

# „Automatisierte Motormodellerstellung mittels Python“

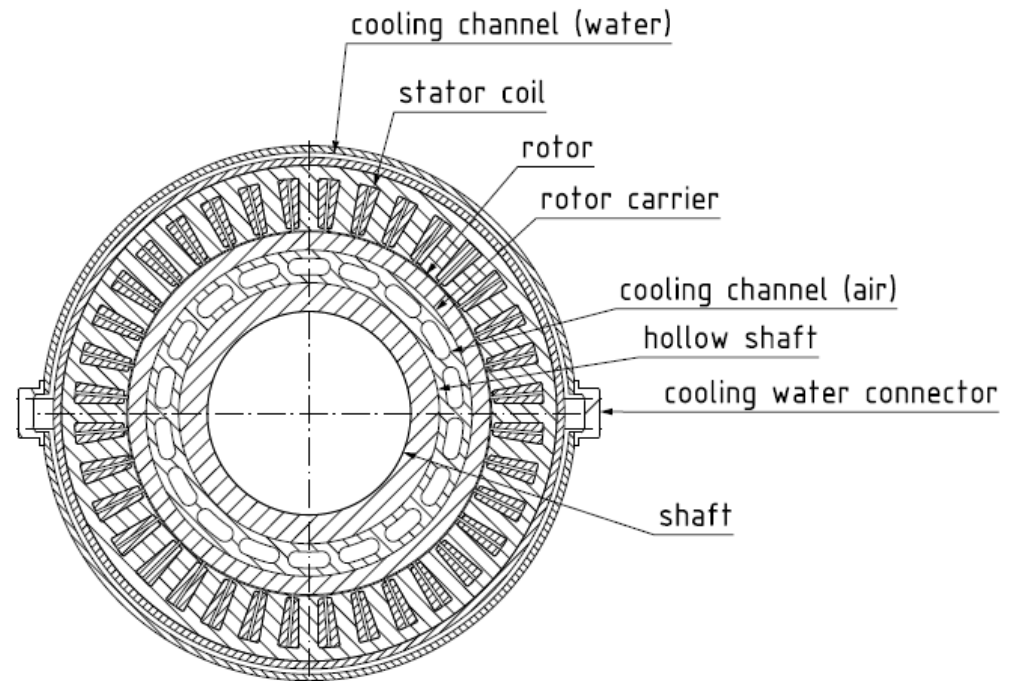
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt - DLR  
Institut für Fahrzeugkonzepte

Christian Weber



# Gliederung

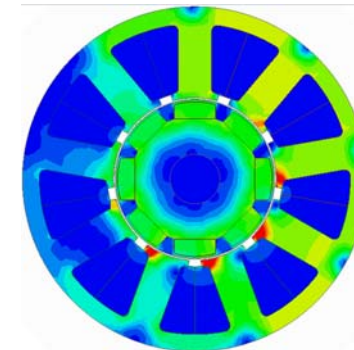
1. Motivation
2. „Design Workflow“
3. Wicklungstool
4. Design Creator
5. Design Optimierung
6. Design Analyse
7. Entwurf einer Maschine
8. Ausblick



# 1. Motivation

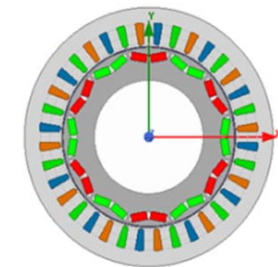
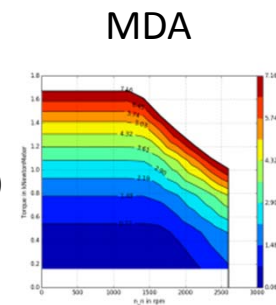
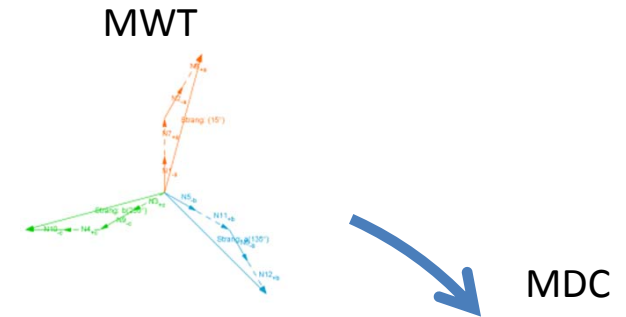
Universelle Entwicklungstools für elektrische Maschinen mittels Python

- Kopplung zwischen analytischen und numerischen Berechnungen
- Maschinen Topologien (PMSM, FESM, ASM) beliebig erweiterbar
- Einfache und schnelle Generierung von Maschinenmodellen
- Optimierung der Maschinengeometrien
- Analyse der Maschinendesigns
- Universelle Kommunikationsschnittstelle

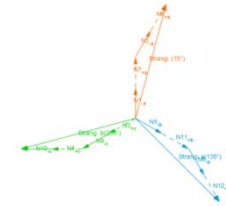


## 2. „Design Workflow“

- Maschinen Wicklungstool– MWT
  - Generierung und Analyse von Wicklungskonzepten
- Maschinen Design Creator – MDC
  - Generierung von Maschinen Modellgenerierung in Maxwell
- Maschinen Modell Optimierung – MDO
  - Optimierung von Maschinenmodellen in Maxwell
- Maschinen Design Analyse – MDA
  - Berechnung von Kennfeldern in Maxwell



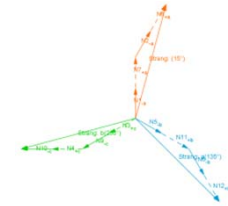
# 3. Wicklungstool – MWT



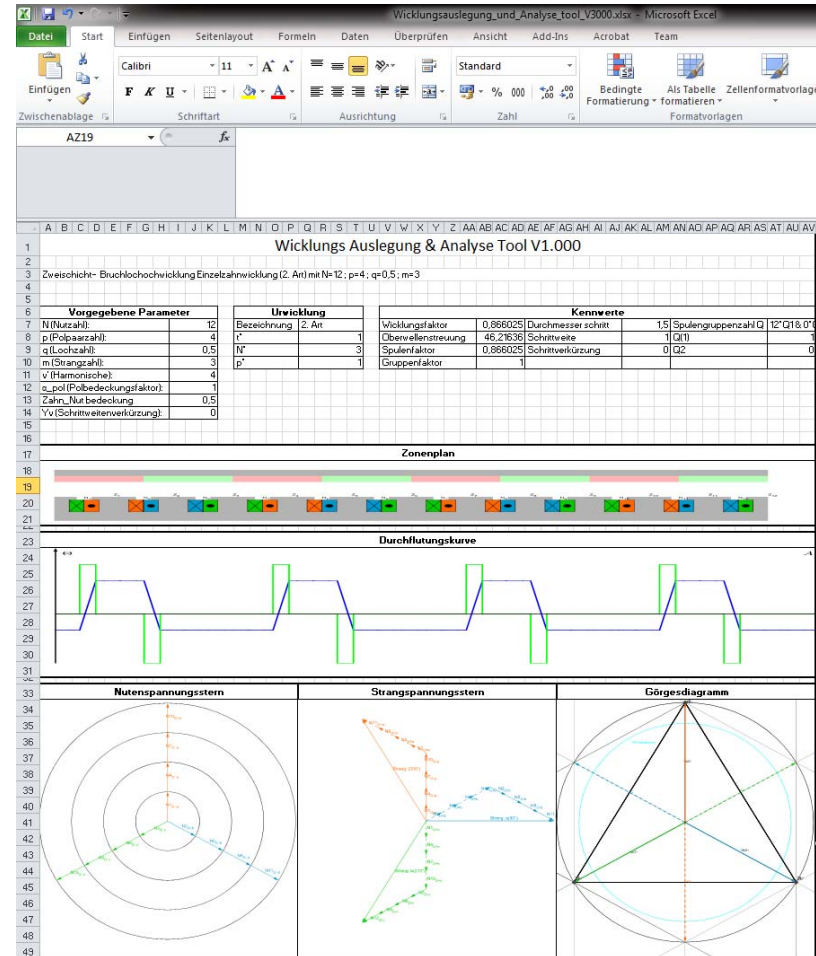
- Auswahl unterschiedlicher Wicklungskonzepte
- Wicklungskonzepte visualisieren
- Darstellung des Luftspaltfeldes
- Berechnung des Wicklungsfaktors
- Automatische Ermittlung von möglichen Wicklungskonzepten
- Export von Ergebnissen



# 3. Wicklungstool – MWT



- Auswahl unterschiedlicher Wicklungskonzepte
- Wicklungskonzepte visualisieren
- Darstellung des Luftspaltfeldes
- Berechnung des Wicklungsfaktors
- Automatische Ermittlung von möglichen Wicklungskonzepten
- Export von Ergebnissen



# 3. Wicklungstool – MWT

## Wicklungs Auslegung & Analyse Tool V1.000

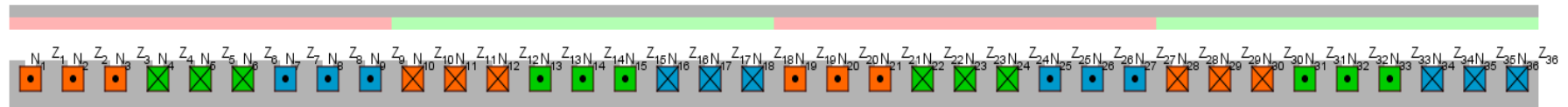
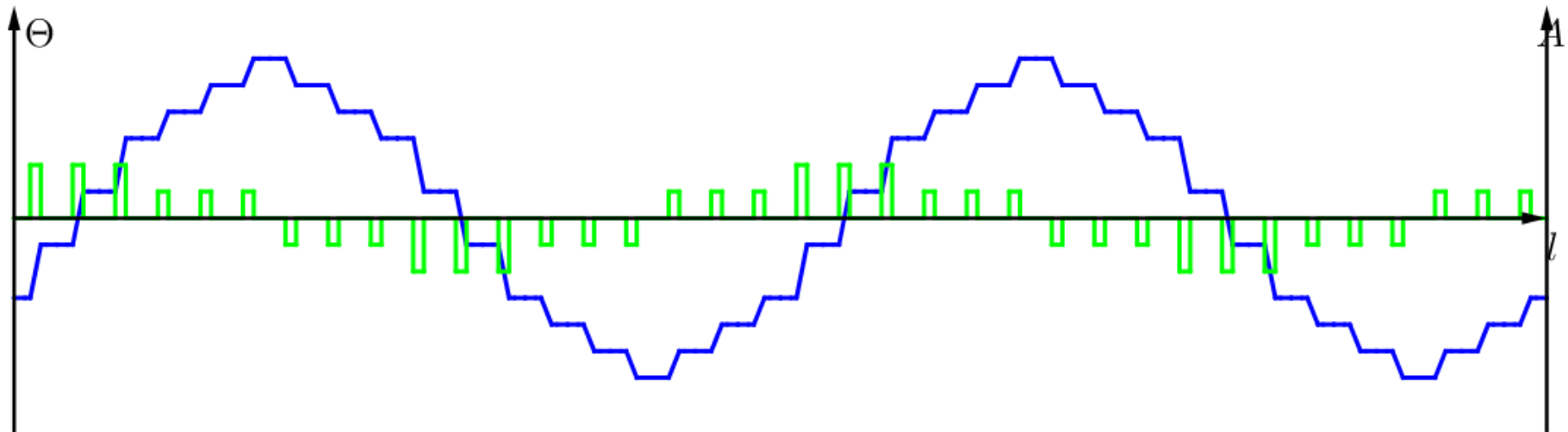
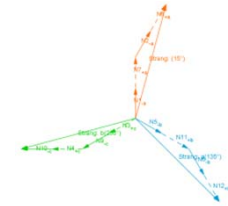
Einschicht- Ganzlochwicklung (1. Art) mit N=36 ; p=2 ; q=3 ; m=3

Vorgegebene Parameter		Urwicklung		Kennwerte					
N (Nutzahl):	36	Bezeichnung	1. Art	Wicklungsfaktor	0,95979508	Durchmesser schritt	9	Spulengruppenzahl Q	6*Q1 & 0*Q:
p (Polpaarzahl):	2	t*	1	Oberwellenstreuung	1,40614394	Schrittweite	9 Q(1)		3
q (Lochzahl):	3	N*	18	Spulenfaktor	1	Schrittverkürzung	0 Q2		0
m (Strangzahl):	3	p*	1	Gruppenfaktor	0,959795				
v' (Harmonische):	2								
$\alpha_{pol}$ (Polbedeckungsfaktor):	1								
Zahn_Nut bedeckung	0,5								
Yv (Schrittweitenverkürzung):	0								

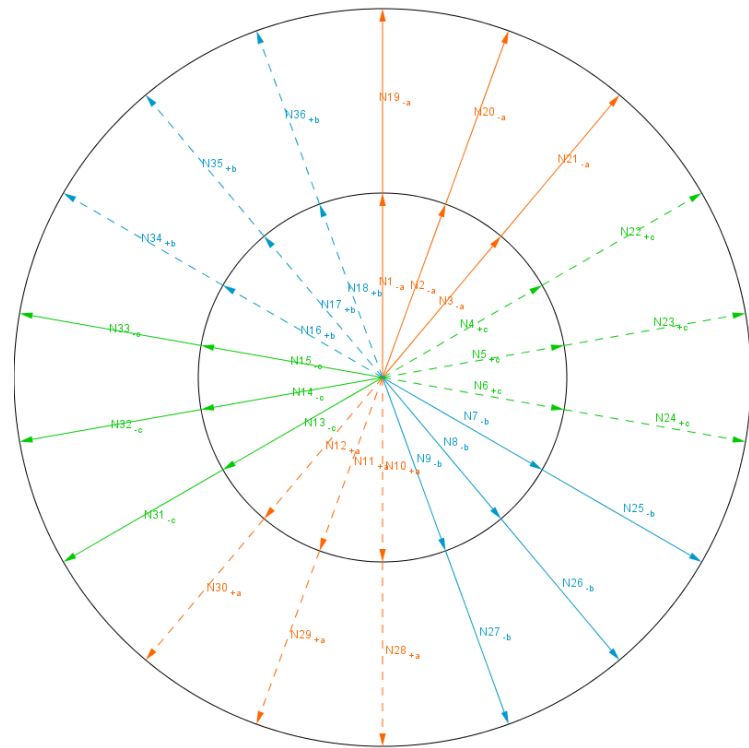
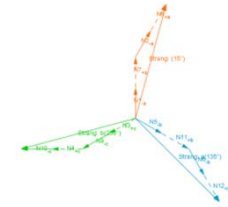
Zonenplan



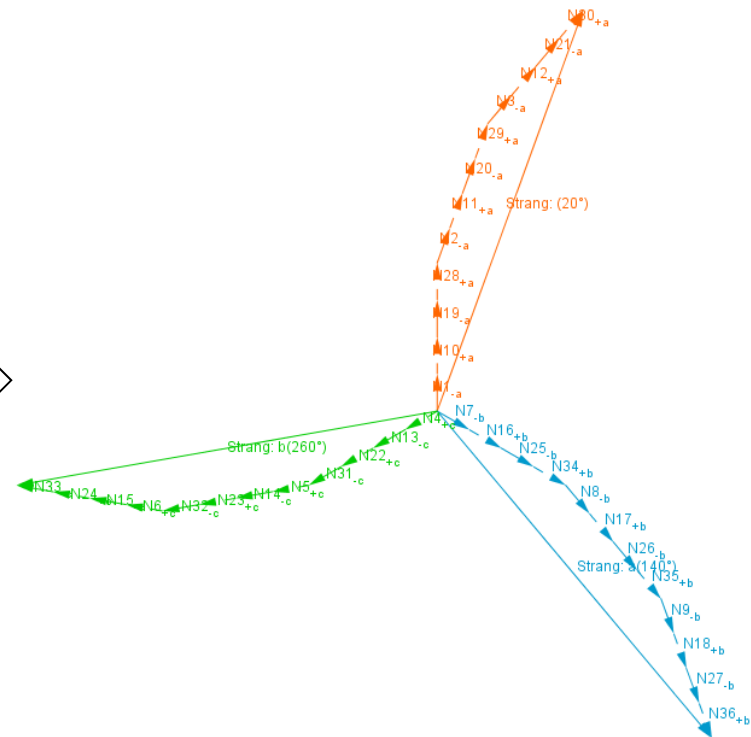
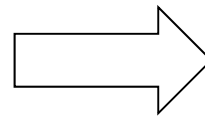
# 3. Wicklungstool – MWT



# 3. Wicklungstool – MWT



Nutenspannungstern



Strangspannungstern

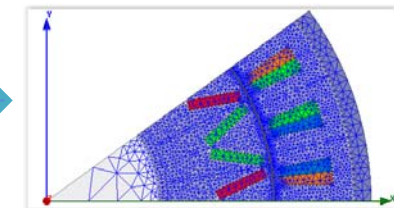
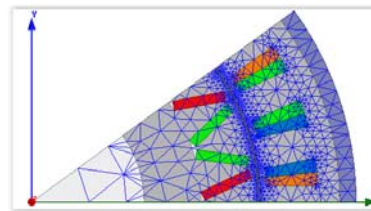
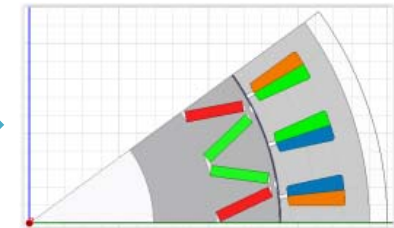
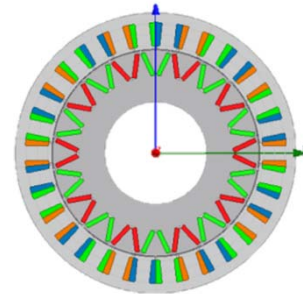
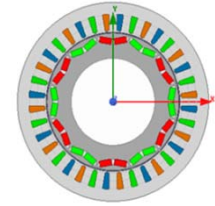




## 4. Design Creator– MDC

Implementierte Methoden:

- Symmetrieerkenennung
- Netzgenerierung
- Änderung des FEM Lösungsansatz  $f(x)$



Statisch

$$i = const$$

Transient

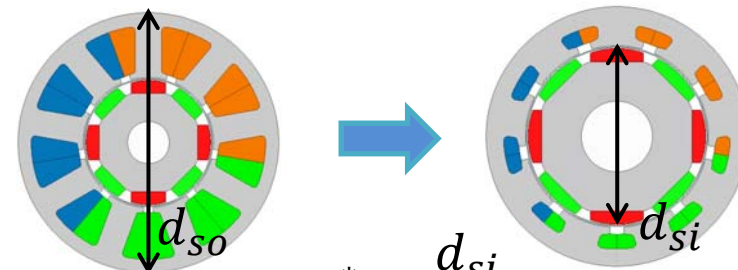
$$i(t)$$





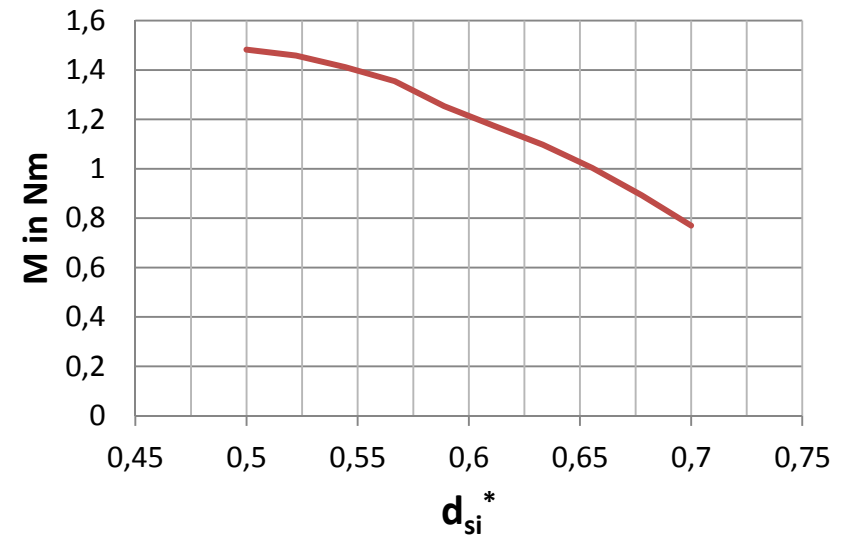
## 5. Design Optimierung – MDO

- Numerische Optimierung von Maschinenmodellen
  - Optimierung der magnetischen Flussdichte im:
    - Stator Joch
    - Stator Zahn
  - Variation des Bohrungsdurchmessers unter Vorgabe von Randbedingungen
  - Ausgabe von analytischen Berechnungen



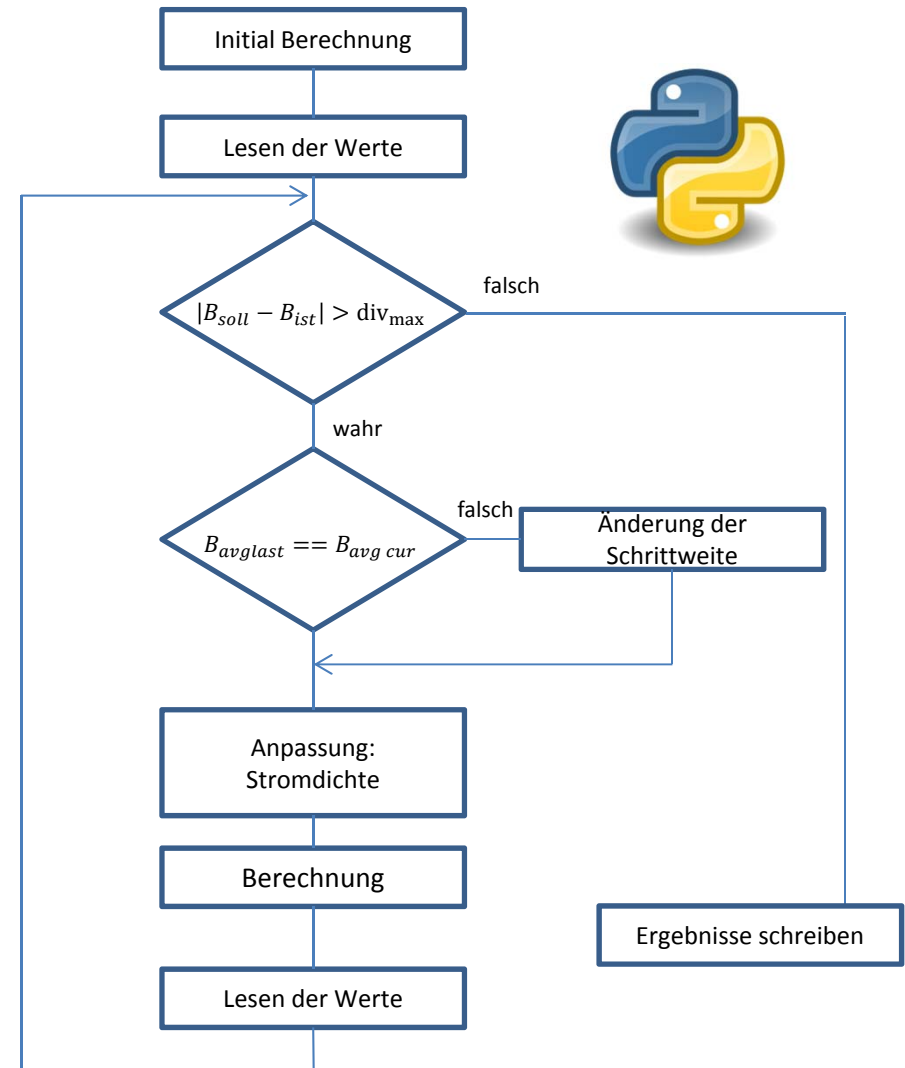
$$d_{si}^* = \frac{d_{si}}{d_{so}}$$

N9p4\_L2

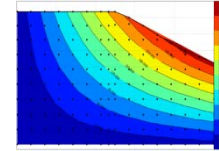


## 5. Design Optimierung – MDO

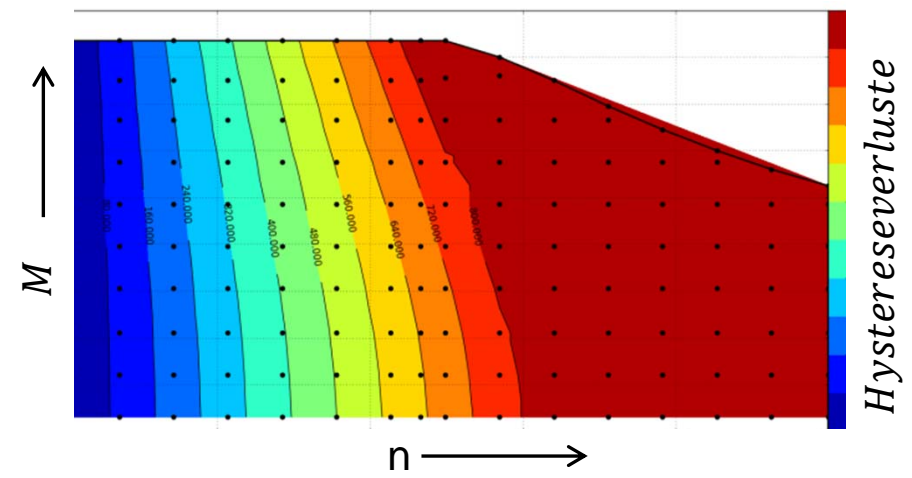
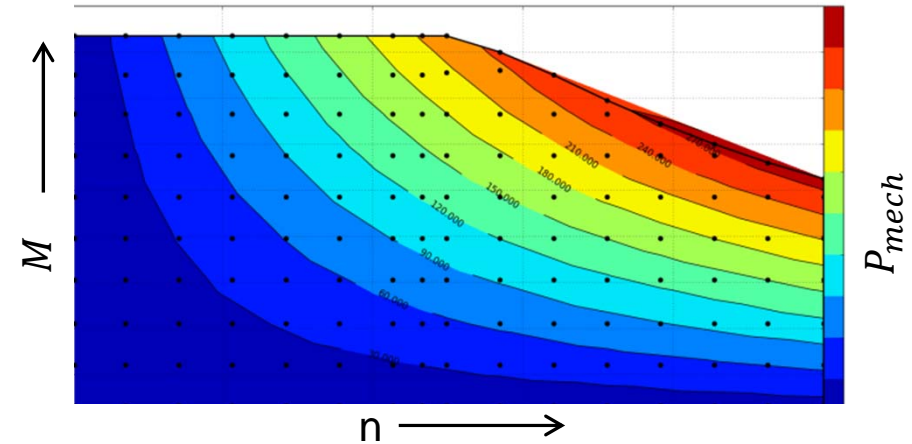
- Numerische Optimierung von Maschinenmodellen
  - Optimierung der magnetischen Flussdichte im:
    - Stator Joch
    - Stator Zahn
  - Variation des Bohrungsdurchmessers unter Vorgabe von Randbedingungen
  - Ausgabe von analytischen Berechnungen



## 6. Maschinen Design Analyse – MDA



- Berechnung von Kennfeldern
  - Wicklungsverluste
  - Ummagnetisierungsverluste
  - Scheinleistung
  - Wirkleistung
  - Wirkungsgradkennfeld



# Entwurf einer Maschine

- Auslegung eines Kleinmotors mit Zahnspulenwicklung
- Generierung von möglichen Wicklungsschemata

Einschichtwicklungen

N/p	1	2	4	5
	1	0,5	0,25	0,2
6	1	0,866	0,866	0,5
12	2	1	0,5	0,4
	0,9659	1	0,866	0,9659

Zweischichtwicklungen

N/p	1	2	3	4	5	6
	0,5	0,25	X	0,125	0,1	X
3	0,866	0,866	X	0,866	0,866	X
	1	0,5	X	0,25	0,2	X
6	1	0,866	X	0,866	0,5	X
9	1,5	0,75	0,5	0,375	0,3	0,25
	0,9452	0,6169	0,866	0,9452	0,9452	0,866
12	2	1	X	0,5	0,4	X
	0,9659	1	X	0,866	0,933	X
	2,5	1,25	X	0,625	0,5	X
15	0,9514	0,9514	X	0,7109	0,866	X



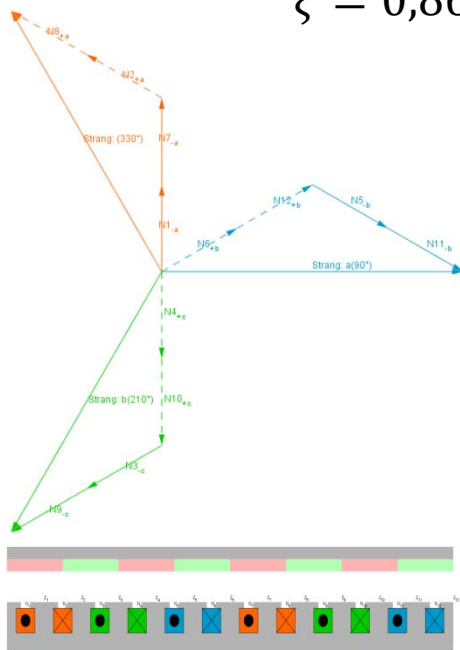
# Entwurf einer Maschine

**N=12,p=4,Einschicht**

$$m = 3$$

$$q = 0,5$$

$$\xi = 0,866$$

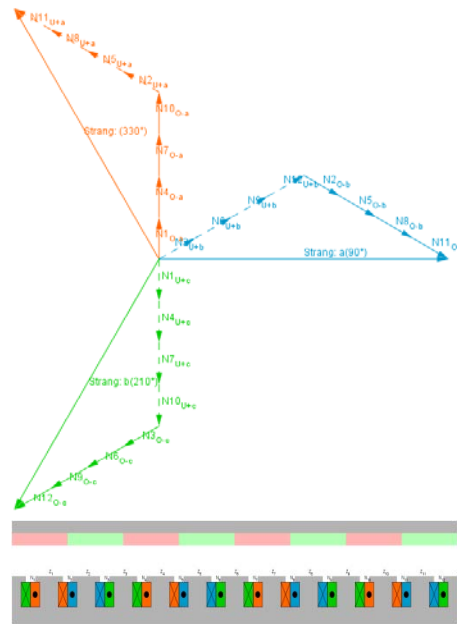


**N=12,p=4, Zweischicht**

$$m = 3$$

$$q = 0,5$$

$$\xi = 0,866$$

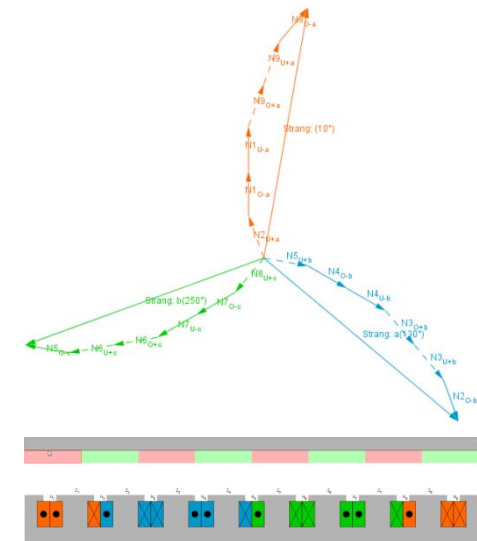


**N=9,p=4, Zweischicht**

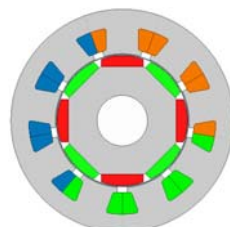
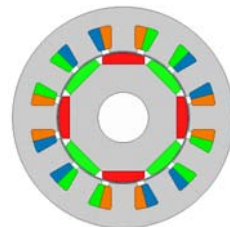
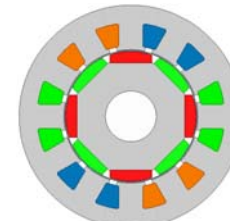
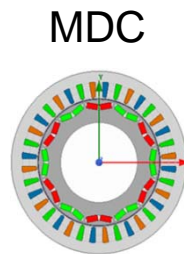
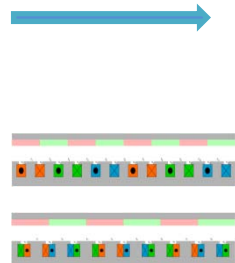
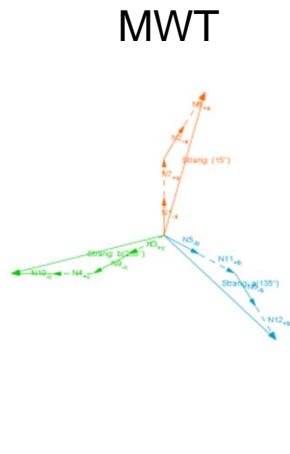
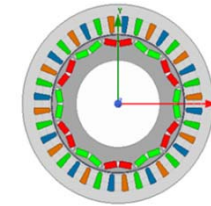
$$m = 3$$

$$q = 0,375$$

$$\xi = 0,945$$



# Entwurf einer Maschine



Technische Daten:

$$n = 6000 \text{ U/min}$$

*Stator:*

$$D_{so} = 60 \text{ mm}$$

$$l_{fe} = 30 \text{ mm}$$

$$b_{st}^* = 0.6$$

$$\delta = 0.7 \text{ mm}$$

*PM:*

$$B_r = 1.2 \text{ T}$$

$$H_c = 890 \text{ kA/m}$$

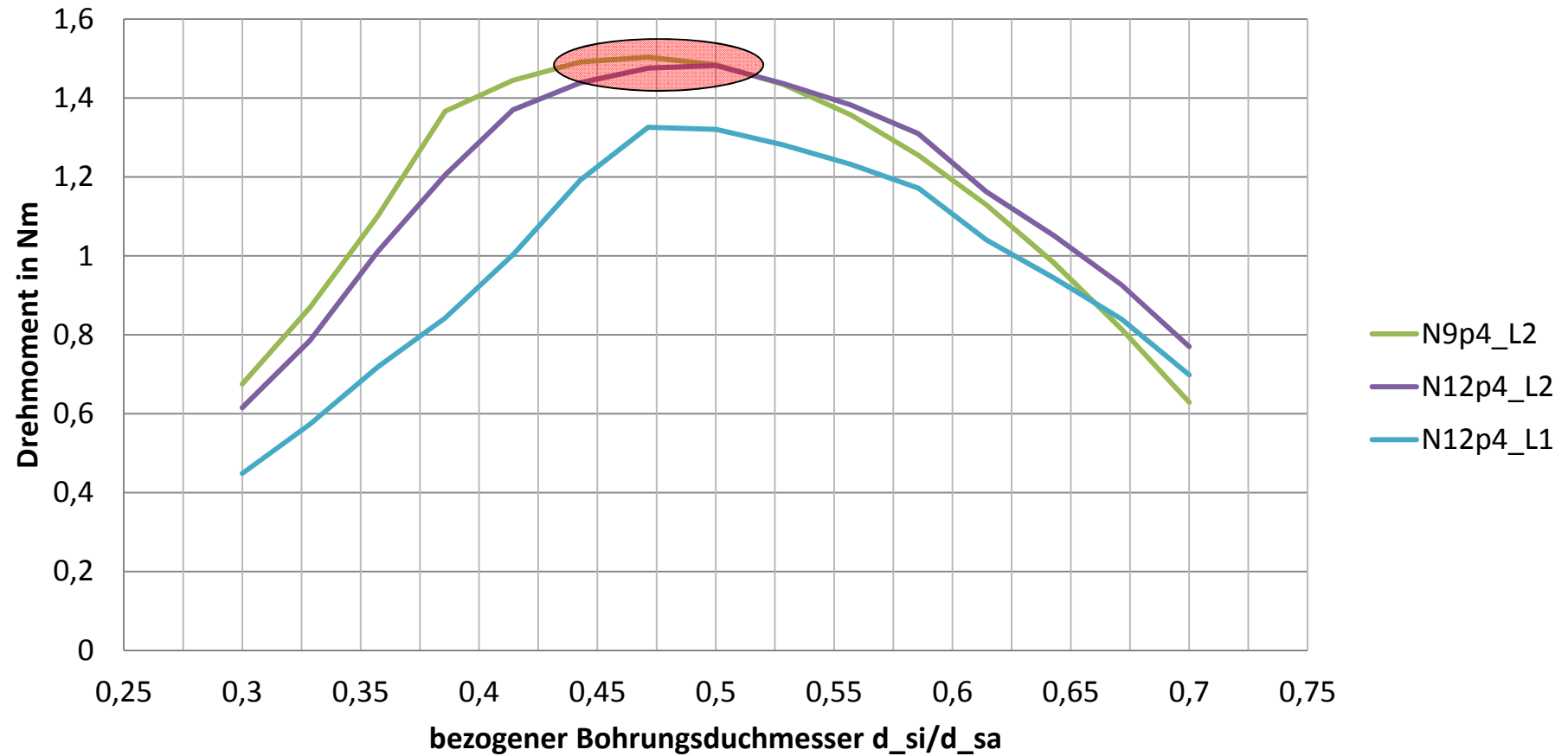
$$h_{pm} = 3 \text{ mm}$$

$$\alpha_p = 0.85$$





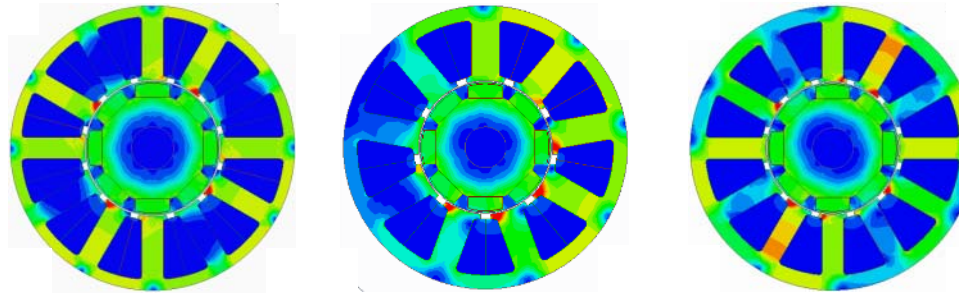
# Entwurf einer Maschine



Vorgaben: max.  $B_{avg}$  im Zahn = 1.6 T, max.  $B_{avg}$  im Joch = 1.4 T,  $J_{max} = 15 A/mm^2$



# Entwurf einer Maschine

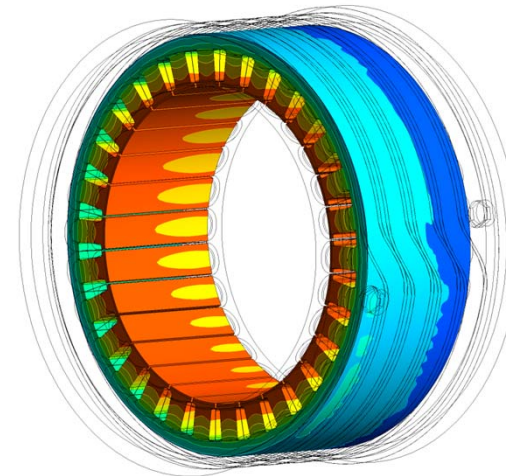


	N12p4_L2	N9p4_L2	N12p4_L1
$\eta$	86,9 %	87,1 %	85,32 %
$P_{Mech}$	942 W	942 W	829 W
$M$	1,5 Nm	1,5 Nm	1,32 Nm
$M_{p2p}$	88 mNm	17 mNm	103 mNm
$P_{Fe}$	12,6 W	11 W	11,7 W
$P_{CU}$	130 W	128 W	132 W
Masse Elektroblech	331 g	350 g	352 g
Masse Kupfer	108 g	134 g	100 g
Masse Magnete	37 g	36 g	36 g



## Ausblick

- Einfügen weiterer Optimierungsalgorithmen
  - Effizienz
  - Drehmomentwelligkeit
- Tool zur Berechnung der Temperaturverteilung in der Maschine
  - Thermisches Netzwerk



**Danke für Ihr Aufmerksamkeit!**

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt - DLR  
Institut für Fahrzeugkonzepte

Christian Weber

