

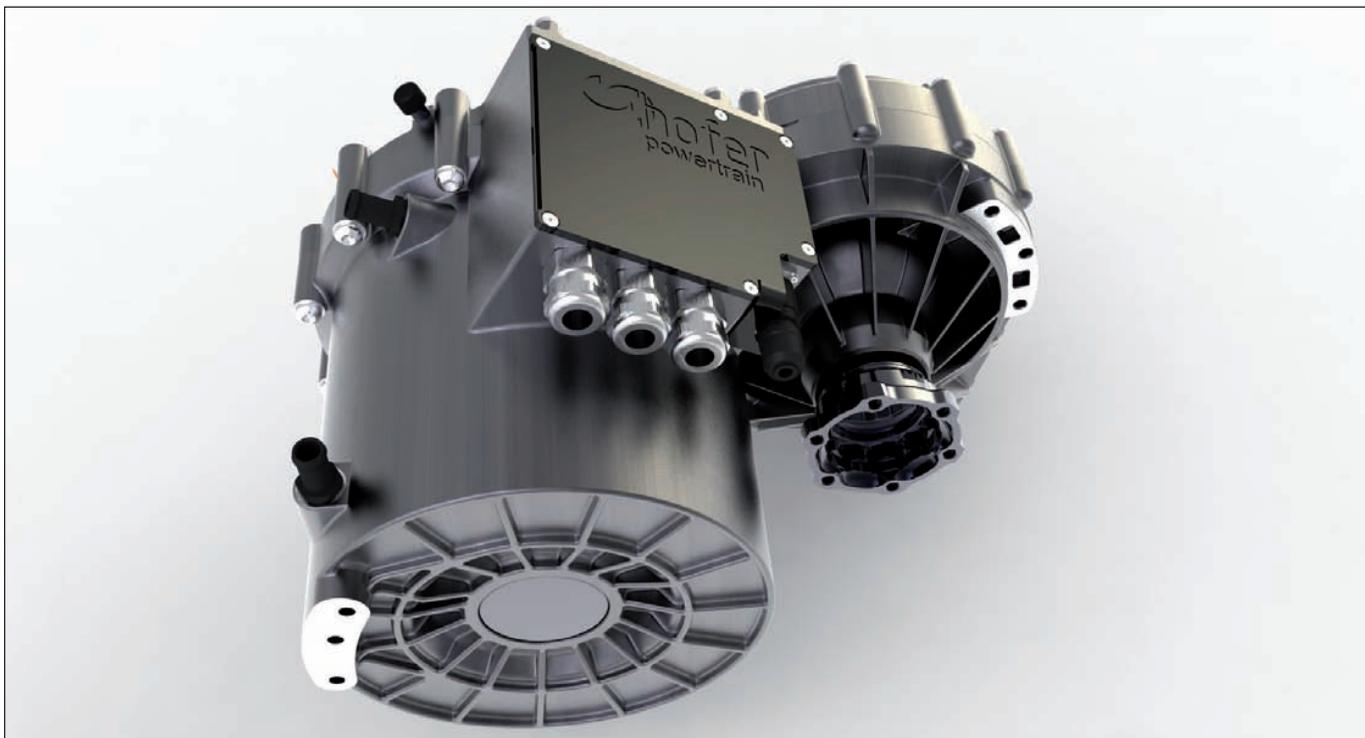
HAUS DER TECHNIK

Außeninstitut der RWTH Aachen
Kooperationspartner der Universitäten Duisburg-Essen
Münster - Bonn - Braunschweig

Tagung

Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

29. - 30. November 2011 in München



Leitung:

Dr.-Ing. Heinz Schäfer, hofer eds GmbH, Würzburg

Veranstaltungsort:

Hotel Maritim München, Goethestr. 7, 80336 München

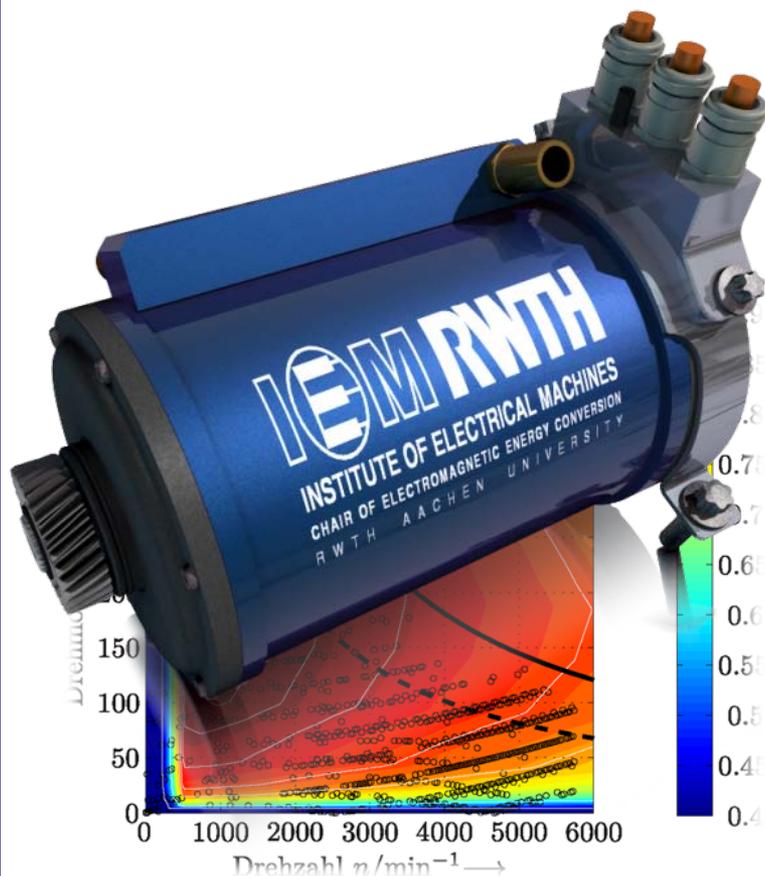
Mit Beiträgen von:

AFT GmbH, APL GmbH, AUDI AG, AVL Software and Functions GmbH, Duale Hochschule Baden-Württemberg, FEV Motorentechnik GmbH, FHS Würzburg Schweinfurt, Fraunhofer Institut für Integrierte System- und Bauelementetechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, hofer pdc/eds GmbH, Hochschule Aschaffenburg, IAV Chemnitz, MBtech Group GmbH & Co. KGaA, P3 automotive GmbH, Robert Bosch GmbH, RWTH Aachen, Siemens AG, TU Berlin, TU Braunschweig, TU Chemnitz, TÜV Süd Automotive GmbH, Validas AG



Fahrzyklusgerechte Auslegung von Traktionsantrieben für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

30.11.2011



Dipl.-Ing. Matthias Felden

Dipl.-Ing. Thomas Finken

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer



Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick



Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick



E-Mobilität, um 1900

Elektro-Droschke



*Lohner-Porsche -
Elektromobil*



E-Mobilität heute

Toyota Prius



Tesla Roadster





- CO₂-Reduktion – Beeinflusst durch nationalen Strommix
- Bei rein elektrischem Antrieb lokal emissionsfreies Fahren
- Senkung der Belastung durch Feinstaub, Lärm und Schadstoffen in urbanen Ballungsräumen
- Diversifizierung der eingesetzten Primärenergieträger
- Nutzung der Batterie als Energiezwischenspeicher - Vorteilhaft bei Stromnetzintegration der erneuerbaren und fluktuierenden Energien





Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick



Allgemeine Anforderungen

Hauptanforderungen an die elektrische Maschine:

- ein hoher Wirkungsgrad in einem großen Drehzahl- und Drehmoment-Bereich
- eine hohe Überlastfähigkeit
- geringer Bauraum und Gewicht
- hohe Zuverlässigkeit bei geringen Kosten

Fahrzeuggerechte Anforderung

Um den Bedarf an Energie / Kraftstoff („Verbrauch“) zu minimieren:

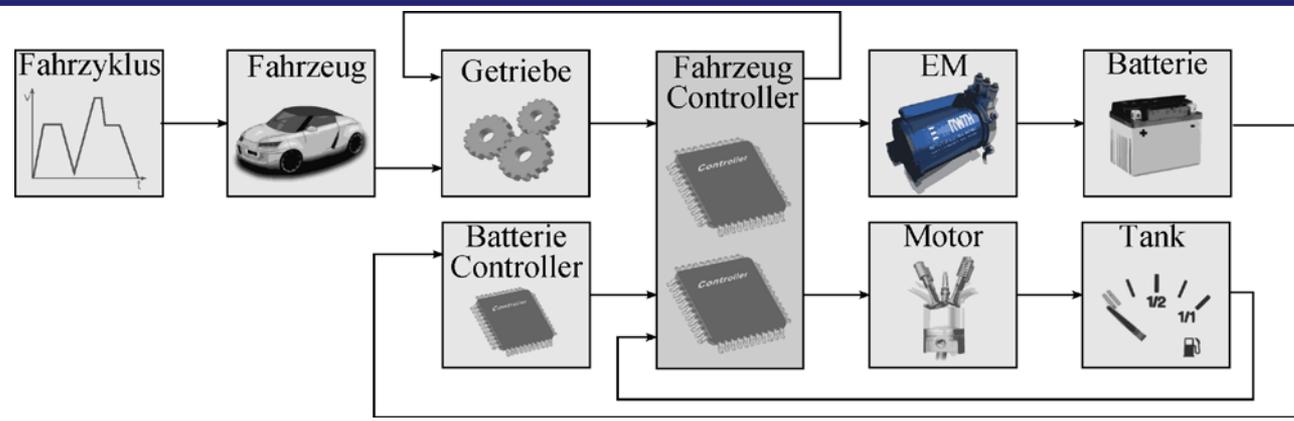
- muss die elektrische Maschine individuell für ein bestimmtes Fahrzeug und dessen Verwendungszweck ausgelegt werden
- der Gesamtwirkungsgrad muss im Bereich der häufigsten Betriebspunkte optimiert werden

Fragestellung

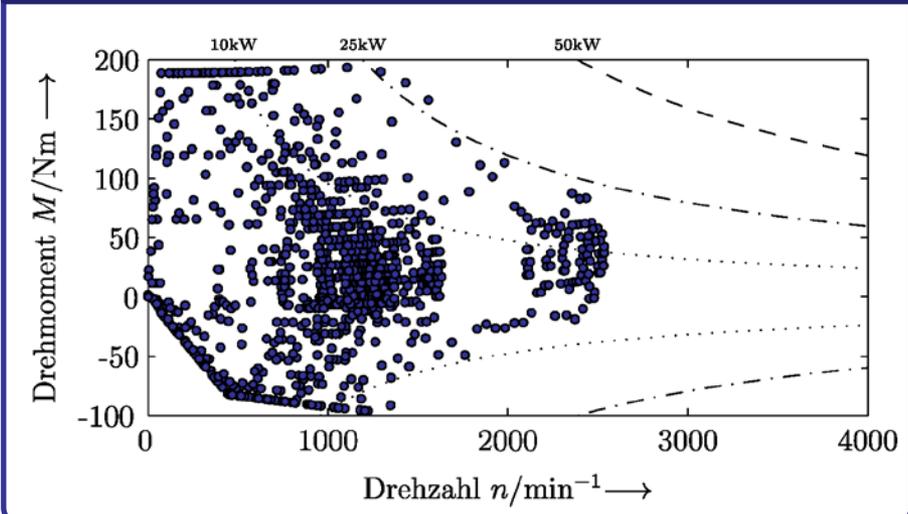
➔ Was sind die zu erwartenden Betriebspunkte?



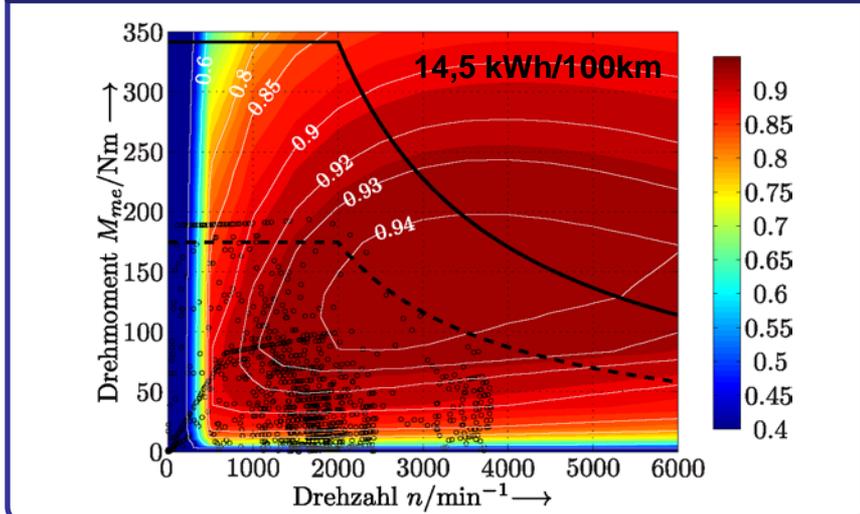
Fahrzeugsimulation



Betriebspunktverteilung der EM



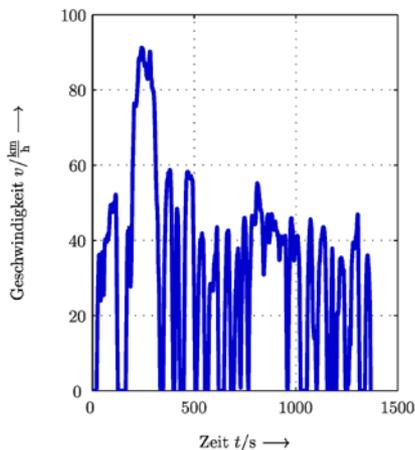
Energiebedarf der EM



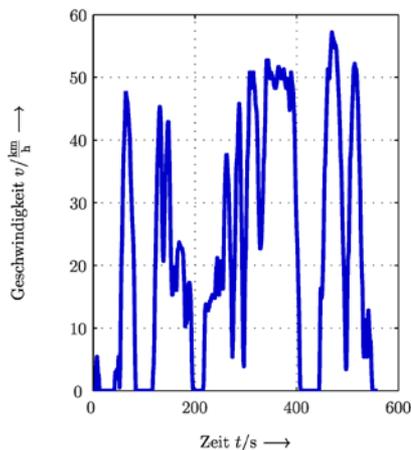


Stadtfahrten

EPA Urban (UDDS)

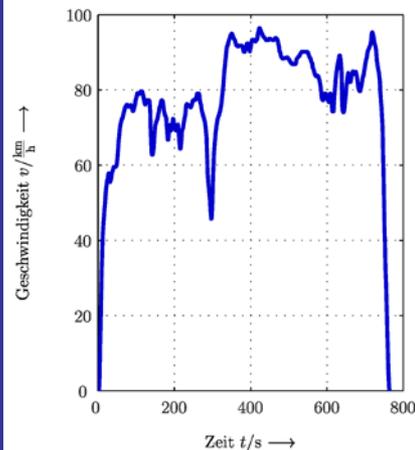


Hyzem Urban



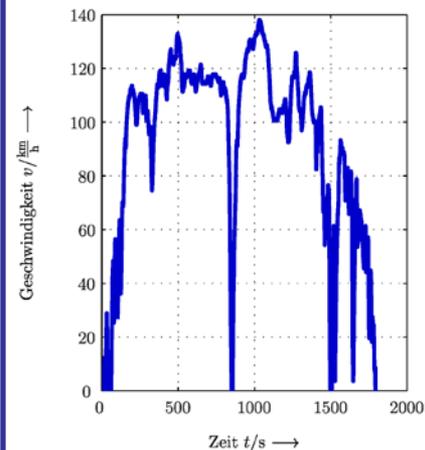
Überlandfahrt

EPA Highway (HWFET)

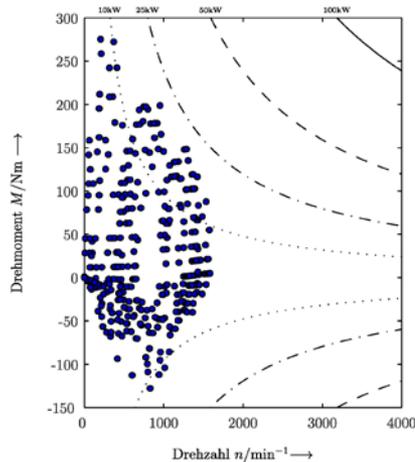
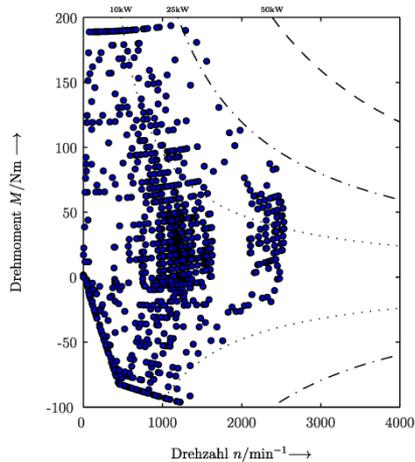


Autobahnfahrt

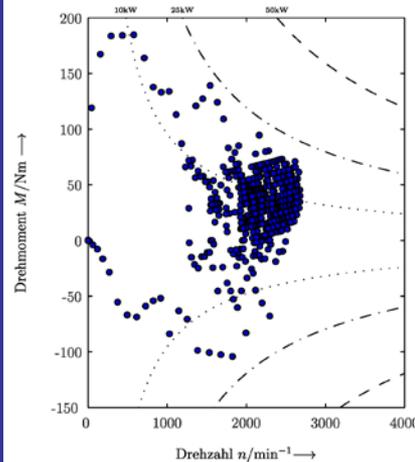
Hyzem Motorway



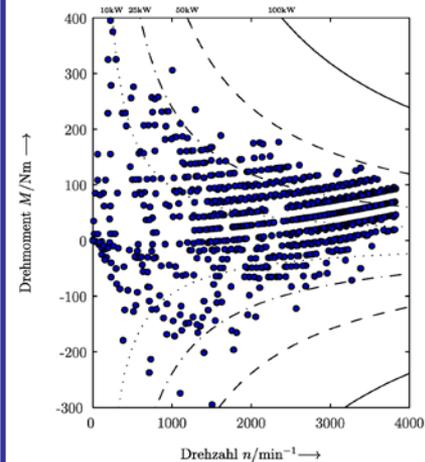
Stadtfahrten, Betriebspunktverteilung, EV

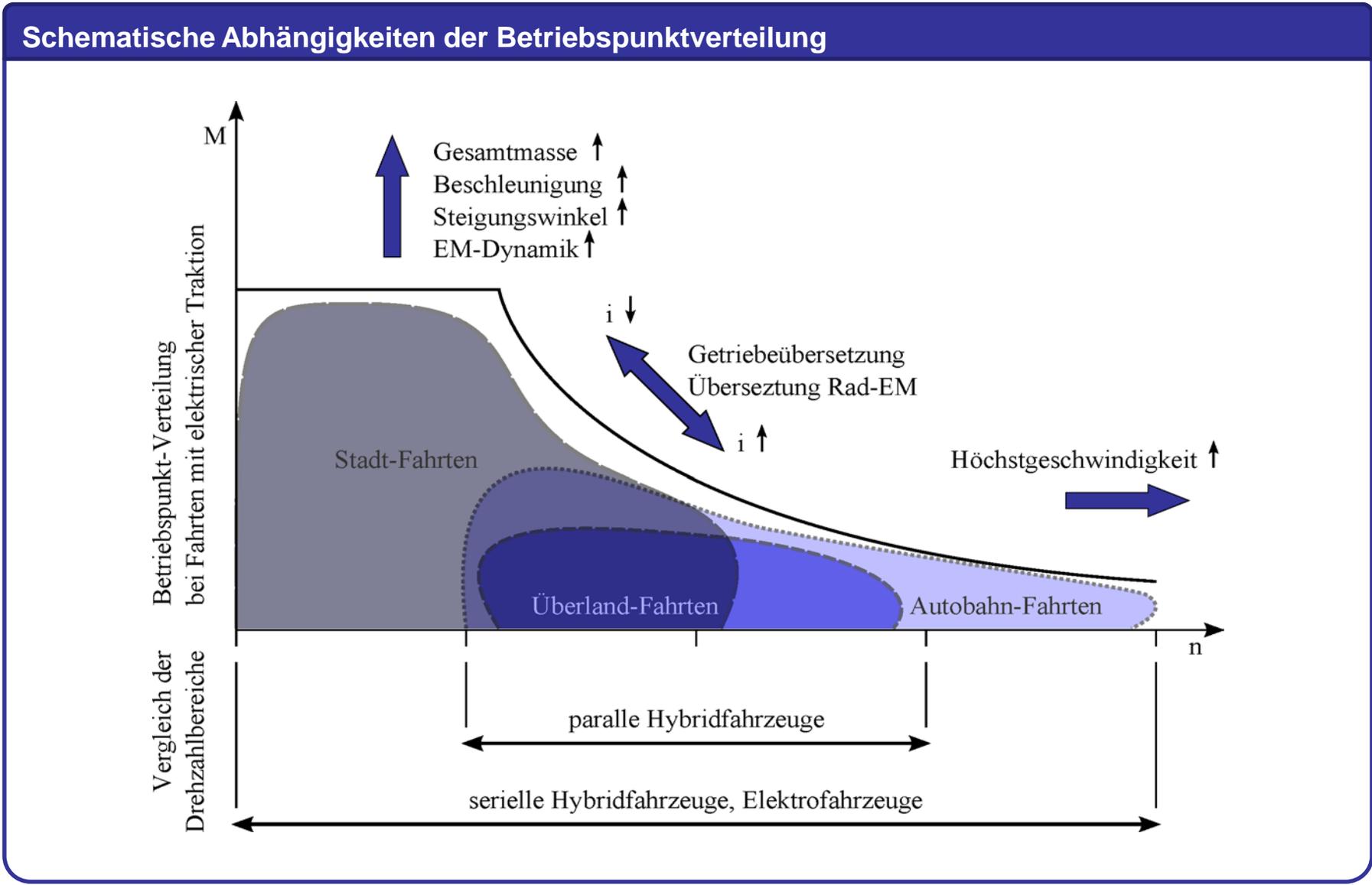


Überland, Verteilung



Autobahn, Verteilung







Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

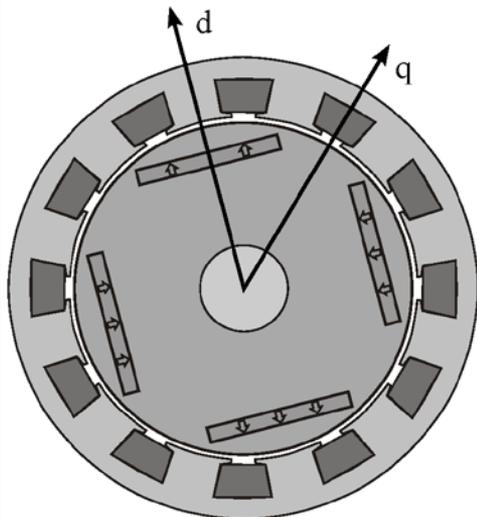
Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick



Drehmoment der PMSM (Grundwellengleichung)

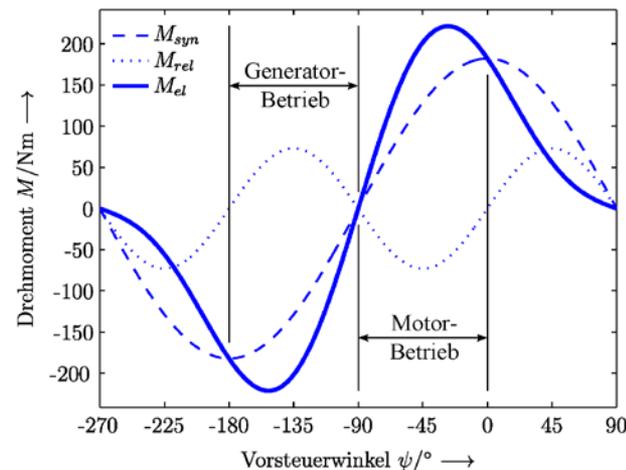


$$M_{el} = \frac{3p}{\omega_{el}} \cdot [U_p - I_d \cdot (X_q - X_d)] \cdot I_q$$

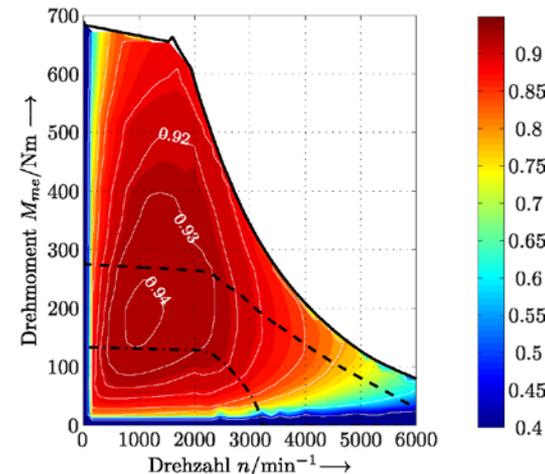
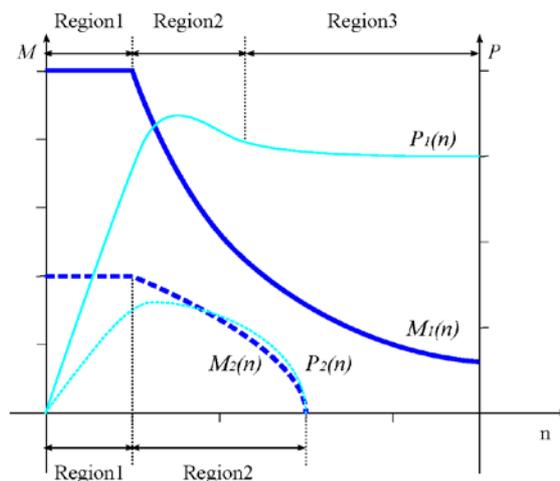
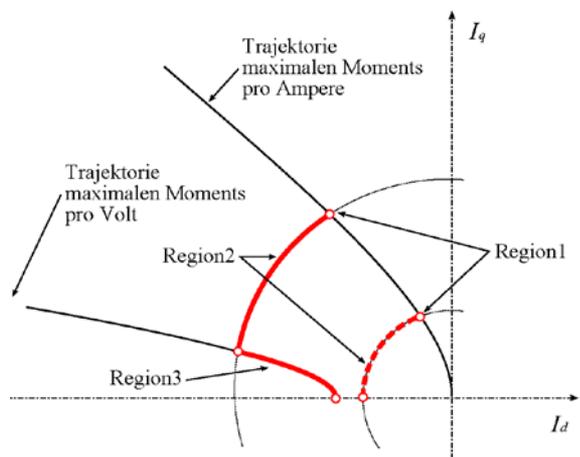
$$= \underbrace{\frac{3p}{\omega_{el}} \cdot U_p I_q}_{M_{syn}} - \underbrace{\frac{3p}{\omega_{el}} \cdot I_q I_d \cdot (X_q - X_d)}_{M_{rel}}$$

$$I_q = I \cos \psi$$

$$I_d = I \sin \psi$$



Regelstrategie der PMSM





Bisherige Arbeiten

- Oftmals Untersuchung und Optimierung isolierter Aspekte wie z.B.:
 - Leistungsabgabe
 - Drehmomentwelligkeit
 - einzelne Verlustmechanismen

Ziel dieses Beitrags

Für alle zu untersuchenden

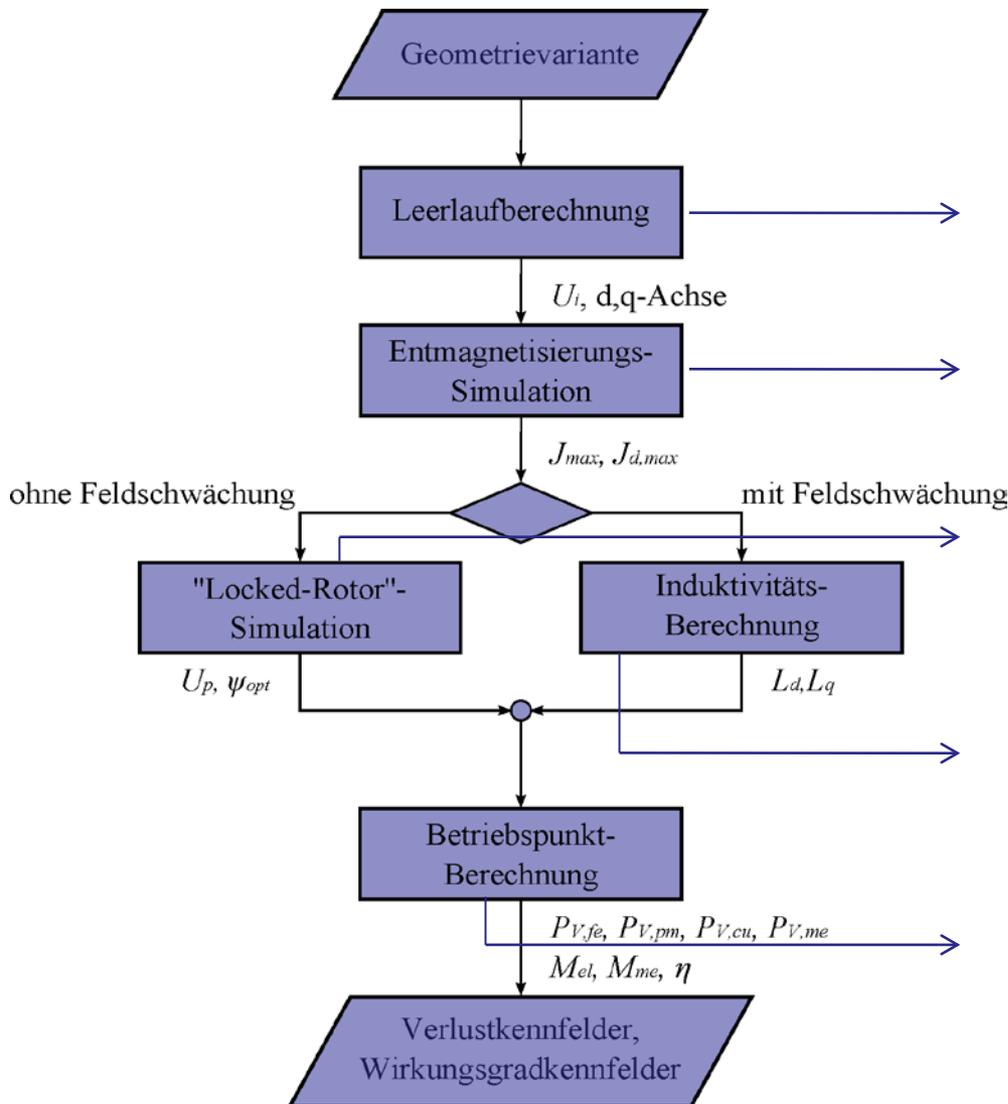
- Bauformen
- Freiheitsgrade
- Optimierungsmaßnahmen

sollen die Auswirkungen und Effekte ermittelt werden

- Drehmoment- und Leistungsdaten, Feldschwächbarkeit
- parasitäre Effekte (Drehmomentwelligkeit, Verluste)
- Wirkungsgradkennfelder, Verlauf, Verschiebung der besten Wirkungsgrade
- Energiebedarf in HEV und EV



Automatisierte Berechnungskette zur Erzeugung des Wirkungsgradkennfeldes



- *FE-Paket: iMOOSE*
- *induzierte Spannung*
- *Lage der d,q-Achsen*
- *maximaler Laststrom*
- *optimaler Vorsteuerwinkel, Polradspannung*
- *Induktivitäten (abhängig von Strom und Vorsteuerwinkel)*
- *Verluste und Wirkungsgrad*
- *Drehmomentwelligkeit*



Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

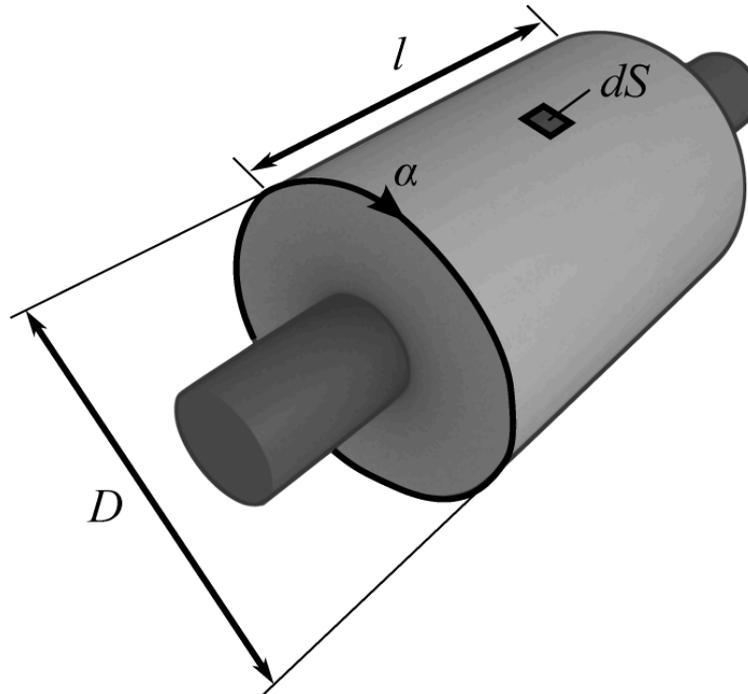
- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick

Analytische Grobauslegung



$$F_{\alpha} = \oint_S B_n H_t dS = \frac{lD}{2} \int_0^{2\pi} B_n H_t d\alpha$$

$$\sigma = \frac{F_{\alpha}}{\pi D l} = \frac{M}{\frac{D}{2} \cdot \pi D l} = M \frac{2}{\pi D^2 l}$$

$$D = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{P_n \cdot 2p}{n_n \cdot \sigma \cdot \lambda}}$$

Auslegung bei beschränktem Bauraum

Oft jedoch: beschränkter Bauraum mit

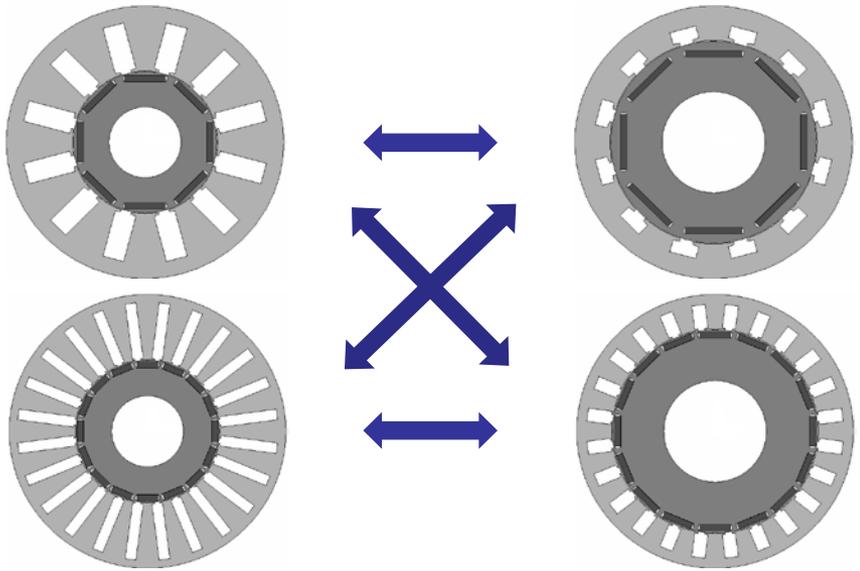
- gegebener axialer Länge
- gegebenem maximalem Durchmesser
- Fragestellung:
Wieviel Leistung kann integriert werden?

Freiheitsgrade der Auslegung:

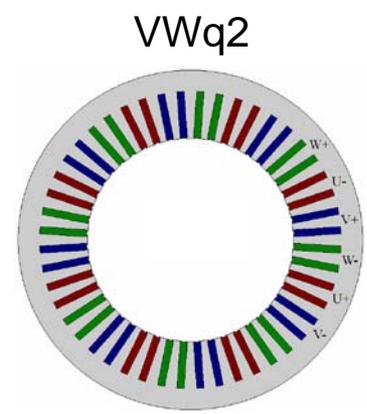
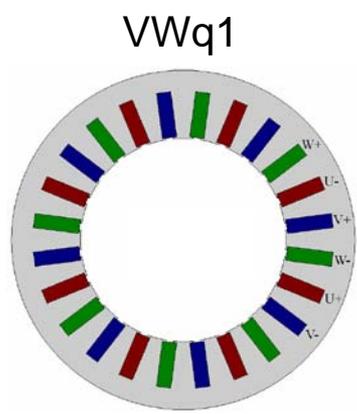
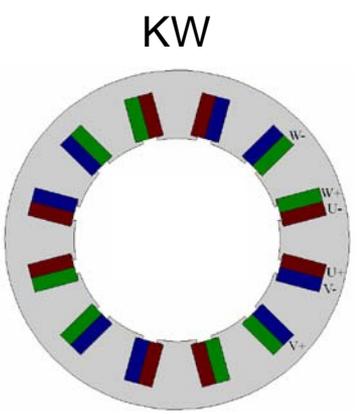
- Rotordurchmesser
- Polpaarzahl
- Wicklungsart, Rotorbauform, ...



Freiheitsgrade Polpaarzahl und Rotordurchmesser



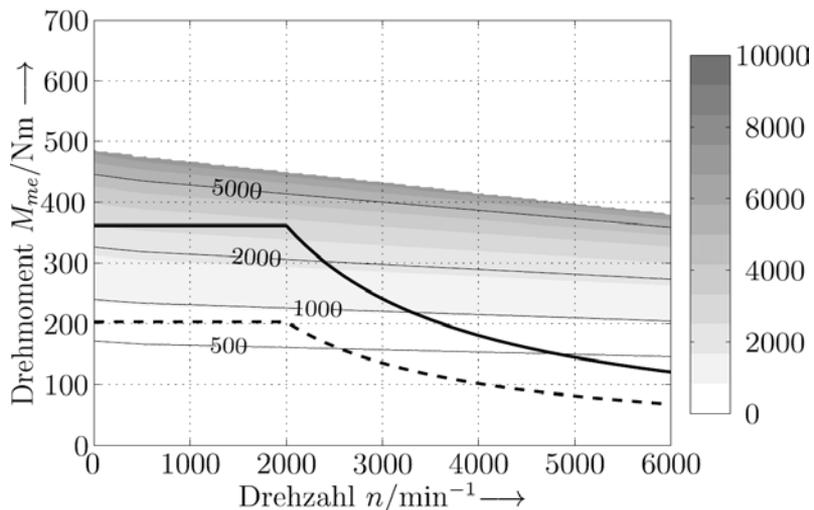
Freiheitsgrad Wicklungsart, simulierte Wicklungsarten



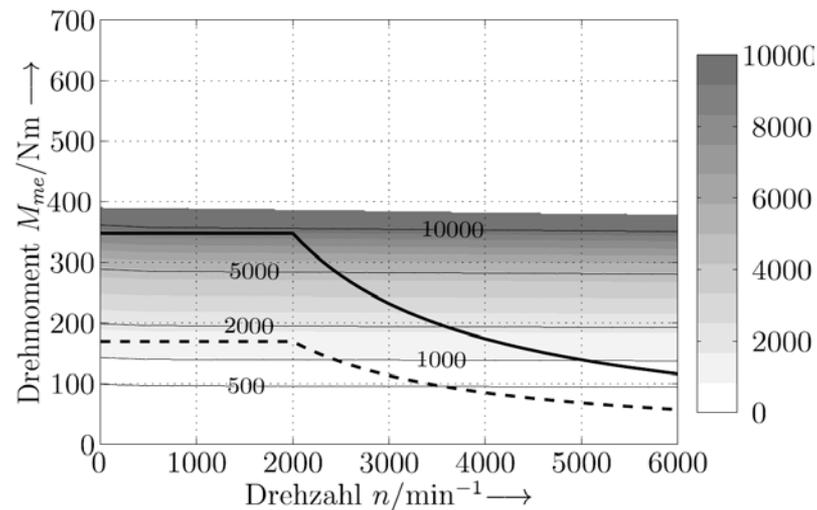


Beeinflussung der Ohmschen Verluste

- Analytische Abschätzung
- Im Wesentlichen beeinflusst durch Wahl der Wicklungsart
- Deutlich längere mittlere Windungslängen bei verteilten Wicklungen auf Grund der größeren Wicklungsschritte zwischen Hin- und Rückleiter und dem entsprechenden längeren Wickelkopf
- Dadurch deutlich höhere Ohmsche Verluste bei verteilten Wicklungen



Konzentrierte Wicklung

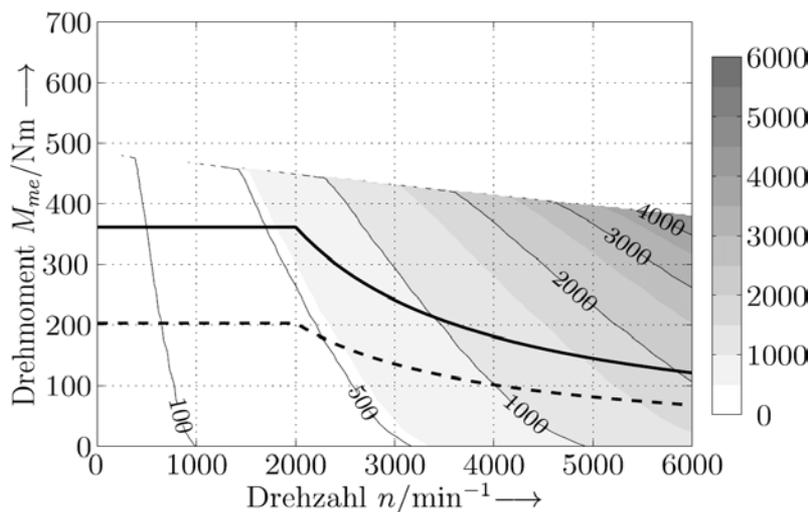


Verteilte Wicklung

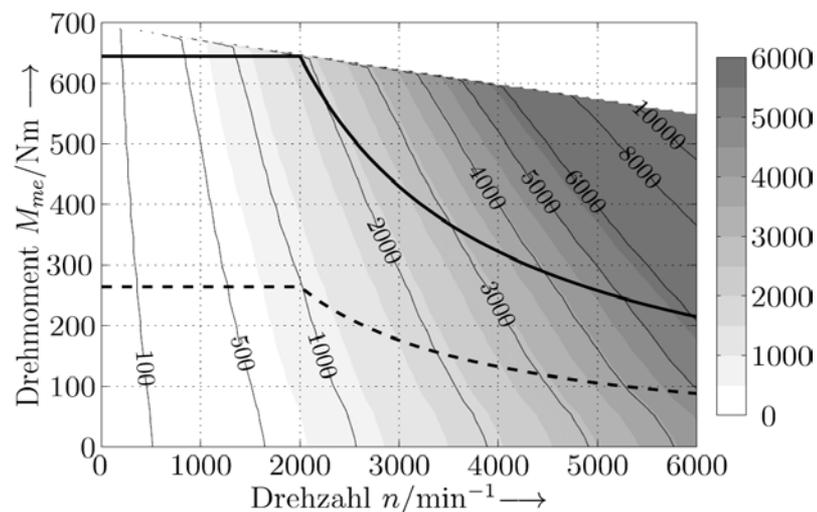


Beeinflussung der Eisenverluste

- Post-Processing auf Grundlage der zuvor erzeugten FE-Lösungen
- Separationsansatz mittels Bertotti-Formel erweitert mit eigenem Term für Verluste bei hohen Frequenzen
- Eisenverluste wesentlich durch Polpaarzahl beeinflusst auf Grund der überproportionalen Frequenzabhängigkeit
- Verluste nahezu unabhängig von Wicklungsart (fast identischen Eisenvolumen)



Polpaarzahl $p=4$



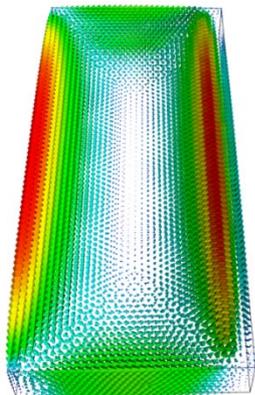
Polpaarzahl $p=8$



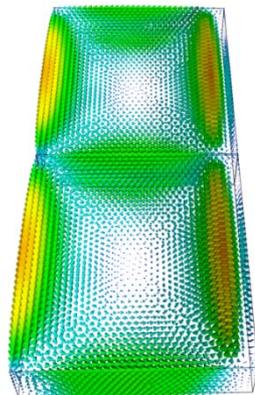
Verlustbetrachtung – Wirbelstromverluste in den Magneten

Variation der axialen Magnetsegmentierung

$N_{a,seg}=2$



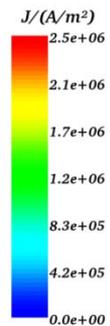
$N_{a,seg}=4$



$N_{a,seg}=8$

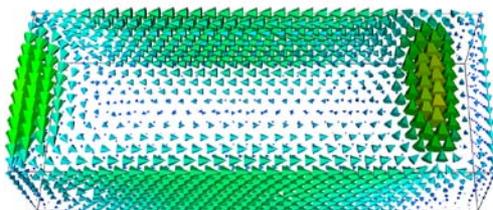


$N_{a,seg}=12$

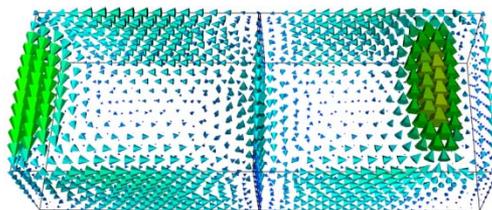


Variation der tangentialen Magnetsegmentierung

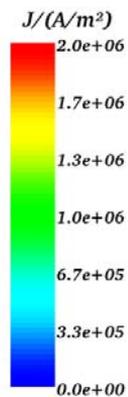
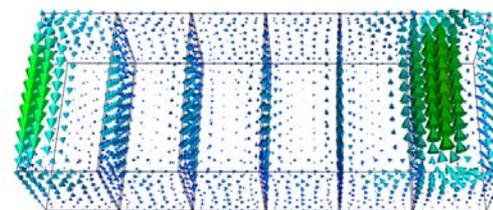
$N_{t,seg}=1$



$N_{t,seg}=2$



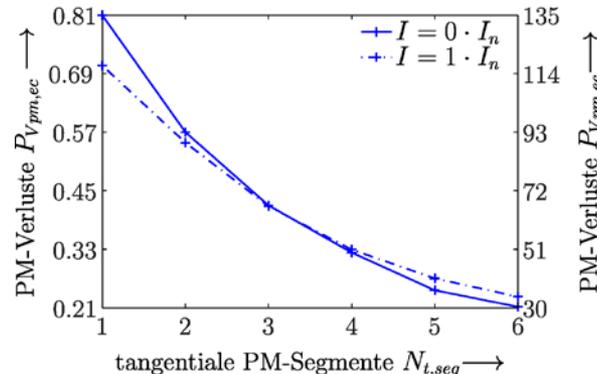
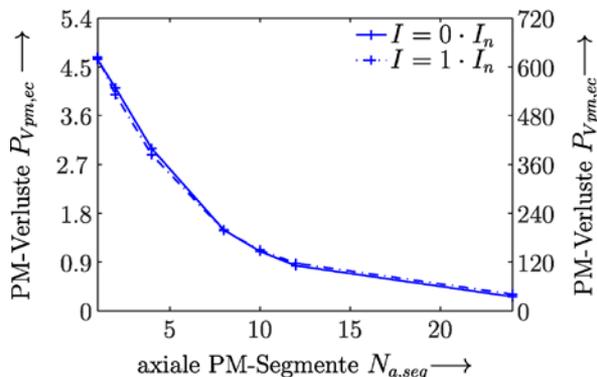
$N_{t,seg}=6$



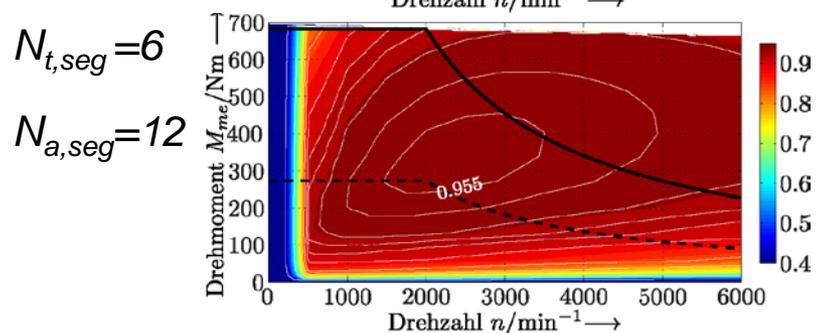
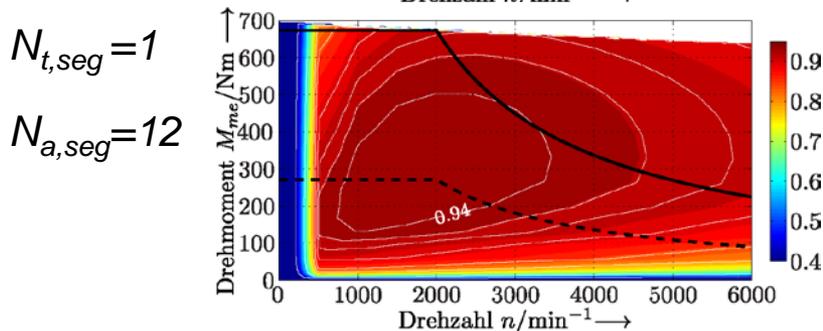
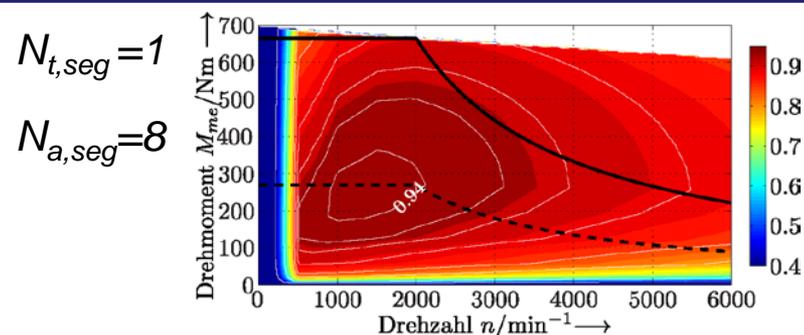
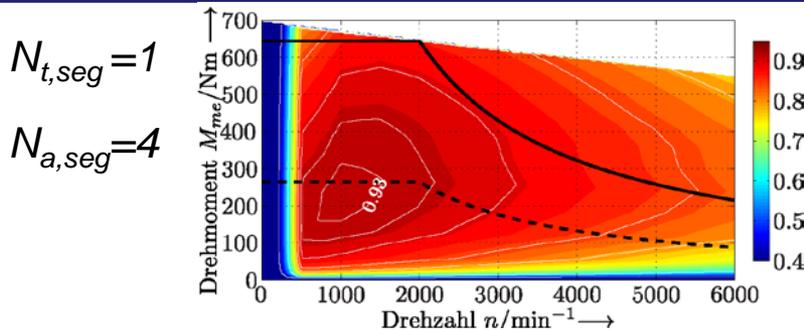


Verlustbetrachtung – Wirbelstromverluste in den Magneten

Einfluss der Magnetsegmentierung auf die Verluste



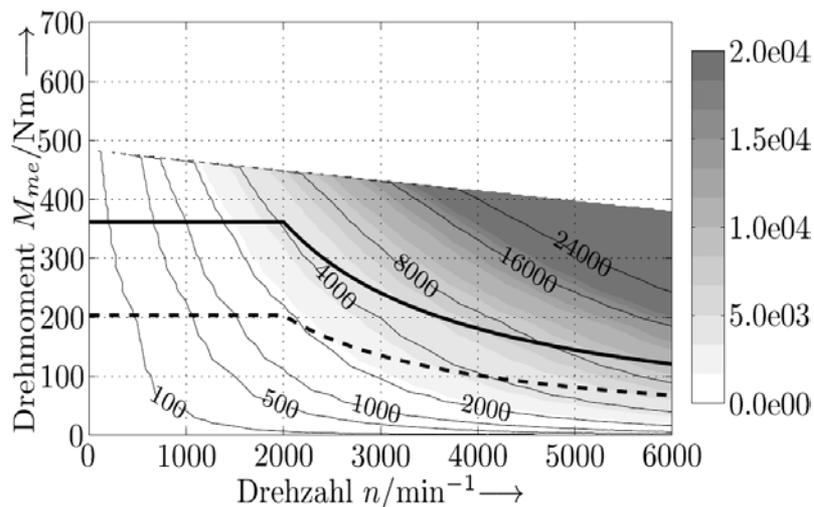
Einfluss der Magnetsegmentierung auf den Wirkungsgrad



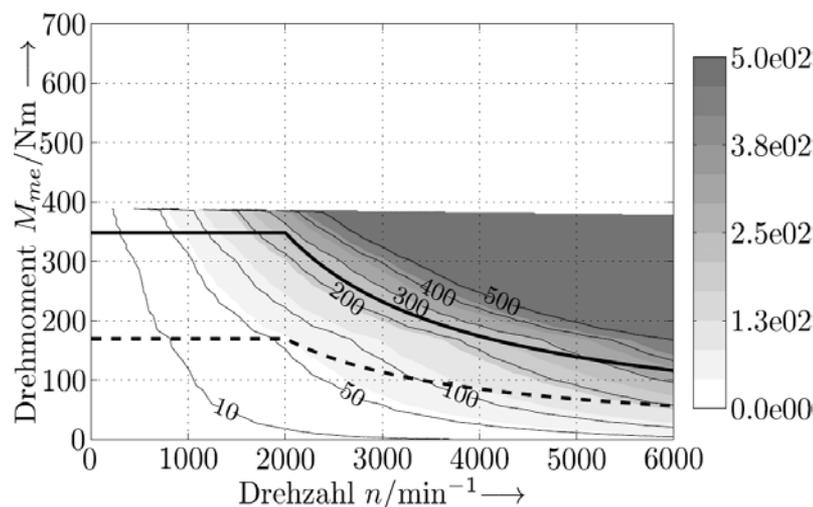


Beeinflussung der Wirbelstromverluste in den Magneten

- Deutliche Reduktion der Magnetverluste durch Segmentierung der Magnete
- Abwägung der Segmentzahl mit Fertigungskosten
- Polpaarzahl p hat keinen Einfluss durch geringere Magnetbreite bei hoher Polpaarzahl; wirkt wie Segmentierung
- Maßgeblich beeinflusst durch Wicklungsart, da konzentrierte Wicklungen einen deutlich größeren Gradienten in der Flussdichte der Magnete und dementsprechend Wirbelströme verursachen



Konzentrierte Wicklung

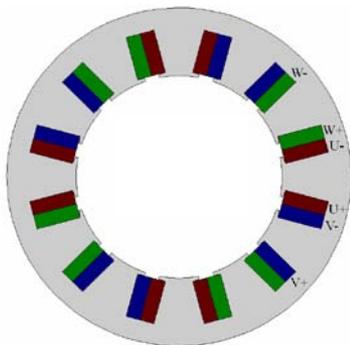


Verteilte Wicklung

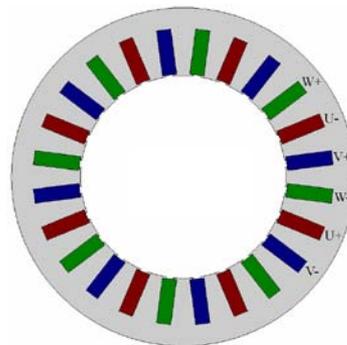


Beispielhafte Verlustkennfelder für Maschinen mit Polpaarzahl $p=4$

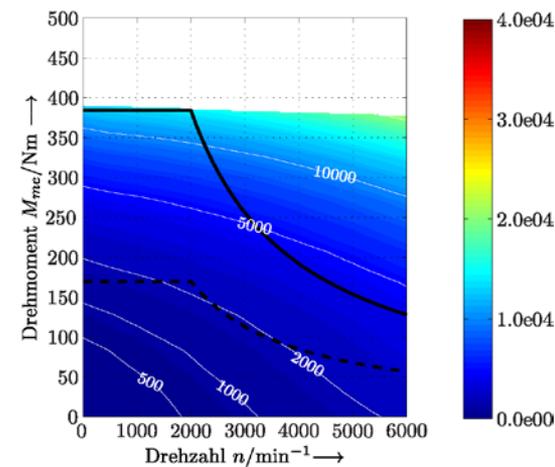
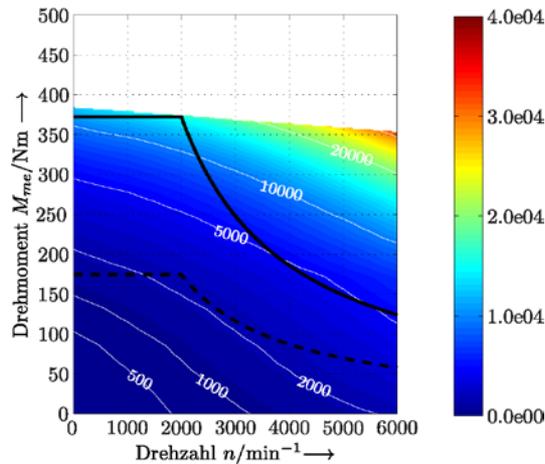
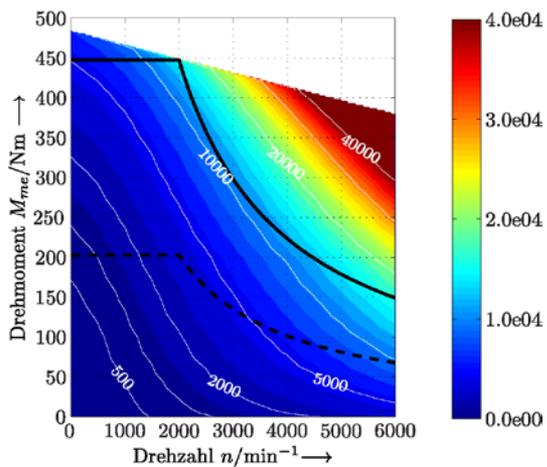
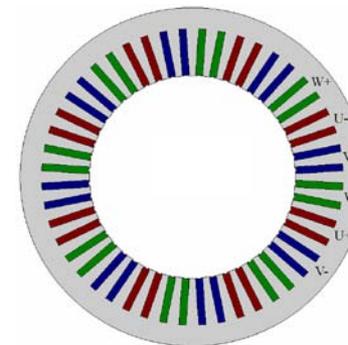
KW



VWq1



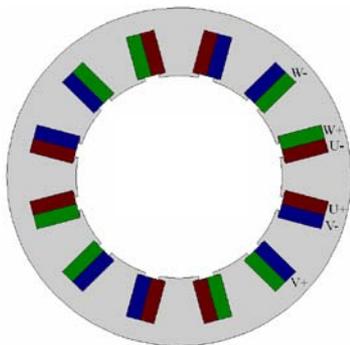
VWq2



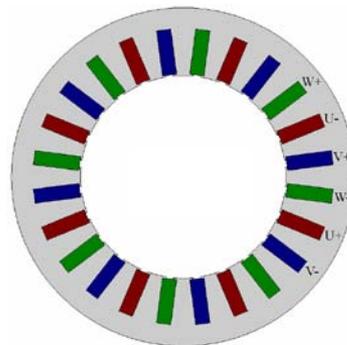


Beispielhafte Wirkungsgradkennfelder für Maschinen mit Polpaarzahl $p=4$

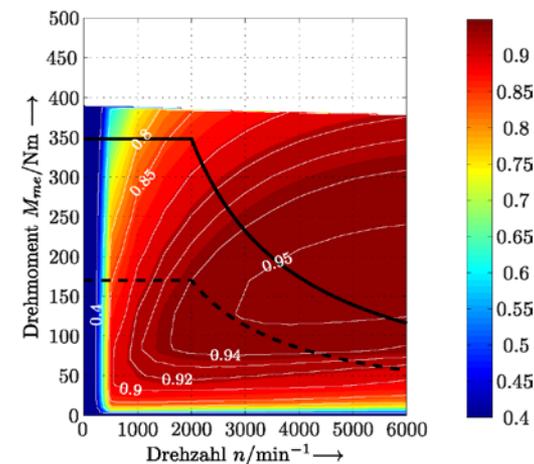
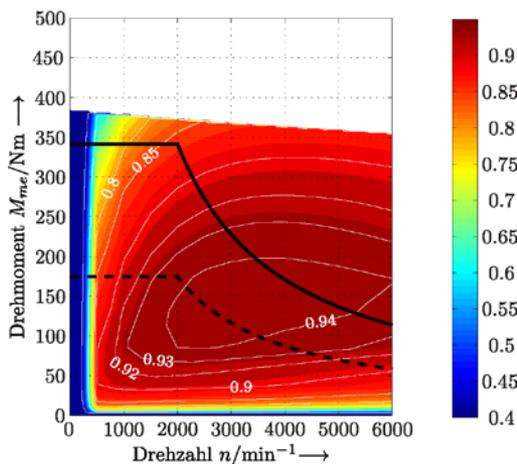
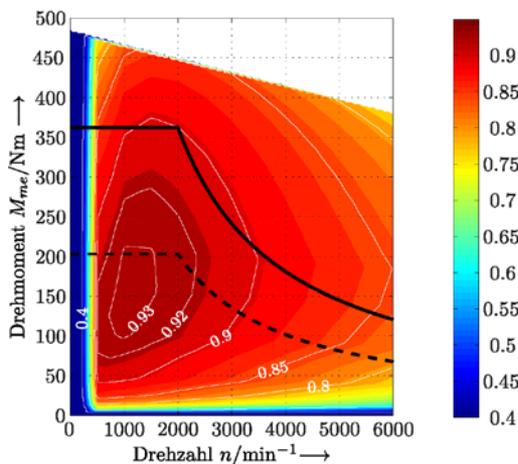
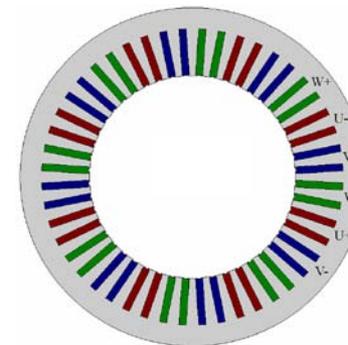
KW



VWq1



VWq2



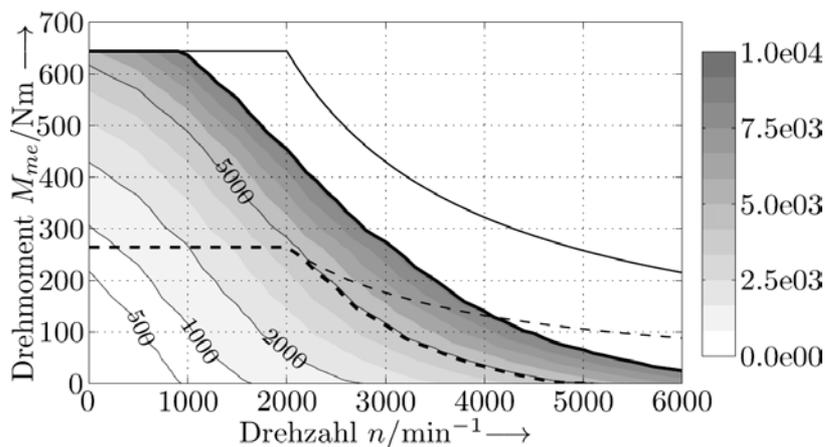


Einfluss der thermischen Grenzen

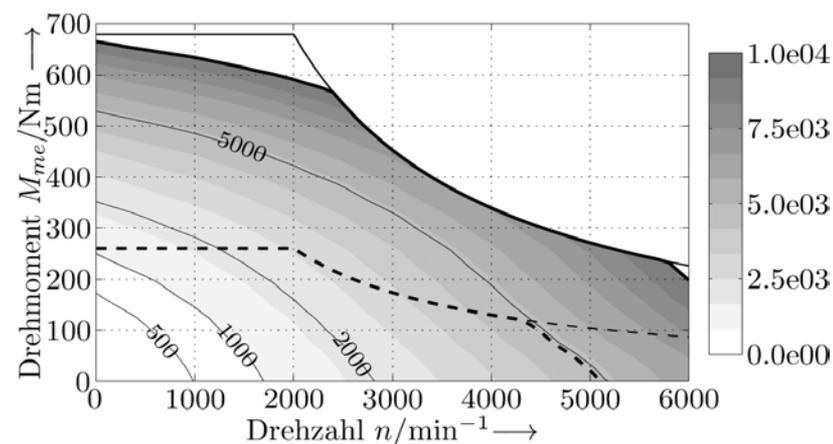
Drei thermische Grenzen:

- Gesamtverluste kleiner als abführbare Verluste an Mantelfläche
- Rotorverluste besonders kritisch, im wesentlichen Magnetverluste
- Ohmsche Verluste innerhalb der Nut, hoher thermischer Widerstand auf Grund von Nutwandisolierung und Lufteinschlüssen

- Rotorverluste und Gesamtverluste bei konzentrierten Wicklungen und hohen Drehzahlen oft kritisch und limitierend



Konzentrierte Wicklung



Verteilte Wicklung



Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick



Resultierende Gesamtwirkungsgrade über Fahrzyklen

- Maschinen mit konzentrierten Wicklungen vorteilhaft bei Anwendungen mit beschränkten Drehzahlen (Parallel Hybrid / Power Split / Stadtfahrzeug)
- Begründet durch geringere Ohmsche Verluste durch kurze Wickelköpfe
- Verteilte Wicklungen im Vorteil bei breitem Drehzahlband (Serieller Hybrid / EV)
- Wesentlich hierfür sind die geringeren Magnetverluste bei hohen Drehzahlen

	Paralleler Hybrid			Serieller Hybrid		
	NEDC	UDDS	HWFET	NEDC	UDDS	HWFET
KW-p4	0.735	0.764	0.806	0.859	0.778	0.783
KW-p6	0.716	0.767	0.823	0.780	0.725	0.713
KW-p8	0.697	0.765	0.822	0.756	0.689	0.670
VW-q1-p4	0.743	0.737	0.700	0.910	0.856	0.877
VW-q1-p6	0.770	0.765	0.795	0.920	0.848	0.853
VW-q1-p8	0.700	0.740	0.777	0.867	0.796	0.792
VW-q2-p4	0.740	0.744	0.700	0.917	0.863	0.882
VW-q2-p6	0.701	0.710	0.744	0.877	0.813	0.808
VW-q2-p8	0.650	0.696	0.735	0.822	0.761	0.744



Gesamtbewertung der Wicklungsarten

- Höhere Momentendichte bei konzentrierten Wicklungen durch anteilig längeren Aktivteil bei gleicher Gesamtlänge (aktiv + Wickelkopf)
- Erhöhung der Polpaarzahl kann bis zu einem gewissen Punkt die Ausgangsleistung erhöhen.
- Jedoch steigen die Gesamtverluste, so dass besonders bei hohen Geschwindigkeiten die thermischen Grenzen sehr limitierend sein können.
- Max. Wirkungsgrad / magn. Ausnutzung höher bei verteilten Wicklungen

	KW		VWq1		VWq2	
	4	8	4	8	4	8
Polpaarzahl p						
Nennmoment $M_{n,el}$	++	++	--	-	-	--
Nennleistung P_n	++	++	--	-	-	--
Max. Strom I/I_n	0	++	++	++	++	++
Maximalmoment M_{max}	++	++	+	++	++	++
Maximalleistung P_{max}	++	++	+	++	++	++
Rastmomente	-	-	--	--	-	-
Drehmomentwelligkeit	0	0	--	--	++	-
Magnetmasse m_{PM}	--	-	++	++	++	++
Magn. Ausnutzung P_n / m_{PM}	0	+	++	++	++	++
Max. Wirkungsgrad η_{max}	+	0	++	++	++	++
Therm. Betriebsgrenzen	+	0	++	+	++	+



Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

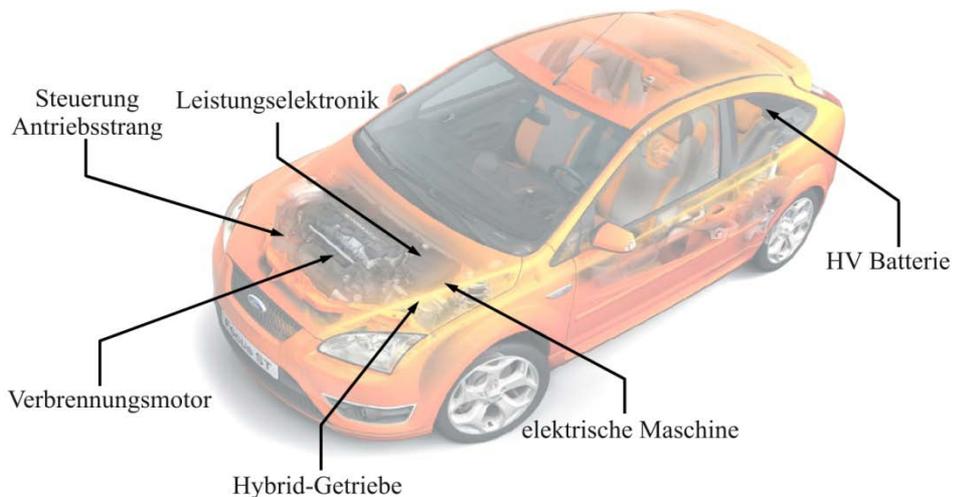
Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick

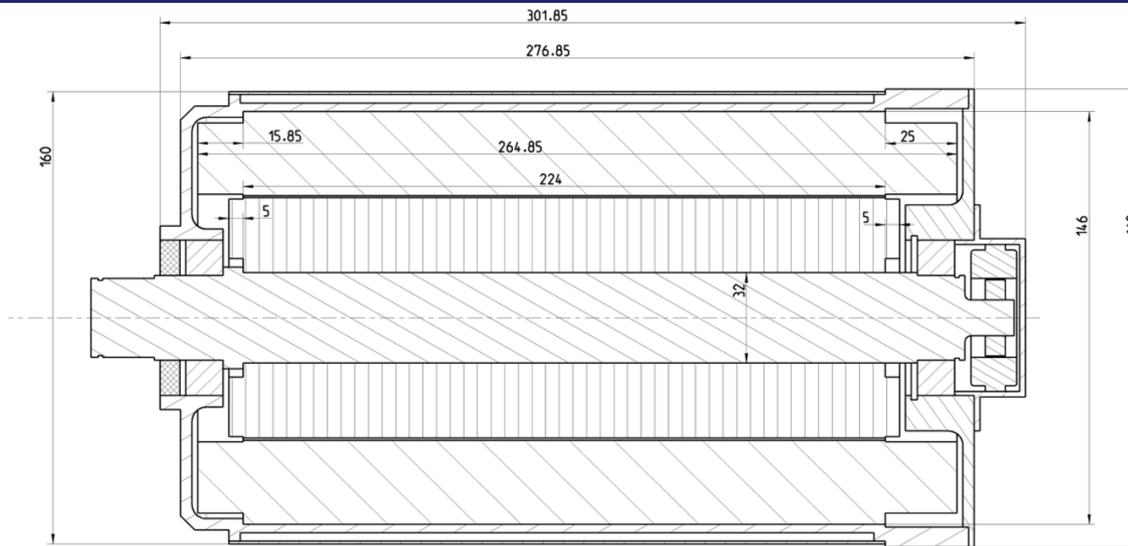


BMWi Verbundprojekt “Europa Hybrid - Innovativer PKW Hybridantrieb für Europa”

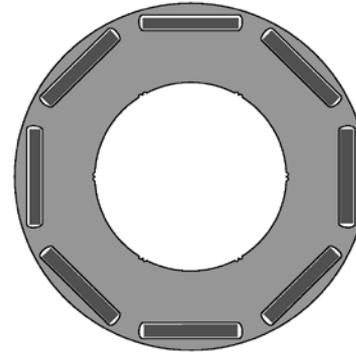
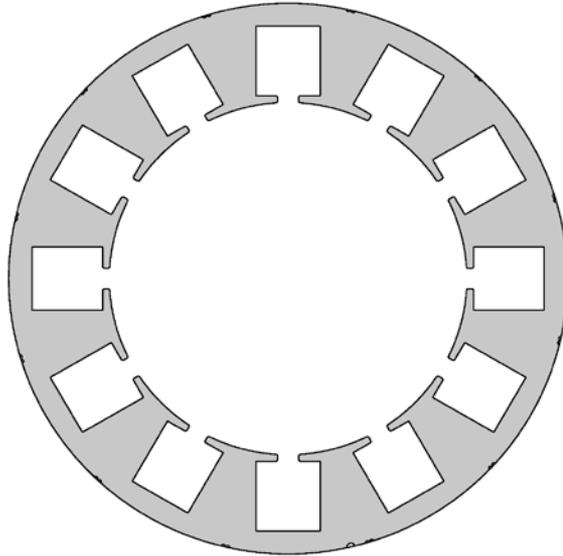


- paralleles Hybridfahrzeug (Funktionalität inklusive zugkraftunterbrechungsfreies Schalten)
- beschränkter Bauraum
- maximale Leistung / Leistungsdichte

Bauraum Längsschnitt der elektrischen Maschine



Blechnschnitt und Gehäuse

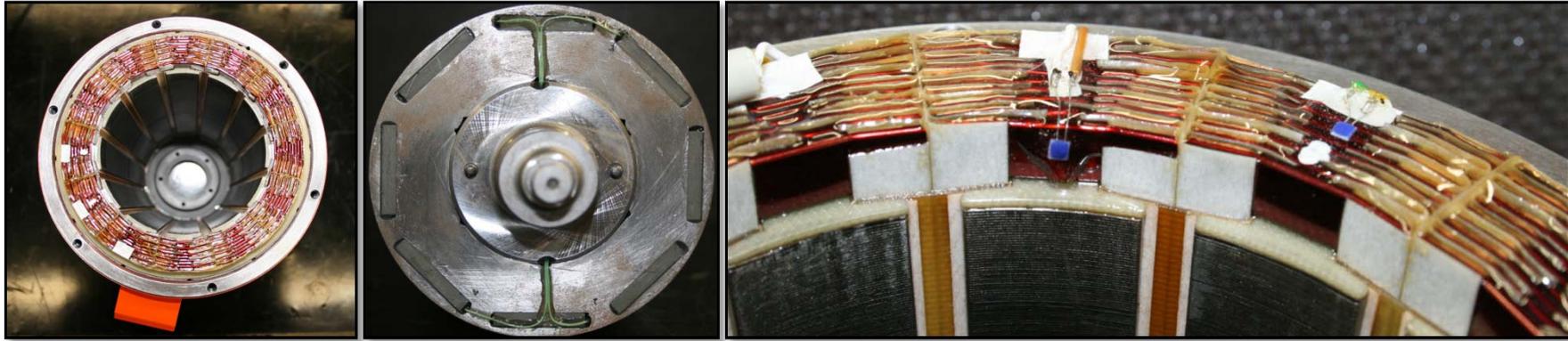


Leistungsdaten und Abmessungen

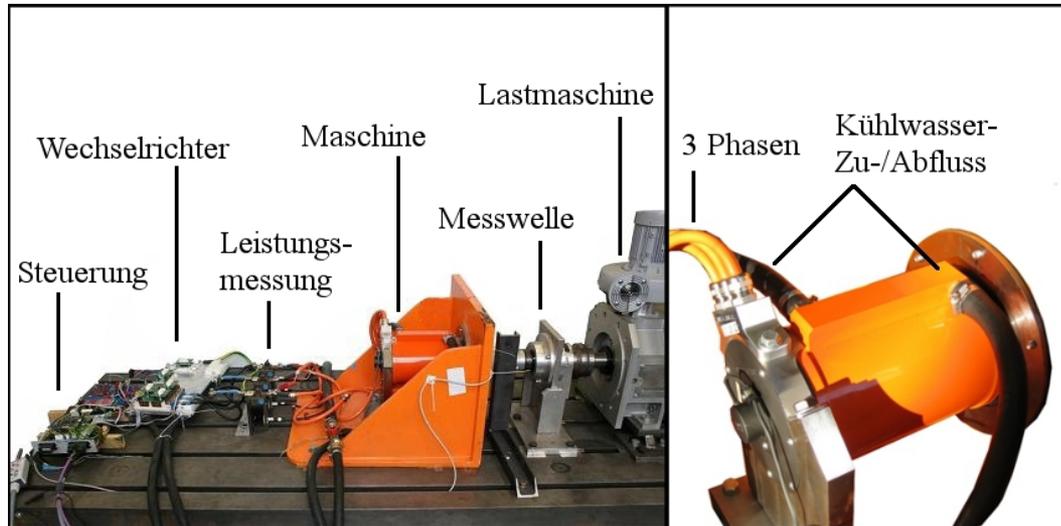
Nennleistung P_n	32 kW
Maximalleistung P_{max}	61 kW
Drehmoment M_n (M_{max})	71 (130) Nm
Nenn Drehzahl n_n	4500 min ⁻¹
maximale Drehzahl n_{max}	12000 min ⁻¹
Zwischenkreis-Spannung U_B	650 V
Strom I_n (I_{max})	120 (240) A
max. Wirkungsgrad η_{max}	93%

Polpaarzahl p	4
Gesamtlänge $l_{z,ges}$	265 mm
Aktivlänge l_z	224 mm
Stator Durchmesser D_s	146 mm
Rotordurchmesser D_r	92 mm
Luftspaltweite δ	0.7 mm
Wellendurchmesser D_w	50 mm
Magnetabmessungen	25x4 mm ²

Prototyp

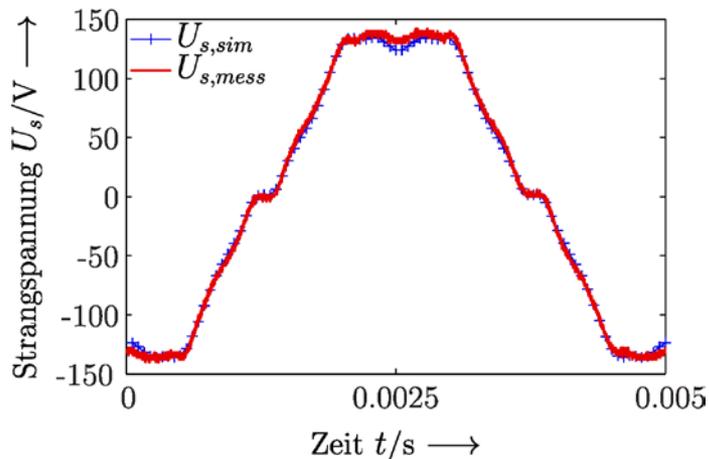


Prüfstands Aufbau

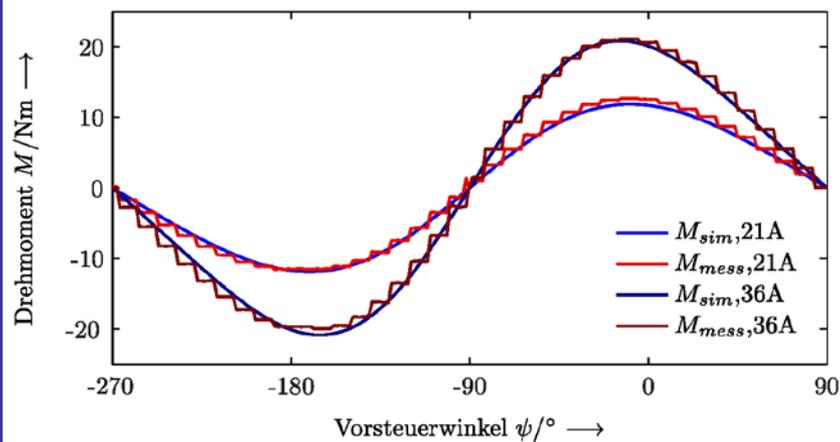




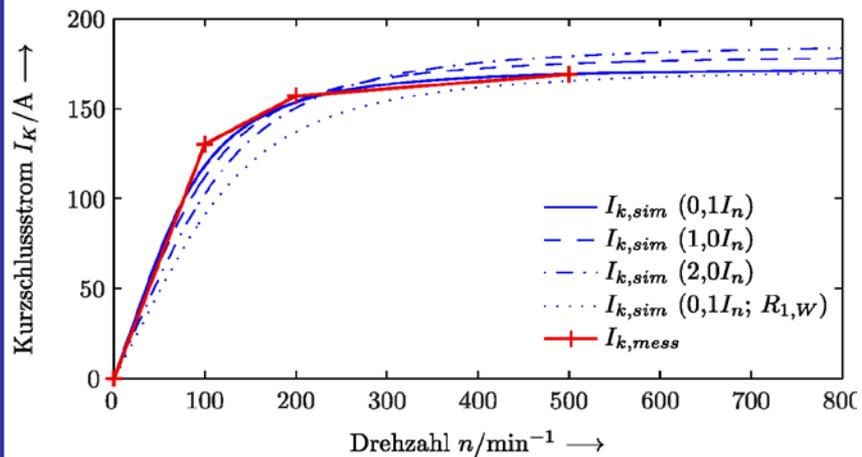
Leerlauf



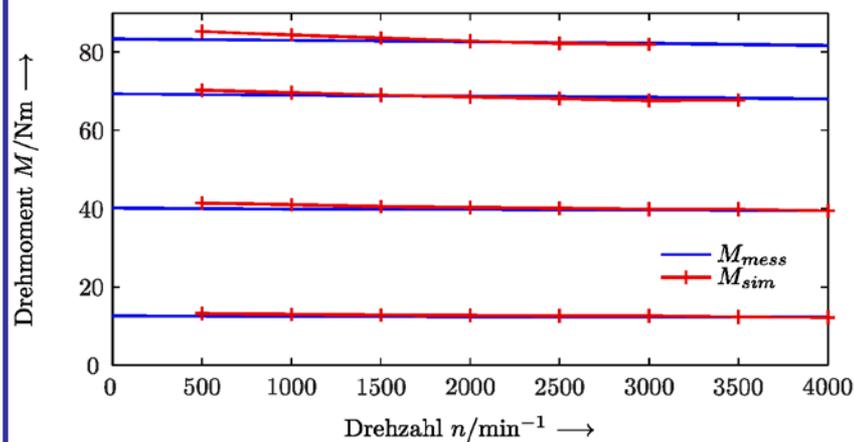
„Locked Rotor – Test“



Kurzschluss



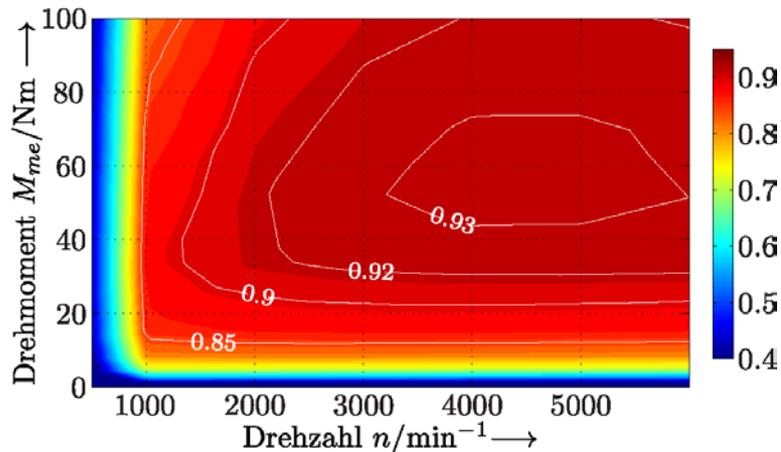
Lastmessung



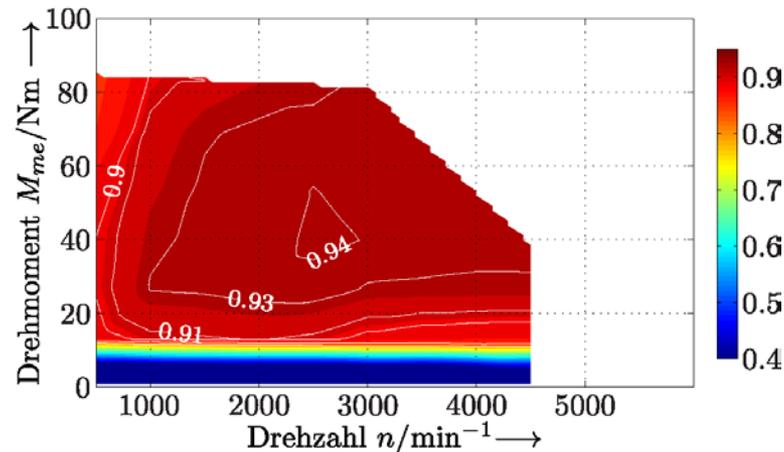


Wirkungsgradmessung - Maschine

Simulation

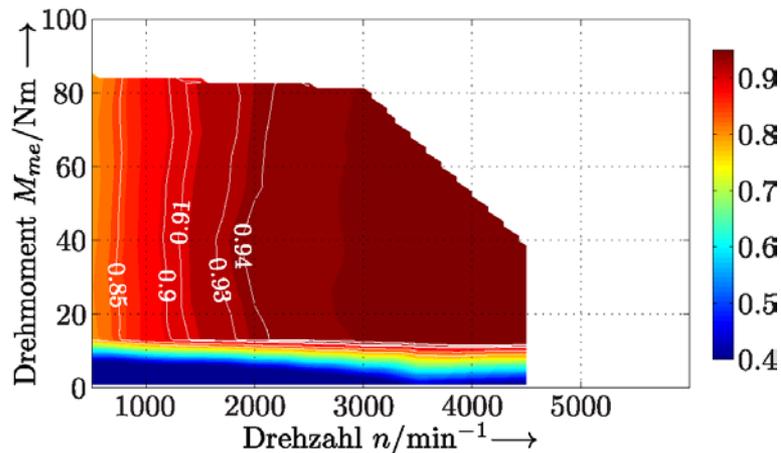


Messung

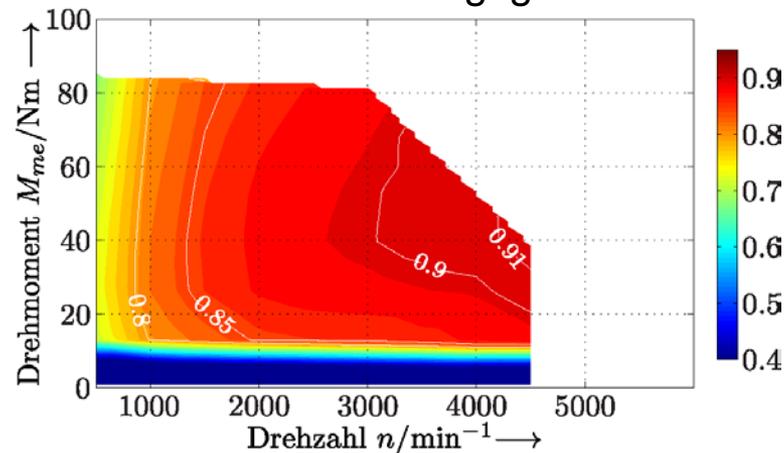


Wirkungsgradmessung - Umrichter, Gesamt

Umrichter



Gesamtwirkungsgrad





Einleitung

- Elektromobilität früher und heute / Aktuelle Motivation für Elektrotraktion

Anforderungen an die elektrische Maschine

- Allgemeine Anforderungen
- Fahrzyklusgerechte Anforderungen

Anwendungsbeispiel: Die permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Beschreibung
- Werkzeuge der Berechnung

Auslegung und Optimierung der permanentmagneterregten Synchronmaschine

- Auslegung bei beschränktem Bauraum
- Verlustbetrachtung
- Bewertung der unterschiedlichen Varianten

Prototypenaufbau

- Prototyp und Aufbau des Prüfstandes
- Vergleich von Simulation und Messungen

Zusammenfassung und Ausblick



Zusammenfassung

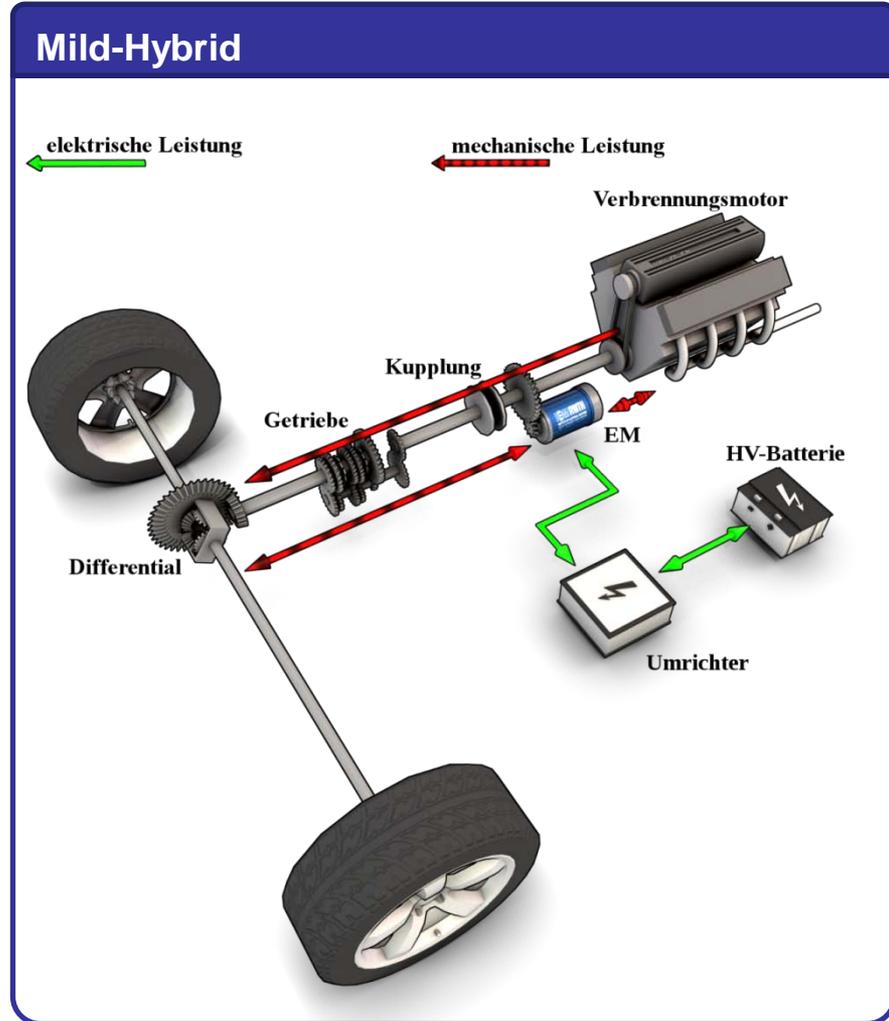
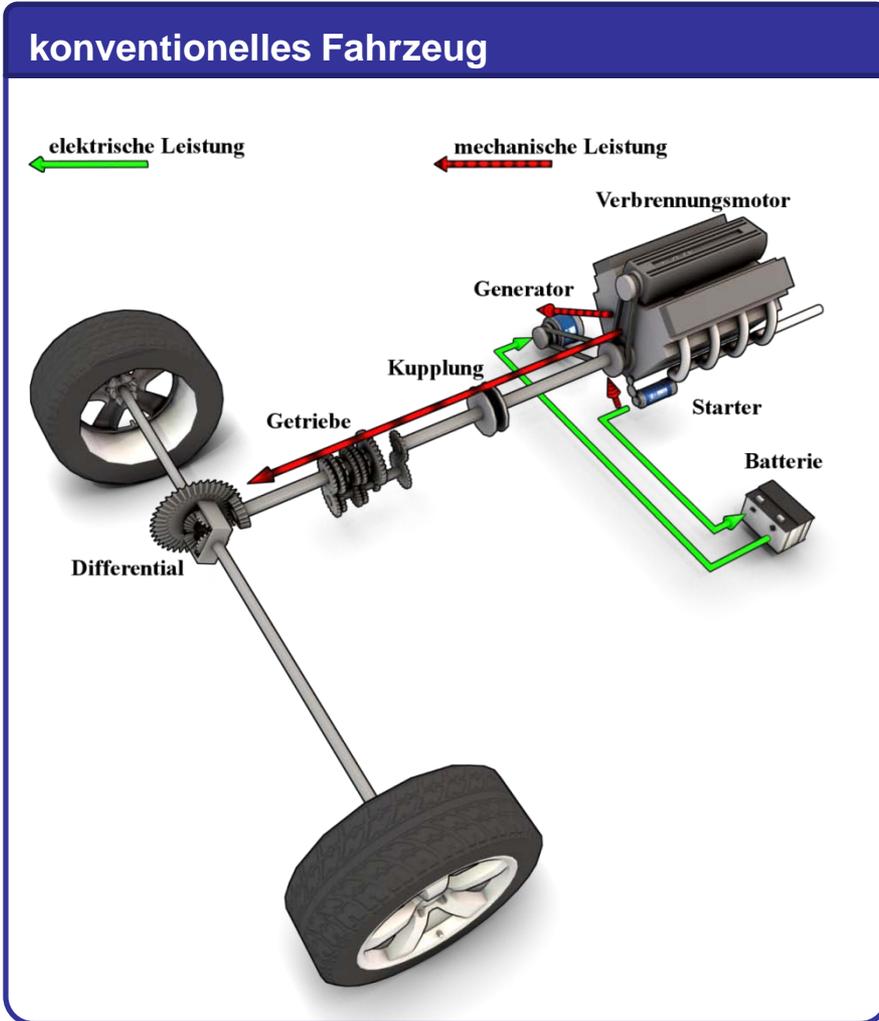
- Erarbeitung der Anforderungen in Abhängigkeit von Fahrprofilen und Fahrzeugdaten
- Vergleich verschiedener Maschinenarten hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit in HEV / EV
- Entwicklung der notwendigen Simulationsschritte zur Berechnung von PMSM
- Untersuchung der Freiheitsgrade (Rotordurchmesser, Polpaarzahl, Wicklung, Rotorbauart) in Bezug auf Drehmoment, Drehmomentwelligkeit, Leistung, Feldschwächbarkeit, Verluste, Wirkungsgrad und Energiebedarf in HEV und EV
- Betrachtung von Ohmschen, Eisen und Magnetverlusten
- Bewertung der Freiheitsgrade
- Prototypen zeigen gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung

Ausblick

- Entwicklung / Implementierung von optimierten Verlustmodellen
 - Verbesserung der absoluten Aussage
 - simulationsgestützte Ermittlung der thermischen Grenzen
- Erweiterung der Berechnungswerkzeuge (mehrsträngig, Fehlerfälle, Redundanz, ...)
- Übertragung der Vorgehensweise / automatisierte Berechnungskette auf weitere Maschinenarten (Asynchronmaschine)

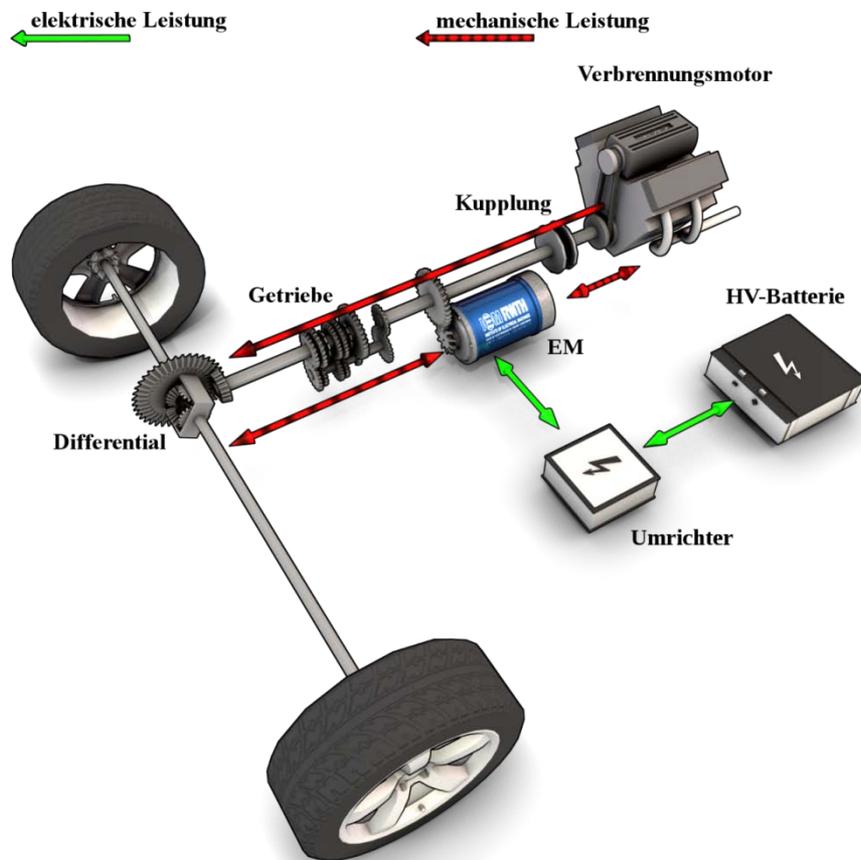


Anhang

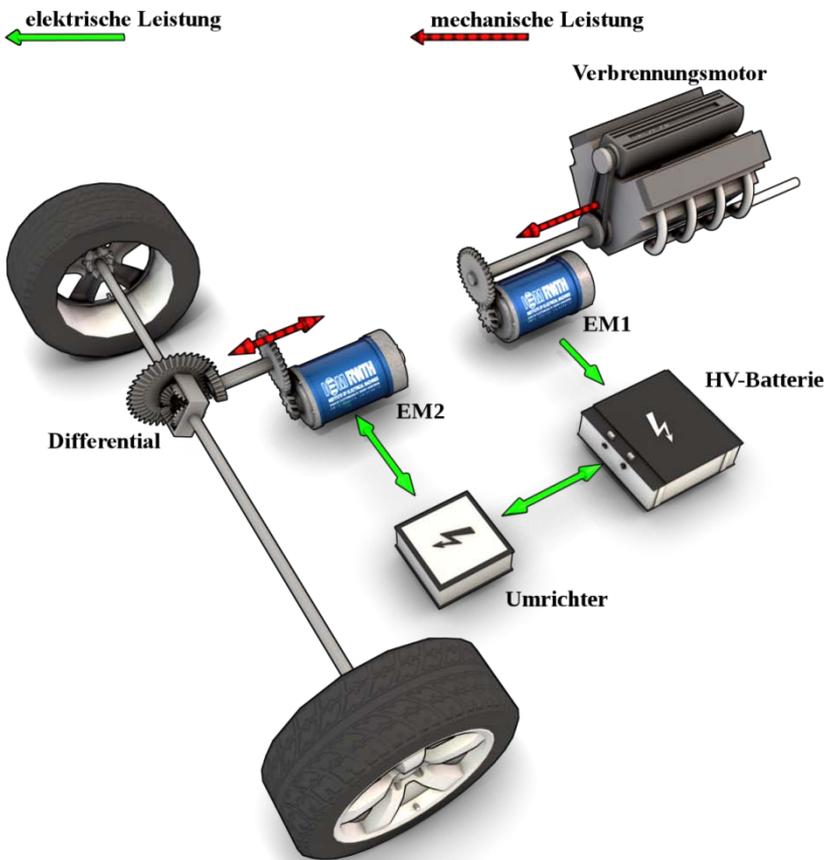


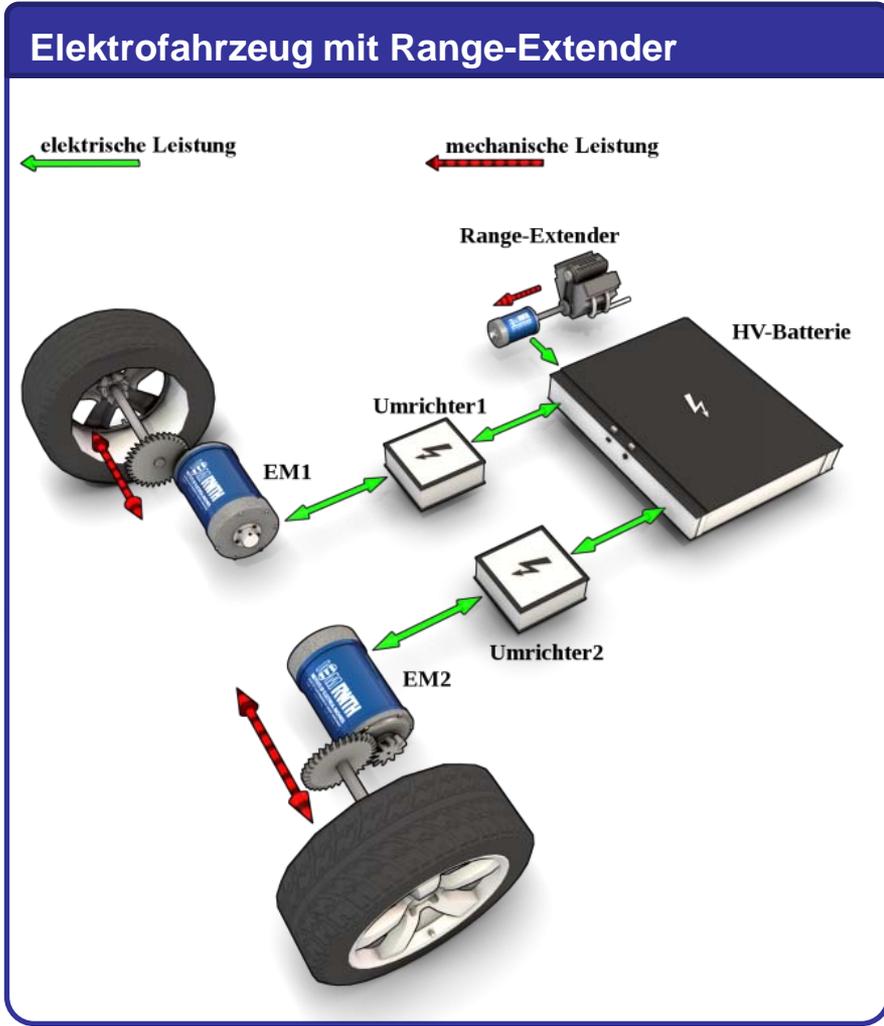
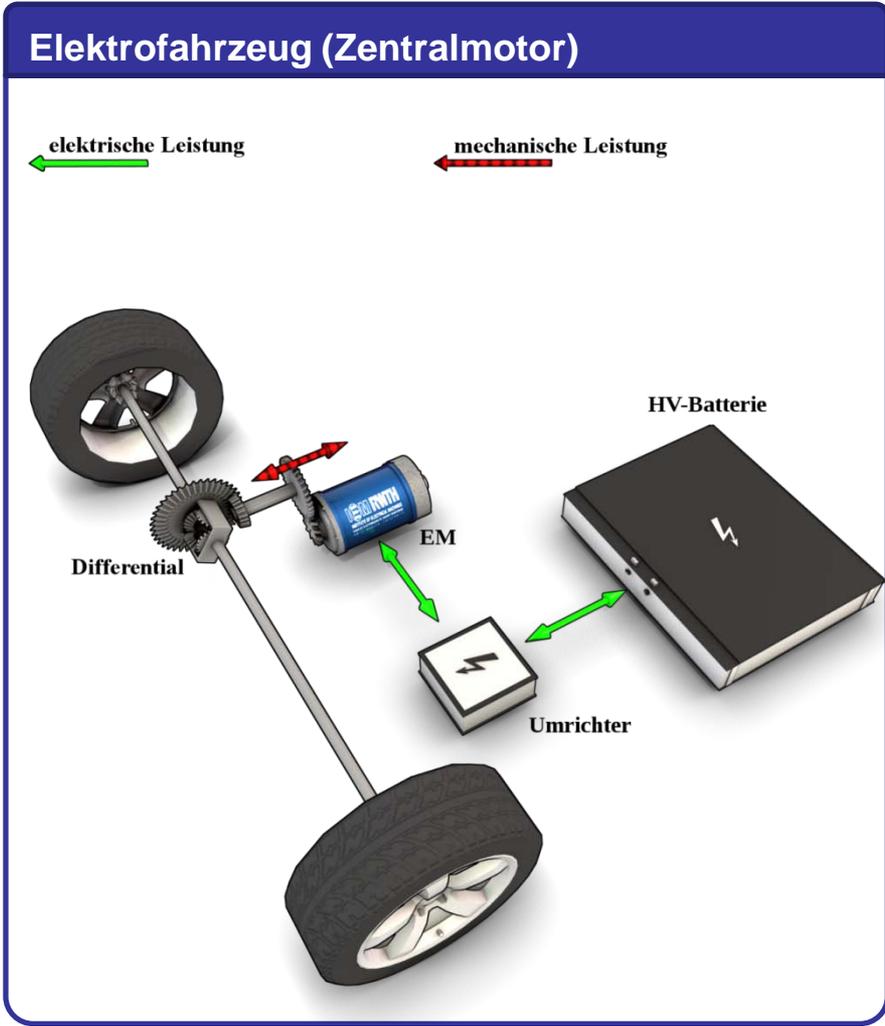


Voll-Hybrid, parallel



Voll-Hybrid, seriell

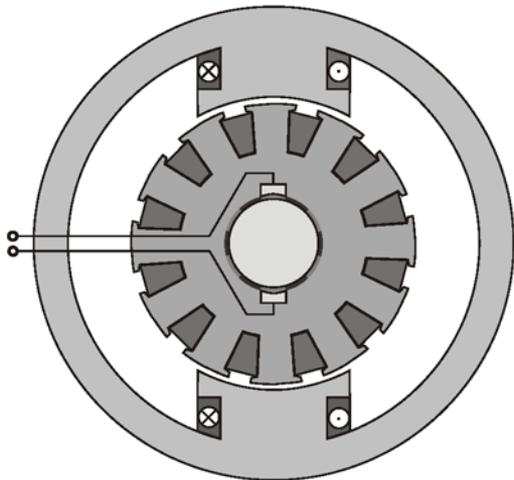




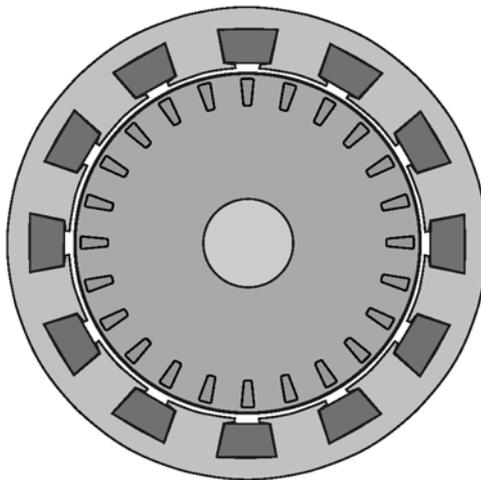


Maschinen für den Antriebsstrang

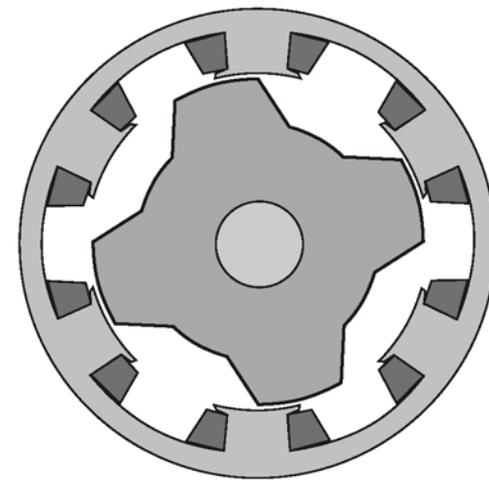
Gleichstrommaschine (GM)



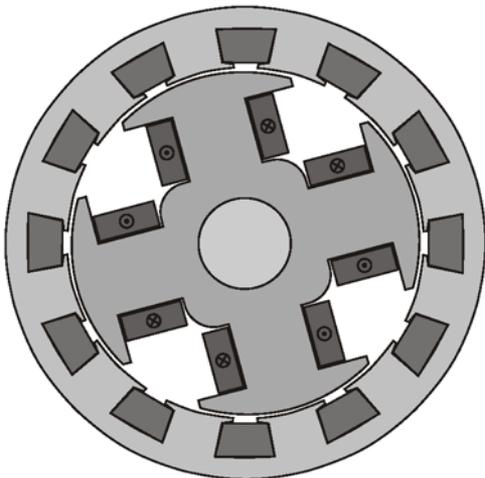
Asynchronmaschine (ASM)



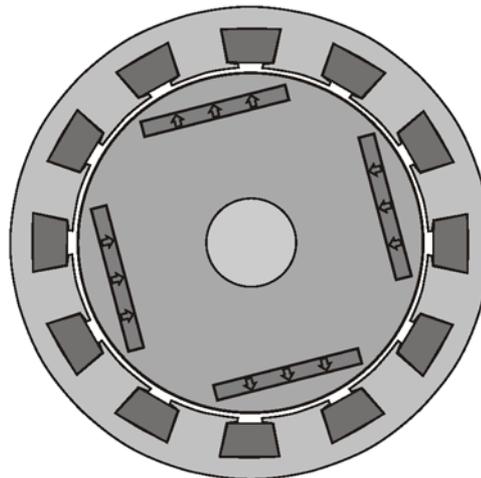
Reluktanzmaschine (GRM)



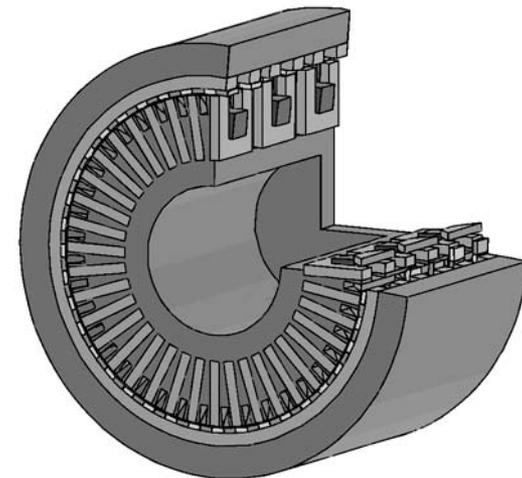
Synchronmaschine (SM)



PM- Synchronmaschine (PMSM)



Transversalflussmaschine (TFM)

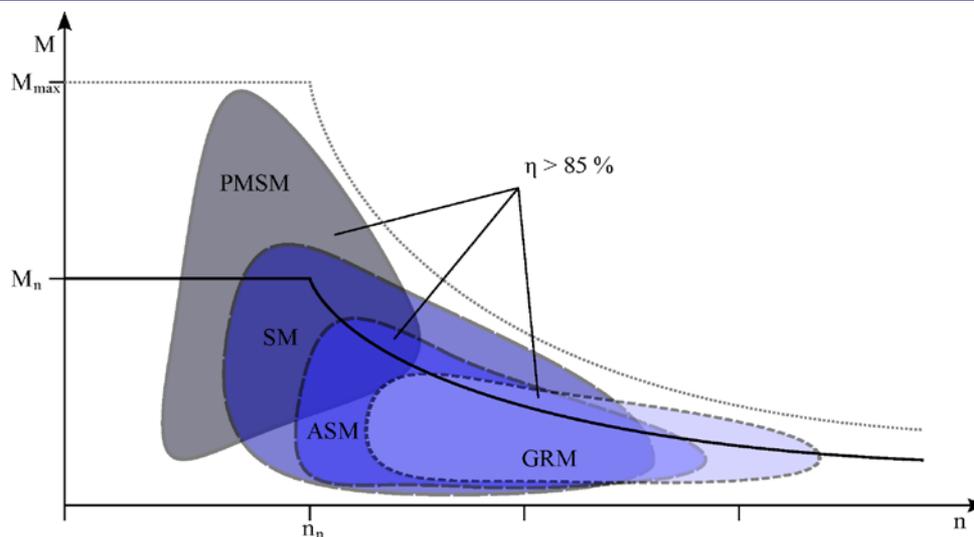




Vergleich elektrischer Maschinen

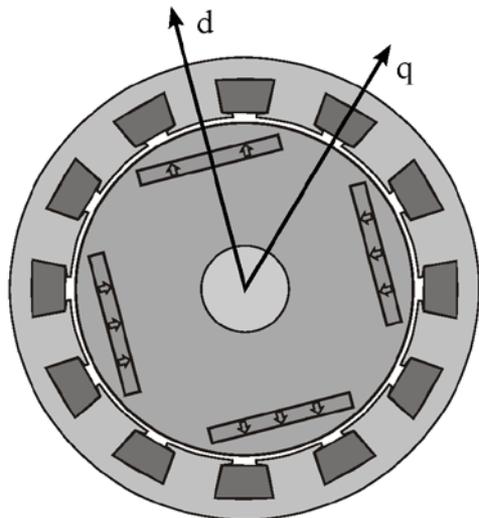
	GM	ASM	GRM	SM	PMSM	TFM
Drehmomentdichte	⊖⊖	○	○	○	○	⊕⊕
max. Drehzahl	○	⊕	⊕⊕	⊕	○	○
Leistungsdichte	⊖⊖	⊕	⊕	⊕	⊕⊕	⊕⊕
max. Wirkungsgrad	⊖⊖	⊕	○	⊕	⊕⊕	⊕
Drehmomentwelligkeit	○	⊕	⊖⊖	⊕	⊕	⊖
Geräuschabstrahlung	⊖	⊕	⊖⊖	⊕	⊕	⊖
technische Reife	⊕⊕	⊕⊕	⊖	⊕⊕	⊕	⊖
Zuverlässigkeit	⊖	⊕⊕	⊕⊕	⊕⊕	⊕	○
Aufbau, Kosten	○	⊕	⊕⊕	○	⊖	⊖⊖
Regelung, Kosten	⊕⊕	○	⊖	○	⊖	○

Schematische Darstellung der Bereiche besten Wirkungsgrades





Drehmoment der PMSM (Grundwellengleichung)

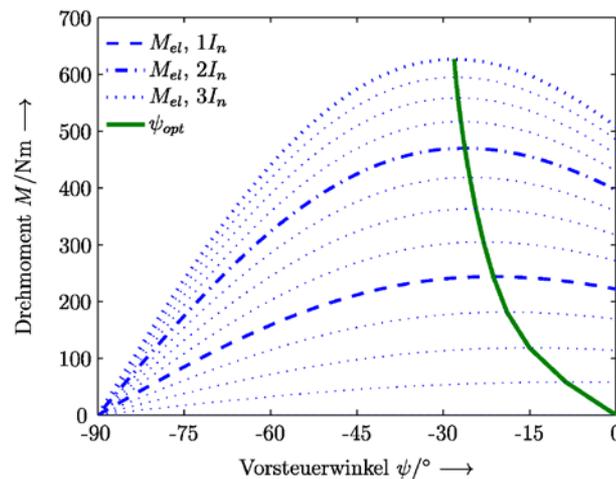
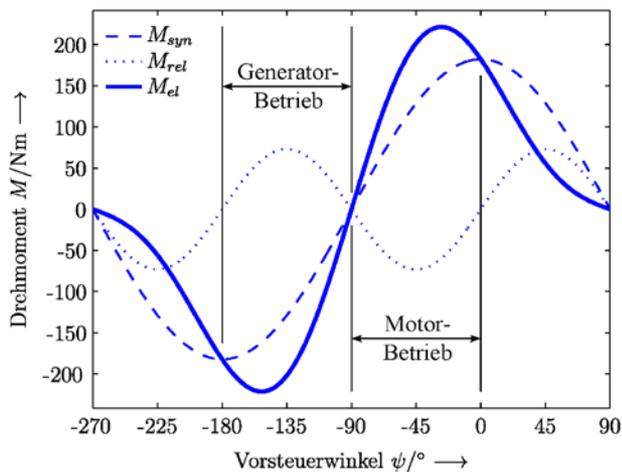


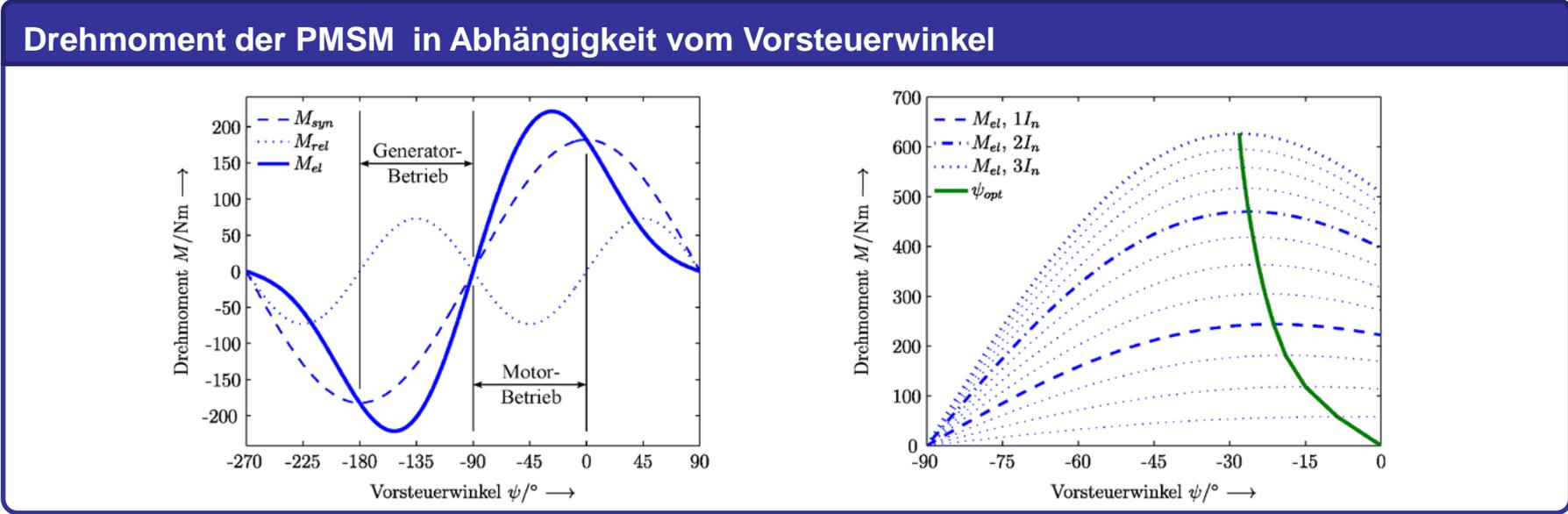
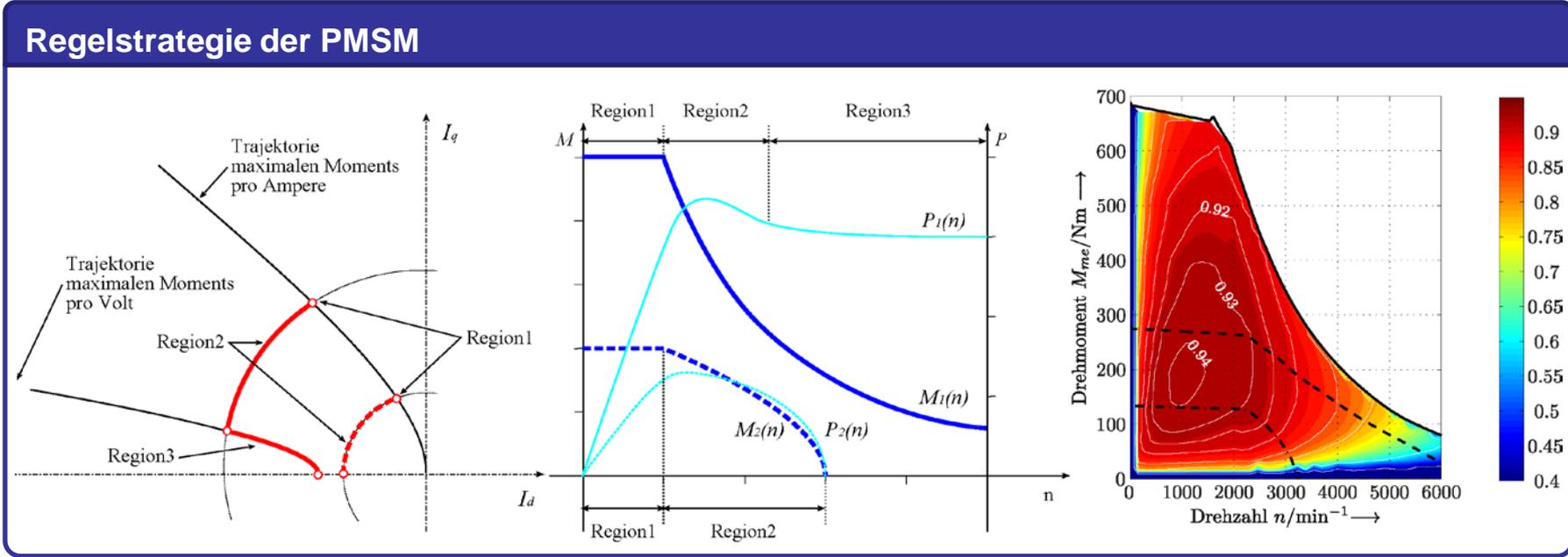
$$\begin{aligned}
 M_{el} &= \frac{3p}{\omega_{el}} \cdot [U_p - I_d \cdot (X_q - X_d)] \cdot I_q \\
 &= \underbrace{\frac{3p}{\omega_{el}} \cdot U_p I_q}_{M_{syn}} - \underbrace{\frac{3p}{\omega_{el}} \cdot I_q I_d \cdot (X_q - X_d)}_{M_{rel}}
 \end{aligned}$$

$$I_q = I \cos \psi$$

$$I_d = I \sin \psi$$

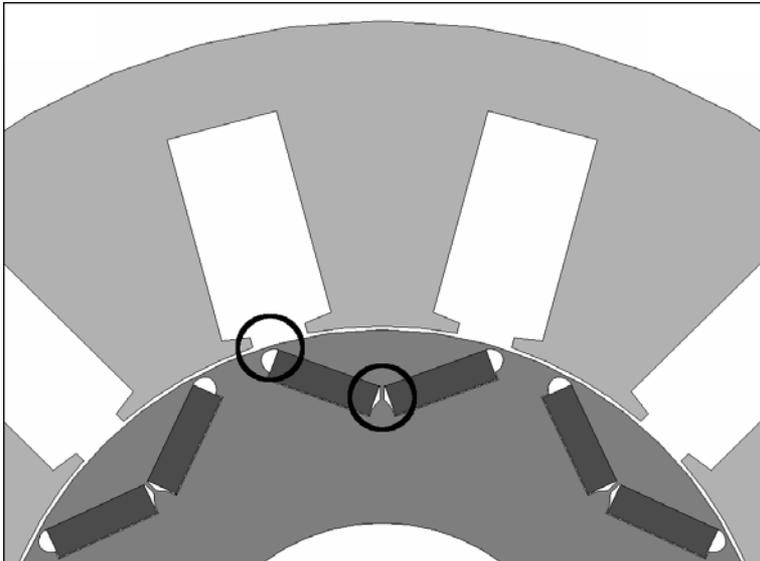
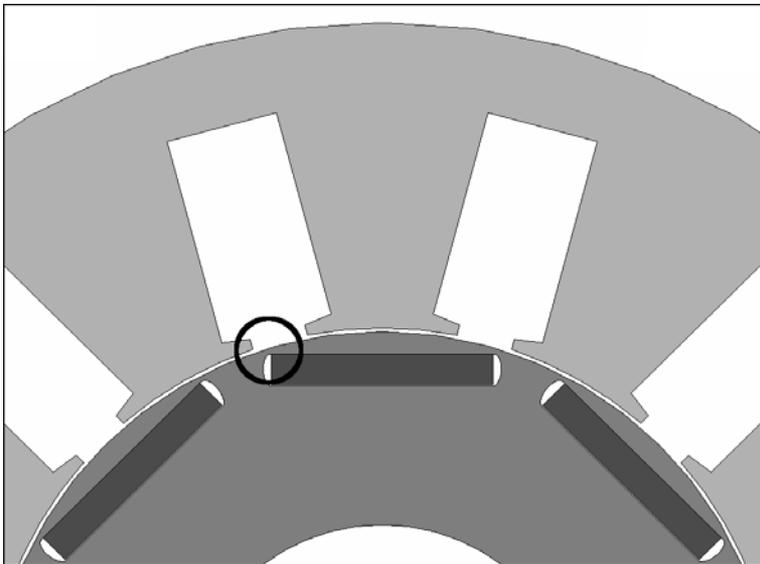
Drehmoment der PMSM in Abhängigkeit vom Vorsteuerwinkel



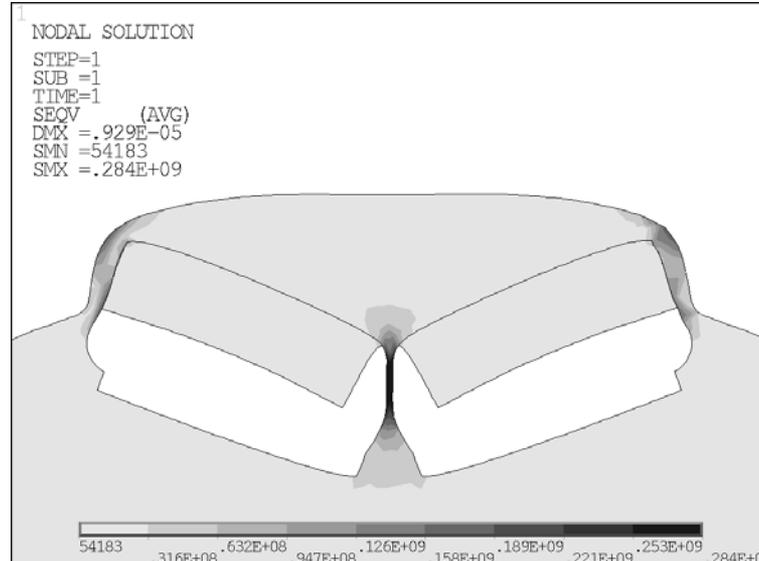
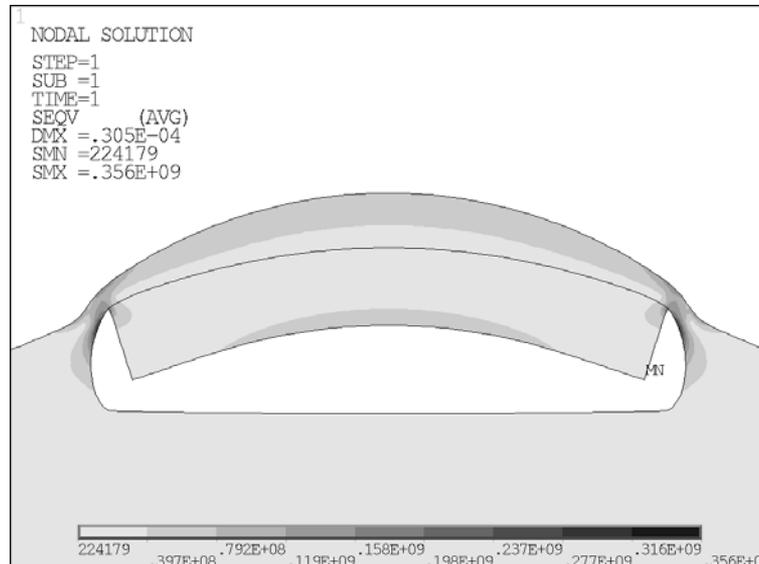




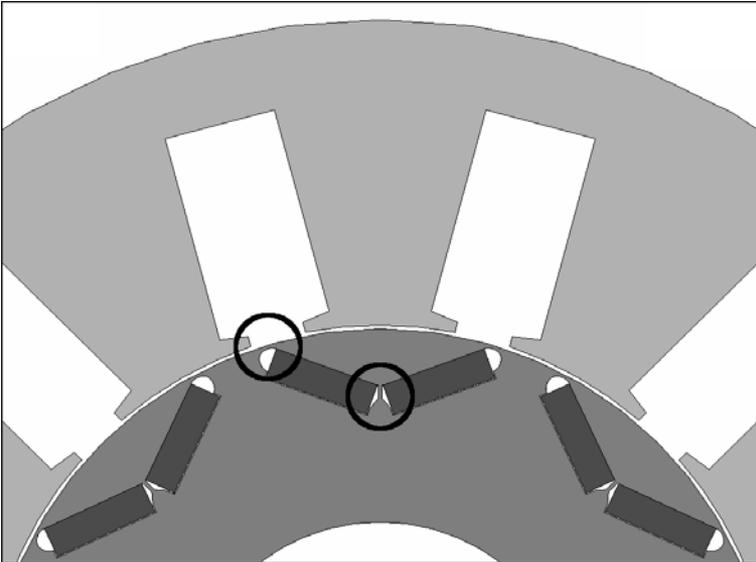
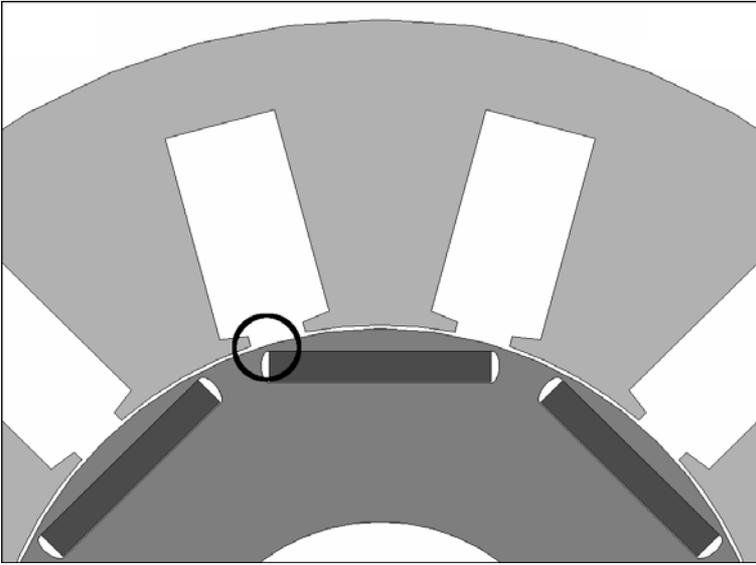
Stegbreite bei vergrabenen PM



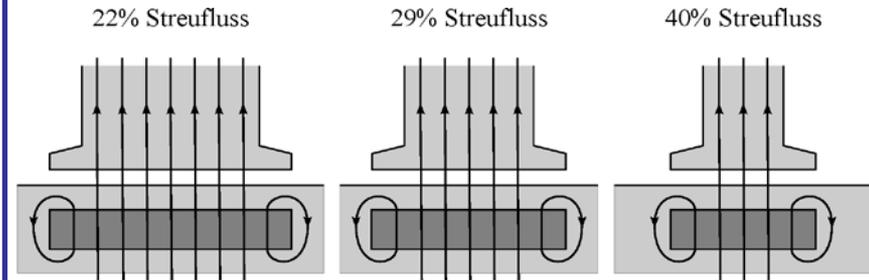
Fliehkraftbelastung der Stege



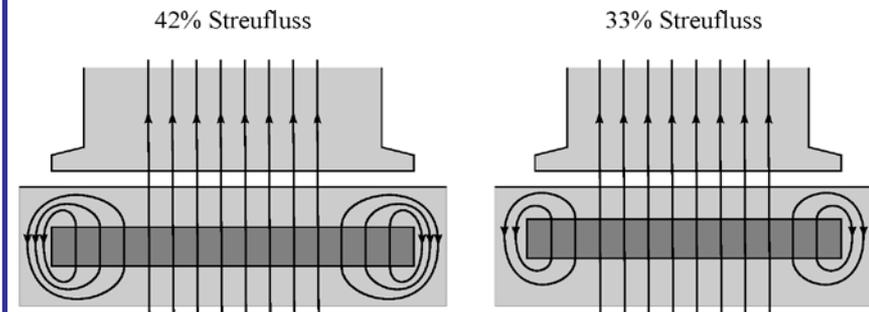
Stegbreite bei vergrabenen PM



Einfluss der Magnetbreite

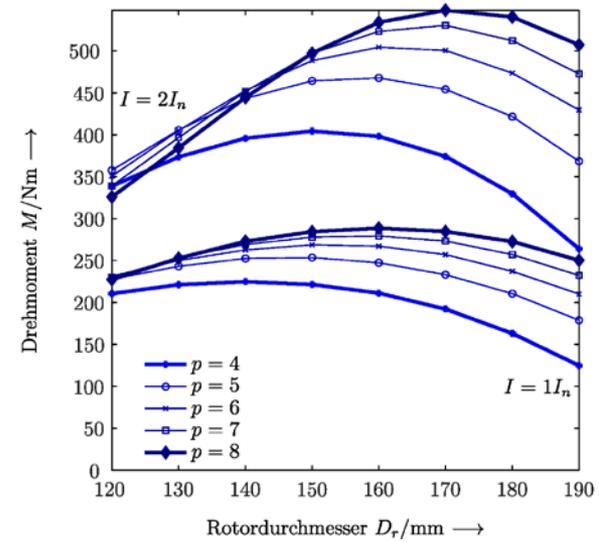
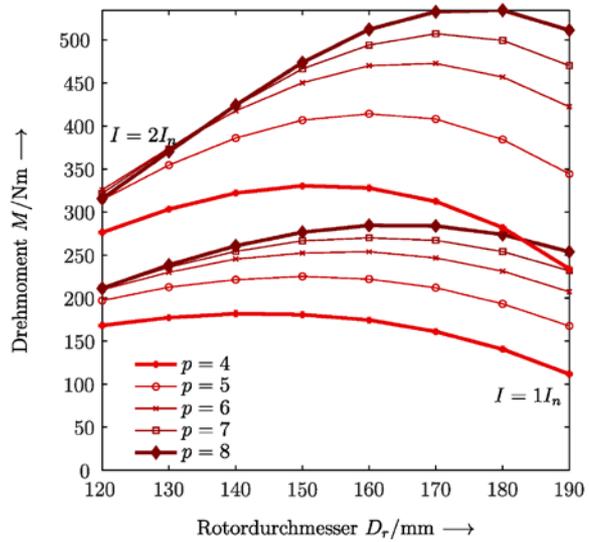


Einfluss der Stegbreite

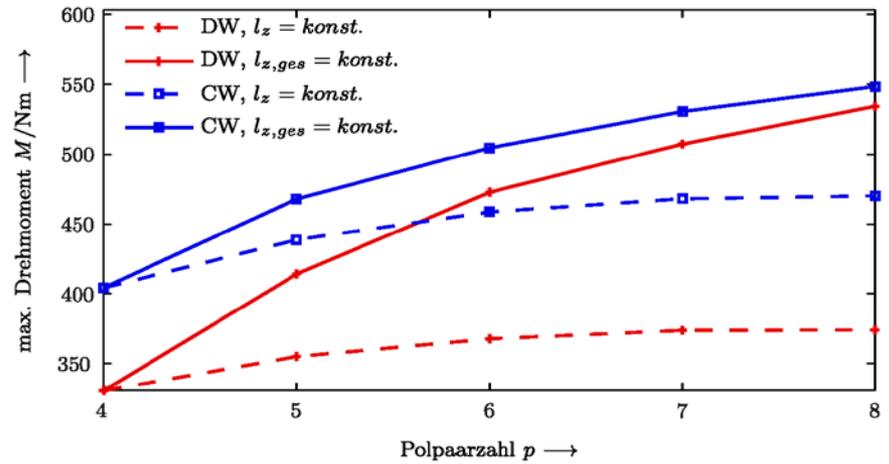




Drehmoment in Abhängigkeit vom Rotordurchmesser (Parameter: Polpaarzahl)

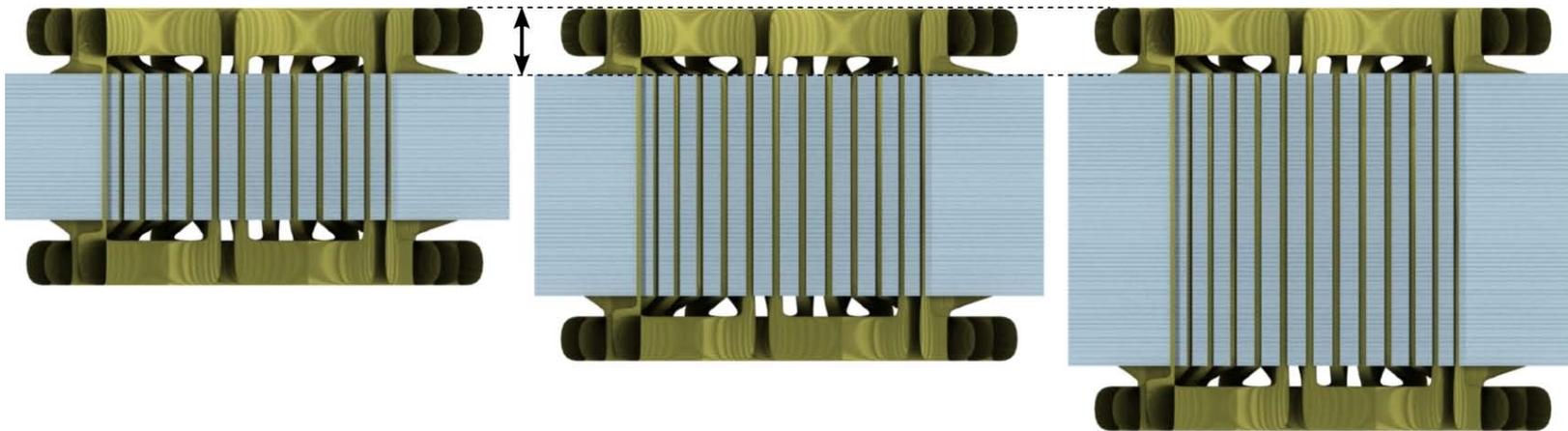


Maximales Drehmoment in Abhängigkeit von der Polpaarzahl

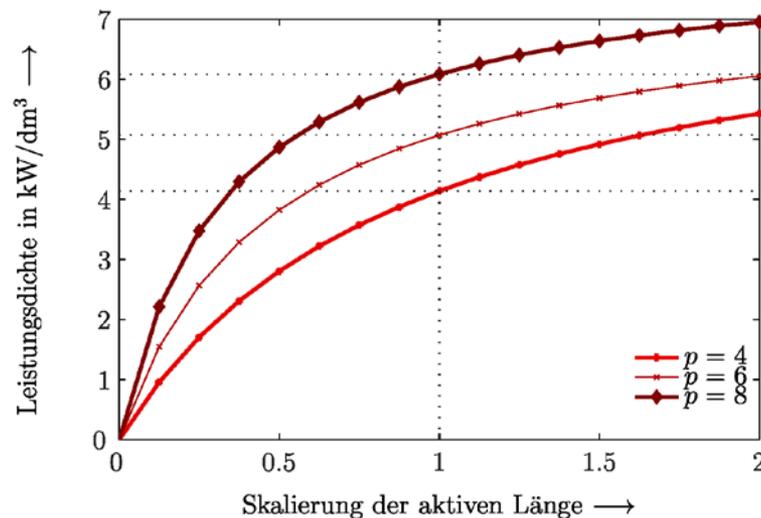
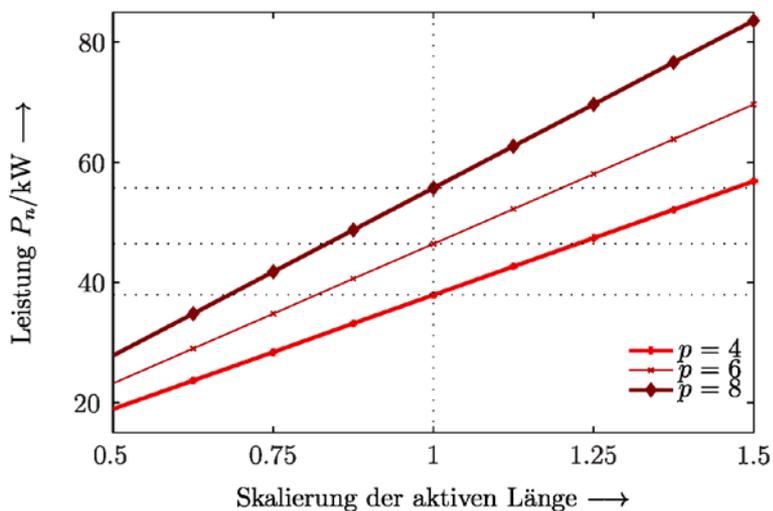




Längenskalierung



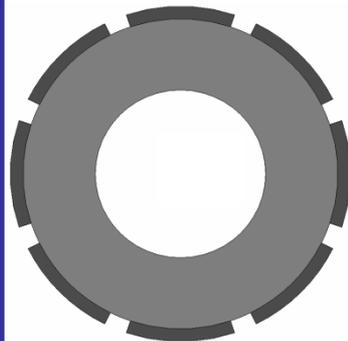
Einfluss der Längenskalierung



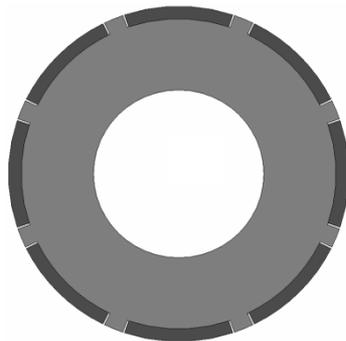


Rotorbauform

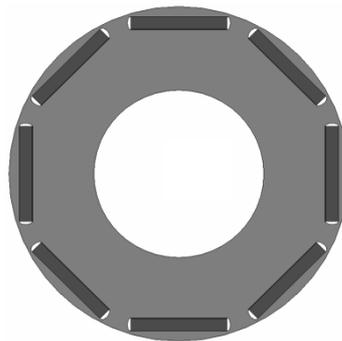
PM-oben



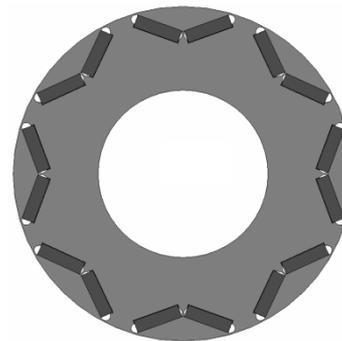
PM-eingelassen



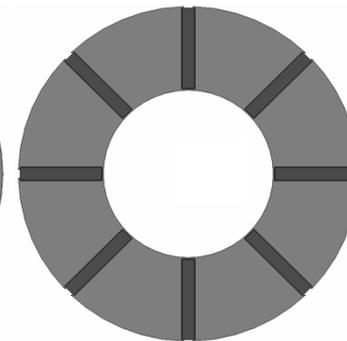
PM-vergraben



PM-vergrabenV



PM-sammler



Einfluss der Rotorbauform auf die Feldschwächbarkeit

	oben		eingelassen		vergraben		vergrabenV		sammler	
	p=4	p=8	p=4	p=8	p=4	p=8	p=4	p=8	p=4	p=8
Windungszahl w	34	11	31	11	29	11	27	12	29	9
Nennstrom I_n (A)	48	75	53	77	56	67	55	65	45	82
L_d bei I_n (mH)	3,07	0,62	2,49	0,58	2,74	0,72	2,51	0,90	4,34	0,41
L_q bei I_n (mH)	3,46	0,71	5,19	1,22	6,28	1,67	6,58	2,21	7,06	0,62
L_q / L_d	1,1	1,1	2,1	2,1	2,3	2,3	2,6	2,5	1,6	1,5
n_{max} bei I_n (min^{-1})	4700	3000	5400	3200	6000	3500	6000	5000	6000	2700
n_{max}/n_n	2,35	1,50	2,70	1,60	3,00	1,75	3,00	2,50	3,00	1,35

Wicklungsdaten und Feldschwächbarkeit bei $n_n=2000\text{min}^{-1}$ (DWq2)



Einfluss der Wicklungsauslegung auf den Wirkungsgrad

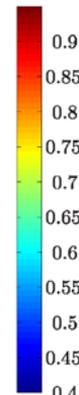
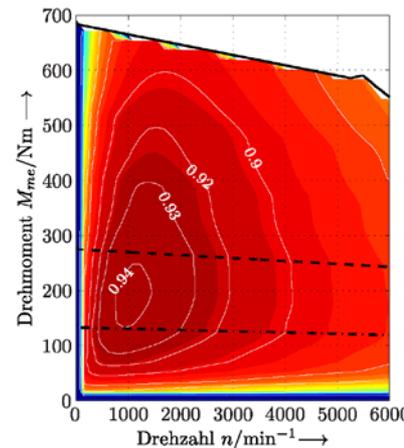
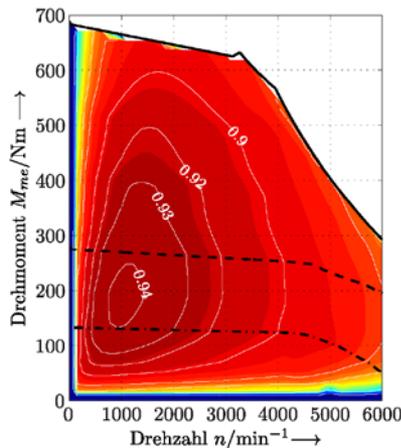
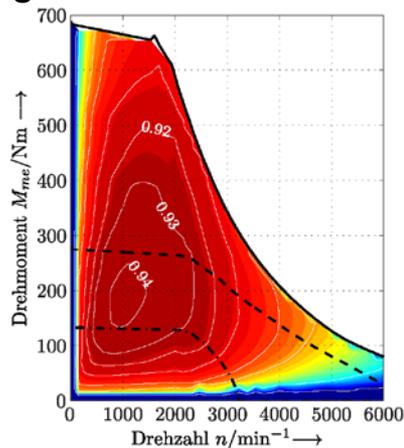
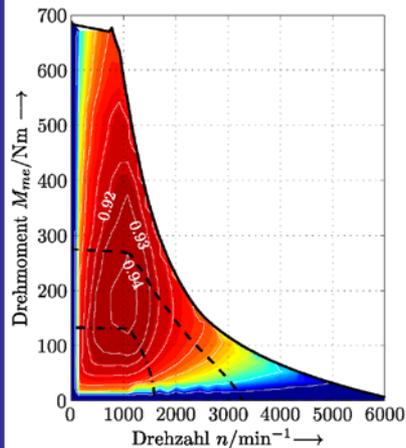
$n_n=1000\text{min}^{-1}$

$n_n=2000\text{min}^{-1}$

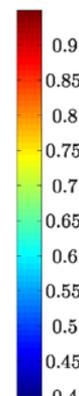
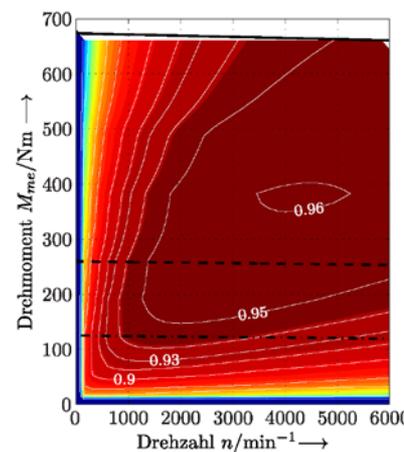
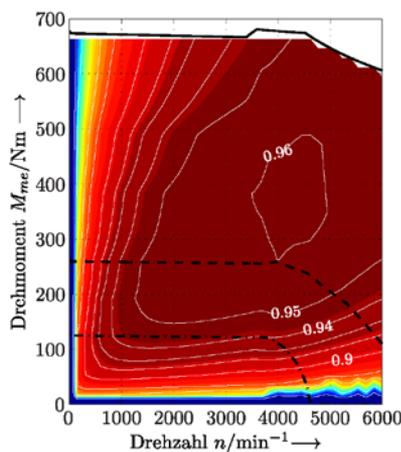
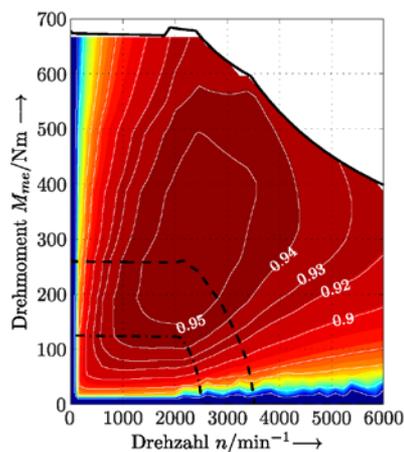
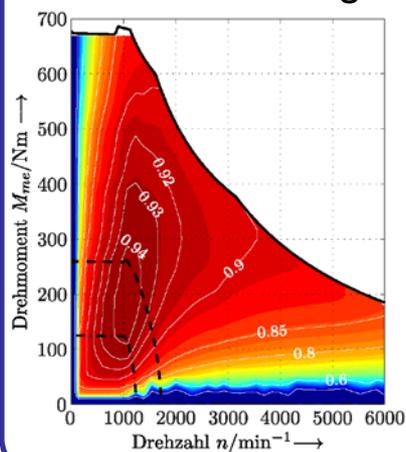
$n_n=4000\text{min}^{-1}$

$n_n=8000\text{min}^{-1}$

Konzentrierte Wicklung

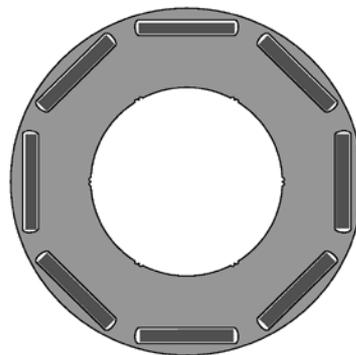
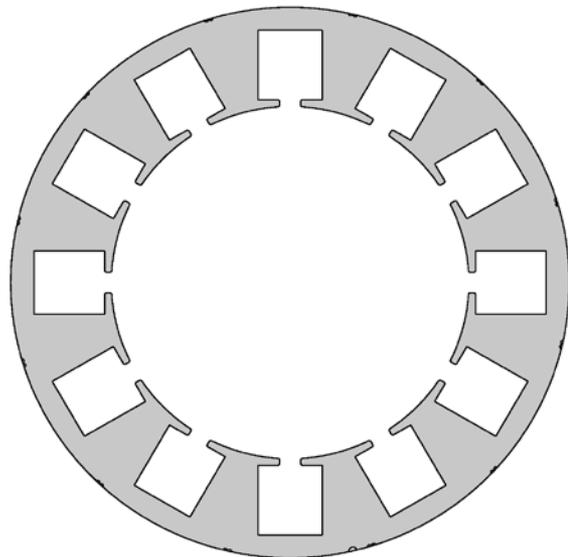


Verteilte Wicklung

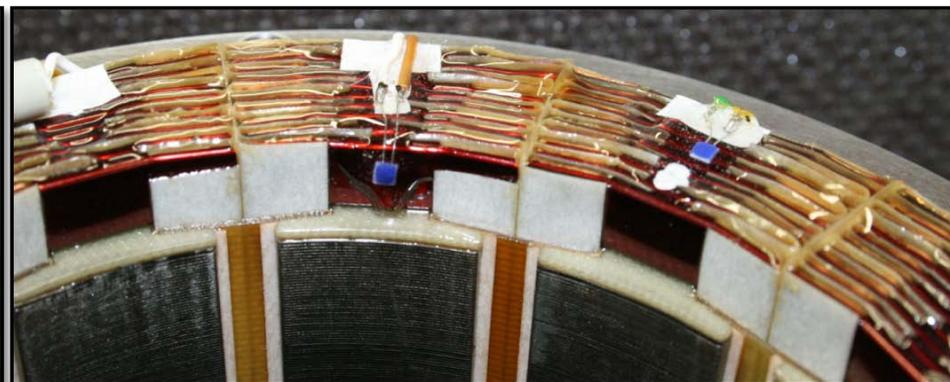
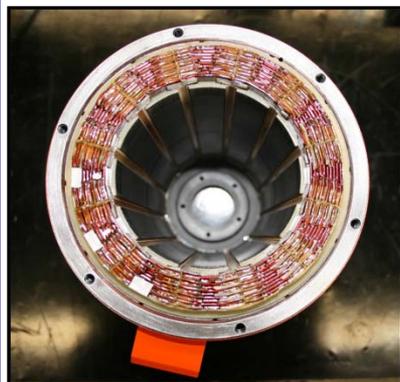




Blechschnitt und Gehäuse

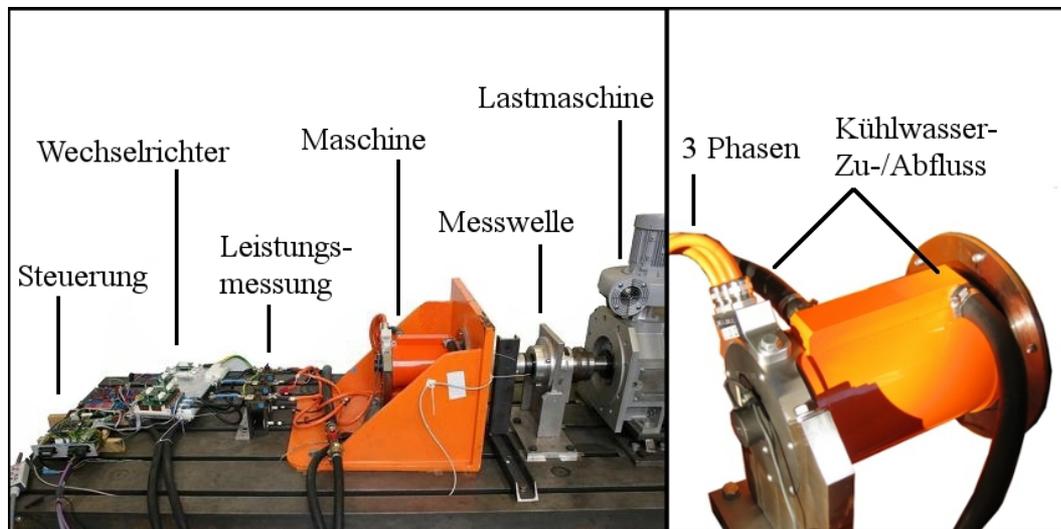


Prototyp

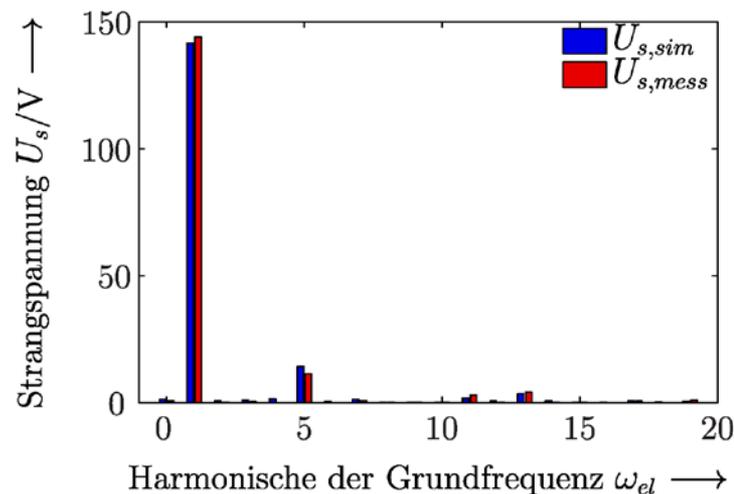
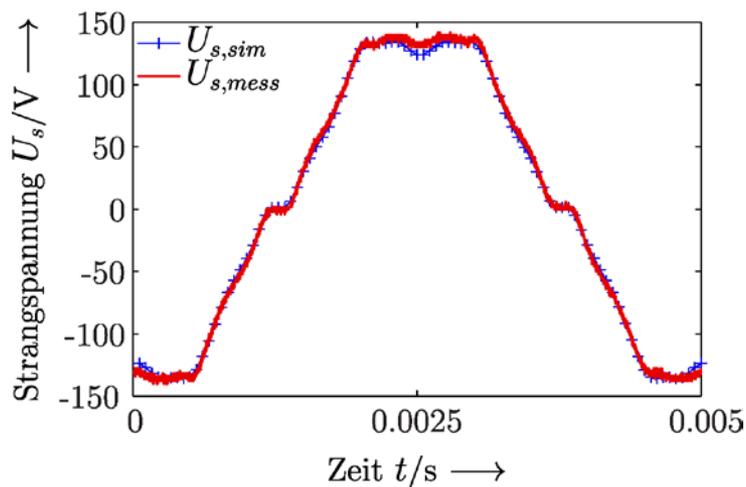




Prüfstands-aufbau

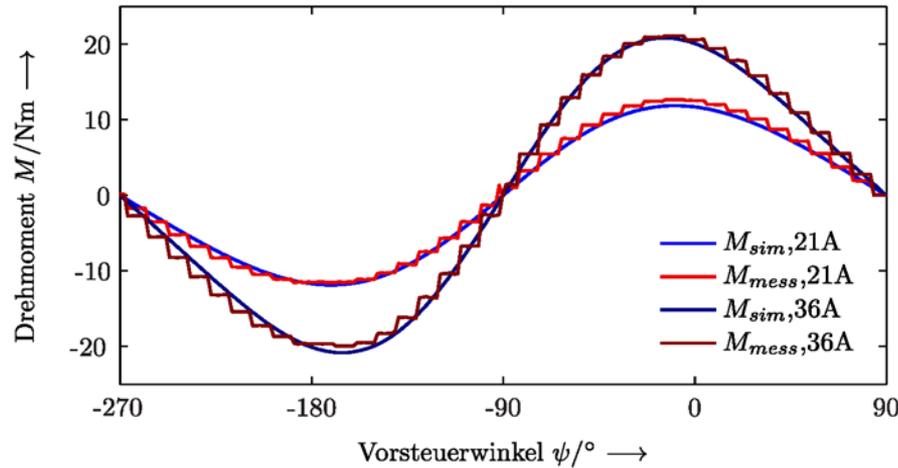


Leerlauf





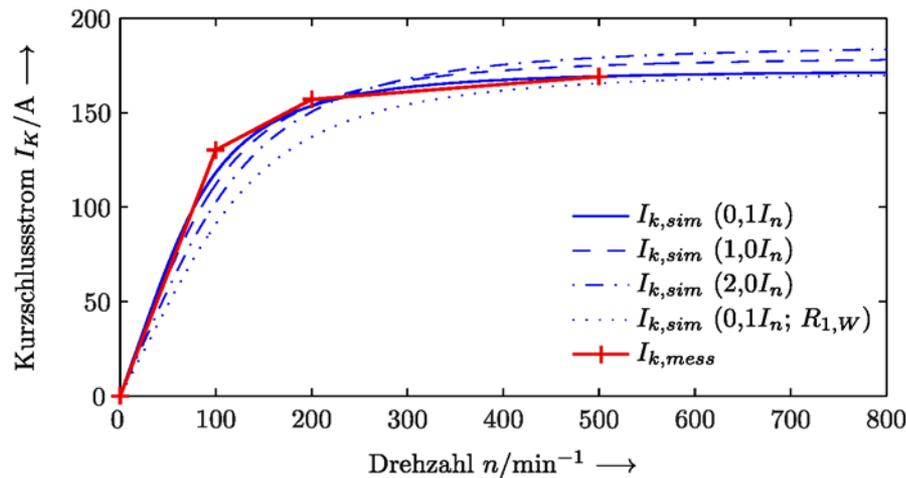
„Locked Rotor – Test“



		$I = 21 \text{ A}$		
		$M_{syn}(\text{Nm})$	$M_{rel}(\text{Nm})$	$\psi_{opt}(\text{°el.})$
Simulation		11,70	0,98	-7,55
Messung		12,17	0,83	-9,16

		$I = 36 \text{ A}$		
		$M_{syn}(\text{Nm})$	$M_{rel}(\text{Nm})$	$\psi_{opt}(\text{°el.})$
Simulation		20,09	2,83	-14,30
Messung		20,32	2,56	-13,07

Kurzschluss



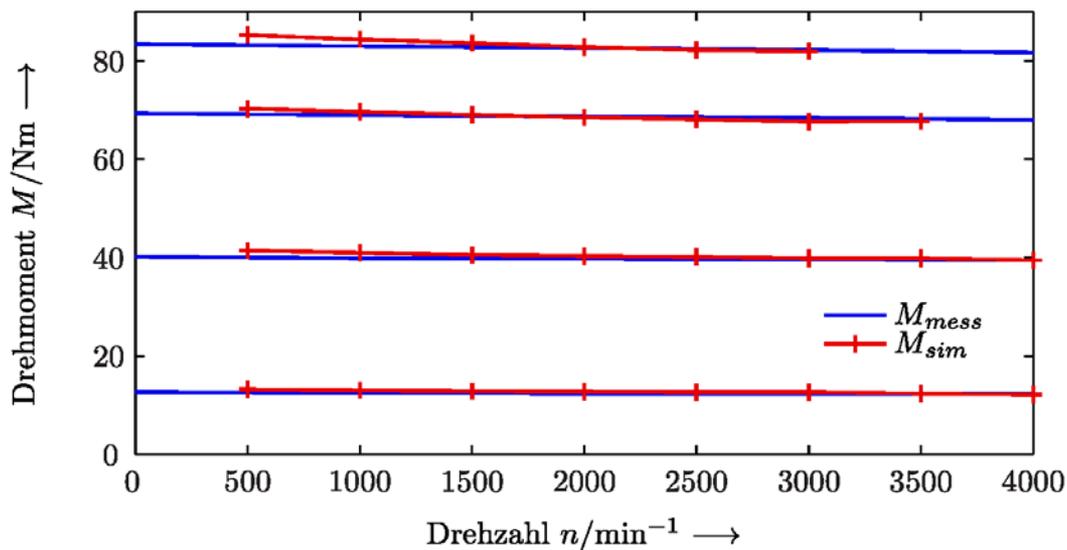
		I/I_n				
		0,1	0,5	1	1,5	2
L_d (mH)		0,29	0,29	0,26	0,24	0,22
L_q (mH)		0,68	0,57	0,52	0,44	0,42
Ψ_{pm} (mVs)		86,7	85,0	80,7	75,7	70,5

$$R_{1,W} = 22 \text{ m}\Omega$$

$$R_{1,K} = 15 \text{ m}\Omega$$



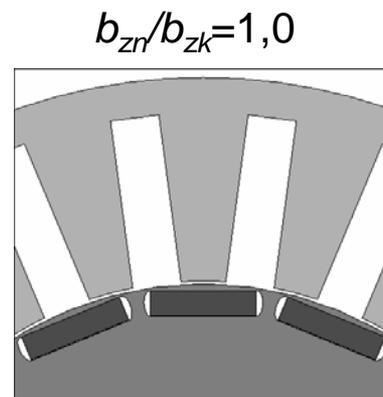
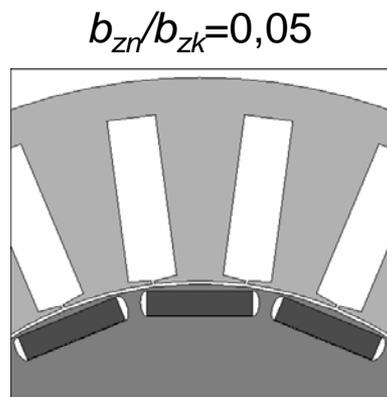
Lastmessung



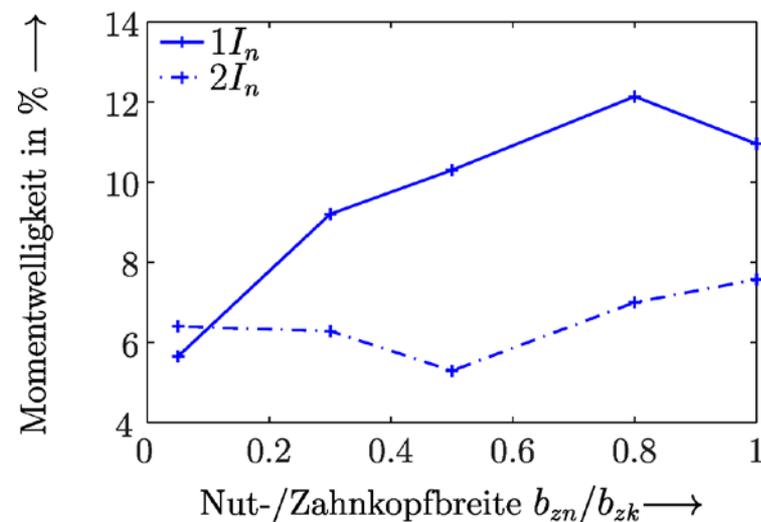
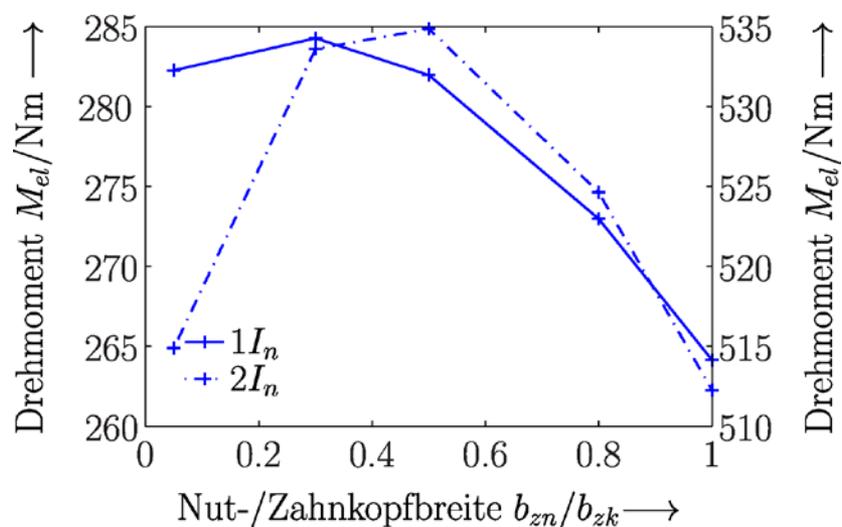
n (min^{-1})	$I = 24 \text{ A}$		$I = 71 \text{ A}$		$I = 116 \text{ A}$		$I = 140 \text{ A}$	
	M_{mess}	M_{sim}	M_{mess}	M_{sim}	M_{mess}	M_{sim}	M_{mess}	M_{sim}
1000	12,97	12,37	40,95	39,85	69,62	68,76	84,32	83,51
2000	12,72	12,33	40,27	39,75	68,51	68,68	82,81	83,30
3000	12,62	12,29	39,84	39,64	67,62	68,36	81,96	82,86
4000	12,14	12,25	39,42	39,52	-	67,98	-	82,34
max. Abweichung	4,7 %		2,7 %		1 %		1,6 %	
min. Abweichung	0,9 %		0,1 %		0,2 %		0,2 %	



Variation der Zahnkopfbreite

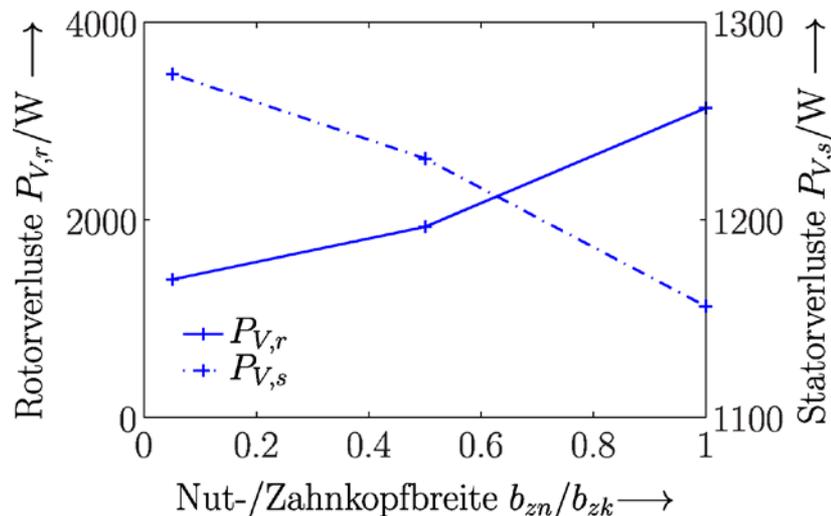


Einfluss der Zahnkopfbreite

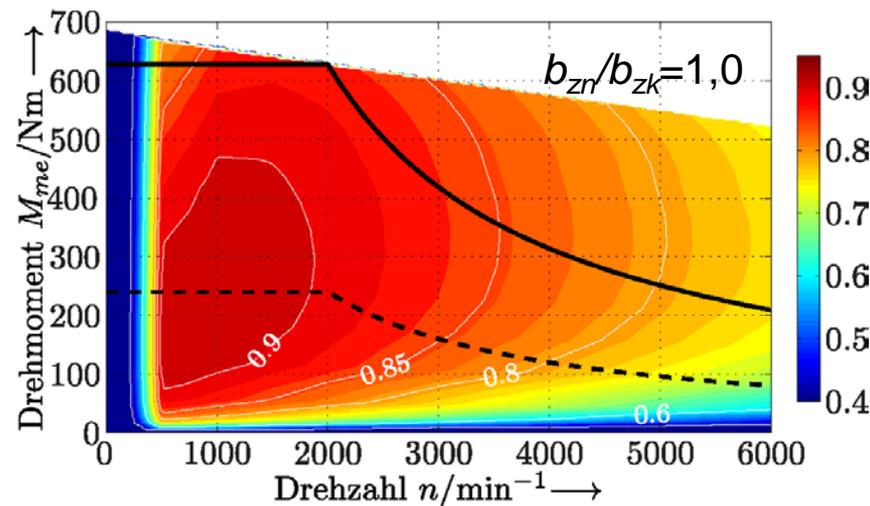
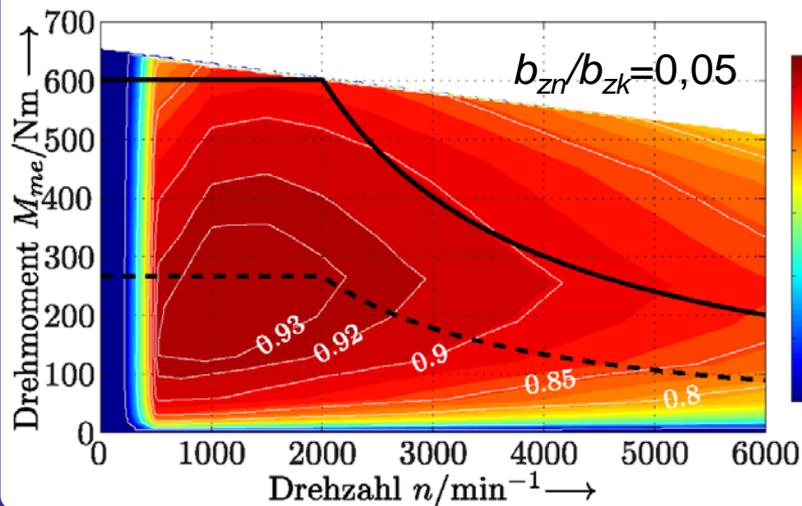




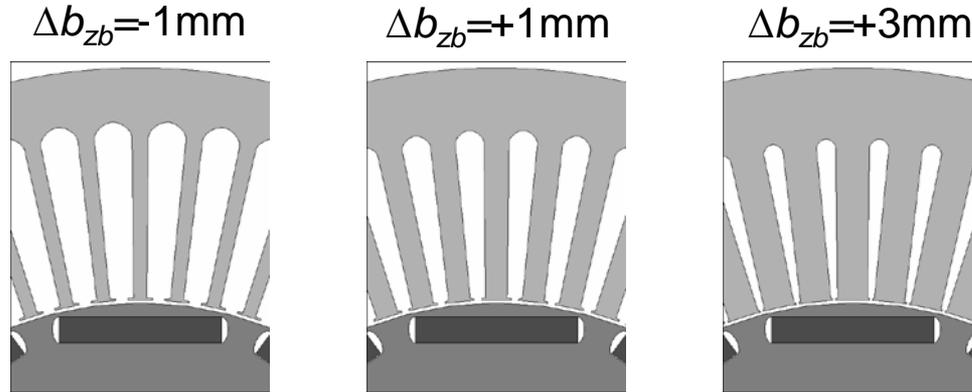
Variation der Zahnkopfbreite



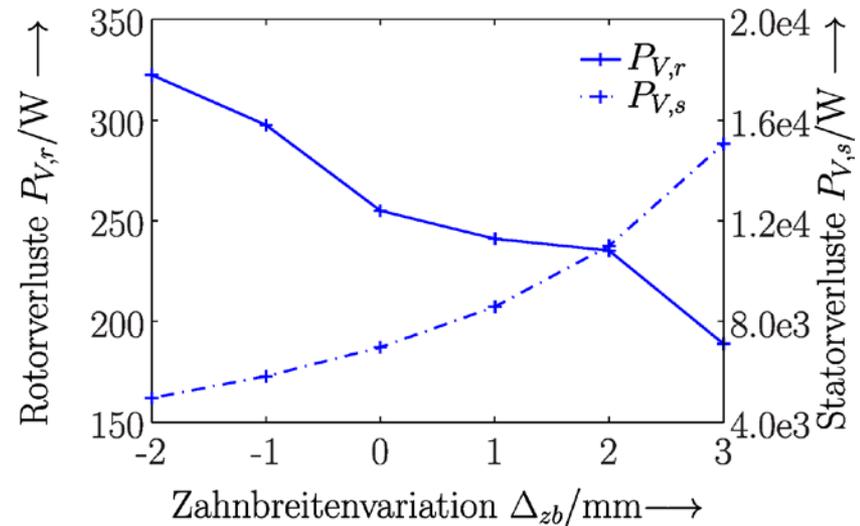
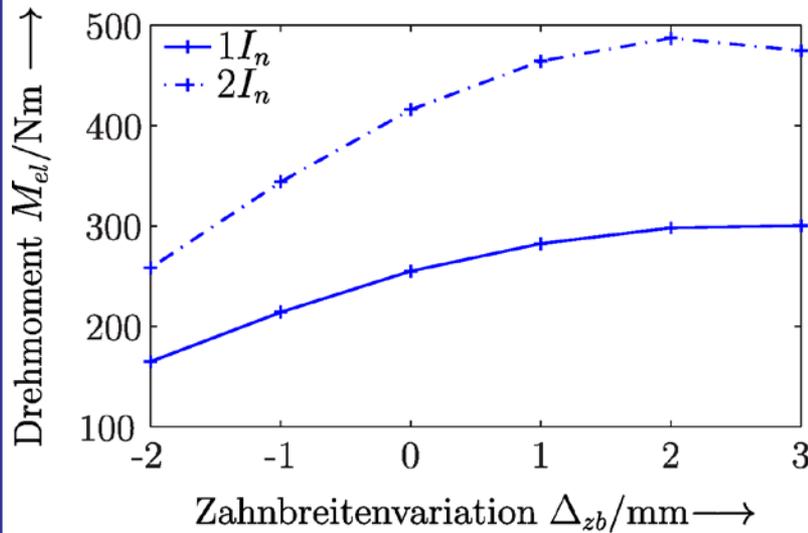
Einfluss der Zahnkopfbreite auf den Wirkungsgrad



Variation der Nutfläche und Zahnbreite

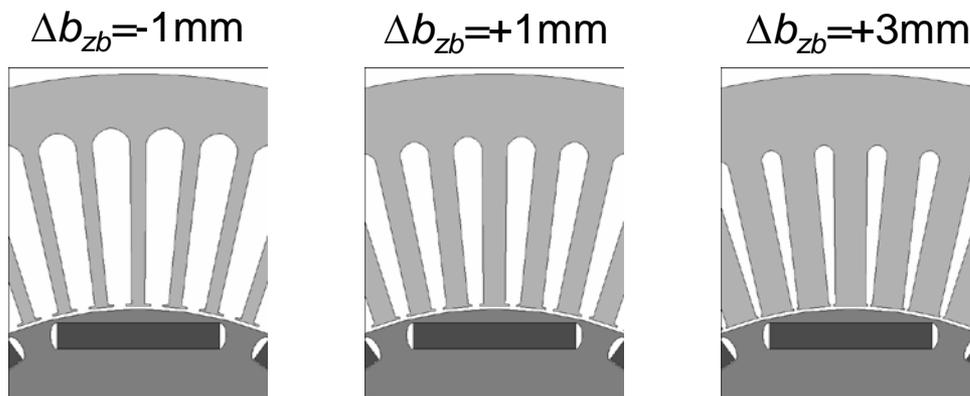


Einfluss der Nutfläche





Variation der Nutfläche und Zahnbreite



Einfluss der Nutfläche auf den Wirkungsgrad

