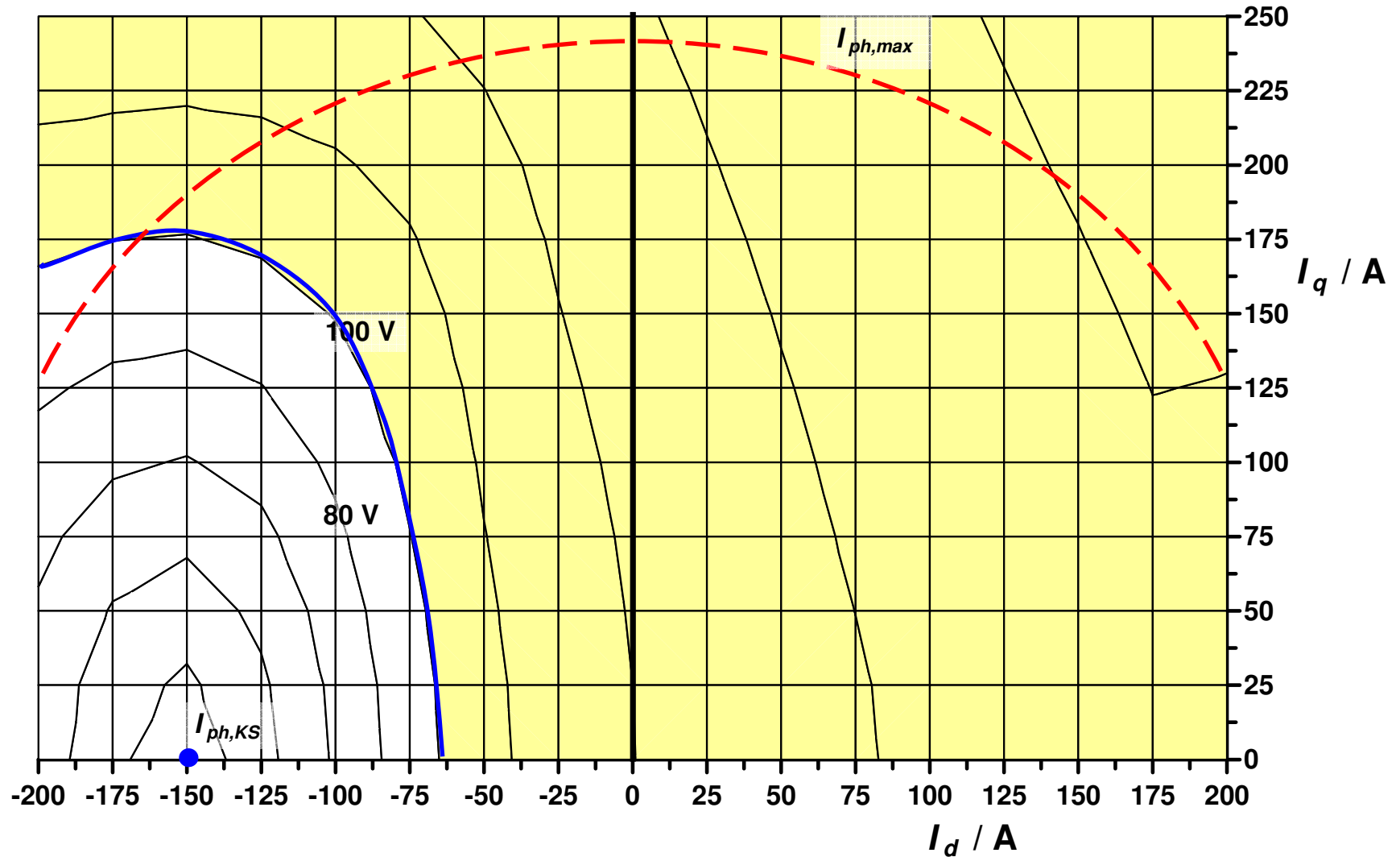
SM Kennfeld ‚Systemwirkungsgrad‘ / verlustminimaler Betrieb (reiner q-Strom-Betrieb, $n = 3315$ 1/min)



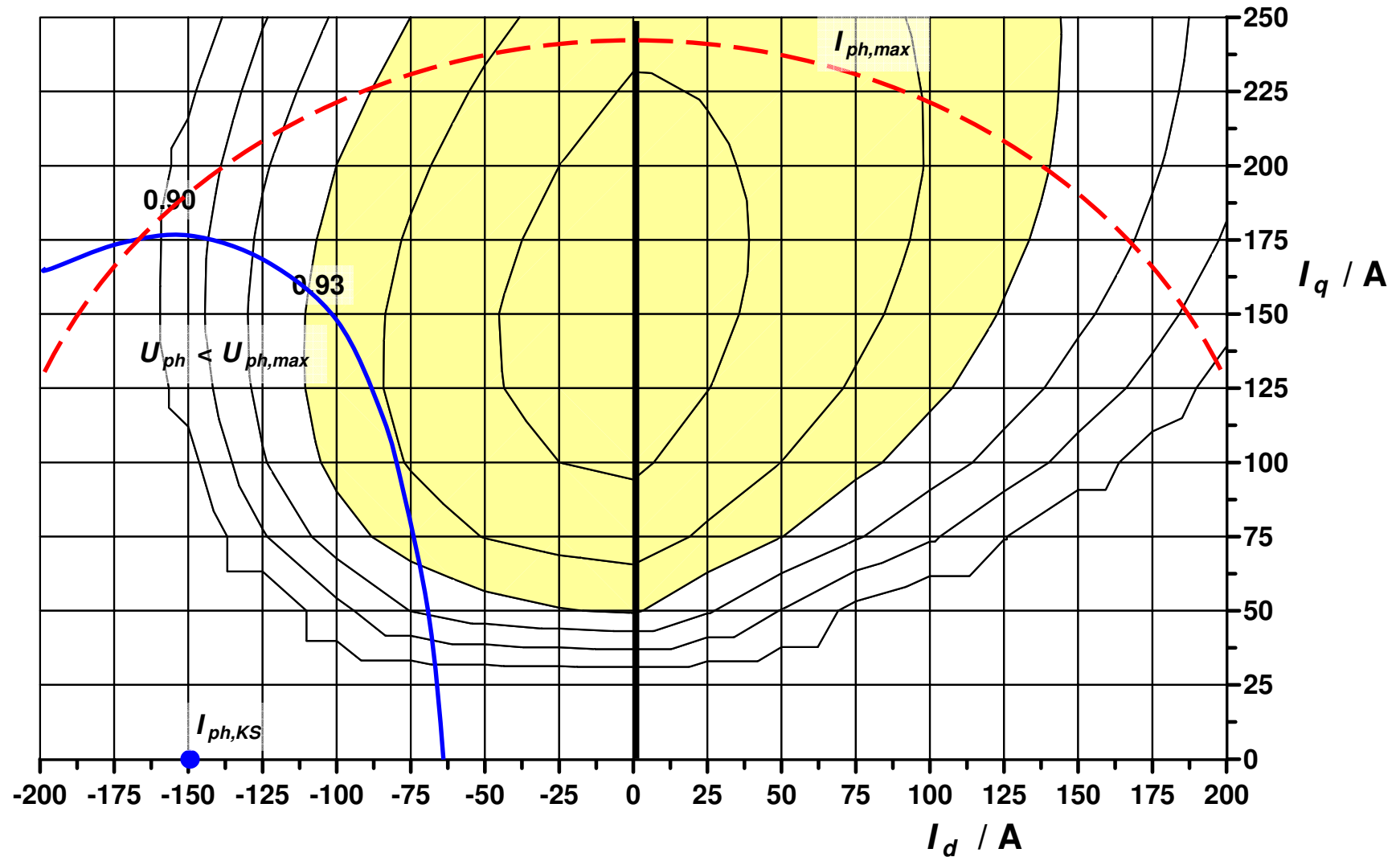
SM Kennfeld ‚Drehmoment‘ / Spannungs-/Stromgrenzen (d-q-Strom-Betrieb, $I_f = 8A$, $n = 6000$ 1/min)



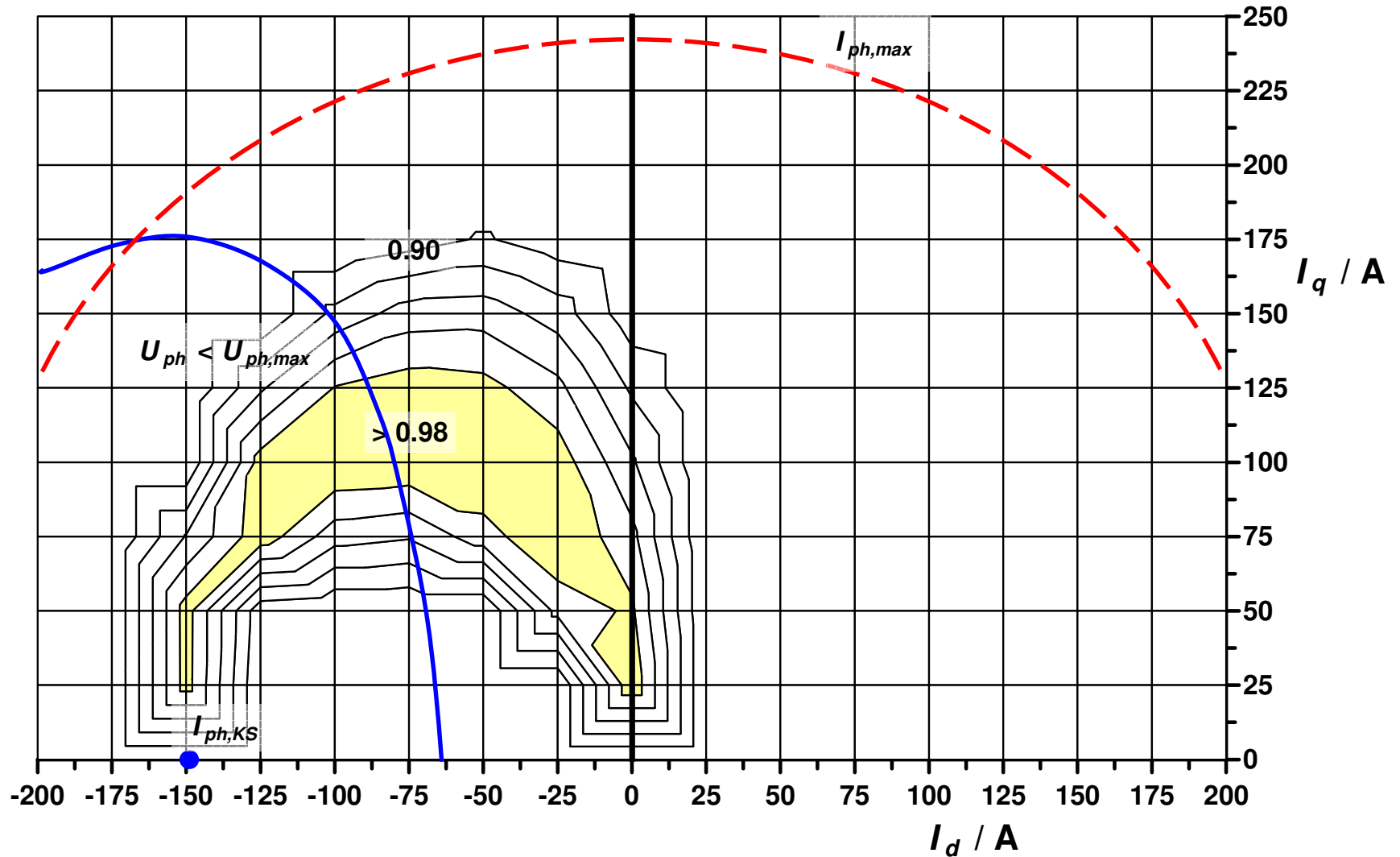
SM Kennfeld ‚Strangspannung‘ / Spannungs-/Stromgrenzen (d-q-Strom-Betrieb, $I_f = 8A$, $n = 6000$ 1/min)



SM Kennfeld ‚Systemwirkungsgrad‘ / Spannungs-/Stromgrenz. (d-q-Strom-Betrieb, $I_f = 8A$, $n = 6000$ 1/min)

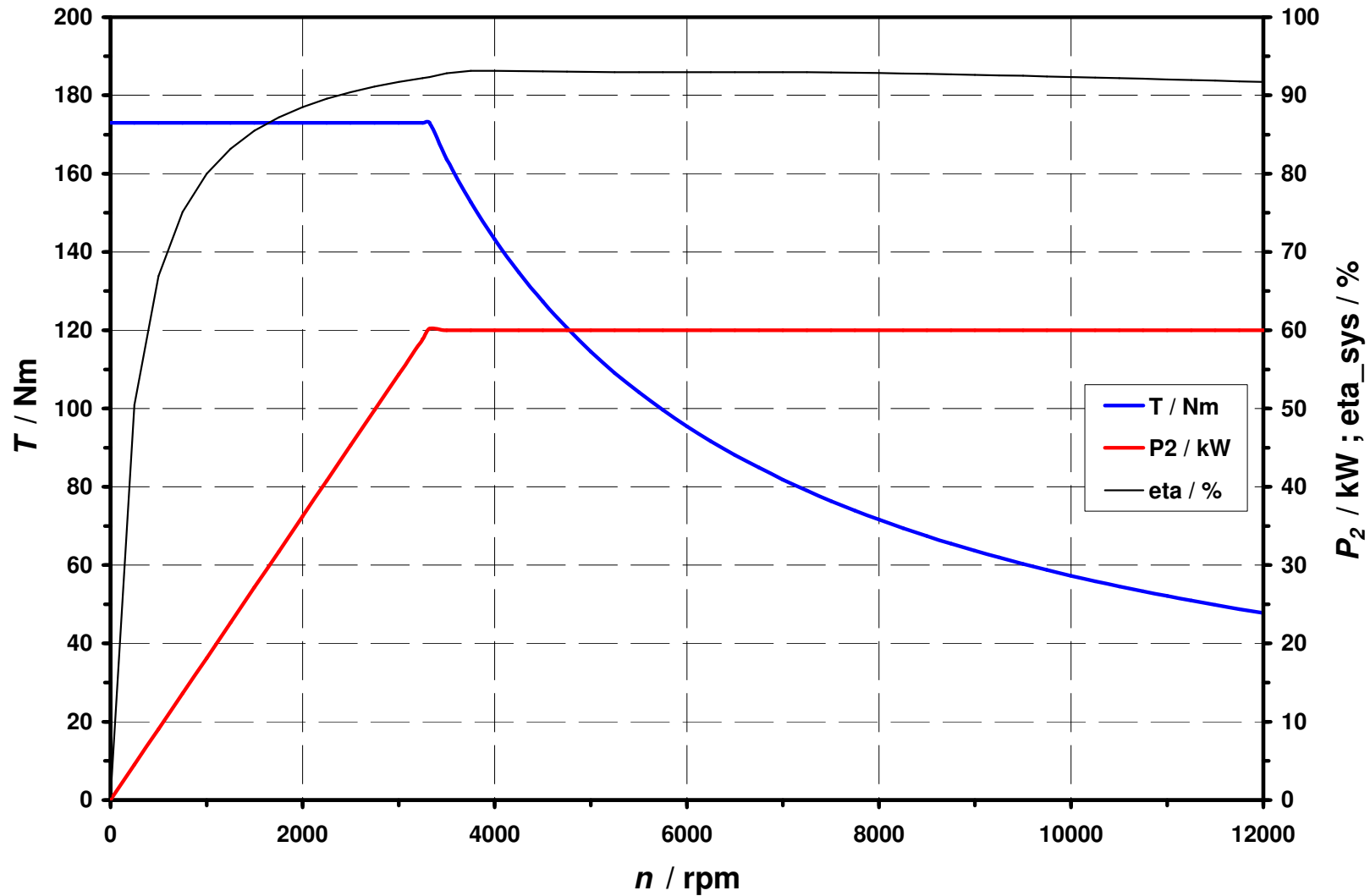


SM Kennfeld ‚Leistungsfaktor‘ / Spannungs-/Stromgrenzen (d-q-Strom-Betrieb, $I_f = 8A$, $n = 6000$ 1/min)

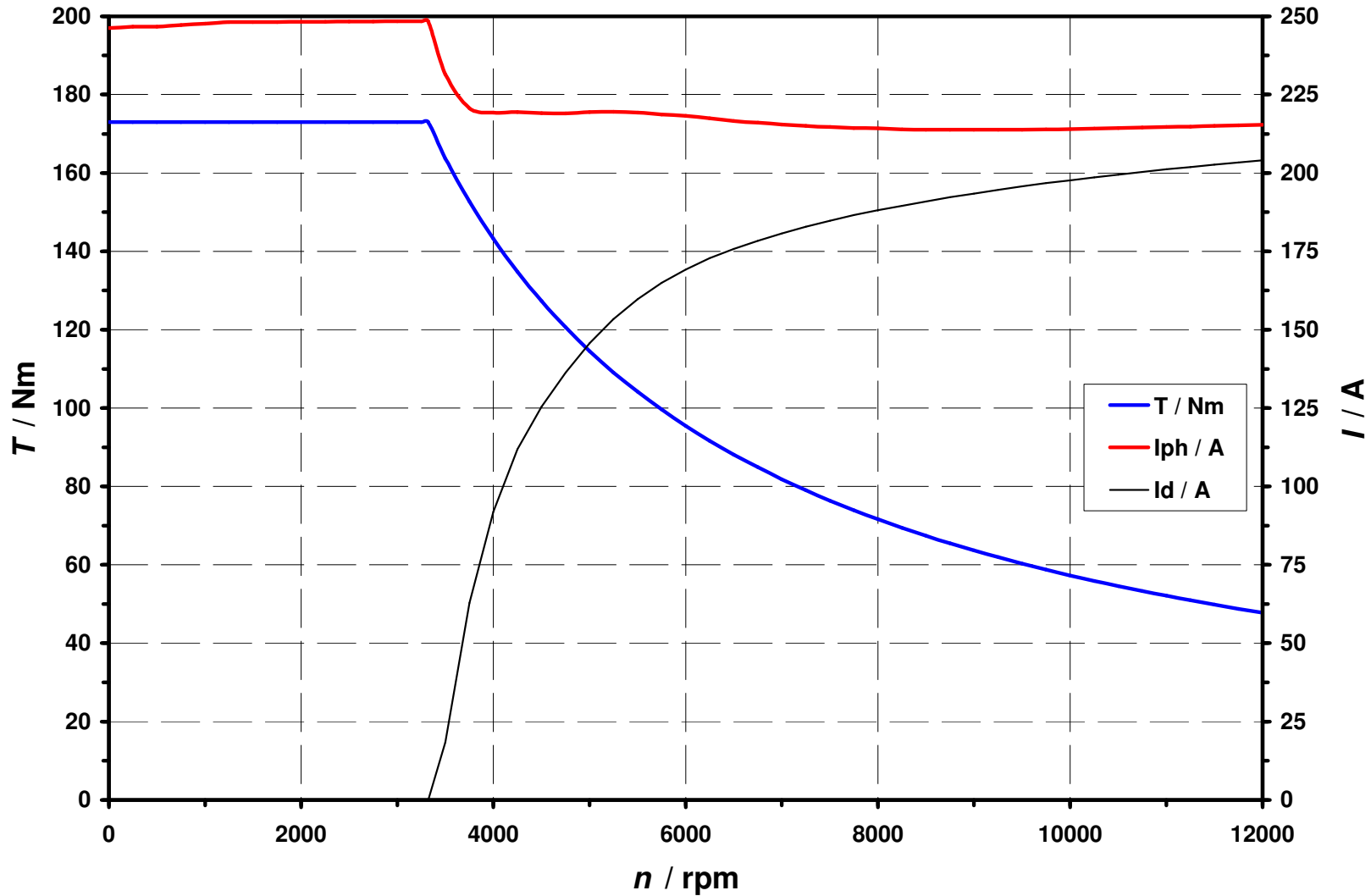


Motorkennlinien ($U_{DC} = 240V$; $I_{ph,max} = \sim 240A$; $\vartheta_{mot} = 140^{\circ}C$):

Drehmoment / mech. Leistung / Systemwirkungsgrad



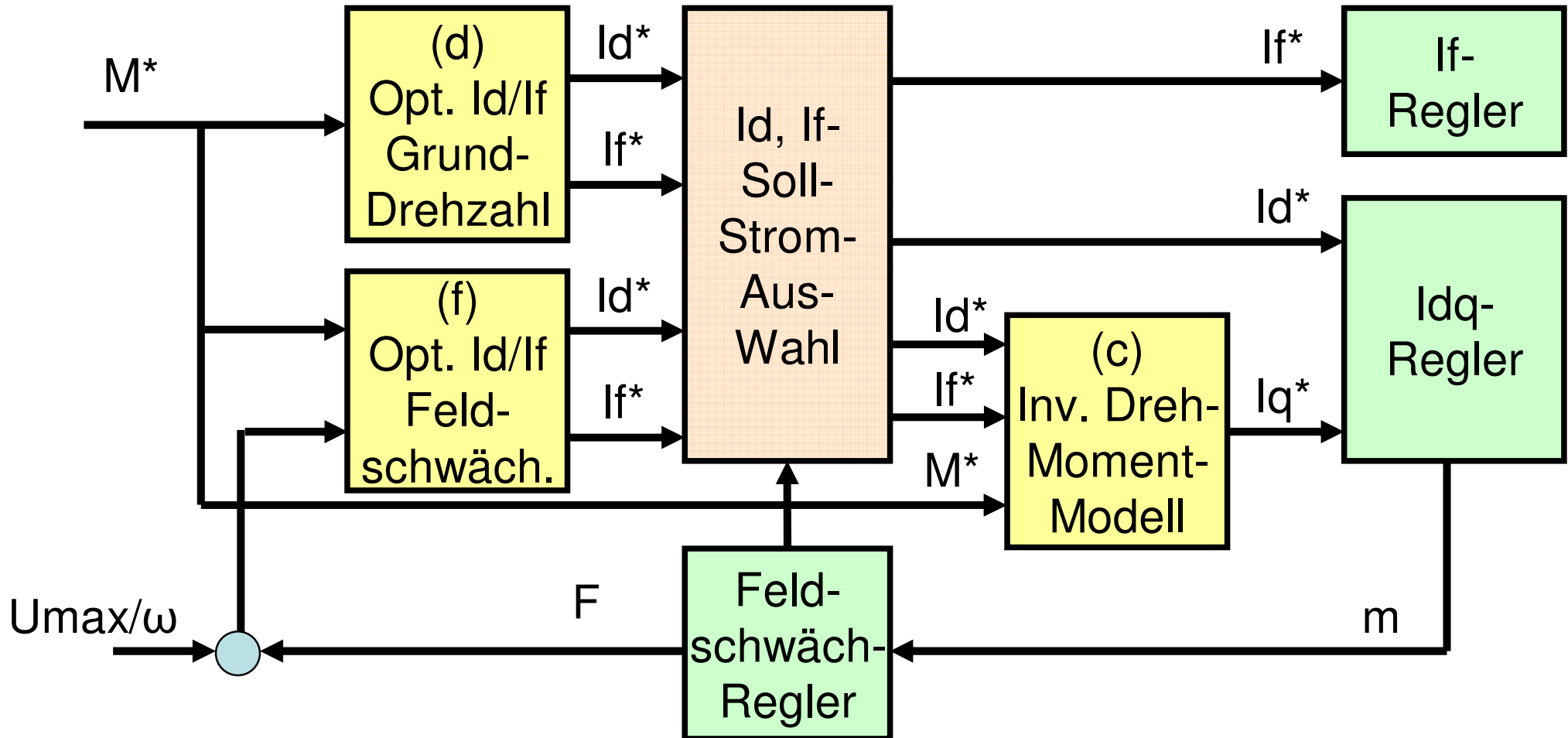
Motorkennlinien ($U_{DC} = 240V$; $I_{ph,max} = \sim 240A$; $\vartheta_{mot} = 140^\circ C$): Drehmoment / Ströme I_{ph} - und I_d



Motorregelung

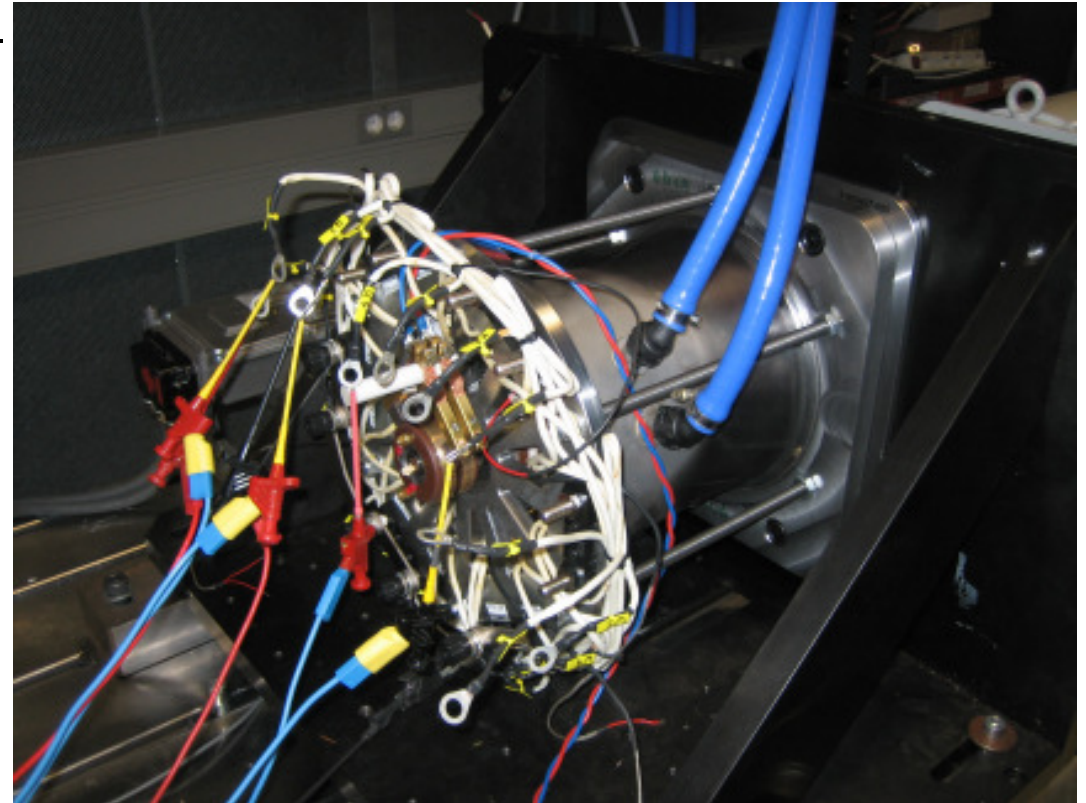
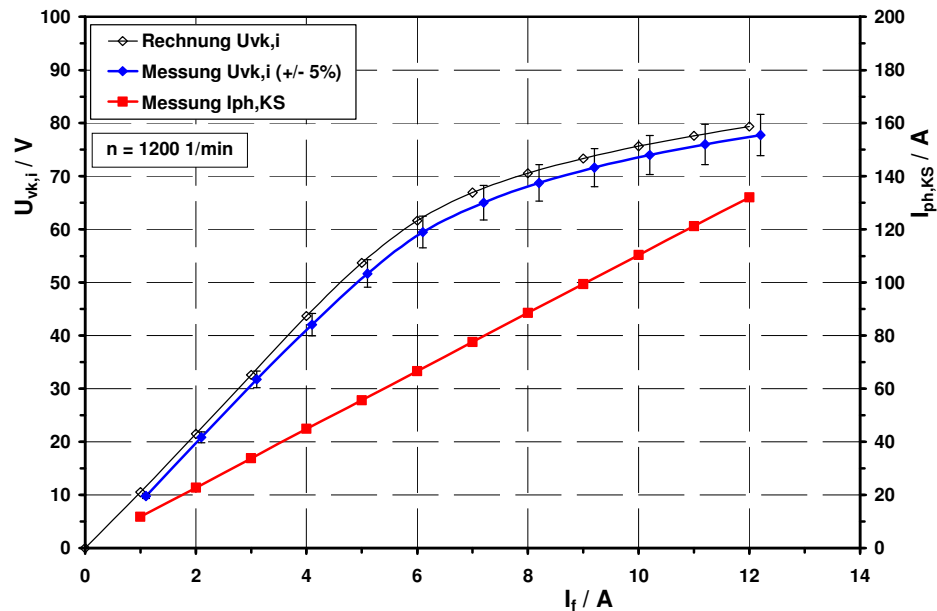
- **Stromsollwertbestimmung aus Drehmomentenvorgabe**
 - Ziel: verlustminimale Wahl der Stromsollwerte I_f , I_d , I_q
 - Im Grunddrehzahlbereich:
 - Analytische Optimierung für lineare Maschine
 - Numerische Off-Line-Optimierung für reale Maschine
 - Im Feldschwächbereich:
 - Randbedingung: Einhalten der Statorspannungsgleichung
 - Feldschwächung durch I_f und I_d
 - Numerische Off-Line-Optimierung der optimalen Stromaufteilung
- **Stromregelung**
 - Einsatz von Standard-Stromregelungsverfahren für Drehfeldmaschinen

Funktionsblöcke der Motorregelung



Prototypmotor auf dem Prüfstand

- Prototypmotor mit umschaltbarer Statorwicklung
- Betrieb an einem Standard-IGBT-PWR
- Erregerstromspeisung über Netzteil
- Stromgeregelter Betrieb



- ↪ Passive Messungen (LL / KS)
- ↪ Betriebspunktmessungen
- ↪ Erwärmungsläufe

Betriebspunktmessungen: **Auswertungen (1)**

(q-Strom-Betrieb, $I_f = 12A$, $n = 600$ 1/min)

Statortemperatur		ϑ_{stat}	°C	50	50	50	50	50	50
Rotortemperatur		ϑ_{rot}	°C	59	59	59	59	59	59
Längsstrom		I_d	A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Querstrom		I_q	A	53,7	71,6	89,5	107,4	125,2	143,0
Strangstrom (Kontrolle)		I_{ph}	A	53,7	71,6	89,5	107,4	125,2	143,0
Zwischenkreisspannung	DC	U_{DC}	V	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
Zwischenkreisstrom	DC	I_{DC}	A	19,3	26,4	33,4	40,2	46,6	53,4
Zwischenkreisleistung	DC	P_{DC}	kW	3,86	5,29	6,67	8,05	9,32	10,68
Ständerfrequenz	GS	$f_{s,1}$	Hz	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Strangspannung	GS	$U_{ph,1}$	V	23,5	23,9	24,3	24,9	25,2	25,6
	rms	$U_{ph,g}$	V	46,7	47,2	47,7	48,3	48,7	49,1
	OS	$U_{ph,o}$	V	40,4	40,7	41,0	41,4	41,7	41,9
induzierte Spannung	GS	$U_{ph,i,1}$	V	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
Strangstrom	GS	$I_{ph,1}$	A	53,7	71,6	89,5	107,4	125,2	143,0
	rms	$I_{ph,g}$	A	54,1	72,0	89,8	107,7	125,6	143,5
	OS	$I_{ph,o}$	A	6,5	7,2	7,7	7,1	9,8	11,4
Leistungsfaktor	GS	$\cos\varphi$	-	0,991	0,981	0,968	0,950	0,935	0,914
	ges.	λ	-	0,500	0,499	0,496	0,492	0,486	0,478
Blindleistung	kap.: -1			1	1	1	1	1	1
Eingangsleistung	GS	P_1	kW	3,75	5,04	6,33	7,61	8,86	10,05
	ges.	$P_{1,g}$	kW	3,80	5,09	6,38	7,67	8,92	10,52
	OS	$P_{1,o}$	kW	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,47
Drehzahl		n	rpm	600,3	600,0	600,3	600,0	600,0	600,0
Drehmoment		M_d	Nm	55,0	73,4	90,7	108,0	123,8	138,5
Mechanische Leistung		P_2	kW	3,46	4,61	5,70	6,79	7,78	8,70
Erregerspannung	DC	U_f	V	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
Erregerstrom	DC	I_f	A	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
Erregerleistung	DC	P_f	kW	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

Tabellarische Auswertung:

- **Plausibilitätsüberprüfung**
- **Wirkungsgradermittlung**
- **Einzelverlustermittlung (insbes. Zusatzverluste)**
- **Motorinduktivitäten**
- **Zeigerdiagramme**
- **Optimale Betriebspunkte**

Betriebspunktmessungen: Auswertungen (2)

(q-Strom-Betrieb, $I_f = 12A$, $n = 600$ 1/min)

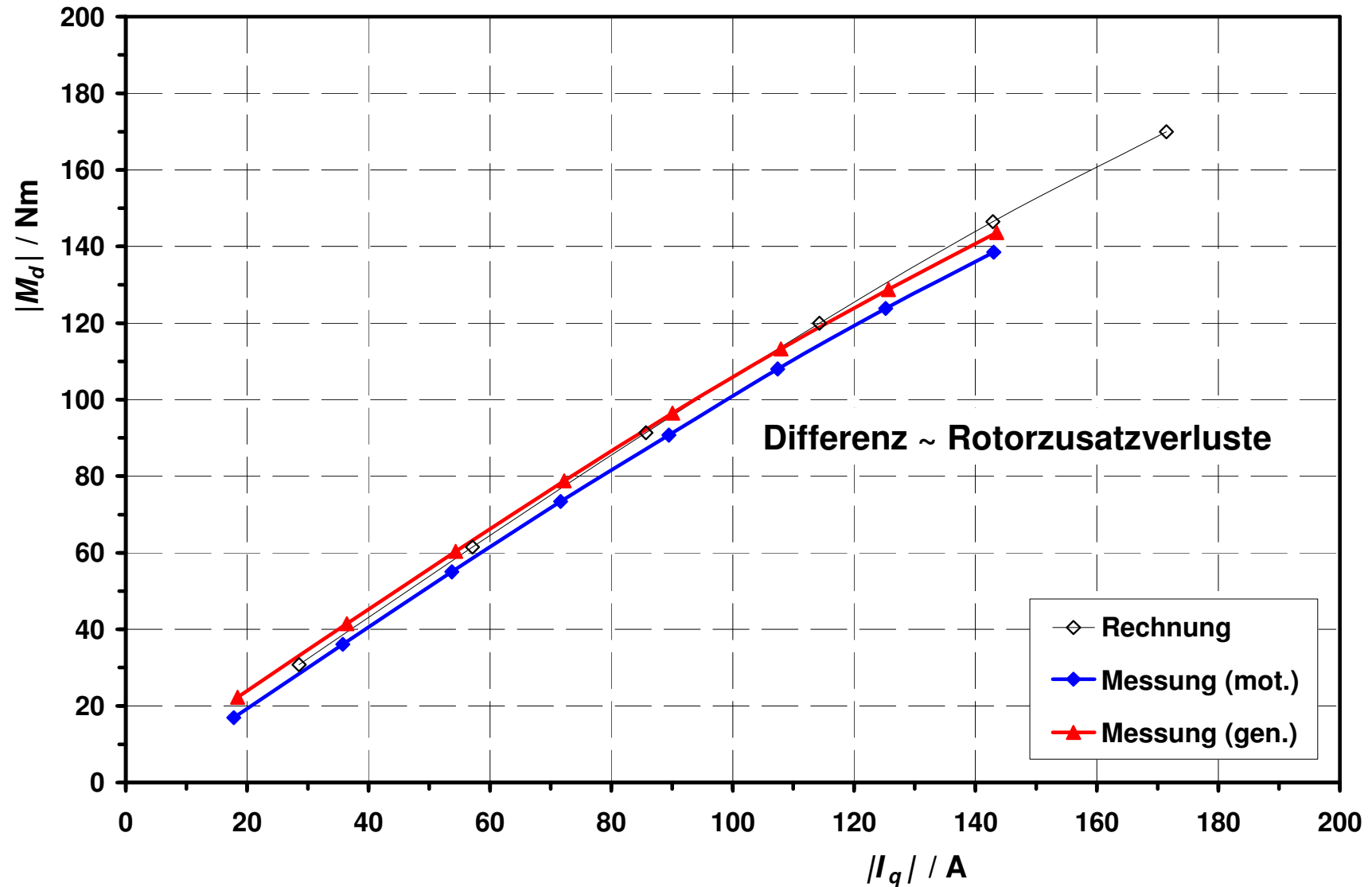
Induktivitäten									
Vorsteuerwinkel		β	°	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Phasenwinkel		φ	°	7,9	11,2	14,5	18,2	20,7	24,0
Polradwinkel		δ	°	-7,9	-11,1	-14,4	-18,2	-20,7	-24,0
Längsspannung		U_d	V	-3,2	-4,6	-6,1	-7,8	-8,9	-10,4
Querspannung		U_q	V	23,3	23,4	23,6	23,6	23,6	23,4
Strangspannung		U_{ph}	V	23,5	23,9	24,3	24,9	25,2	25,6
induzierte Spannung		$U_{ph,i,1}$	V	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
Spannungsabfall d		$I_d \times R_1$	V	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Spannungsabfall q		$I_q \times R_1$	V	1,0	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
		$U_d - I_d R_1$	V	-3,2	-4,6	-6,1	-7,8	-8,9	-10,4
		$U_q - I_q R_1$	V	22,3	22,2	21,9	21,7	21,3	20,8
Längsinduktivität		L_d	μH						
Querinduktivität		L_q	μH	238,6	256,7	269,9	288,3	283,7	289,9
verketteter Rotorfluss		Ψ_f	mVs	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7
verketteter Längsfluss		$\Psi_{s,d}$	mVs	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7	90,7
verketteter Querfluss		$\Psi_{s,q}$	mVs	12,8	18,4	24,2	31,0	35,5	41,5
Kontrolle Drehmoment									
Luftspaltmoment 1		$M_{d,1}$	Nm	57	76	94	111	127	142
Luftspaltmoment 2		$M_{d,2}$	Nm	57	76	94	112	129	144
Abweichung			%	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3
Differenz Wellenmoment			Nm	-2,2	-2,4	-3,0	-3,2	-3,6	-3,7

Tabellarische Auswertung:

- Plausibilitätsüberprüfung
- Wirkungsgradermittlung
- Einzelverlustermittlung (insbes. Zusatzverluste)
- Motorinduktivitäten
- Zeigerdiagramme
- Optimale Betriebspunkte

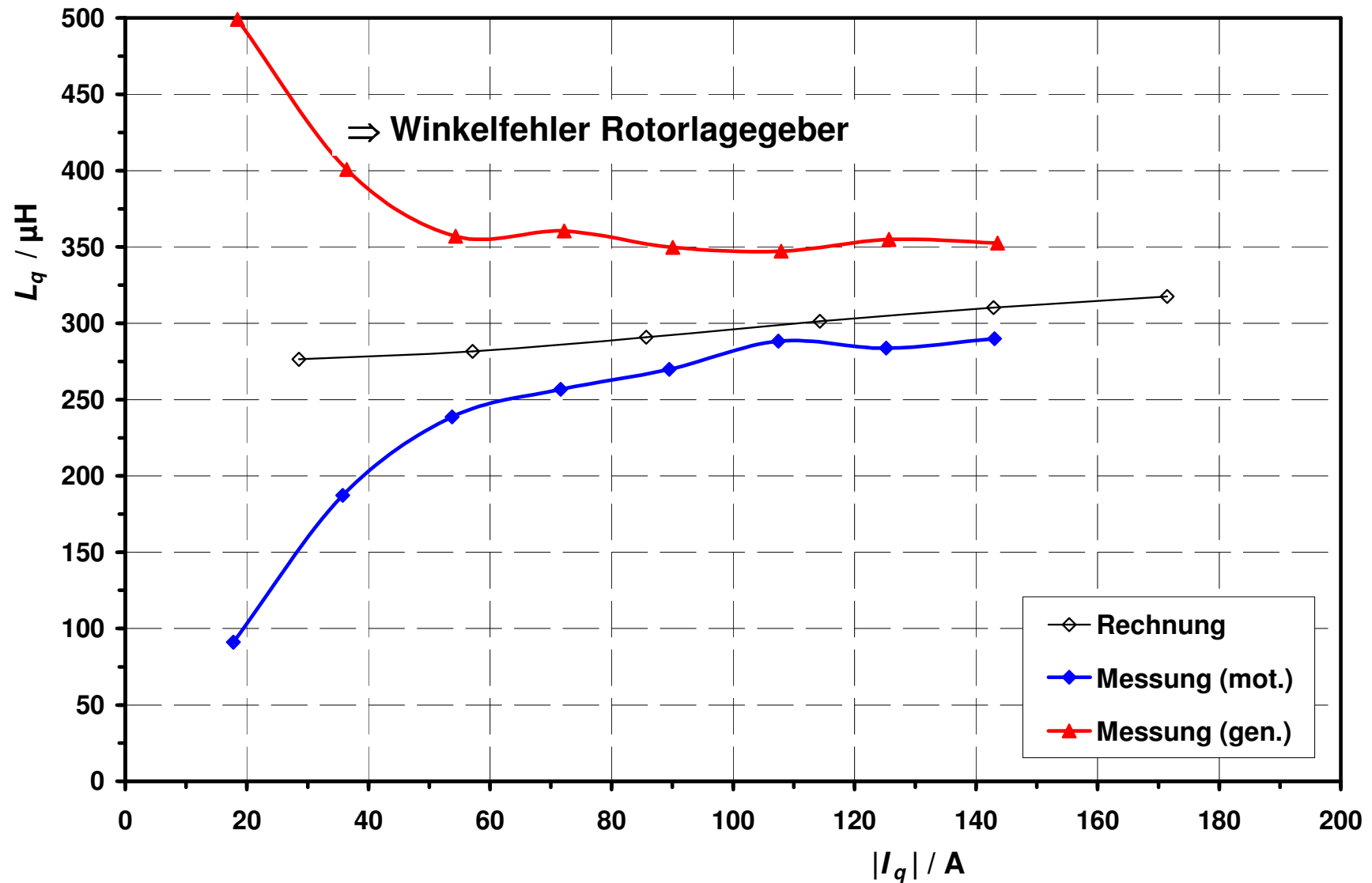
Betriebspunktmessungen: Drehmoment (mot./gen.)

(q-Strom-Betrieb, $I_f = 12A$, $n = 600$ 1/min)



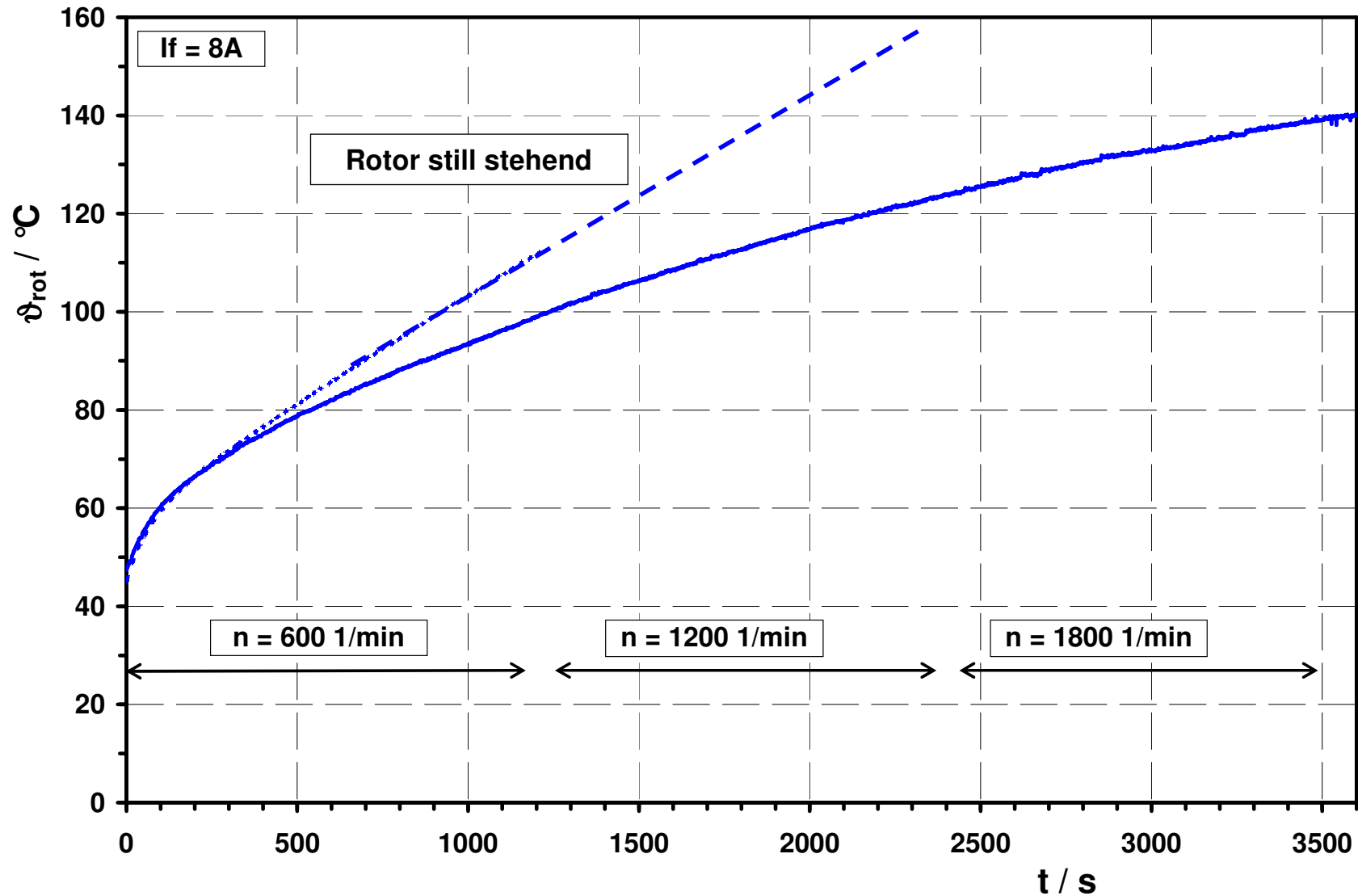
Betriebspunktmessungen: Induktivität L_q (mot./gen.)

(q-Strom-Betrieb, $I_f = 12A$, $n = 600$ 1/min)



Thermische Messungen: **Rotorerwärmung**

($I_f = 8A$; still stehend, $n = 600, 1200$ und 1800 1/min)



Zusammenfassung / Ausblick

- ↪ Fremderregte Synchronmaschine können als Achshybridantriebe zum Einsatz kommen aufgrund geringer Beschränkungen bezüglich der axialen Baulänge
- ↪ **Sehr gute Performance und Wirkungsgrade** (Systemwirkungsgrade bis zu 93%) in allen Betriebsbereichen
- ↪ Abschaltbarkeit des Motors wichtig für die Erreichbarkeit **höchster Sicherheitsstufen**
- ↪ Erhöhter technischer Aufwand (Schleifringssystem, Rotorbandagierung, Speisung der Erregerwicklung) **kostenmäßig vertretbar**
- ↪ Weiterentwicklung: **Integration von Motor und Getriebe** (Einsparung von Bauraum und Kosten)