

Advanced Electric Motor Technologies

**Topologische Optimierung von Permanentmagnet-
und Reluktanz- Synchronmotoren mit FEMAG**

Milorad RISTICEVIC, PD Dr.-Ing. Andreas MÖCKEL - TU Ilmenau

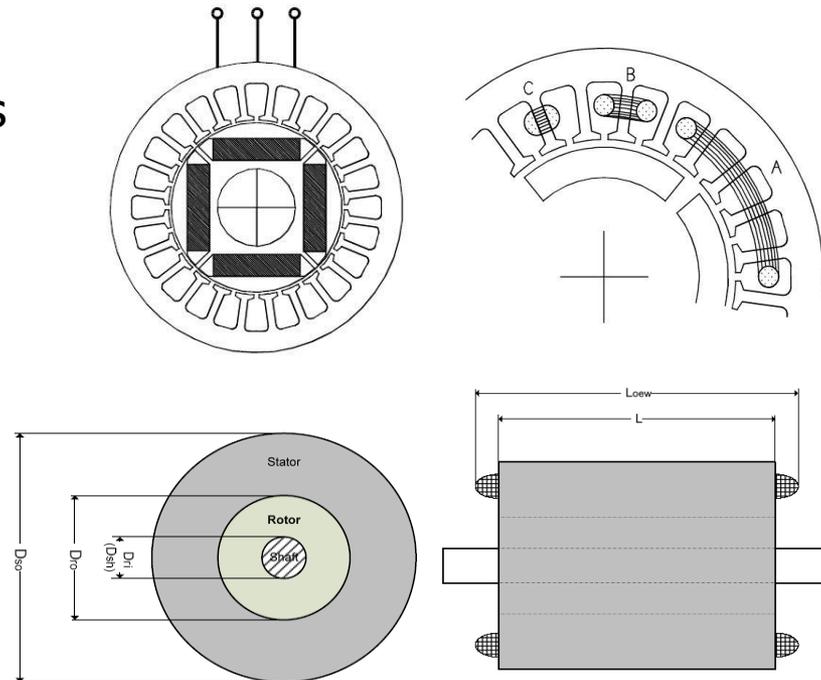
Maximilian PILZ, Stefan PAINTNER, Dr.-Ing Dorin ILES – ILES Engineering

Inhalt

- Erfahrungsbasierte Motorauslegung (Stand der Technik)
- Topologische Motorauslegung
- Optimierungsalgorithmen / Klassifizierung / Funktionsweise
- Topologische Optimierung mit FEMAG / Workflow
- Topologische Auslegung / Optimierung am Beispiel
 - PMSM
 - SRM
- Fazit

Auslegungsprozess

- Topologische Strukturierung
 - Richtung des Luftspaltfeldes
 - Aussen bzw. Innenläufer
 - Strang-, Nut-, Polzahl
 - „Formung“
- Bemessung
 - „Key Design Größen“
- Materialwahl



Motorauslegung ist ein heuristischer Prozess

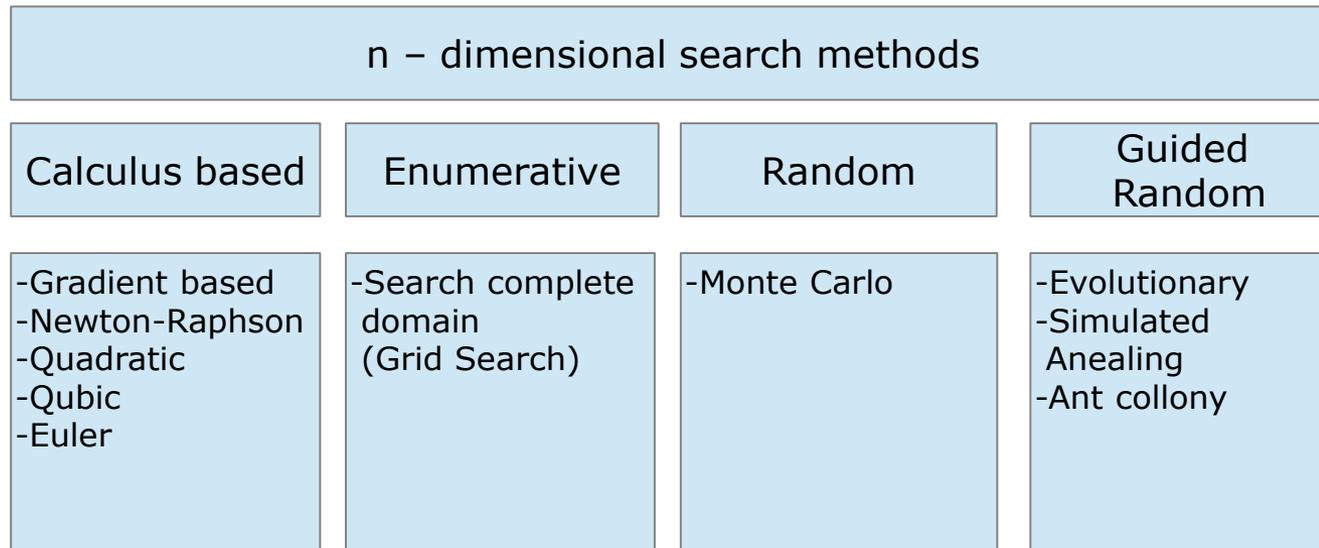
Topologische Auslegungsmethode

- Auslegung übernehmen Algorithmen
- Findung einer geeigneten Topologie innerhalb eines automatisiertem Prozesses
- Optimierung durch Erzeugung und Verteilung von Material / Materialeigenschaften im festgelegten Gebiet

Auslegung / Optimierung in freier Form

Wahl der Suchalgorithmen

■ Grobe Klassifikation der Suchalgorithmen



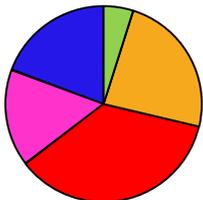
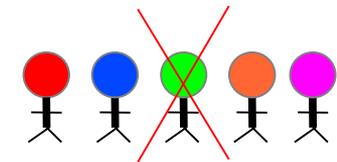
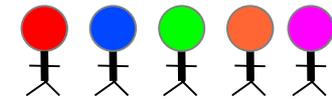
Guided Random search methods

Genetische Algorithmen

- John Holland
 - Simulation natürlicher Selektionsprozesse
 - Suchraum zu groß oder zu komplex
 - Überleben des Stärksten / Besten
 - Kriterium: Zielfunktion(en)
 - Ergebnispräsentation
 - Phentyp (Bildlich, Anschaulich)
 - Genotyp (Sachlich, algorithmisch)

Operatoren und Begriffe

- Gen, Chromosom, Individuum
- Generation / Population (Startpopulation)
 - Gesamtzahl von konturierender Individuen
- Selektion / Reproduktion
 - „Roulette – Wheel – Selection“



$$\bar{\mathcal{F}} = \sum_{i=1}^n \mathcal{F}_i$$

Operatoren und Begriffe

■ Kreuzung

- Kombination von Chromosomen



■ Mutation

- Zufällige Veränderung des Chromosom

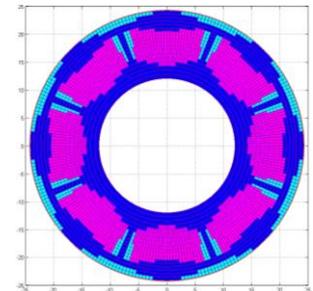
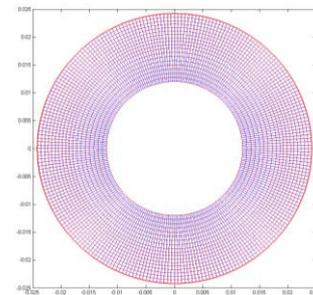
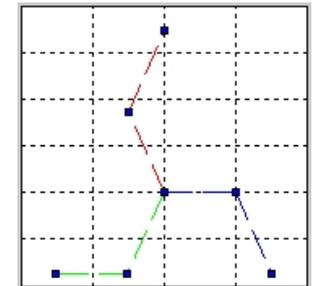
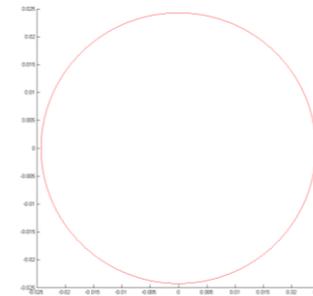
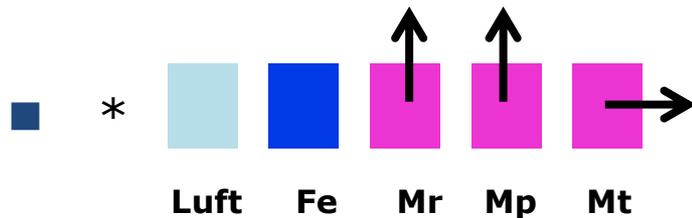


■ Elitismus

- Ewiges Leben des Besten

Topologiegenerierung

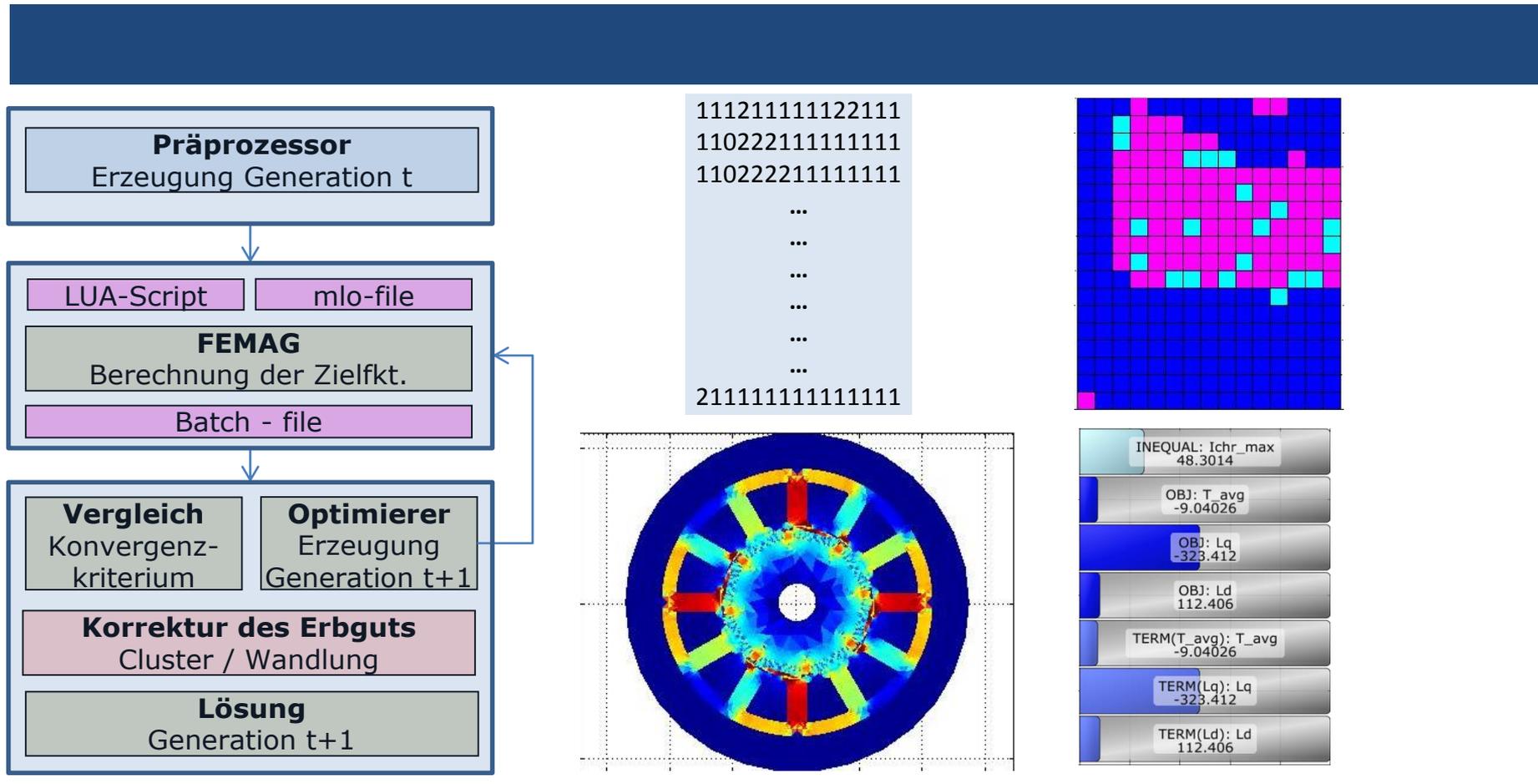
- Abmessungen des Gebiets / Teilgebiets
- Diskretisierung
- Strang-, Nut- und Polzahl
- Materialbelegung (0,1,2,3,4)*
- Kodierung



Ind₁=00000000001111101000300003003333333333311010100311111111111111111000000000000000

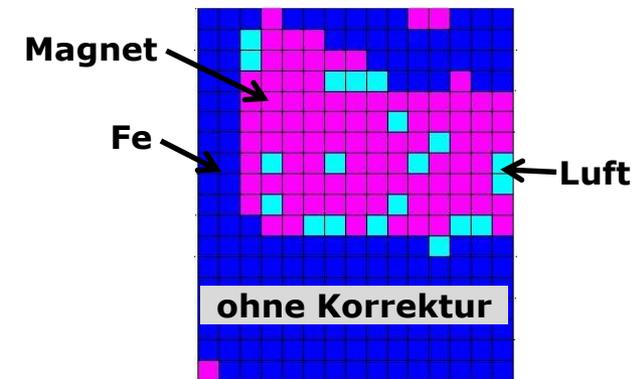
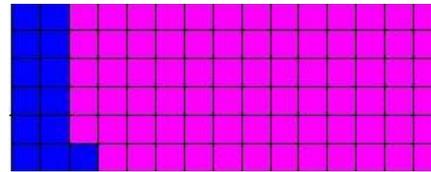
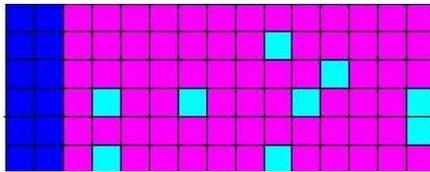
...

Workflow Auslegung/Optimierung (Schematisch) TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU

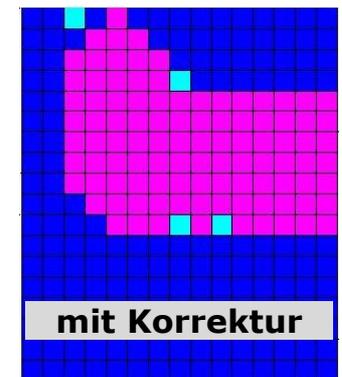


Erbgutkorrektur

- Löcher (mind. Nachbarzahl ≥ 3)

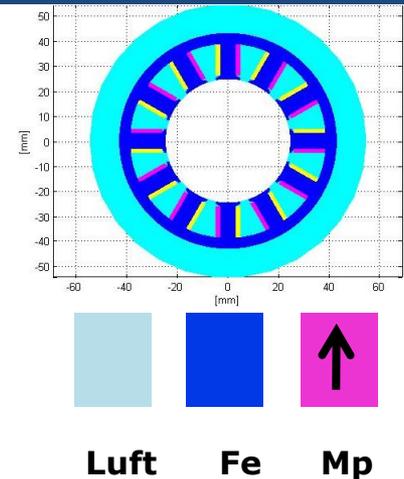


- Schwebende Flächen



Topologische Auslegung/Optimierung PMSM

- Stator: $m=3$, $n=12$, 2 Schicht Wicklung
- DSO / DRO: 80mm / 48.5mm
- Magnetisierung/Orientierung: Parallel

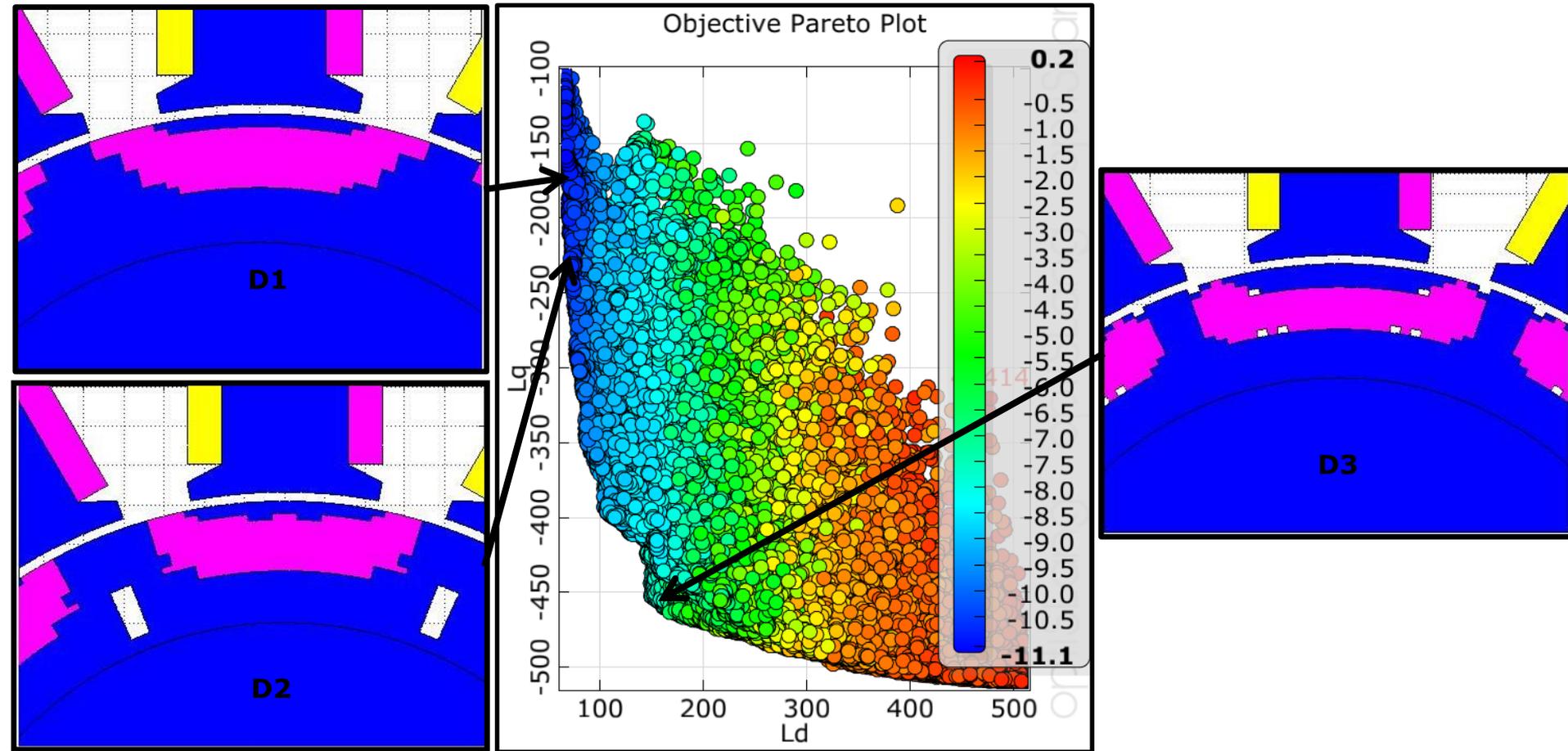


- Beschränkung auf topologische Rotorauslegung / Optimierung
- T max & bei guter feldschwächbarkeit
- Ziele: T_{avg} , L_{min} , L_{max}

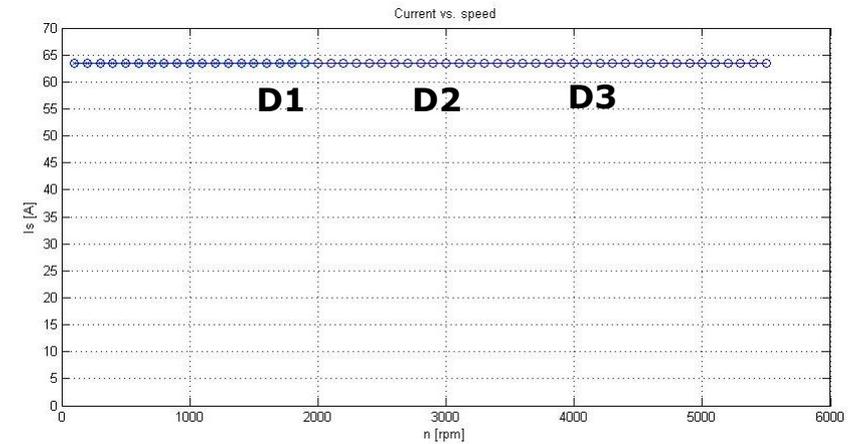
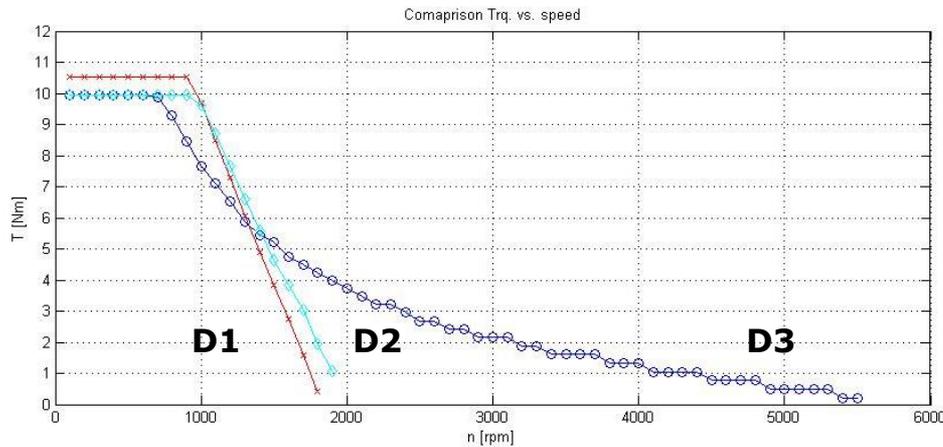
Topologische Auslegung/Optimierung PMSM

- Optimierer (Pareto Optimierung auf Basis genetischer Algorithmen)
- Roulette Wheel; Cross Over 4%; Mutation 8%
- 15 tangential x 18 radial → 4320 Elemente im Rotorgebiet
- Netzelemente: 12000
- 30 Schritte / Rechnung
- Generationsgröße: 100 Individuen
- Anzahl Designs: ca. 80000
- Anzahl der Generationen: entspricht ~800 Generationen
- Berechnungszeiten (Rechenzeit): 3-6min / 40-80h / 1.5-3.5Tage
- HPC-Cluster mit 100 CPU's

Topologische Auslegung/Optimierung PMSM



Topologische Auslegung/Optimierung PMSM

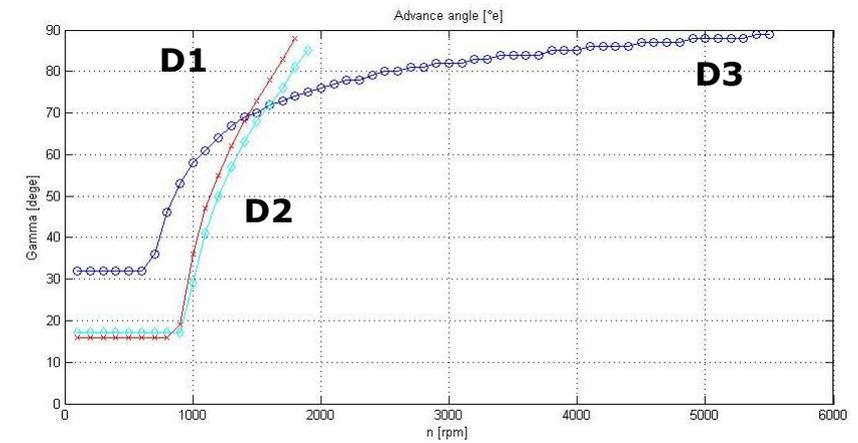


■ D1 & D2

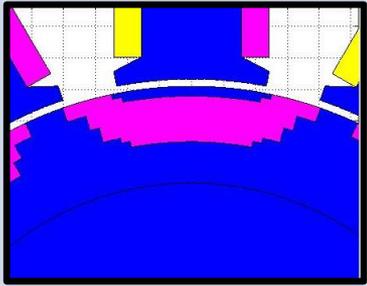
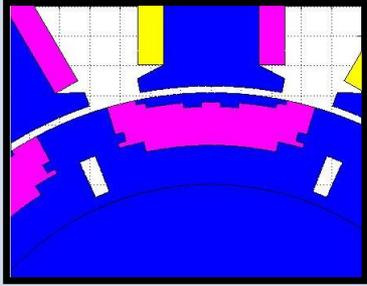
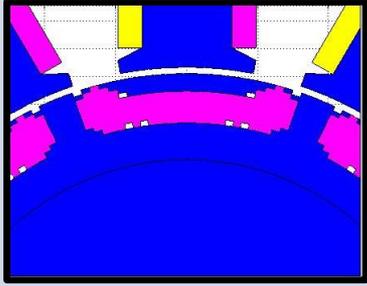
- hohes Drehmoment bei weniger Windungen
- höhere Kennliniensteilheit
- Eckfrequenz bei höherer Drehzahl

■ D3

- höheres Reluktanzmoment
- günstiges characteristic current
- höhere Leerlaufdrehzahlen



Topologische Auslegung/Optimierung PMSM

	Design 1	Design 2	Design 3
Querschnitt			
DRO / DSO	0.6	0.6	0.6
Wdg. / Coil	13	13	18
Curr nom. [Apk]	90	90	90
Advance Ang. [°el]	20	20	35
Lmin / Lmax [µH]	70 / 160	75 / 180	130 / 400
Trg. avg. [Nm]	10	10.5	10
Char. curr. [A]	220	200	140
Magnetel. [-]	102	96	96

Topologische RSM-Optimierung

Zielsetzung

Idee basierend auf einer Zusammenarbeit mit



Ziel dieser Zusammenarbeit:

- Suche nach Alternativen für die IEC-Asynchronbaureihe

Ansatz dieses Fallbeispiels:

- Parametrische Optimierung
- Basis: IEC-90/4-polige Normgeometrie

Idee:

- Topologische Optimierung basierend auf diesem Ansatz

Topologische RSM-Optimierung

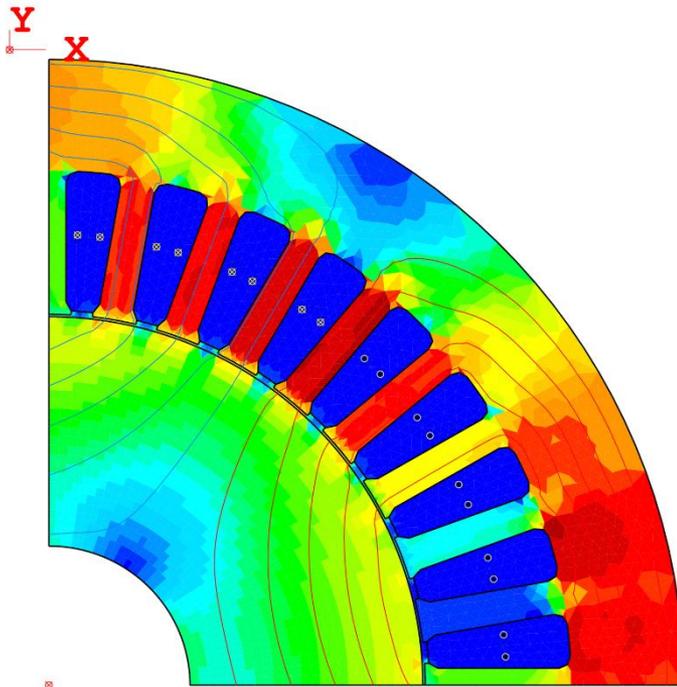
Ausblick

Ursprünglicher Ansatz:

- Erfahrungsbasiert
- Flussführung orientiert am Fluss der sich in einem vollen Rotor ergibt

Ziel:

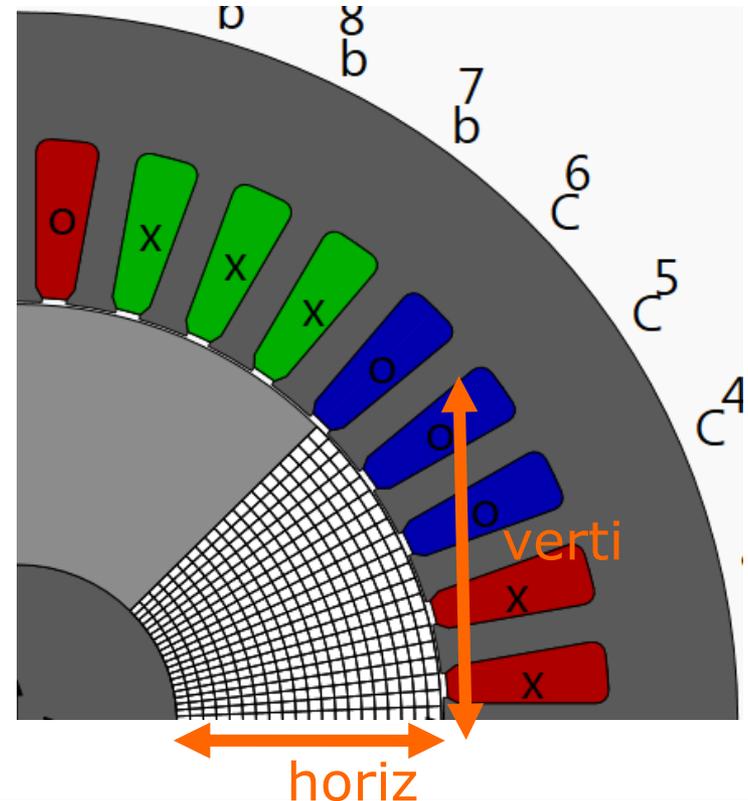
- Unvoreingenommenes Design
- Neue Ideen und Inspiration



Topologische RSM-Optimierung

Vorgehen und Randbedingungen

- Einsatz von genetischen Algorithmen
- Ausgangsbasis: Stator der IEC-Baureihe; Baugröße 90/4-polig
- Aufteilung in horiz*verti (radial*tangential) Elemente
- Reine Betrachtung des Reluktanz-Effekts (keine Platzierung von Magnetmaterial)
- Berücksichtigung von Symmetrien (halbe Polteilung)



Topologische RSM-Optimierung

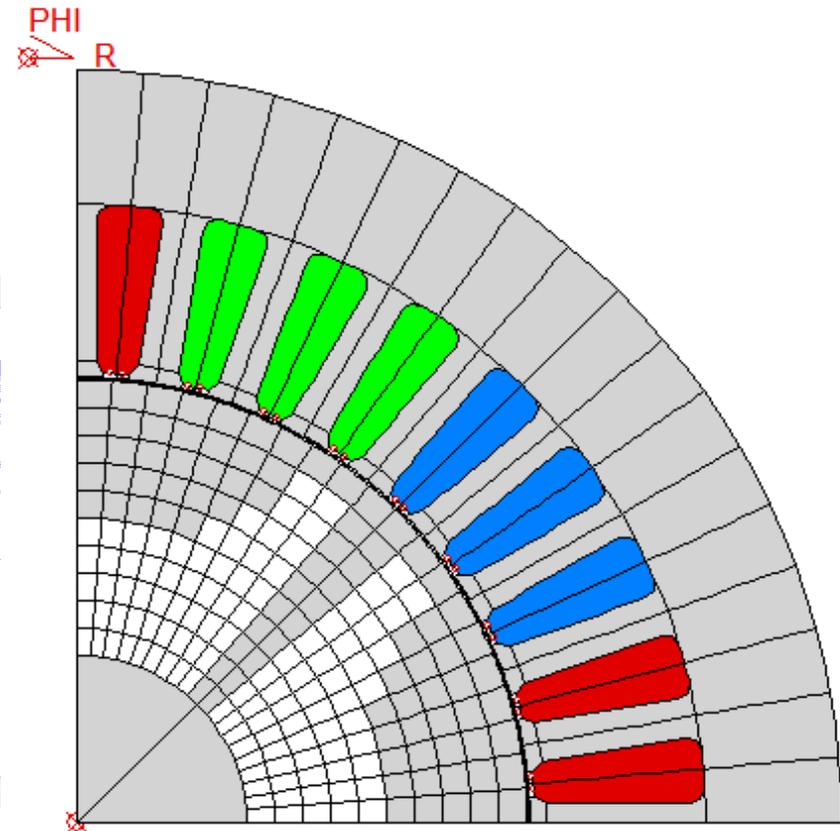
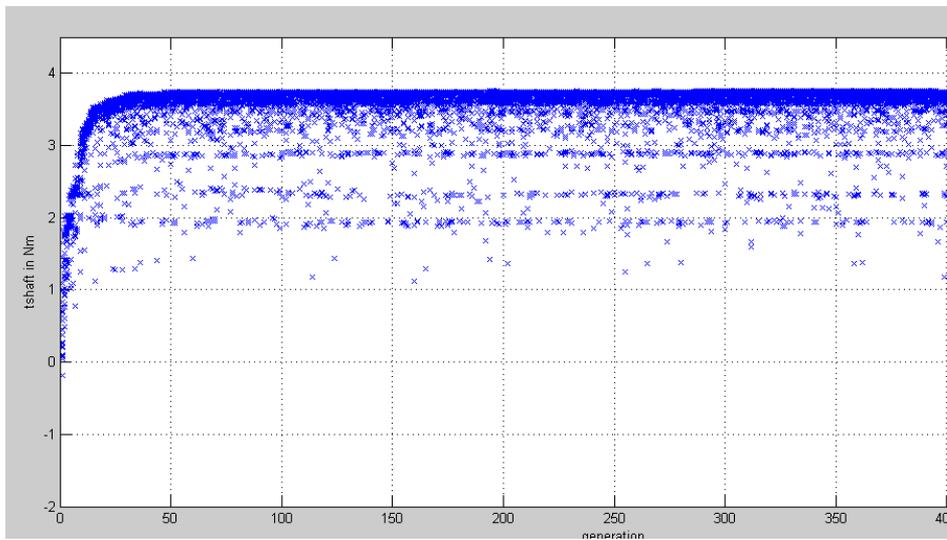
Initiale Fragestellungen

- Wie viele Individuen pro Generation?
- Wie viele Elemente in horizontaler, wie viele Elemente in vertikaler Richtung?
- Wie viele Generationen?
- Wahrscheinlichkeit?
 - der Mutation?
 - der Kreuzung?
 - des Elitismus?
- Mutation ausschließlich während der Kreuzung?
- Heil- Algorithmen?

Topologische RSM-Optimierung

Ergebnisse

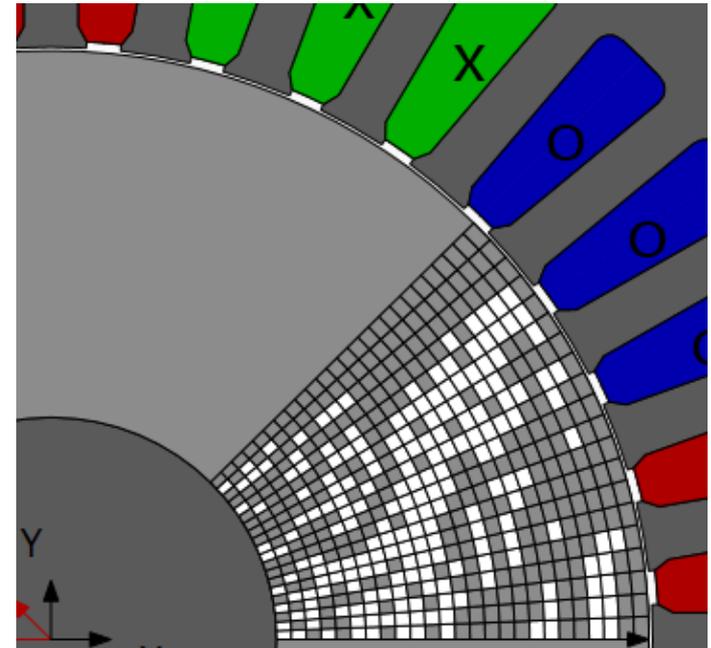
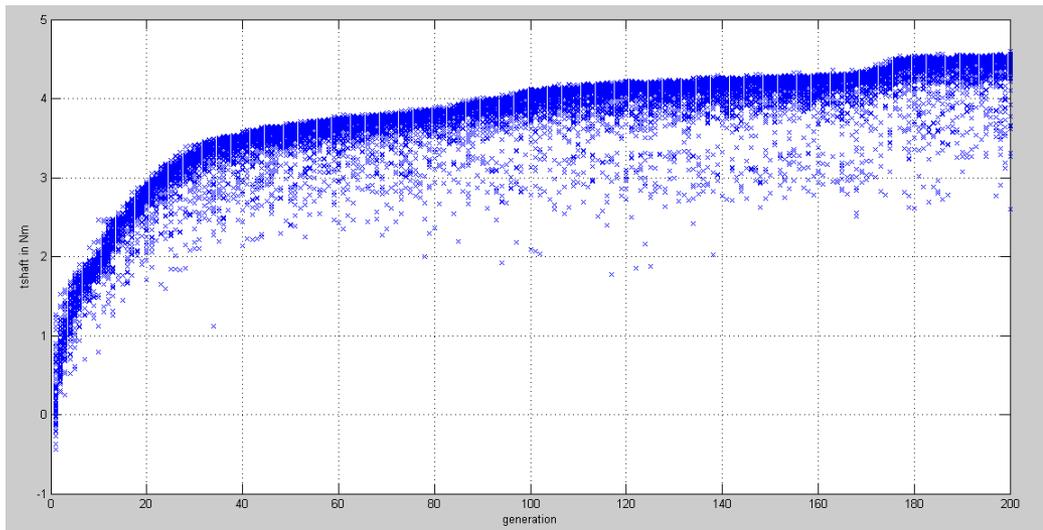
- $10 \times 10 = 100$ Rotorelemente
- 500 Generationen
- 200 Individuen pro Generation



Topologische RSM-Optimierung

Ergebnisse

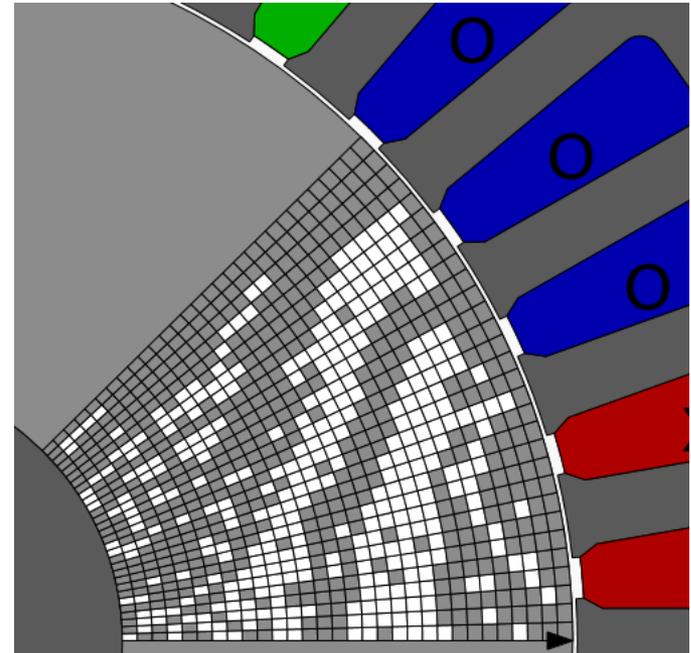
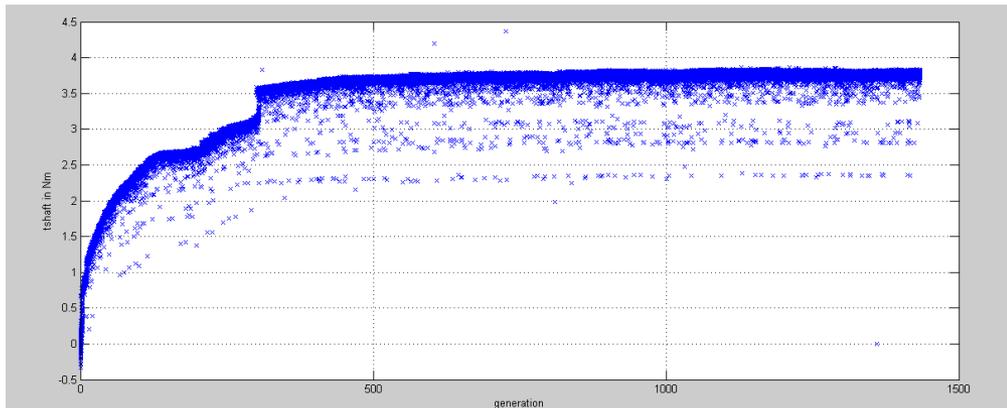
- 200 Generationen
- 100 Individuen pro Generation
- $25 \times 20 = 500$ Rotorelemente



Topologische RSM-Optimierung

Ergebnisse

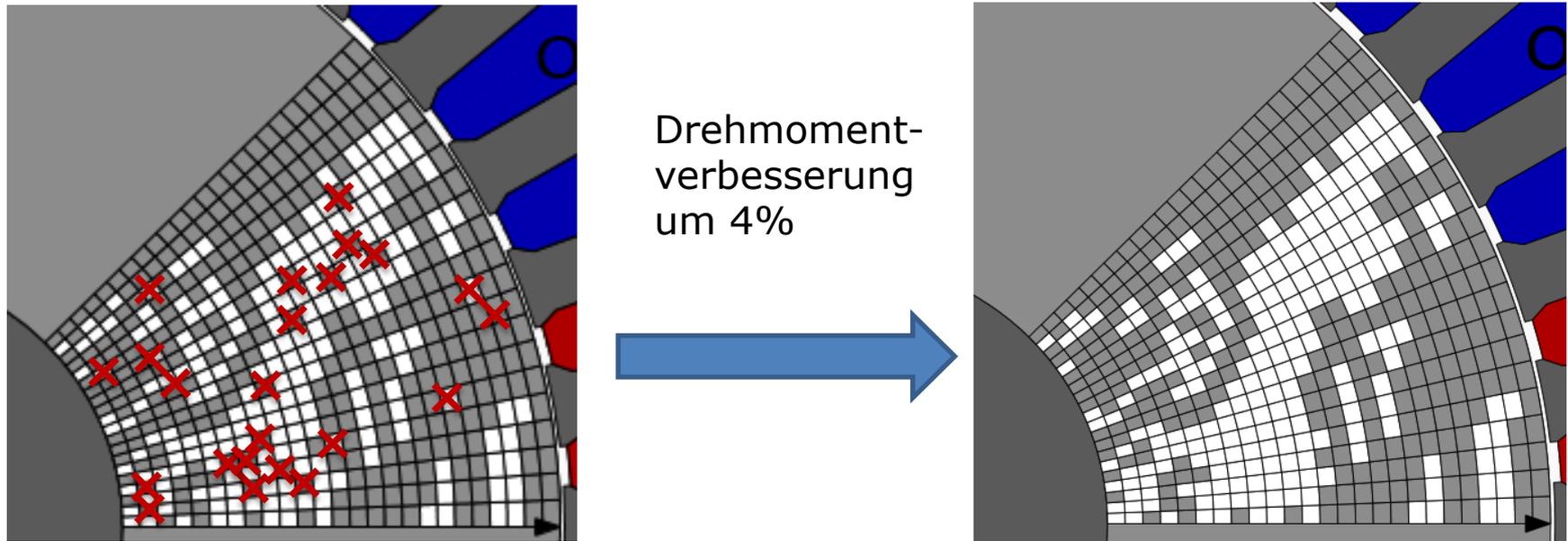
- 1400 Generationen
- 100 Individuen pro Generation
- $30 \times 30 = 900$ Rotorelemente



Topologische RSM-Optimierung

Einsatz von Heil Mechanismen

- Auswahl des Individuums welches das Zielkriterium am besten erfüllt
- Überprüfung der Geometrie auf Plausibilität (Selektion abhängig von den Nachbarelementen)



FAZIT:

- Topologische Optimierung:
 - Erweitert den Suchraum
 - Mögliche Freiform zur Überprüfung und Gewinnung von Ideen
 - Einsatz unterschiedlicher Materialien
 - Einschränkungen der Designgültigkeit (Genetische Korrektur)
 - Hoher Berechnungsaufwand
 - Berechnungsgüte bestimmt durch Diskretisierung
 - Wandlung in geometrische Darstellung empfehlenswert / notwendig
 - Gewichtungsfaktoren für unterschiedliche Ziele durch probieren

Quellen:

- [1] Takeo Ishikawa, Kouki Yonetake, and Nobuyuki Kurita; An Optimal Material Distribution Design of Brushless DC Motor by Genetic Algorithm Considering a Cluster of Material
- [2] Takeo Ishikawa and Kyoichi Nakayama; Topology Optimization of Rotor Structure in Brushless DC Motor With Concentrated Windings Using Genetic Algorithm Combined With Cluster of Material
- [3] W.L. Soong, "Theoretical Limitations to the Field-Weakening Performance of the Five Classes of Brushless Synchronous AC Motor Drives", *Proc. IEE Elec.Machines & Drives Conf, 1993*, Oxford, England, pp. 127-132.
- [4] T.M. Jahns, "Flux Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", *IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-23, no. 4, pp. 55-63, 1987.*
- [5] M.Risticevic, A.Möckel, D.Iles "Topologische Optimierungsverfahren für elektrische Maschinen", KMK 2013

VIELEN DANK!