Layout of a smart actuator for automotive thermal management

C. Hugel

Friday, 24.06.2022

Agenda

1. Very short introduction of Hilite
2. Introduction to the PMSM
3. Sensitivity analysis of the Motor
4. Optimization with OptiSLang
5. Tolerance based sensitivity analysis
6. Conclusion

Hilite International

- automotive company
- founded in 1930
- about 1700 employees
- 9 locations on 3 continents
- 550 Mio. € turnover

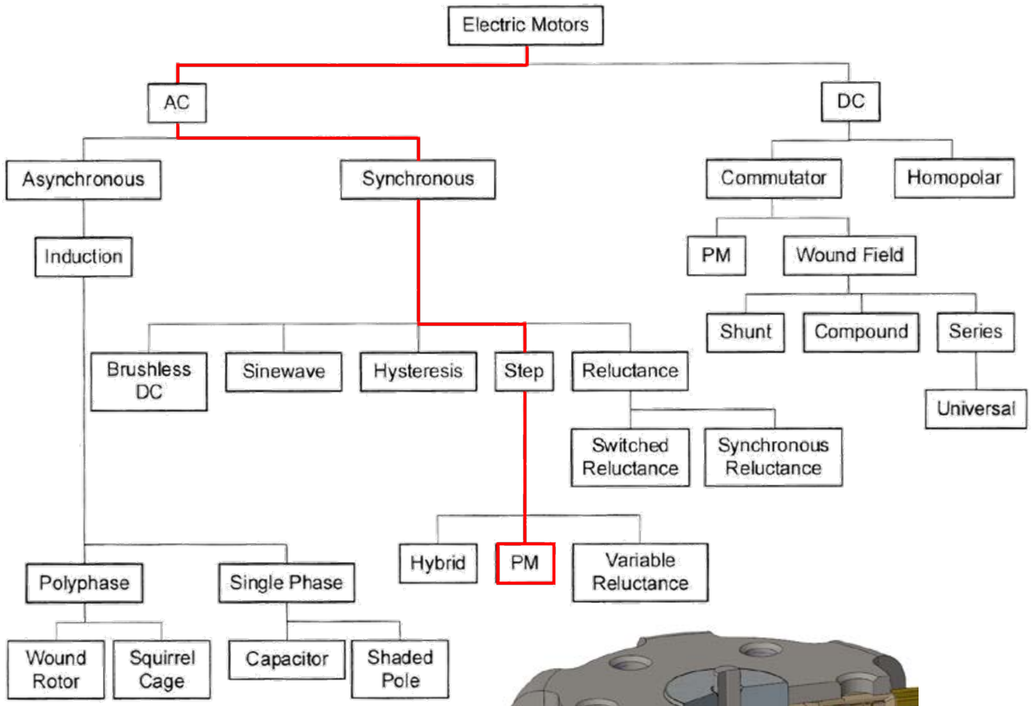
Engine applications | Transmission applications | VCR system | Thermal Management

Introduction

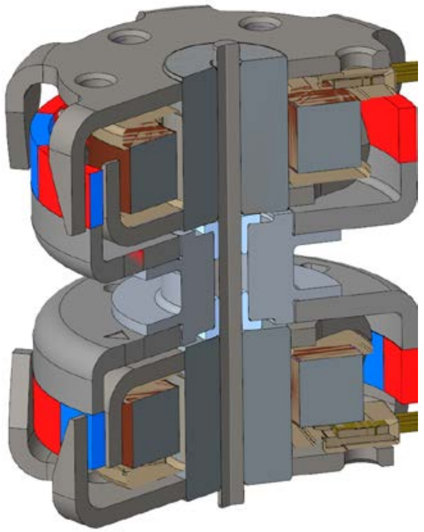
Task, starting conditions and system setup

Introduction to Task

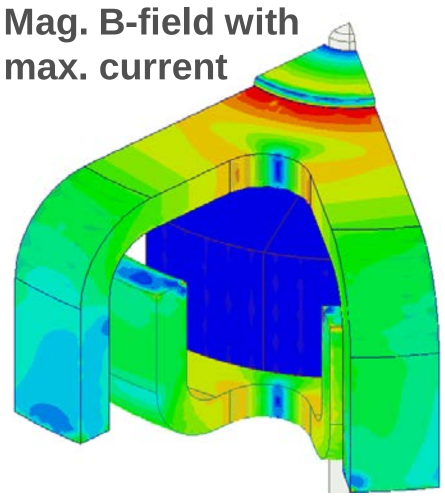
- Developments at Hilite Germany include valves for thermal management with specific demands
- Besides piston and transmission, the electric machine is the most important part of the valve
- For well operating valve, the right electric machine has to be chosen
- Hilite is using a PMSM
  “Permanemt Magnet Synchronous Motor”

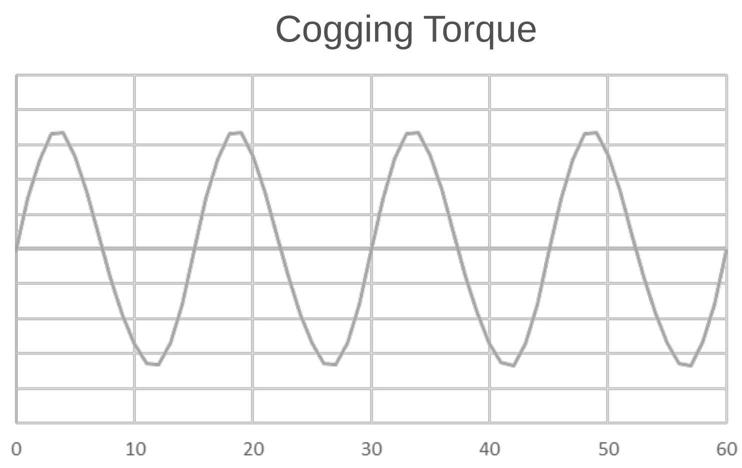


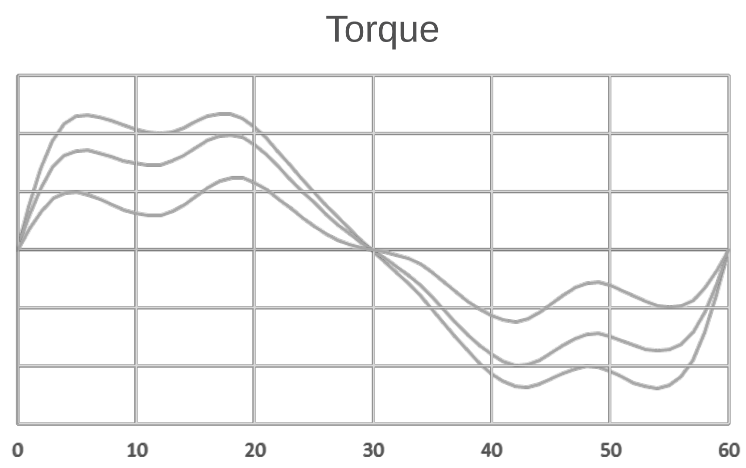
(Brushless Permanent Magnet Motor Design, Dr. Duane Hanselman, Magna Physics Publishing, 2006, S.2)



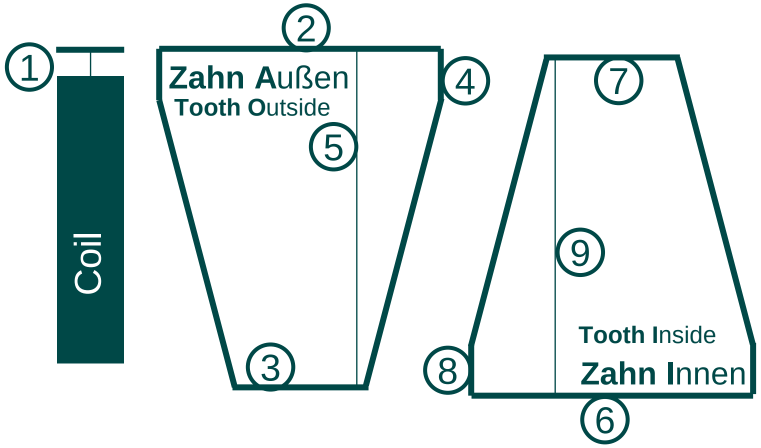
Starting condition





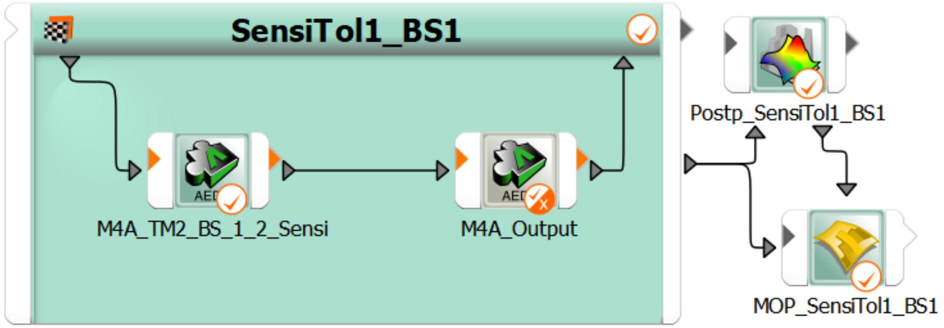


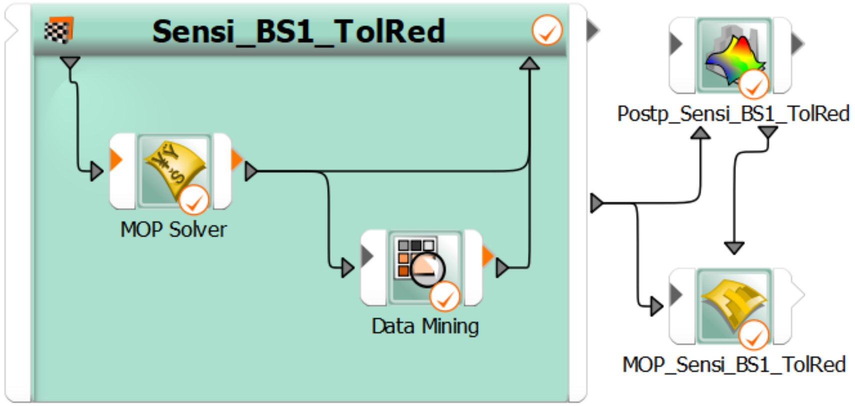
- Reference design with straight "teeth" for stator outside and inside
- 60°-periodic half model to minimize calculation time
- Quasistatic transient calculation with rotation angle over time
- Different applied electric currents to allow all optimizations
- Variation of the shape of the teeth to positively influence the characteristic curve of the torque (9 parameters)



Computations with OptiSLang

- Computation of torque for Stepper-Motor in ANSYS Maxwell (AEDT)
- Usage of the ANSYS AEDT integration for OptiSLang
- AEDT-OptiSLang setup with separated output for more flexible postprocessing
- Custom simulation solver mode with script to prevent single runs



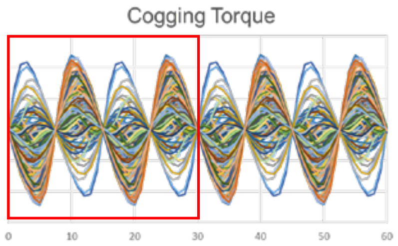


First sensitivity analysis

Influence on cogging and maximum torque

Sensi. tooth – Cogging torque

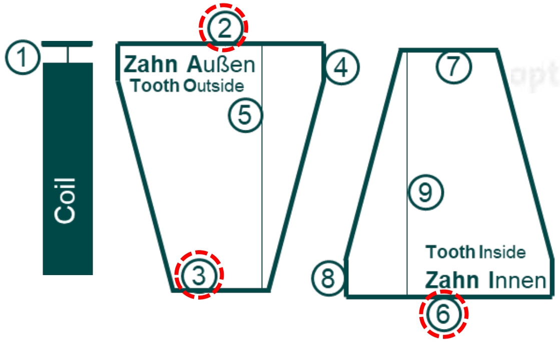
Ansys WOST WORKSHOP · HILITE INTERNATIONAL



#	Parameter	W00	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08	W09	W10	W11	W12	W13	W14	W15
①	Spulenverschiebung	0.0 %															
②	Zahn_A_breite_Basis	6.9 %	32.8 %	33.2 %	34.3 %	35.3 %	38.0 %	40.6 %	41.8 %	37.8 %	41.0 %	38.5 %	34.7 %	33.8 %	35.2 %	33.6 %	8.4 %
③	Zahn_A_breite_Spitze	4.0 %	15.4 %	15.4 %	15.4 %	16.0 %	17.2 %	17.7 %	16.3 %	16.9 %	16.7 %	15.5 %	15.7 %	16.2 %	15.2 %	15.6 %	1.3 %
④	Zahn_A_hoehe_Basis	5.5 %	4.3 %	5.0 %	4.3 %	4.1 %	4.0 %	4.3 %	4.0 %	3.2 %	3.9 %	3.8 %	4.1 %	3.9 %	4.5 %	5.1 %	4.5 %
⑤	Zahn_A_hoehe_gesamt	2.6 %	0.2 %	1.2 %	1.2 %	1.4 %	1.6 %	1.4 %	1.2 %	1.2 %	1.3 %	1.4 %	1.3 %	1.4 %	1.2 %	1.3 %	8.8 %
⑥	Zahn_I_breite_Basis	0.0 %	50.8 %	53.4 %	53.5 %	53.6 %	50.2 %	46.4 %	43.2 %	45.1 %	47.2 %	50.4 %	53.3 %	53.5 %	52.3 %	48.3 %	0.5 %
⑦	Zahn_I_breite_Spitze	1.8 %	9.3 %	9.0 %	7.5 %	6.3 %	5.7 %	4.5 %	4.8 %	4.9 %	5.1 %	5.5 %	6.9 %	7.1 %	7.9 %	7.8 %	0.0 %
⑧	Zahn_I_hoehe_Basis	4.9 %	1.5 %	1.4 %	1.9 %	2.0 %	1.5 %	1.0 %		1.0 %	1.0 %	1.6 %	1.8 %	2.2 %	1.6 %	1.5 %	7.4 %
⑨	Zahn_I_hoehe_gesamt	0.0 %				0.3 %						0.1 %					
	Total	7.8 %	90.9 %	95.1 %	96.4 %	96.8 %	95.4 %	93.7 %	89.6 %	87.1 %	92.8 %	95.3 %	96.7 %	96.3 %	94.7 %	90.8 %	10.6 %

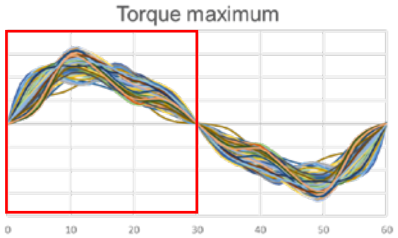
#	Parameter	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24	W25	W26	W27	W28	W29	W30
①	Spulenverschiebung															2.4 %
②	Zahn_A_breite_Basis	33.2 %	32.6 %	34.4 %	35.4 %	39.2 %	41.9 %	42.2 %	37.1 %	40.3 %	37.8 %	34.2 %	35.3 %	33.1 %	34.7 %	7.4 %
③	Zahn_A_breite_Spitze	15.3 %	15.5 %	15.9 %	16.5 %	17.1 %	16.3 %	17.4 %	16.2 %	16.3 %	15.7 %	15.4 %	15.8 %	14.8 %	14.8 %	
④	Zahn_A_hoehe_Basis	3.1 %	4.3 %	3.9 %	3.8 %	3.4 %	4.4 %	3.9 %	2.6 %	4.0 %	4.5 %	3.9 %	4.3 %	4.9 %	5.0 %	5.8 %
⑤	Zahn_A_hoehe_gesamt	0.3 %	1.4 %	1.3 %	1.3 %	1.4 %	1.5 %	0.9 %	1.2 %	1.4 %	1.2 %	1.2 %	1.1 %	1.1 %	1.2 %	1.0 %
⑥	Zahn_I_breite_Basis	50.6 %	51.5 %	53.4 %	53.9 %	50.6 %	46.8 %	43.6 %	45.7 %	48.3 %	50.3 %	51.8 %	53.7 %	51.3 %	50.0 %	
⑦	Zahn_I_breite_Spitze	9.5 %	9.3 %	7.6 %	6.3 %	5.0 %	4.7 %	5.5 %	5.4 %	4.6 %	5.4 %	6.7 %	7.2 %	7.9 %	8.8 %	3.7 %
⑧	Zahn_I_hoehe_Basis	1.6 %	1.8 %	1.9 %	1.7 %	1.6 %	1.3 %		0.8 %	1.2 %	1.5 %	1.9 %	2.0 %	1.9 %	1.4 %	7.1 %
⑨	Zahn_I_hoehe_gesamt				0.3 %						0.0 %					
	Total	90.8 %	95.1 %	96.4 %	96.8 %	95.4 %	93.6 %	89.4 %	87.2 %	92.8 %	95.4 %	96.7 %	96.3 %	94.7 %	90.8 %	8.5 %

Area of extreme values



Sensi. tooth – Torque maximum

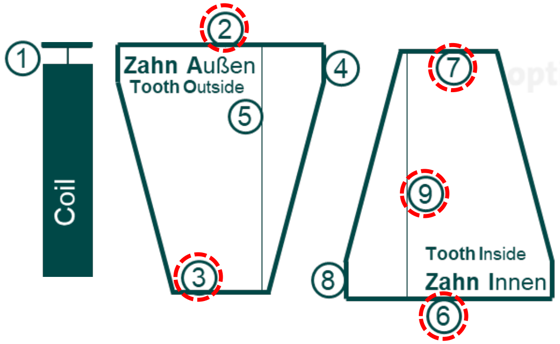
Ansys WOST WORKSHOP · HILITE INTERNATIONAL



	W0	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15
① Spulenverschiebung																
② Zahn_A_breite_Basis	5.2 %	40.4 %	43.2 %	44.6 %	48.8 %	53.6 %	59.0 %	55.2 %	42.3 %	31.2 %	29.2 %	27.7 %	28.2 %	29.5 %	30.7 %	33.0 %
③ Zahn_A_breite_Spitze		13.3 %	13.8 %	15.1 %	15.9 %	16.6 %	16.5 %	19.0 %	22.6 %	19.9 %	16.1 %	15.5 %	15.3 %	14.1 %	13.1 %	11.1 %
④ Zahn_A_hoehe_Basis		3.2 %	3.9 %	3.0 %	3.0 %	3.2 %	2.7 %	2.4 %	3.3 %	3.4 %	2.9 %	2.5 %	2.6 %	2.6 %	1.8 %	0.4 %
⑤ Zahn_A_hoehe_gesamt		0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.3 %	2.1 %	4.4 %	3.3 %	2.8 %	2.2 %	2.4 %	2.6 %	2.2 %	3.0 %
⑥ Zahn_I_breite_Basis		39.8 %	40.6 %	38.2 %	36.7 %	32.4 %	26.1 %	21.1 %	28.7 %	39.6 %	43.6 %	45.2 %	42.5 %	37.0 %	27.4 %	19.2 %
⑦ Zahn_I_breite_Spitze	0.3 %	7.3 %	7.3 %	6.8 %	6.1 %	5.7 %	6.2 %	8.0 %	12.5 %	13.7 %	14.5 %	15.6 %	17.9 %	19.3 %	22.1 %	20.7 %
⑧ Zahn_I_hoehe_Basis		1.3 %	1.4 %	1.4 %	1.4 %	0.5 %	0.1 %	0.0 %	0.6 %	1.7 %	1.9 %	2.3 %	2.1 %	2.1 %	1.7 %	1.2 %
⑨ Zahn_I_hoehe_gesamt		0.0 %	0.3 %	0.3 %	0.7 %	1.0 %	1.7 %	4.6 %	7.7 %	7.6 %	7.3 %	7.3 %	8.8 %	10.6 %	15.7 %	21.4 %
Total	5.6 %	94.6 %	96.8 %	97.4 %	97.9 %	97.8 %	97.4 %	97.3 %	94.9 %	93.1 %	94.7 %	96.5 %	96.9 %	96.8 %	97 %	98.2 %

	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24	W25	W26	W27	W28	W29	W30
① Spulenverschiebung															1.8 %
② Zahn_A_breite_Basis	39.0 %	40.6 %	43.8 %	43.0 %	49.1 %	53.7 %	57.8 %	61.6 %	59.9 %	55.1 %	51.7 %	47.6 %	45.8 %	43.8 %	7.1 %
③ Zahn_A_breite_Spitze	7.9 %	6.0 %	4.1 %	3.7 %	2.3 %	1.5 %	1.8 %	6.9 %	13.8 %	18.6 %	17.9 %	16.9 %	16.9 %	17.1 %	4.7 %
④ Zahn_A_hoehe_Basis	0.0 %	0.5 %	0.9 %	0.9 %	0.3 %	0.0 %		1.1 %	2.7 %	3.2 %	3.5 %	3.8 %	3.6 %	3.6 %	1.5 %
⑤ Zahn_A_hoehe_gesamt	2.6 %	2.8 %	1.8 %	1.4 %	0.8 %	0.8 %	0.6 %	1.4 %	2.3 %	2.9 %	2.3 %	1.9 %	1.6 %	1.7 %	3.9 %
⑥ Zahn_I_breite_Basis	23.8 %	38.1 %	44.4 %	49.1 %	48.0 %	44.4 %	38.7 %	29.4 %	23.7 %	25.2 %	30.9 %	35.5 %	38.9 %	40.8 %	
⑦ Zahn_I_breite_Spitze	15.1 %	7.9 %	4.3 %	0.9 %	0.0 %	0.6 %	1.3 %	4.3 %	8.7 %	10.9 %	11.5 %	11.1 %	10.0 %	10.2 %	6.2 %
⑧ Zahn_I_hoehe_Basis	0.3 %		0.0 %				0.0 %	0.4 %	0.6 %	1.0 %	1.3 %	1.1 %	1.1 %		
⑨ Zahn_I_hoehe_gesamt	19.9 %	13.7 %	10.1 %	7.1 %	6.3 %	5.6 %	6.6 %	7.7 %	7.3 %	6.2 %	4.1 %	3.7 %	2.8 %	1.7 %	
Total	97.4 %	97.5 %	98 %	98.5 %	98.7 %	98.9 %	99.1 %	98.2 %	96.3 %	96.1 %	96.7 %	96 %	94.6 %	90.8 %	8.2 %

Area of extreme values

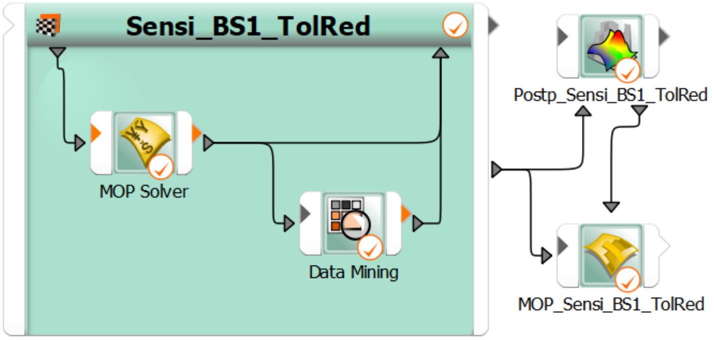


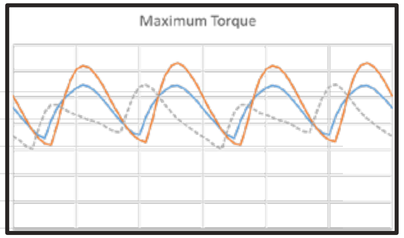
Optimizations

Changing shape and extrema of the torque

Computations with OptiSLang

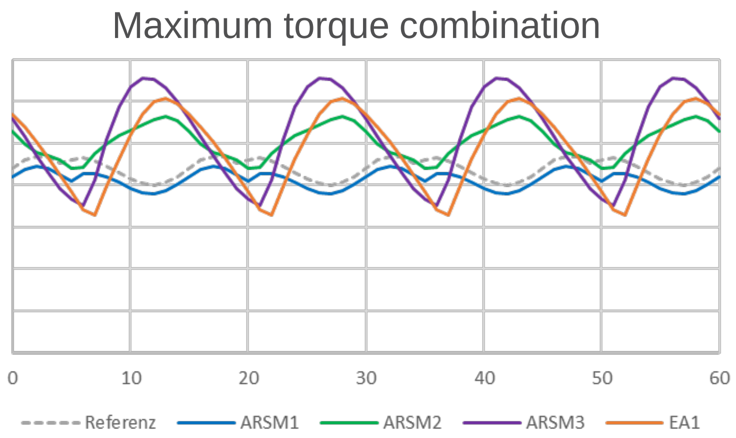
- Variables in Data Mining
  - Creation of full model torque curves
  - Optimization objectives
- Optimization of the maximum torque curve
- Different Optimization runs with “ARSM” and “EA”
  - Minimization of cogging torque
  - Maximization of max. torque
  - Maximization of torque combination minimum
  - Change of maximum position (EA)

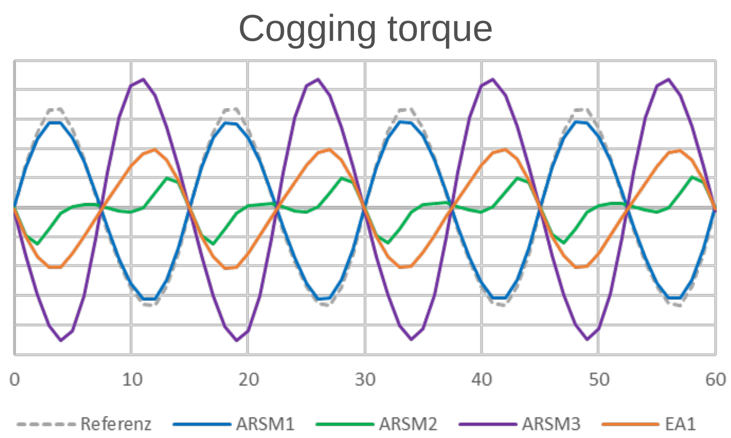


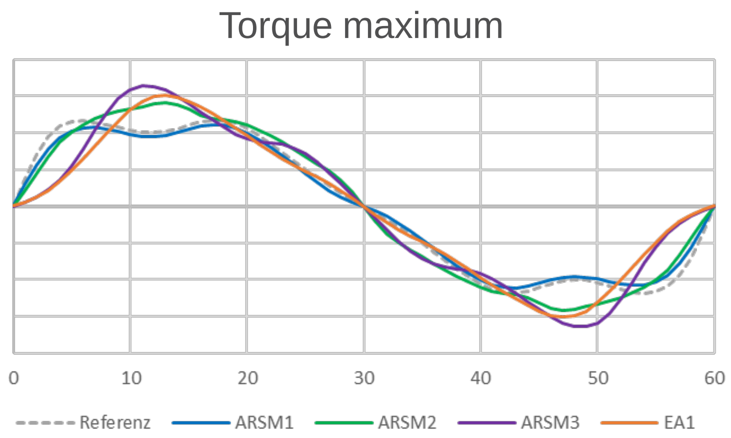


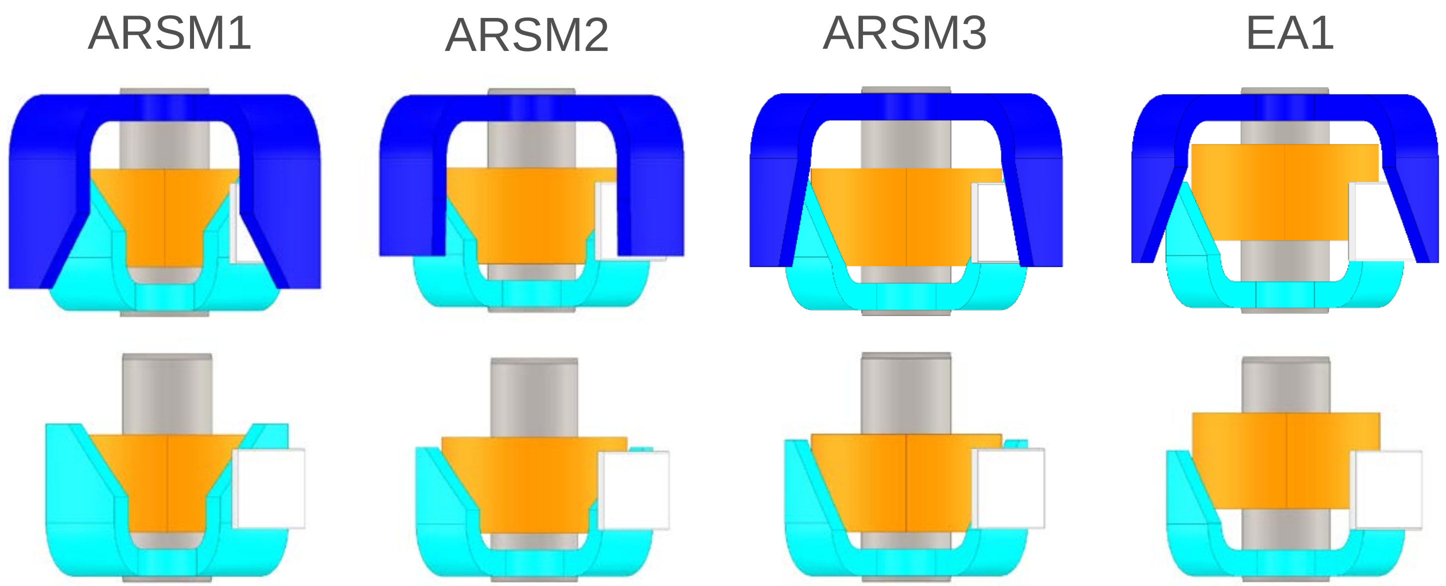
	ID	Description	Type	Value	
1	P1_Rastm		REAL MATRIX	[1:61]	constant
2	P2_Torque		REAL MATRIX	[1:61]	constant
3	V11_Rastm_Sym		REAL VECTOR	[61]	extract(P1_Rastm,0)
4	V21_Torque_Sym		REAL VECTOR	[61]	extract(P2_Torque,0)
5	Winkel		REAL VECTOR	[61]	linspace(0,60,61)
6	S11_Rastm_Sym		REAL SIGNAL	[1:60]	window(signal(Winkel,V11_Rastm_Sym),0,59)
7	S21_Torque_Sym		REAL SIGNAL	[1:60]	window(signal(Winkel,V21_Torque_Sym),0,59)
8	S12_Rastm2x		REAL SIGNAL	[1:120]	signal(linspace(0,119,120),vector(extract(S11_Rastm_Sym,1),extract(S11_Rastm_Sym,1)))
9	V12_Rast_min15		REAL VECTOR	[61]	extract(window(S12_Rastm2x,15,75),1)
10	V13_Rastm		REAL VECTOR	[61]	V11_Rastm_Sym+V12_Rast_min15
11	V22_Torque		REAL VECTOR	[61]	V12_Rast_min15+V21_Torque_Sym
12	S22_Torque_pO		REAL SIGNAL	[1:61]	signal(Winkel,V22_Torque)
13	S12_Rastm		REAL SIGNAL	[1:61]	signal(Winkel,V13_Rastm)
14	S23_Torque2x		REAL SIGNAL	[1:120]	signal(linspace(0,119,120),vector(extract(window(S22_Torque_pO,0,59),1),extract(window(S22_Torque_pO,0,59),1)))
15	S31_Torque_pU		REAL SIGNAL	[1:61]	signal(Winkel,extract(window(S23_Torque2x,45,105),1))
16	S41_Torque_mO		REAL SIGNAL	[1:61]	signal(Winkel,extract(window(S23_Torque2x,30,90),1))
17	S51_Torque_mU		REAL SIGNAL	[1:61]	signal(Winkel,extract(window(S23_Torque2x,15,75),1))
18	TMatrix		REAL MATRIX	[4:61]	[extract(S22_Torque_pO,1),extract(S31_Torque_pU,1),extract(S41_Torque_mO,1),extract(S51_Torque_mU,1)]
80	V00_Torque_max		REAL VECTOR	[61]	[Wmax00,Wmax01,Wmax02,Wmax03,Wmax04,Wmax05,Wmax06,Wmax07,Wmax08,Wmax09,Wmax10,Wmax11,Wmax12,W
81	S00_Torque_max		REAL SIGNAL	[1:61]	signal(Winkel,V00_Torque_max)
82	Max_Torque_max		REAL		max(S00_Torque_max)[0,1]
83	Min_Torque_max		REAL		min(S00_Torque_max)[0,1]

Result of optimizations







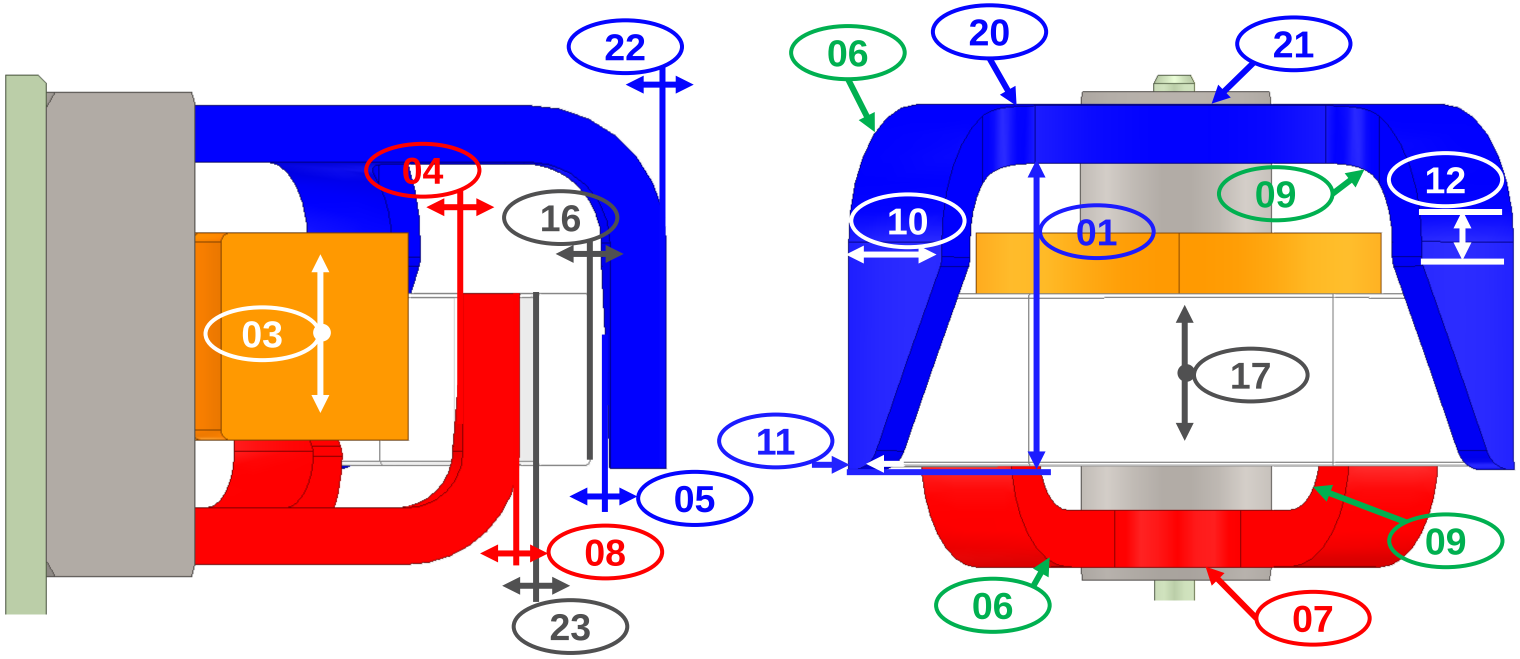


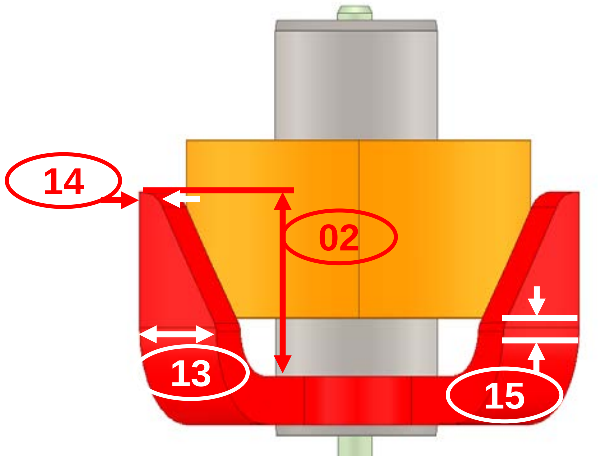
- Recalculated results of MOP with Maxwell
- ARSM1 worse than reference (MOP difference)
- ARSM2 with largest minimal torque
- ARSM3 with largest maximal torque (peak)
- EA1 with maximum torque in central position
- Cogging torque as a constraint
- Major changes in value and orientation of cogging torque

Second sensitivity analysis

Influence of tolerances on cogging and maximum torque

08 Sensitivity with tolerances

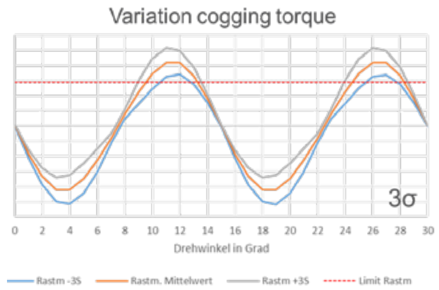




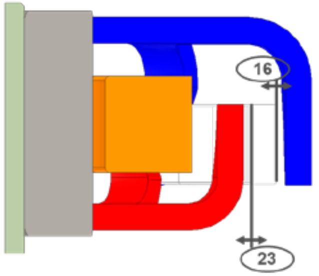
- 21 variable parameters
- Limits of variation due to drawing tolerances

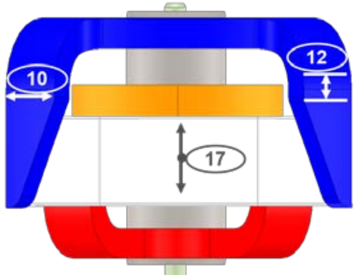
01: Stator außen Zahn höhe
02: Stator innen Zahn höhe
03: Spule Verschiebung axial
04(D): Stator innen Wandstärke
05: Stator außen Durchmesser innen
06: Stator Zahn Radius außen
07: Stator innen Ausschnitt Radius
08: Stator innen Durchmesser außen
09: Stator Zahn Radius innen
10: Stator außen Zahn Breite Basis
11(D): Stator außen Zahn Breite Spitze
12: Stator außen Zahn höhe Basis
13: Stator innen Zahn Breite Basis
14(D): Stator innen Zahn Breite Spitze
15: Stator innen Zahn höhe Basis
16: Magnet Durchmesser außen
17: Magnet Verschiebung axial
18*: Stator außen Zahn Winkel (Nicht abgebildet)
19*: Stator innen Zahn Winkel (Nicht abgebildet)
20: Stator außen Ausschnitt Radius
21(D): Stator außen Radius Scheibe
22(D): Stator außen Wandstärke
23: Magnet Durchmesser innen
24*: Stator innen Durchmesser innen (Nicht abgebildet)
25*: Stator außen Durchmesser außen (Nicht abgebildet)
26*: Stator außen Durchmesser Scheibe (Nicht abgebildet)

09 Sensi. tol. – Cogging torque



- Influence of tolerances on extreme values can be reduced to 1 major and 4 minor parameters
- CoP with 59% maximum on largest cogging torque

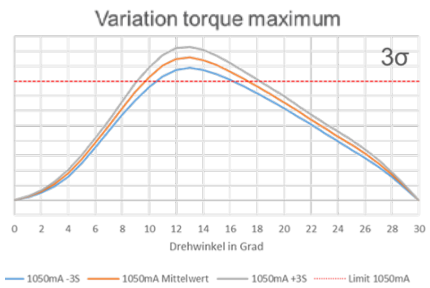




	T0000_30G[0]	T0000_30G[1]	T0000_30G[2]	T0000_30G[3]	T0000_30G[4]	T0000_30G[5]	T0000_30G[6]	T0000_30G[7]	T0000_30G[8]	T0000_30G[9]	T0000_30G[10]	T0000_30G[11]	T0000_30G[12]	T0000_30G[13]	T0000_30G[14]	T0000_30G[15]
Zahn_A_hoehe_gesamt																
Zahn_I_hoehe_gesamt								0.2 %								
Spulenverschiebung	4.7 %															
DAussenStator	16.5 %	6.1 %	7.2 %	4.9 %	2.7 %	2.3 %	1.6 %	1.2 %	4.9 %	2.1 %	2.2 %	3.2 %	4.1 %	6.6 %	7.0 %	13.3 %
RzwischenZahn															0.7 %	
DInnenStator	21.1 %	9.6 %	8.1 %	6.4 %	4.1 %	1.5 %	0.4 %			1.0 %	1.0 %	4.8 %	6.8 %	7.4 %	9.3 %	4.7 %
RInnen	17.9 %															26.2 %
Zahn_A_breite_Basis		10.4 %	9.5 %	10.6 %	12.3 %	11.8 %	8.5 %	12.5 %	11.0 %	9.4 %	10.0 %	9.6 %	12.0 %	8.2 %	6.3 %	24.1 %
Zahn_A_hoehe_Basis	3.5 %		6.0 %	6.8 %	6.8 %	5.8 %	5.3 %	7.1 %	5.0 %	5.0 %	7.0 %	6.4 %	8.5 %	5.0 %	4.9 %	
Zahn_I_breite_Basis	15.1 %	2.5 %	1.8 %	2.3 %	1.6 %	1.2 %					1.0 %	1.7 %	1.9 %	1.6 %	2.6 %	41.2 %
Zahn_I_hoehe_Basis		1.5 %	2.8 %	2.5 %	1.7 %	0.7 %	0.6 %			0.8 %	0.6 %	1.0 %	2.6 %	2.6 %	2.8 %	15.3 %
MDa		38.1 %	25.9 %	17.2 %	12.6 %	9.2 %	7.7 %	5.5 %	7.7 %	7.1 %	9.1 %	14.4 %	19.9 %	28.6 %	30.1 %	
MRingVerschiebung		9.1 %	14.3 %	27.6 %	44.9 %	60.0 %	69.5 %	71.8 %	68.4 %	67.4 %	59.3 %	44.8 %	25.7 %	15.4 %	7.4 %	
Zahn_A_Winkel	6.0 %		1.2 %	2.1 %	1.3 %	1.5 %	1.0 %	1.2 %	2.1 %	1.5 %	1.5 %	2.7 %	1.9 %	2.6 %	1.0 %	20.5 %
Zahn_I_Winkel			0.5 %	0.6 %	0.1 %	0.4 %				0.9 %	0.4 %	0.8 %	0.1 %	0.7 %		
RzwischenZahn_aussen															0.4 %	
MDi		24.1 %	21.2 %	16.8 %	11.8 %	5.8 %	4.0 %	2.4 %	1.5 %	3.9 %	7.0 %	11.7 %	15.6 %	20.1 %	25.1 %	
DInnenStator_I	52.2 %	0.6 %	2.0 %	2.4 %	1.2 %	0.6 %	0.6 %				0.5 %	1.2 %	2.3 %	2.2 %	2.1 %	25.8 %
DAussenStator_A			0.2 %													
DScheibe_AS	9.6 %															
Total	92 %	99.7 %	100 %	100 %	100 %	100 %	99.5 %	100 %	100 %	99.4 %	100 %	100 %	100 %	100 %	99.2 %	83.5 %

	T0000_30G[16]	T0000_30G[17]	T0000_30G[18]	T0000_30G[19]	T0000_30G[20]	T0000_30G[21]	T0000_30G[22]	T0000_30G[23]	T0000_30G[24]	T0000_30G[25]	T0000_30G[26]	T0000_30G[27]	T0000_30G[28]	T0000_30G[29]	T0000_30G[30]
Zahn_A_hoehe_gesamt															
Zahn_I_hoehe_gesamt															100.0 %
Spulenverschiebung	0.7 %													0.3 %	
DAussenStator	9.7 %	5.8 %	4.0 %	2.9 %	1.8 %	1.9 %	4.7 %	4.0 %	1.6 %	1.4 %	3.6 %	4.8 %	5.7 %	9.3 %	
RzwischenZahn															
DInnenStator	7.3 %	7.4 %	6.7 %	4.3 %	1.6 %	1.2 %			1.1 %	1.6 %	5.1 %	6.8 %	6.9 %	8.6 %	
RInnen															
Zahn_A_breite_Basis	8.7 %	9.5 %	10.9 %	10.3 %	10.6 %	9.3 %	10.9 %	10.1 %	9.2 %	10.8 %	9.9 %	9.8 %	9.1 %	7.6 %	
Zahn_A_hoehe_Basis	2.7 %	5.2 %	7.4 %	6.2 %	6.2 %	4.9 %	5.7 %	6.2 %	5.1 %	6.5 %	5.8 %	7.1 %	5.1 %	2.4 %	
Zahn_I_breite_Basis	3.3 %	1.3 %	2.3 %	1.2 %	1.1 %					0.9 %	1.6 %	2.0 %	1.1 %	3.2 %	
Zahn_I_hoehe_Basis	1.4 %	2.7 %	2.1 %	1.4 %	0.6 %	0.6 %			0.6 %	0.6 %	1.5 %	2.3 %	2.7 %	1.5 %	
MDa	28.7 %	28.3 %	21.3 %	13.2 %	9.5 %	6.6 %	7.9 %	7.6 %	7.2 %	9.8 %	12.6 %	19.7 %	28.9 %	30.3 %	
MRingVerschiebung	11.3 %	16.1 %	26.9 %	44.3 %	59.8 %	70.5 %	65.3 %	67.6 %	68.6 %	59.5 %	45.1 %	26.7 %	15.1 %	11.0 %	
Zahn_A_Winkel	1.0 %	1.8 %	1.8 %	2.5 %	1.9 %	1.8 %	2.1 %	2.0 %	1.7 %	1.8 %	2.2 %	1.9 %	1.6 %	0.7 %	
Zahn_I_Winkel		0.7 %	0.4 %	0.6 %	0.5 %					0.6 %	0.5 %	0.6 %	0.8 %		
RzwischenZahn_aussen															
MDi	26.3 %	20.5 %	15.8 %	12.6 %	6.2 %	3.1 %	2.1 %	1.9 %	3.4 %	6.8 %	12.7 %	15.8 %	21.3 %	27.5 %	
DInnenStator_I	0.9 %	3.2 %	2.7 %	1.0 %	0.5 %					0.9 %	1.1 %	2.4 %	2.8 %	0.8 %	
DAussenStator_A															
DScheibe_AS															
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	98.8 %	99.6 %	99.6 %	98.8 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

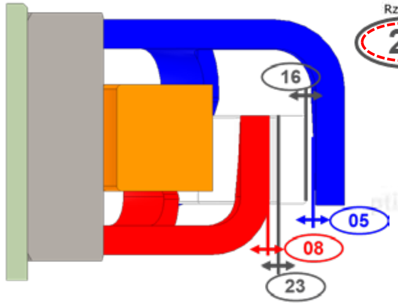
Sensi. tol. – Torque Maximum



- Influence of tolerances on maximum torque can be reduced to 4 important parameters
- CoP values vary between 14% and 33%

	T1050_30G[0]	T1050_30G[1]	T1050_30G[2]	T1050_30G[3]	T1050_30G[4]	T1050_30G[5]	T1050_30G[6]	T1050_30G[7]	T1050_30G[8]	T1050_30G[9]	T1050_30G[10]	T1050_30G[11]	T1050_30G[12]	T1050_30G[13]	T1050_30G[14]	T1050_30G[15]
Zahn_A_hoehe_gesamt	20.8 %															
Zahn_I_hoehe_gesamt																
Spulenverschiebung																
05 → DAussenStator	27.3 %	1.7 %	2.0 %	0.8 %		0.7 %	2.6 %	7.2 %	10.4 %	10.6 %	10.8 %	13.4 %	13.5 %	14.0 %	14.0 %	14.9 %
RzwischenZahn																
08 → DInnenStator					3.5 %	10.8 %	18.3 %	21.9 %	19.2 %	16.6 %	15.0 %	16.3 %	18.4 %	18.2 %	18.0 %	19.4 %
RInnen																
Zahn_A_breite_Basis	27.1 %	8.3 %	4.4 %	2.4 %	2.3 %	0.7 %		1.9 %	3.6 %	3.6 %	3.7 %	2.5 %	1.1 %	1.0 %		
Zahn_A_hoehe_Basis			1.9 %	1.8 %	1.2 %			0.7 %	2.1 %	2.0 %	2.1 %	1.1 %	0.7 %			
Zahn_I_breite_Basis			4.8 %	4.7 %	4.1 %	3.2 %	3.8 %	2.7 %	2.1 %	1.1 %	0.7 %	0.4 %				
Zahn_I_hoehe_Basis				0.7 %	1.2 %	2.2 %	2.9 %	2.7 %	1.9 %	1.1 %	1.1 %	0.8 %	0.5 %			
16 → MDa		11.5 %	5.1 %	0.7 %		2.2 %	10.1 %	21.0 %	24.4 %	25.6 %	26.5 %	27.6 %	29.9 %	31.3 %	31.4 %	30.3 %
MRingVerschiebung		76.2 %	79.0 %	87.9 %	82.0 %	64.0 %	32.5 %	4.0 %	2.4 %	7.6 %	9.8 %	6.9 %	4.1 %	2.8 %	2.0 %	1.9 %
Zahn_A_Winkel	20.6 %	2.0 %	0.8 %	0.8 %	0.6 %				0.5 %	0.7 %	0.6 %	0.5 %				
Zahn_I_Winkel	2.0 %															
RzwischenZahn_aussen																
23 → MDi				0.8 %	5.1 %	13.4 %	24.9 %	35.1 %	31.2 %	27.5 %	29.3 %	29.0 %	31.0 %	30.6 %	33.1 %	34.1 %
DInnenStator_I	26.3 %	0.8 %	0.0 %	0.4 %	1.3 %	2.6 %	3.2 %	3.5 %	2.0 %	1.5 %	1.0 %	0.7 %	0.9 %			
DAussenStator_A																
DScheibe_AS	31.3 %															
Total	61.9 %	100 %	99.3 %	99.6 %	99.7 %	99.2 %	99.3 %	99.5 %	99.6 %	99.5 %	99.7 %	99.7 %	99.1 %	98.8 %	99.5 %	99.5 %

	T1050_30G[16]	T1050_30G[17]	T1050_30G[18]	T1050_30G[19]	T1050_30G[20]	T1050_30G[21]	T1050_30G[22]	T1050_30G[23]	T1050_30G[24]	T1050_30G[25]	T1050_30G[26]	T1050_30G[27]	T1050_30G[28]	T1050_30G[29]	T1050_30G[30]
Zahn_A_hoehe_gesamt															
Zahn_I_hoehe_gesamt															
Spulenverschiebung															
05 → DAussenStator	16.4 %	16.7 %	16.2 %	14.4 %	12.5 %	7.8 %	4.8 %	4.6 %	2.3 %	2.2 %	1.8 %	2.2 %	3.4 %	3.1 %	
RzwischenZahn															
08 → DInnenStator	20.6 %	21.0 %	22.1 %	22.6 %	26.0 %	26.7 %	27.3 %	21.3 %	16.1 %	14.4 %	15.2 %	13.5 %	12.0 %	13.0 %	
RInnen															
Zahn_A_breite_Basis							0.9 %	4.0 %	7.1 %	8.9 %	8.4 %	7.2 %	6.3 %	5.1 %	
Zahn_A_hoehe_Basis							0.5 %	2.7 %	4.5 %	4.6 %	4.9 %	4.5 %	4.2 %	1.7 %	100.0 %
Zahn_I_breite_Basis					0.9 %	2.0 %	4.0 %	5.2 %	5.7 %	5.9 %	7.2 %	8.7 %	6.6 %	9.3 %	
Zahn_I_hoehe_Basis						0.3 %	1.1 %	1.4 %	2.0 %	2.3 %	2.9 %	2.7 %	2.8 %	2.4 %	
16 → MDa	29.9 %	28.7 %	28.6 %	26.6 %	20.3 %	17.6 %	15.4 %	14.2 %	11.9 %	11.7 %	12.7 %	15.4 %	18.0 %	22.4 %	
MRingVerschiebung	1.2 %	0.5 %		2.9 %	7.5 %	7.3 %	1.8 %	1.5 %	9.1 %	11.1 %	6.7 %	3.3 %	1.6 %	1.7 %	
Zahn_A_Winkel								0.4 %	0.9 %	1.2 %	1.4 %	1.3 %	1.1 %	1.1 %	
Zahn_I_Winkel										0.4 %	0.2 %	0.5 %	0.6 %		
RzwischenZahn_aussen														1.3 %	
23 → MDi	33.6 %	33.6 %	31.3 %	29.9 %	27.3 %	26.5 %	24.9 %	22.2 %	17.3 %	16.1 %	16.2 %	17.7 %	20.1 %	18.3 %	
DInnenStator_I				1.9 %	4.7 %	11.4 %	18.9 %	23.1 %	23.1 %	21.4 %	24.0 %	23.1 %	22.8 %	19.4 %	
DAussenStator_A						0.5 %	0.6 %	0.4 %	0.5 %	0.4 %	0.3 %	0.2 %			
DScheibe_AS															
Total	99.4 %	99.2 %	98.3 %	98.8 %	99.1 %	99.9 %	99.9 %	99.8 %	99.6 %	100 %	100 %	100 %	100 %	99.7 %	100 %



Conclusion

- The sensitivity analysis made it possible to identify the valid parameters for the requested torque curves
- With the MOP and its possibility as a solver, it was possible to successfully do different optimizations
- A model with all important tolerances was able to identify and validate the important parameters and its statistics

- In future analyses, the asymmetric effects on the curves and more complex system simulations are planned

Thank you for your attention!

Ansys

WOST

WORKSHOP