

Simulation und Optimierung eines Metabo Winkelschleifer-Motors mit NX Magnetics und NX Thermal Flow

Berlin, 15. November 2017, Julian Witkowski



1. Metabo stellt sich vor

2. Magnetfeldsimulation 2kW-BLAC Motor mit NX Magnetics

- a) **Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell**
- b) **Aufbau des FE-Modells zur Verlustleistungsberechnung**
- c) **Ansteuerung des sinuskommutierten BLAC-Motors**
- d) **Simulationsergebnisse 2D**
- e) **Modellaufbau und Simulation 3D**

3. CHT-Simulation des Antriebsstrangs mit NX Thermal/Flow

- a) **Auslegung eines energieeffizienten Lüfters**
- b) **Exkurs: Wärmeübertragungsmechanismen**
- c) **Modellierung der Wärmeübertragung**
- d) **Auswertung der Simulationsergebnisse**

4. Fazit

1. Metabo stellt sich vor

- *Hersteller von professionellen Elektrowerkzeugen und Zubehör*
- *Weltweit knapp 1.900 Mitarbeiter, davon 1.080 in Nürtingen*
- *Mehr als 75 Auszubildende und BA-Studenten*
- *Umsatz 2016: 423 Mio €*
- *Weit mehr als **500** aktive **Patente***
- *Exportquote im Jahr 2016: 80 Prozent*
- *Produktionsstätten in Nürtingen und Shanghai*
- *Seit März 2016 Teil der Hitachi Koki-Gruppe, Japan*

1. Metabo stellt sich vor

metallbohrer



1. Metabo stellt sich vor

metabo[®]
PROFESSIONAL POWER TOOL SOLUTIONS



Bauhandwerk & Renovierung

Metallhandwerk & Industrie



Forschungsprojekt

Power Tools „Green Efficiency“

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

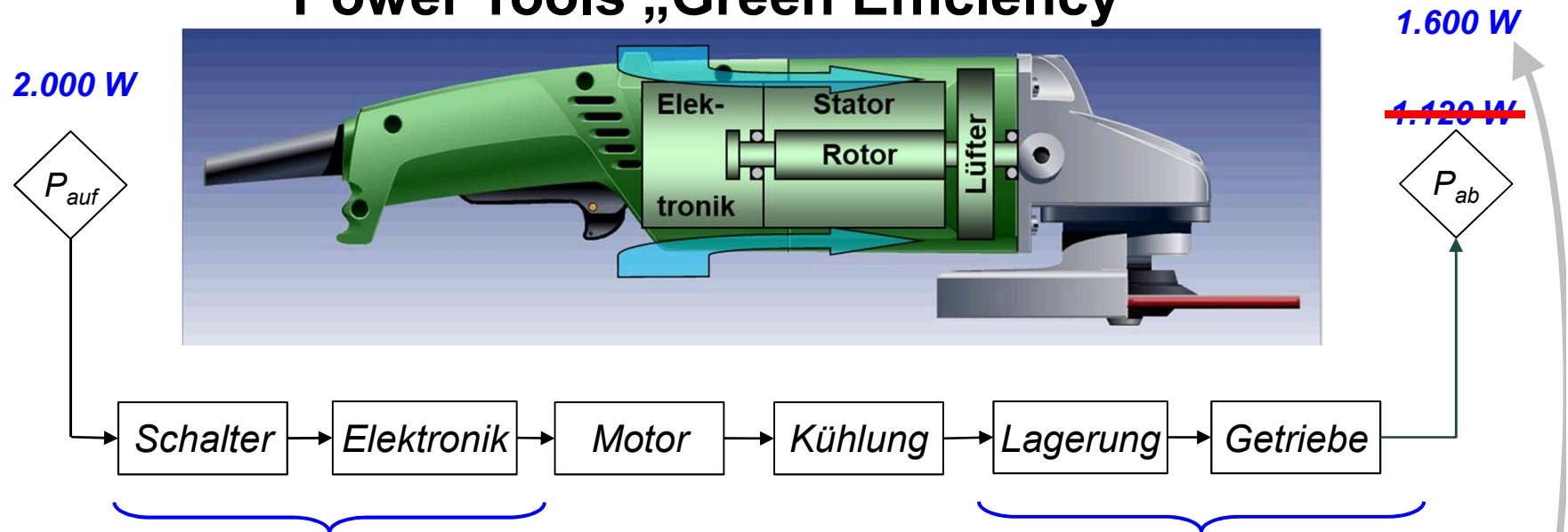


made by



Forschungsprojekt

Power Tools „Green Efficiency“



Bisher (Universalmotor)	25 W	409 W	383 W	100 W	$\eta = 0.56$
Projektzielwerte	120 W	150 W	100 W	40 W	$\eta = 0.80$
Simulation WS 2kW-BLAC	111 W	??? W	??? W	53 W	

1. Metabo stellt sich vor

2. Magnetfeldsimulation 2kW-BLAC Motor mit NX Magnetics

- a) **Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell**
- b) **Aufbau des FE-Modells zur Verlustleistungsberechnung**
- c) **Ansteuerung des sinuskommutierten BLAC-Motors**
- d) **Simulationsergebnisse 2D**
- e) **Modellaufbau und Simulation 3D**

3. CHT-Simulation des Antriebsstrangs mit NX Thermal/Flow

- a) **Auslegung eines energieeffizienten Lüfters**
- b) **Exkurs: Wärmeübertragungsmechanismen**
- c) **Modellierung der Wärmeübertragung**
- d) **Auswertung der Simulationsergebnisse**

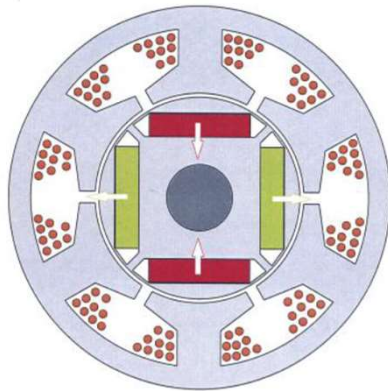
4. Fazit

2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

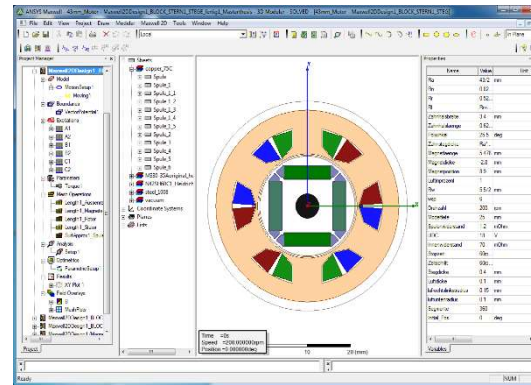
a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell

Ziele

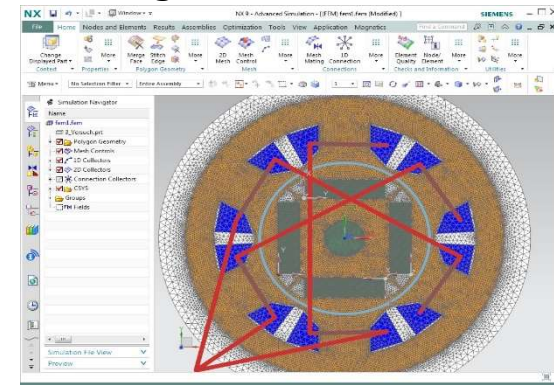
- Gegenüberstellung von ANSYS Maxwell und NX Magnetics am Beispiel einer Motorensimulation mit Blockkommutierung für einen Motor mit 43mm Außendurchmesser.



ANSYS Maxwell



NX Magnetics



- Ableiten einer Softwareempfehlung für die Metabowerke.

Haupt-Motivation: Kostenfaktor

- ANSYS Maxwell
 - nur 2D (3D Lizenz zu teuer)
- NX Magnetics
 - 2D und 3D
 - In NX-Landschaft integriert

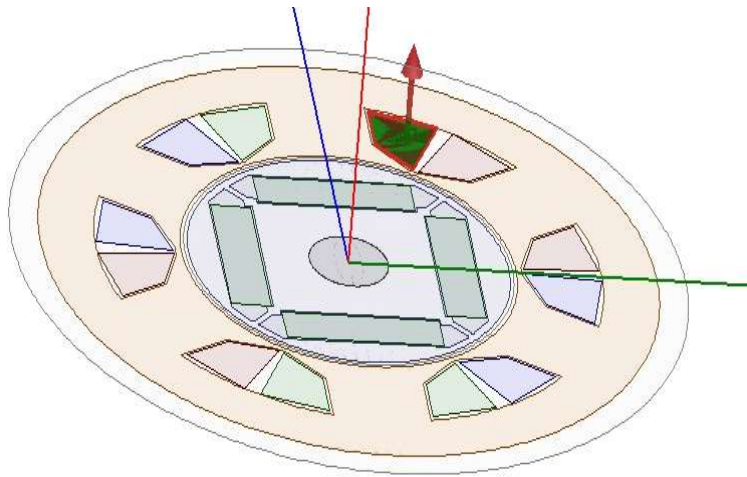
QUELLE KAPITEL 1 A): MASTERARBEIT JOHANNES HAHN, HOCHSCHULE KAISERSLAUTERN (2015)

2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell

■ ANSYS Maxwell

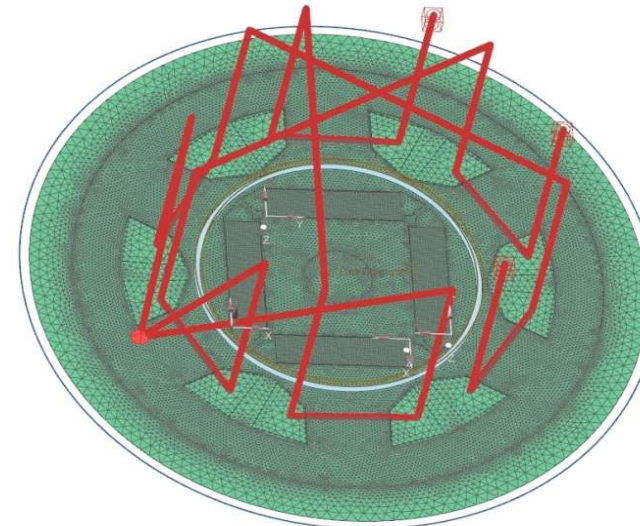
- Stromrichtung in *Maxwell* definieren



- Exportieren der erstellten Windungen in den Circuit Editor

■ NX Magnetics

- Verschaltung der Spulen in der *Fem- Datei* erstellen

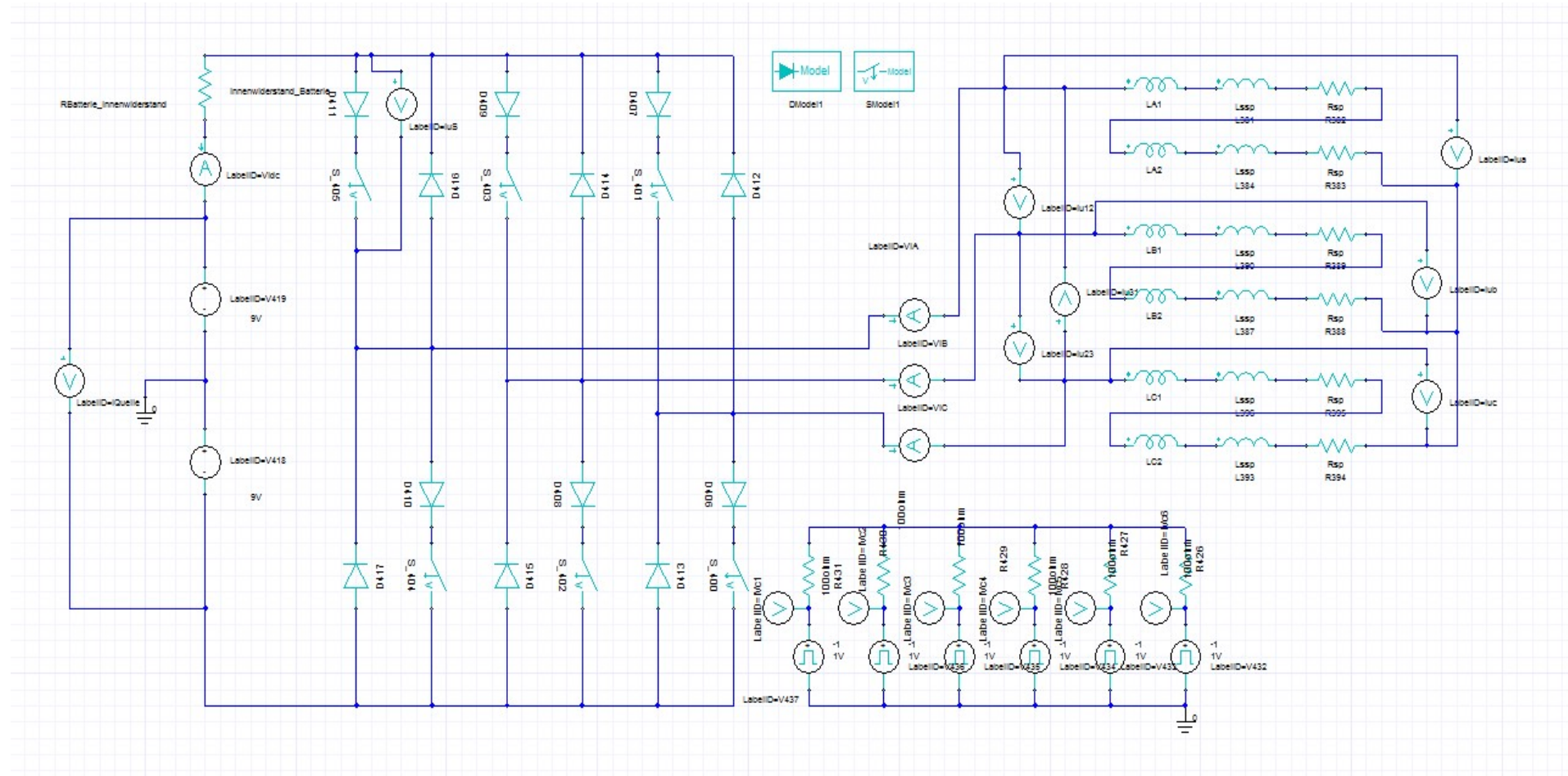


- Signal in Form von Strangspannungen definieren

2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell

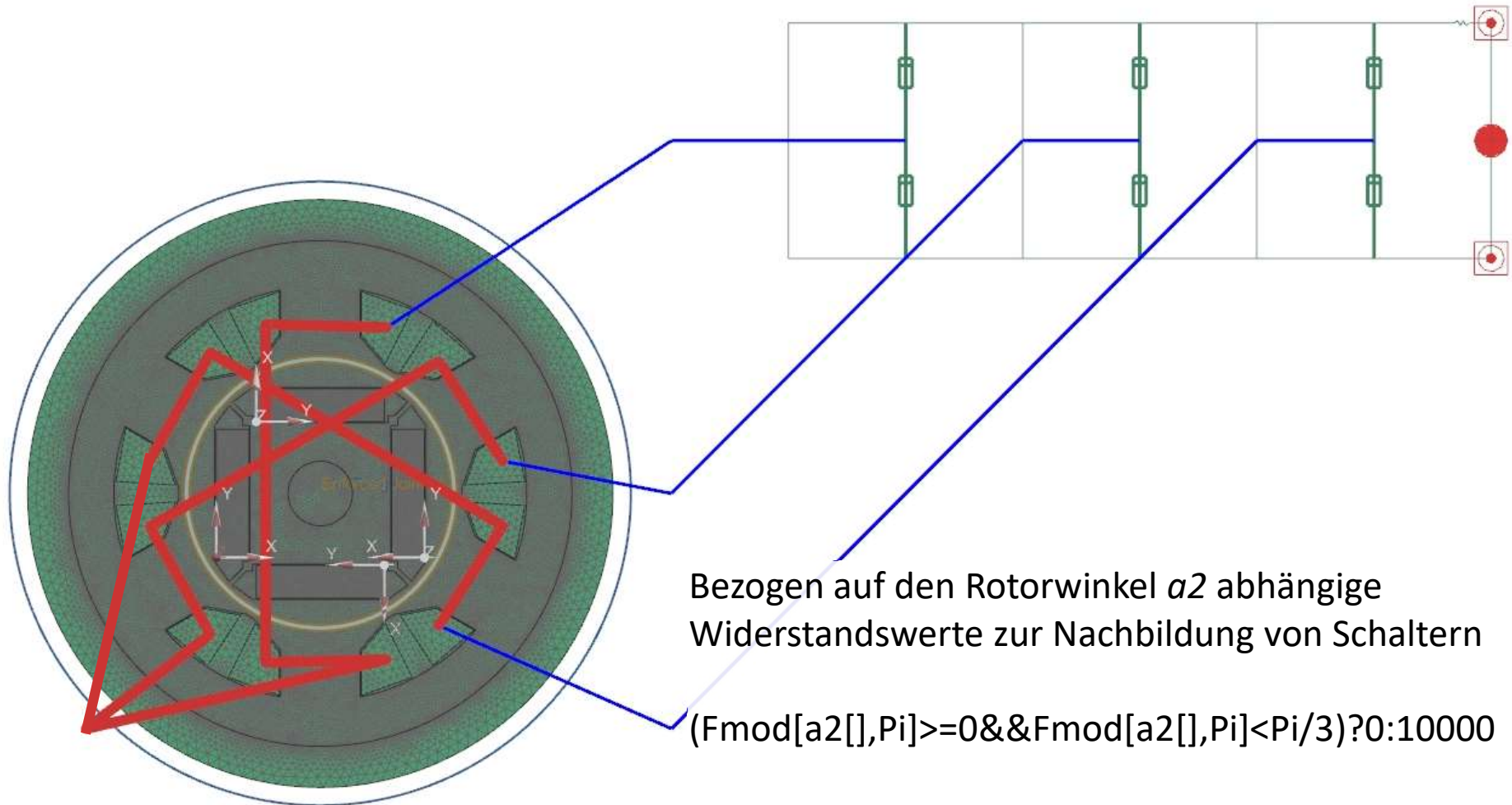
■ ANSYS Maxwell



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell

■ NX Magnetics

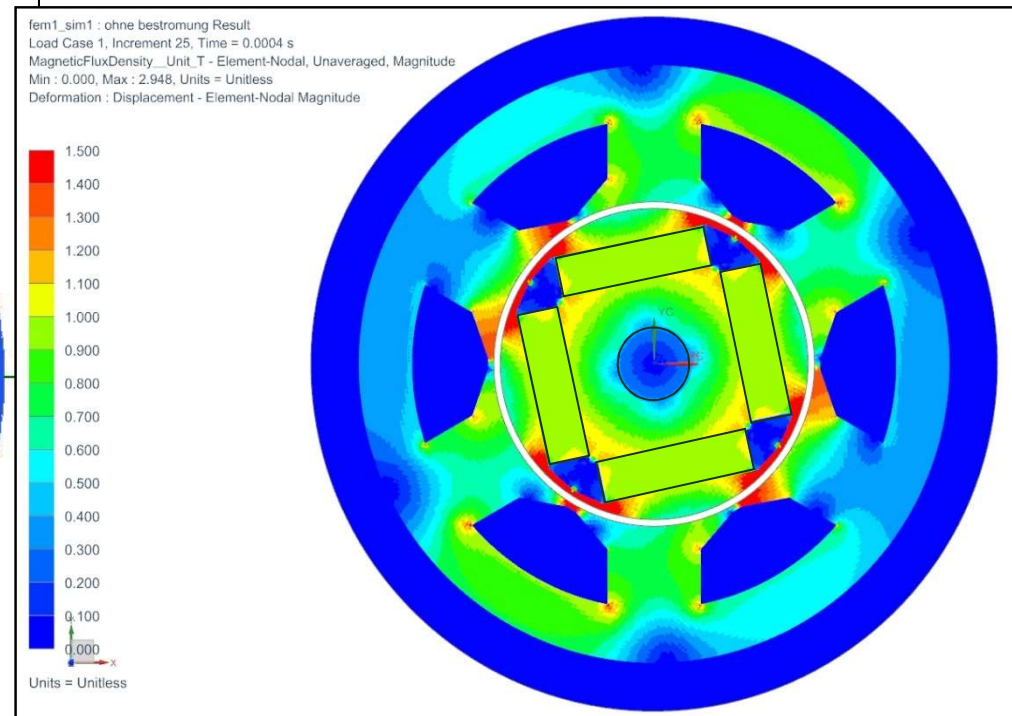
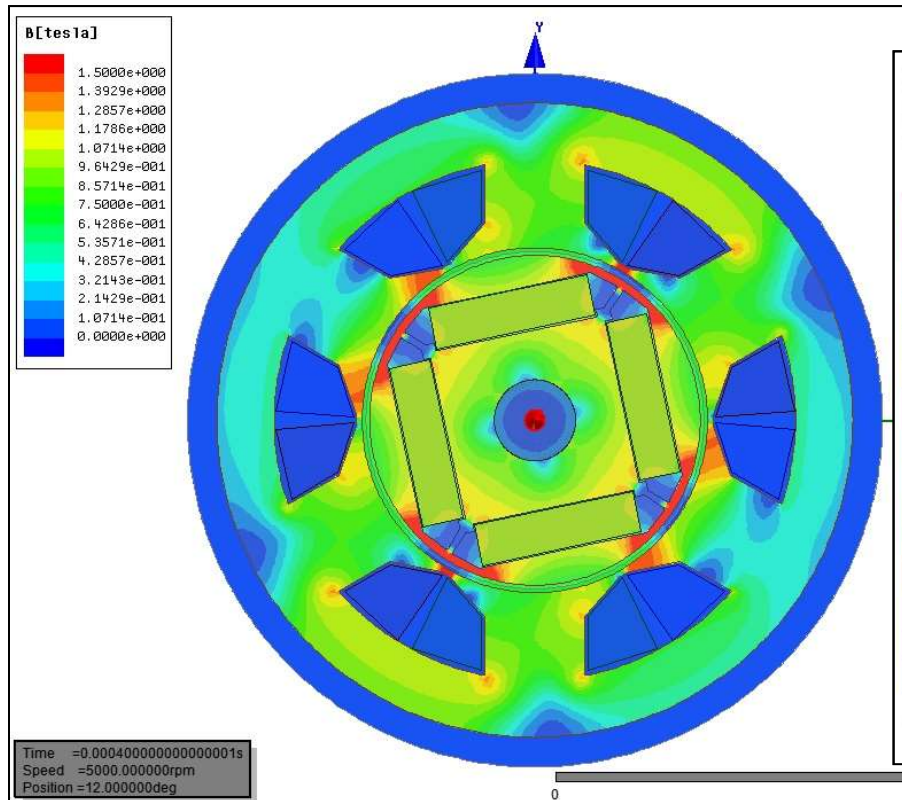


2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell

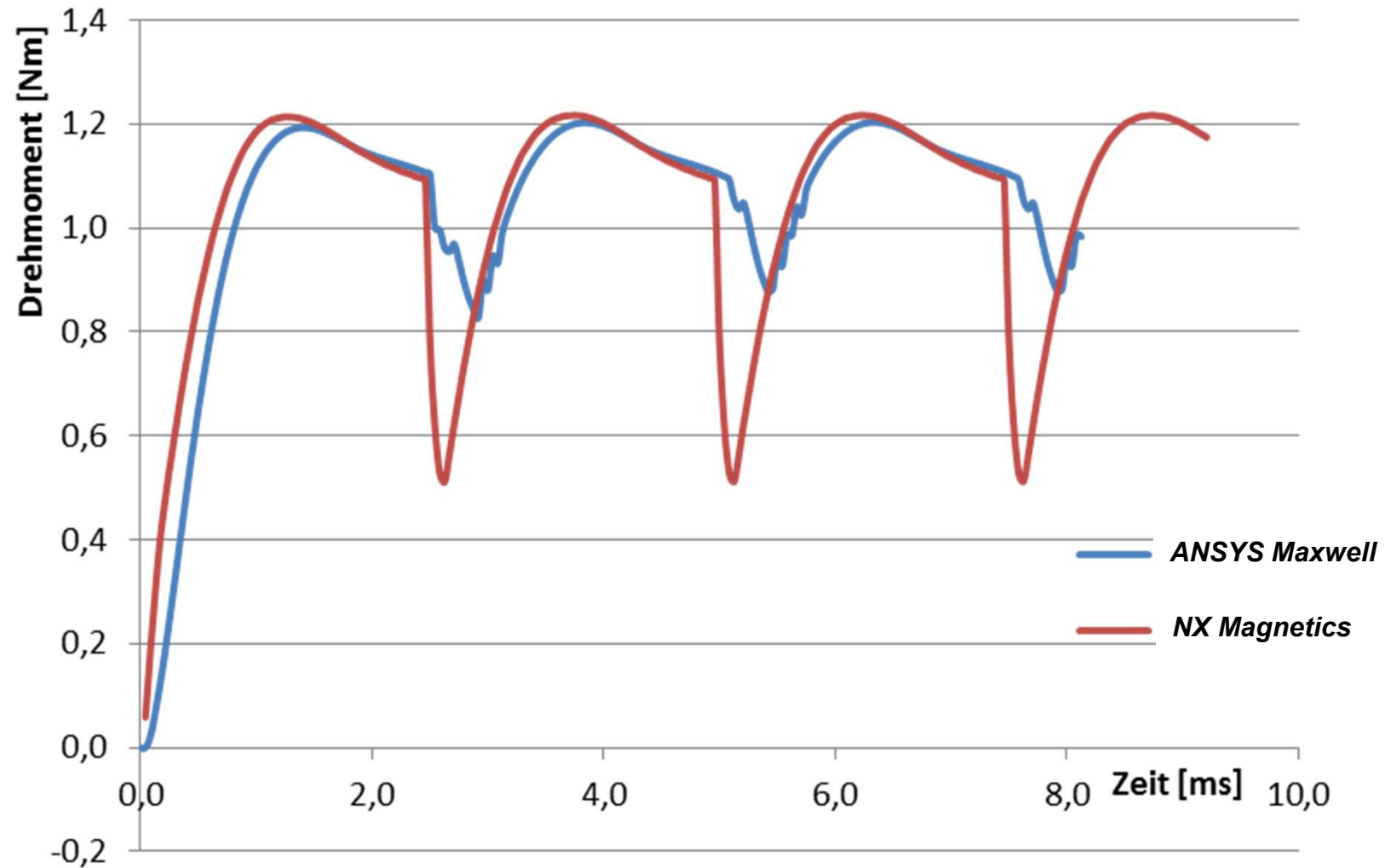
■ ANSYS Maxwell

■ NX Magnetics



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

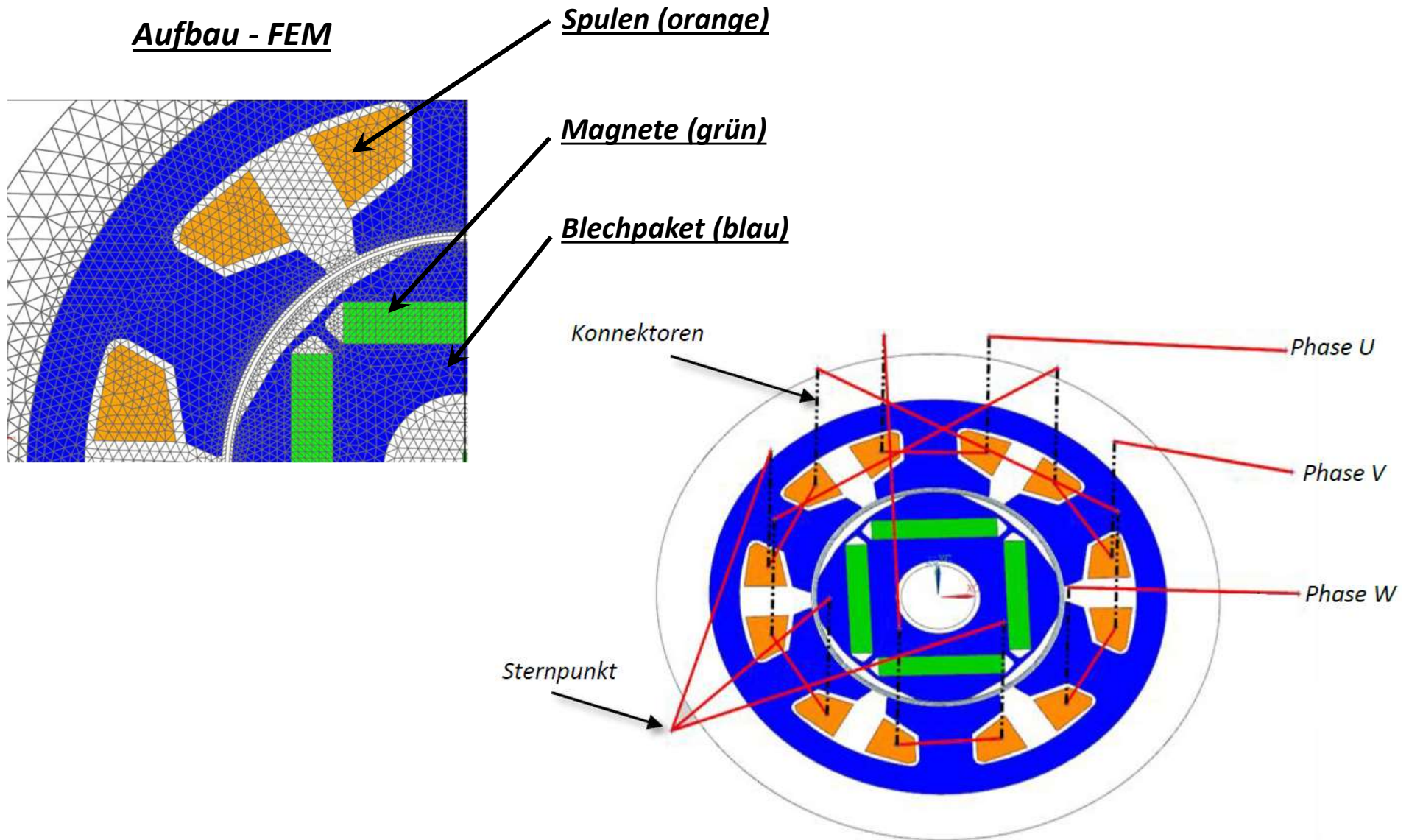
a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell

	<i>ANSYS Maxwell</i>		<i>NX Magnetics</i>	
+	Sehr übersichtlich	Benutzeroberfläche	Frei gestaltbar	+
	Umständlich/ keine Bemaßungslinien	Motor Konstruieren/ Parametrisieren	Vollwertiges Konstruktionsprogramm	+
+	ja	Material vergeben/ neu anlegen	ja	+
	<i>Circuit Editor</i>	Verschaltung des Motors	<i>Fem- Datei</i> (gute Übersicht)	+
+	Ergebnisse in live	Simulation/ Ergebnisse	Datentabelle plotten	+
+	Optimetrix	Optimierungs- schleifen	Parameter Sweep (nicht geprüft)	
+	Simplorer	Erweiterungen	Matlab/ Simulink	

2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

b) Aufbau und des FE-Modells Verlustleistungsberechnung

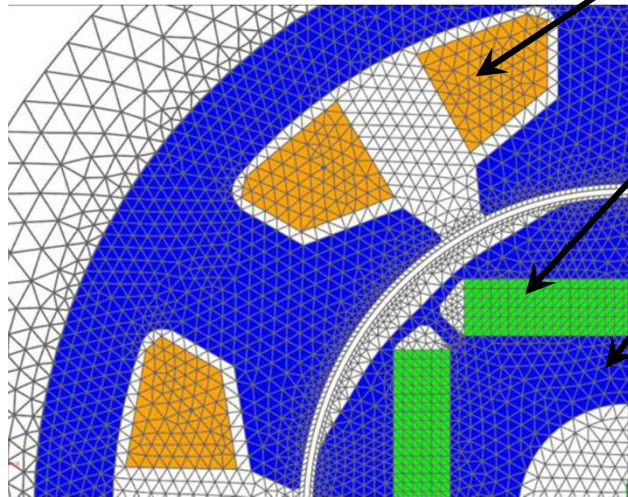
Aufbau - FEM



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

b) Aufbau und des FE-Modells Verlustleistungsberechnung

Aufbau - FEM



Spulen - Ohmsche Verluste

- Widerstand der Kupferwicklung

$$P_{VCu} = R * I^2$$

Magnete - Wirbelstromverluste

- Bei leitfähigem Material

Blechpaket - Eisenverluste (Steinmetzverluste)

- Hystereseverluste
- Wirbelstromverluste
- Überschussverluste

$$p_h = k_h f \hat{B}^2$$

$$p_c = k_c (f \hat{B})^2$$

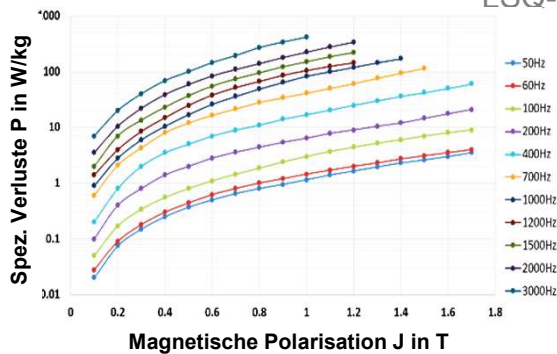
$$p_e = k_e (f \hat{B})^{1.5}$$

$$p_{ges} = k_h f \hat{B}^2 + k_c (f \hat{B})^2 + k_e (f \hat{B})^{1.5}$$

Materialdaten Blechpaket

Basic Magnetic	
relative Permeability (mur)	1
<input checked="" type="checkbox"/> B-H Curve	B-H Curve T
Permanent Magnet	
Electrical	
relative permittivity (epsr)	0
<input checked="" type="checkbox"/> Conductivity (sigma) [S/m]	0
Core Loss	
<input checked="" type="checkbox"/> Hysteresis Coefficient (Kh)	174 W/m^3
<input type="checkbox"/> Eddy Current Coefficient (Kc)	User Defined
<input checked="" type="checkbox"/> User Defined (Kc)	0.469 W/m^3
<input type="checkbox"/> Excess Coefficient (Ke)	0 W/mm^3

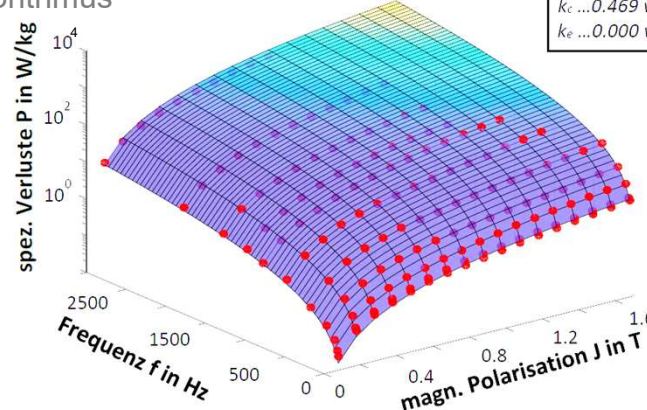
Materialdaten



Matlab

LSQ-Algorithmus

Koeffizienten

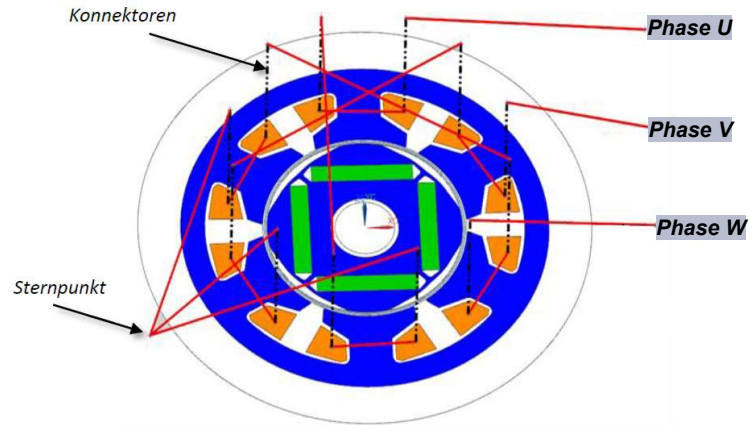


$k_h \dots 174.9 \text{ w/m}^3$
 $k_c \dots 0.469 \text{ w/m}^3$
 $k_e \dots 0.000 \text{ w/m}^3$

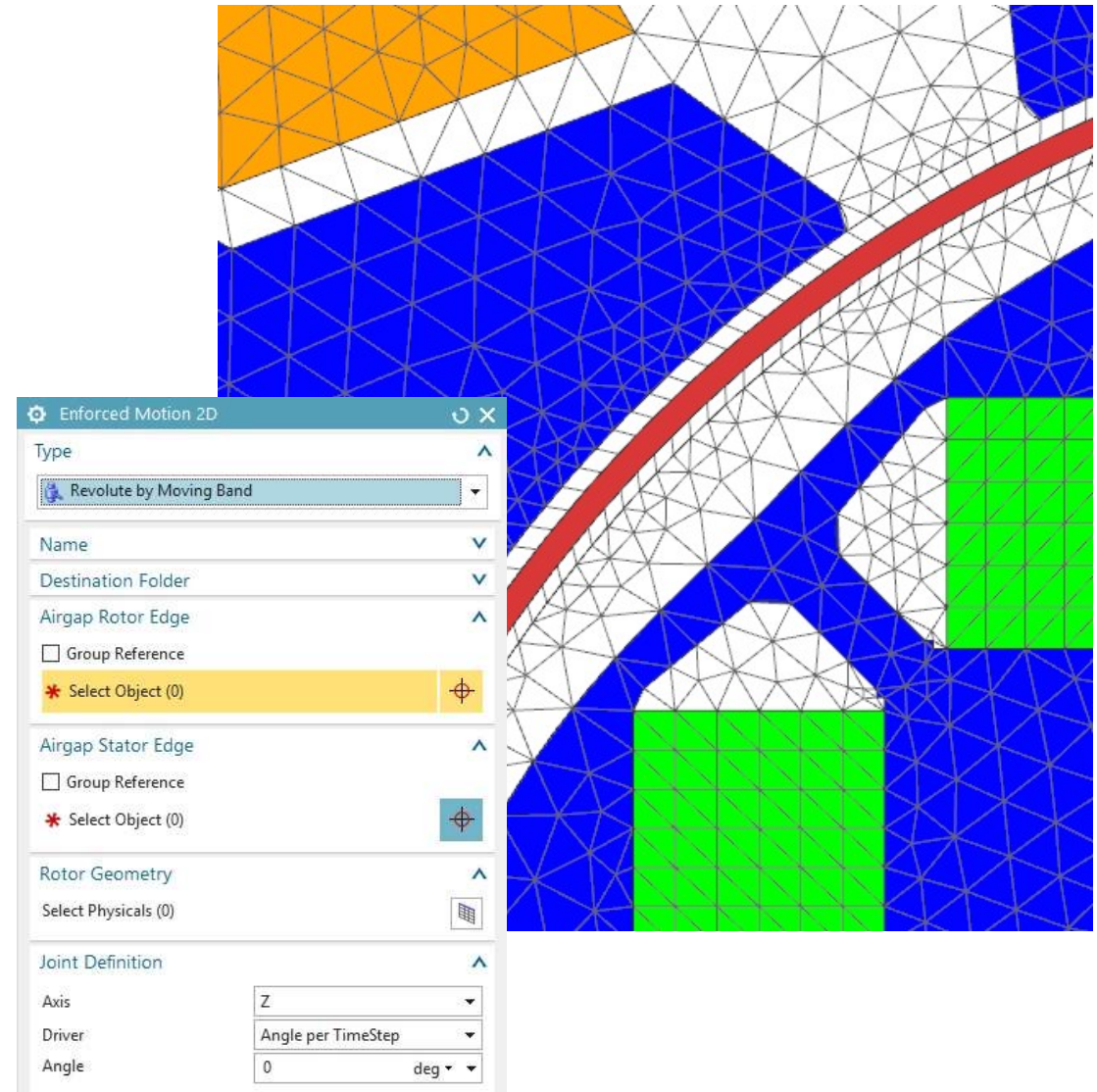
2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

c) Ansteuerung des sinuscommutierten BLAC-Motors

Aufbau - Sim



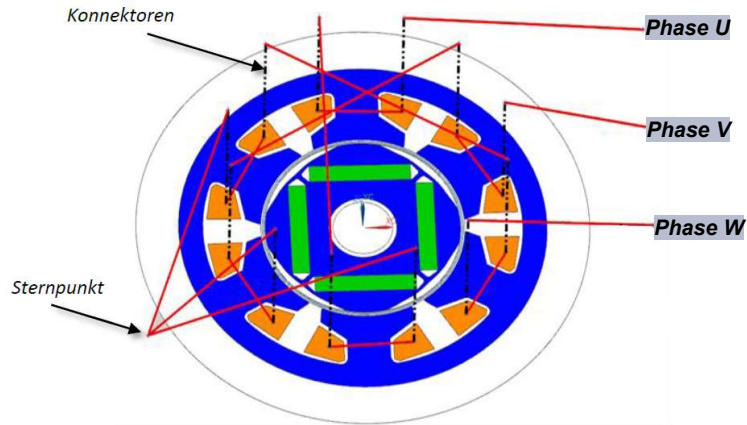
- Abgrenzung Umgebungsluft flux tangent
- Rotordrehung mit Moving Band



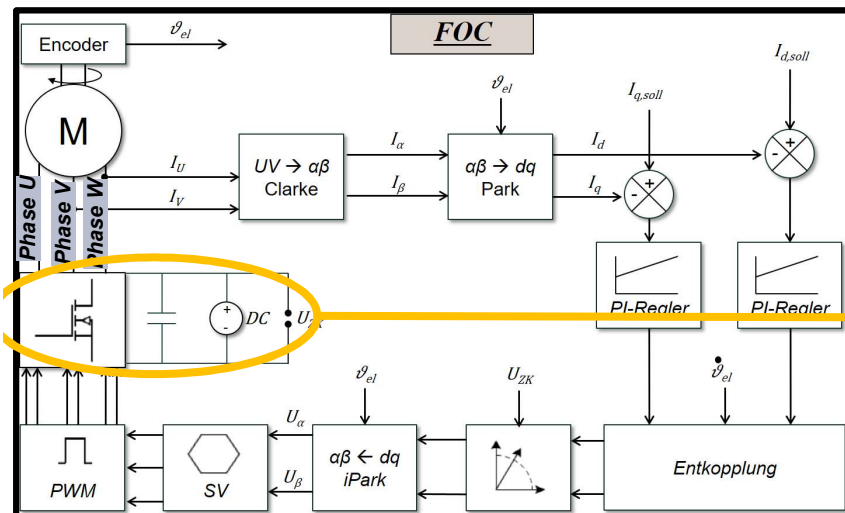
2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

c) Ansteuerung des sinuscommutierten BLAC-Motors

Aufbau - Sim

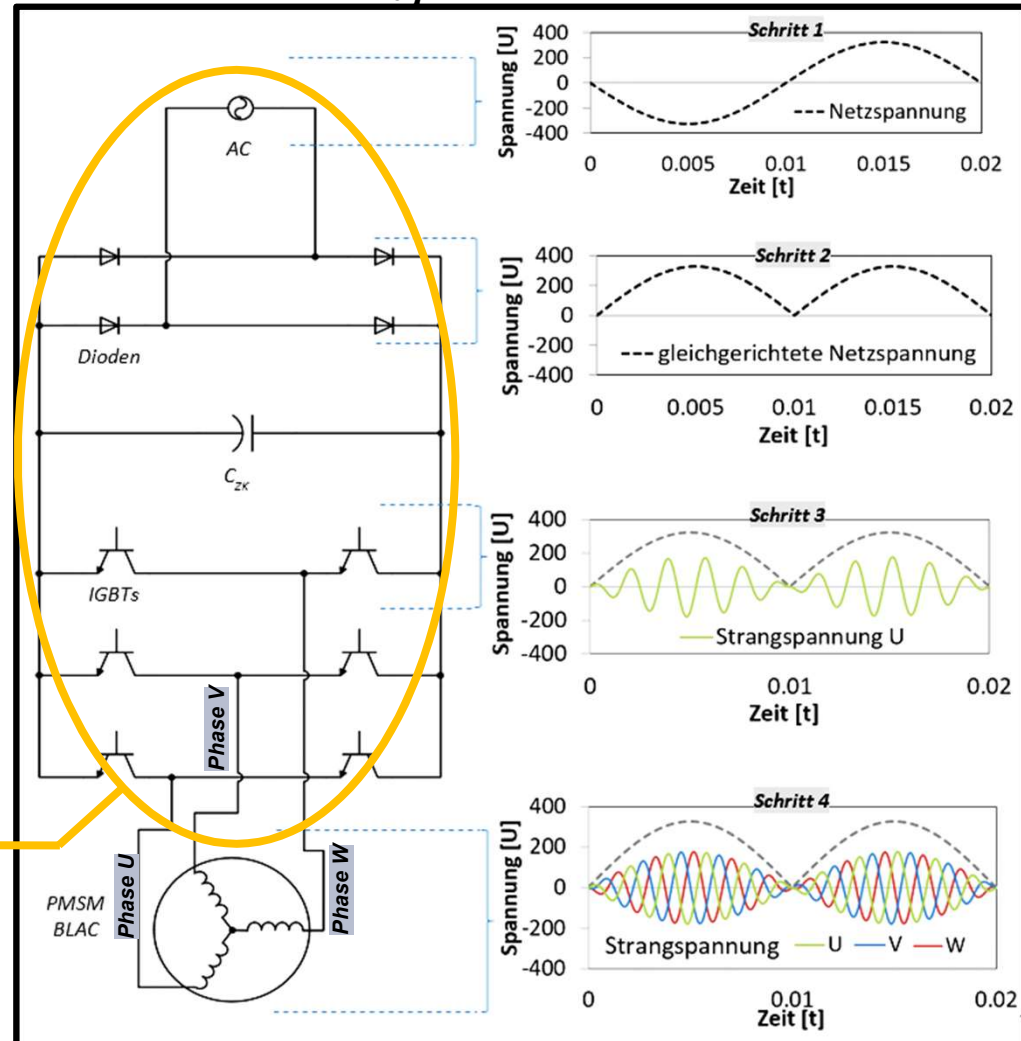


- Abgrenzung Umgebungsluft flux tangent
- Rotordrehung mit Moving Band
- Ansteuerung der Phasen...



QUELLE: MASTERARBEIT FLORIAN LUDWIG, TU ILMENAU (2013)

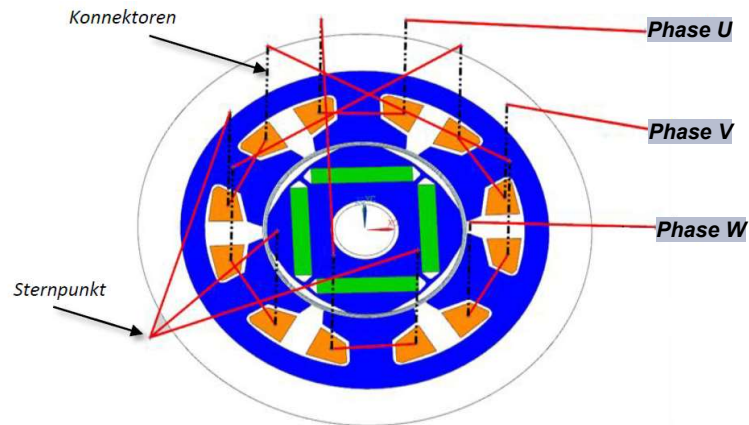
Prinzip Motor-Elektronik



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

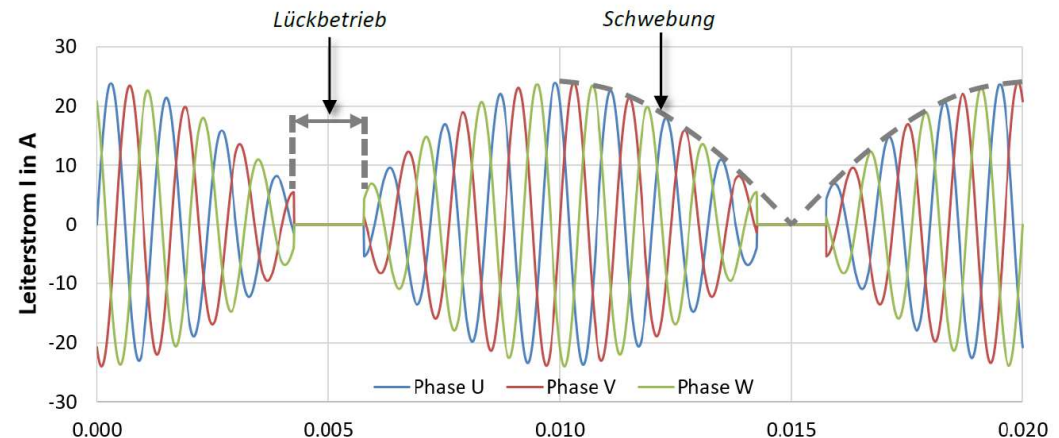
c) Ansteuerung des sinuscommutierten BLAC-Motors

Aufbau - Sim



- Abgrenzung Umgebungsluft flux tangent
- Rotordrehung mit Moving Band
- Ansteuerung der Phasen...

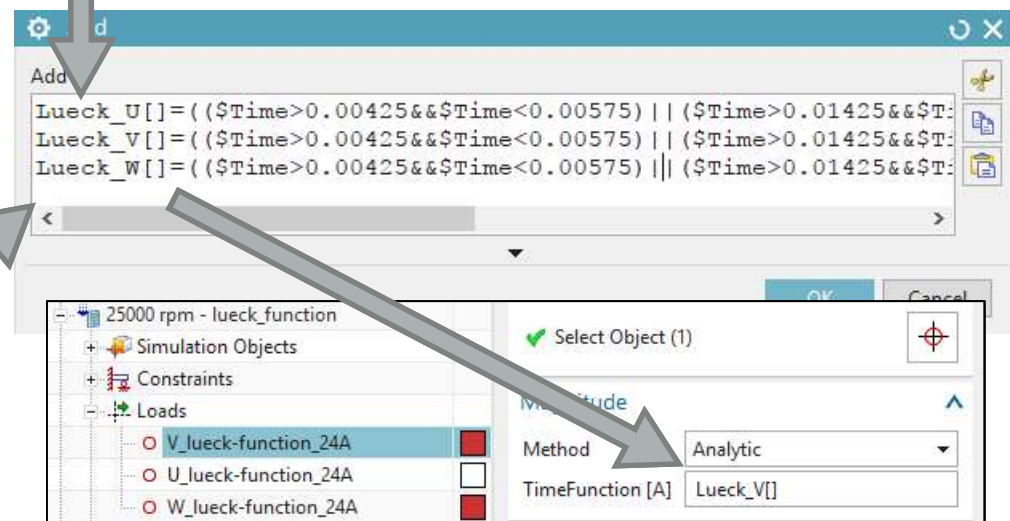
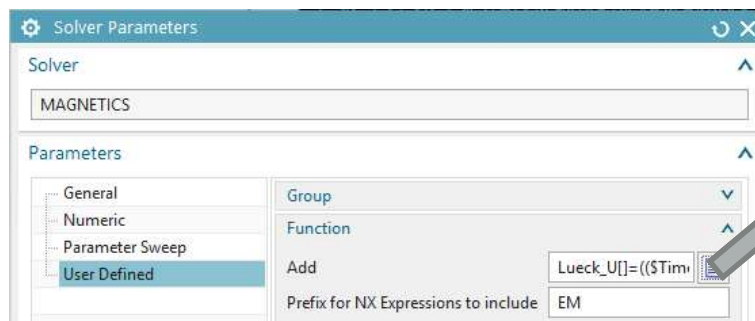
...über ideale Phasenströme



wenn $[(t > 0.00425s \ \& \ t < 0.00575s) \ \text{oder} \ (t > 0.01425s \ \& \ t < 0.01575s)]$

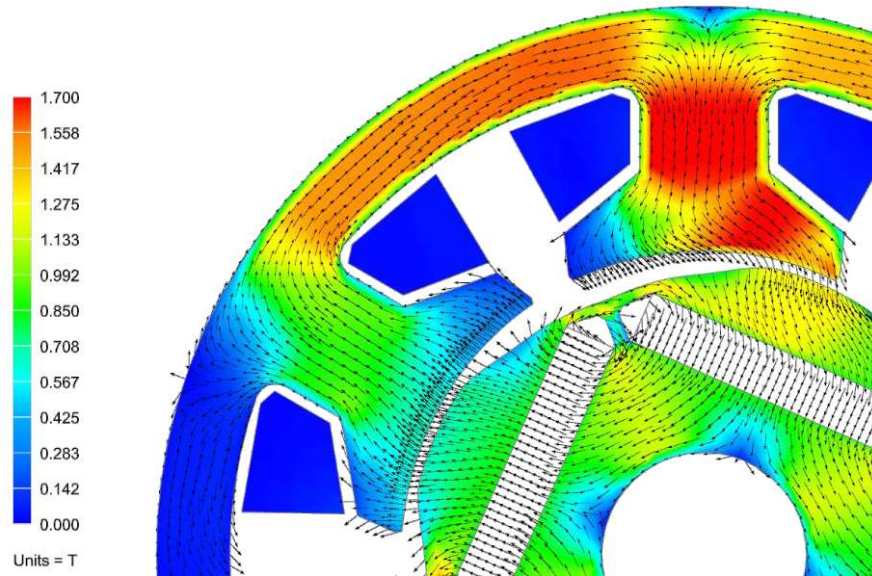
dann [0A]

sonst $[\sin\left(\left(2 * \pi * \frac{2 * n}{60} * t + \varphi\right)\right) * \text{abs}(\cos(2 * \pi * 50\text{Hz} * t - \pi)) * 23\text{A}]$

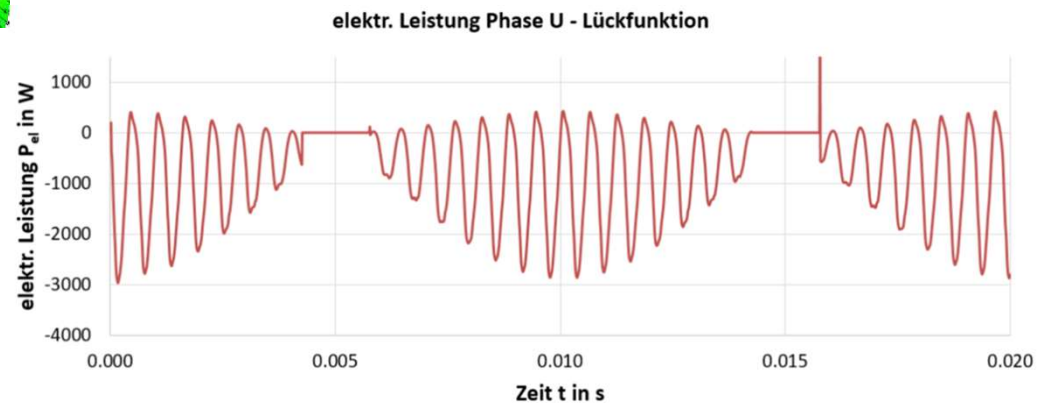


2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

d) Simulationsergebnisse 2D



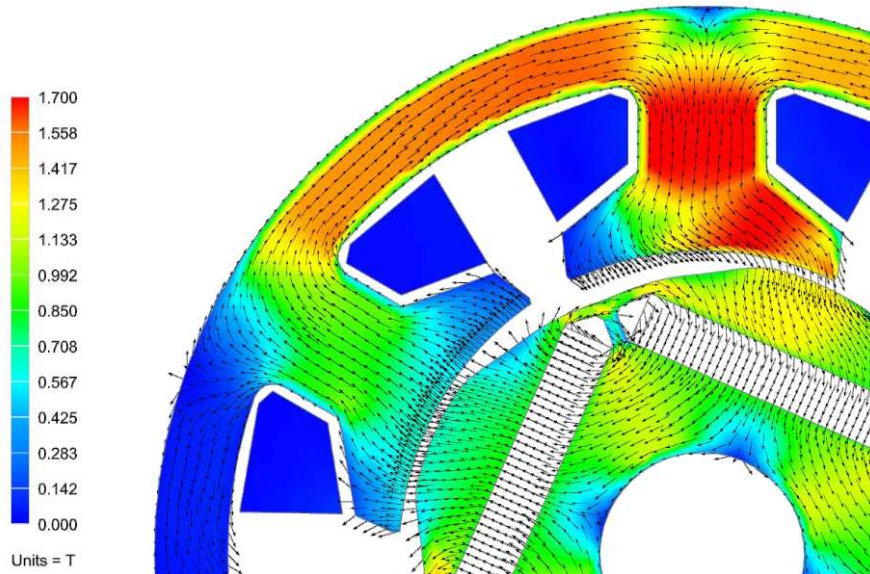
elektr. Aufnahmeleistung	mech. Abtriebsleistung	Differenz
P_{el}	P_{mech}	ΔP
2367 W	2293 W	74 W



- Bewertung der Magnetflussdichte
- Auswertung des Momentenverlaufs
- Auswertung des Eingangsleistungsverlaufs

2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

d) Simulationsergebnisse 2D

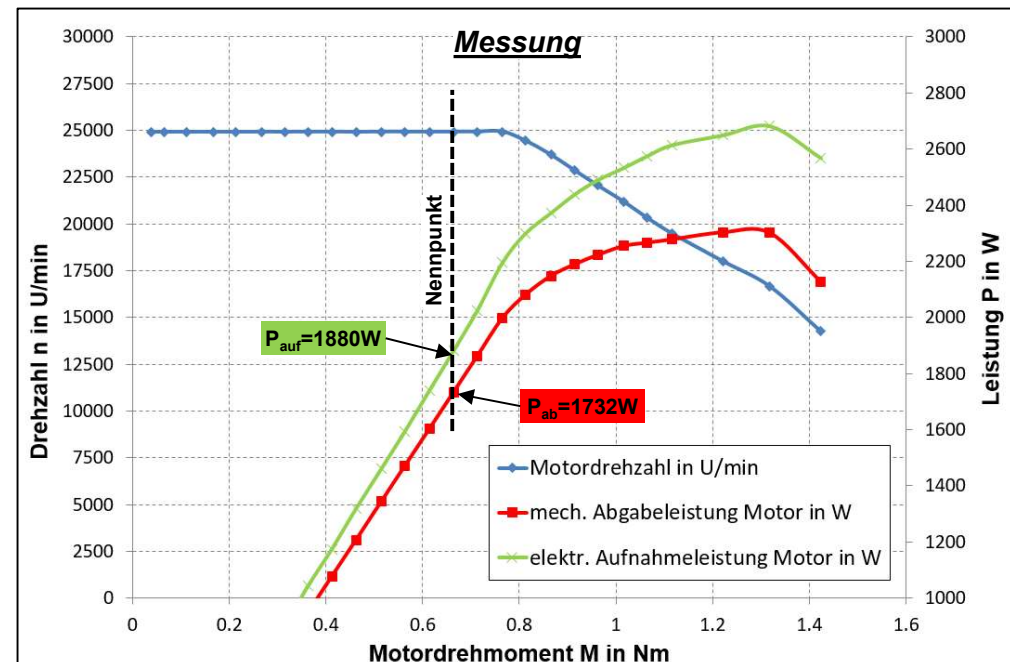


elektr. Aufnahmeleistung	mech. Abtriebsleistung	Differenz
P_{el}	P_{mech}	ΔP
2367 W	2293 W	74 W

	Ohmsche Verluste (analyt.)	Wirbelstromverluste (FE conductivity)	Wirbelstromverluste (Steinmetz)	Hystereseverluste (FFT-Steinmetz)
	$P_{V,Cu}$	$P_{C,FEM}$	$P_{C,FFT}$	$P_{h,FFT}$
Rotor	-	-	0.01 W	0.01 W
Stator	-	-	39 W	17 W
Magnet	-	4 x 5 W	-	-
Spulen	61 W (47 W)	-	-	-
Gesamtverlustleistung 137 W				

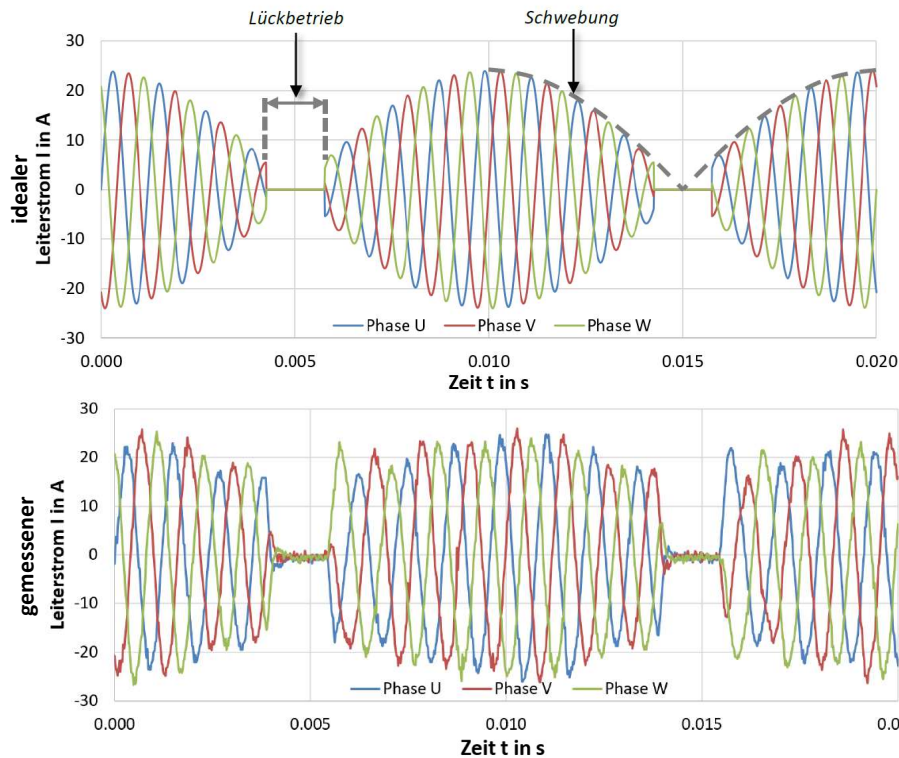
$\Delta P = 74 W$

- Bewertung der Magnetflussdichte
- Auswertung des Momentenverlaufs
- Auswertung des Eingangsleistungsverlaufs
- Berechnete Verlustleistung 137W
- Gemessene Verlustleistung 147W
- Berechnete Aufnahmeleistung 2367W
- Gemessene Aufnahmeleistung 1880W



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

d) Simulationsergebnisse 2D



	Ohmsche Verluste (analyt.) $P_{V,Cu}$	Wirbelstromverluste (FE conductivity) $P_{C,FEM}$	Wirbelstromverluste (FFT-Steinmetz) $P_{C,FFT}$	Hystereseverluste (FFT-Steinmetz) $P_{h,FFT}$
Rotor	-	-	0.01W	0.01W
Stator	-	-	39W	17W
Magnet	-	4 x 5W	-	-
Spulen	61W (47W)	-	-	-
Gesamtverlustleistung 137W				

	Ohmsche Verluste (analyt.) $P_{V,Cu}$	Wirbelstromverluste (FE conductivity) $P_{C,FE}$	Wirbelstromverluste (FFT Steinmetz) $P_{C,FFT}$	Hystereseverluste (FFT Steinmetz) $P_{H,FFT}$
Rotor	-	-	0.02W	0.02W
Stator	-	-	43W	19W
Magnet	-	4 x 10W	-	-
Spulen	84W (63W)	-	-	-
Gesamtverlustleistung 186W				

Verlustleistung

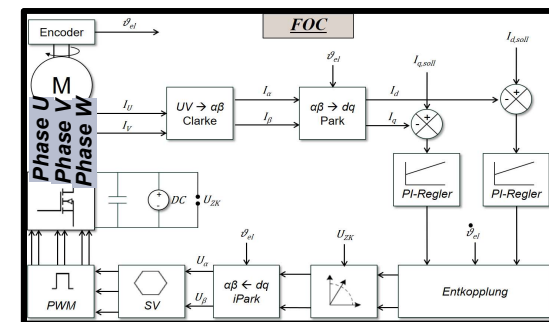
Berechnet mit idealem Strom 137W
 Berechnet mit Messstrom 186W
 Gemessen 197W

bei
 $P_{auf} = 2367W$

skaliert auf
 $P_{auf} = 1880W$

147W

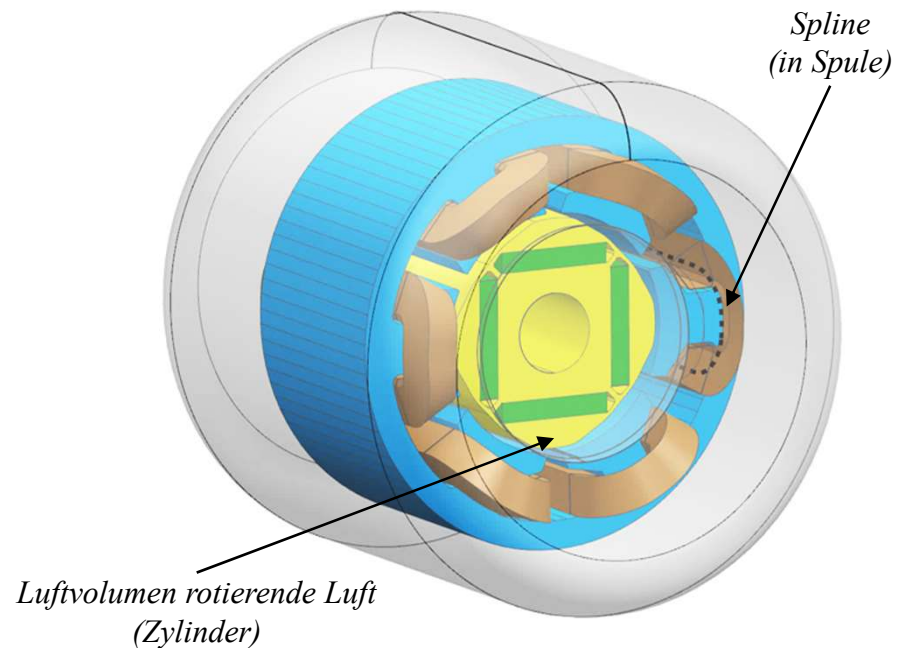
$$p_{ges} = k_h f \hat{B}^2 + k_c (f \hat{B})^2 + k_e (f \hat{B})^{1.5}$$



2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

e) Modellaufbau und Simulation 3D

- *Statoraußendurchmesser 65mm*
- *Magnete $b=18\text{mm} \times d=3\text{mm}$*
- *Luftspalt 0.7mm*
- *Paketlänge 34mm*
- *Blech M270-35A*



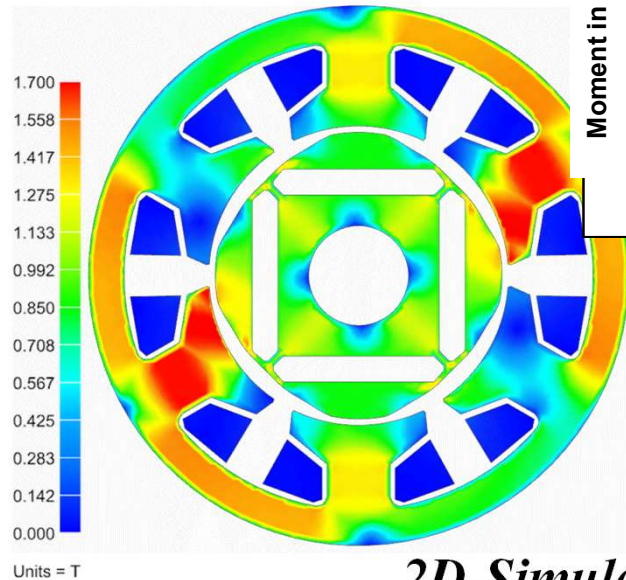
2D-Simulation ausreichend, wenn: - konstante Felder in Achsrichtung existieren
- folgende Gleichung erfüllt ist

$$\delta_{eff} = \delta_{gap} + d_{Mag} < L_{Paket}/10$$
$$\delta_{eff} = 3.7 \not< L_{Pak} /10 = 3.4$$

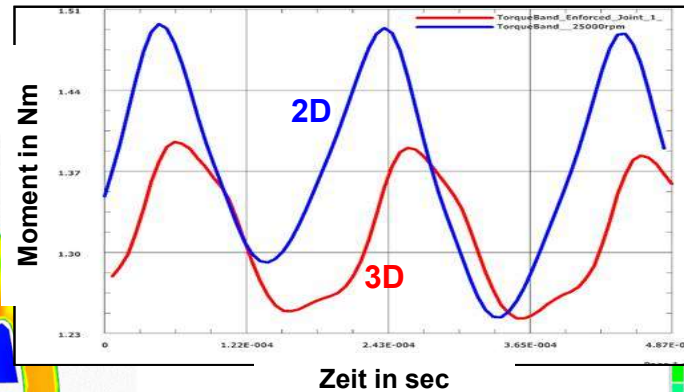
→ zusätzliche **3D-Simulation** erforderlich
Problem: Magnetics 3D noch ohne Verlustleistungsberechnung

2. Magnetfeldsimulation mit NX Magnetics

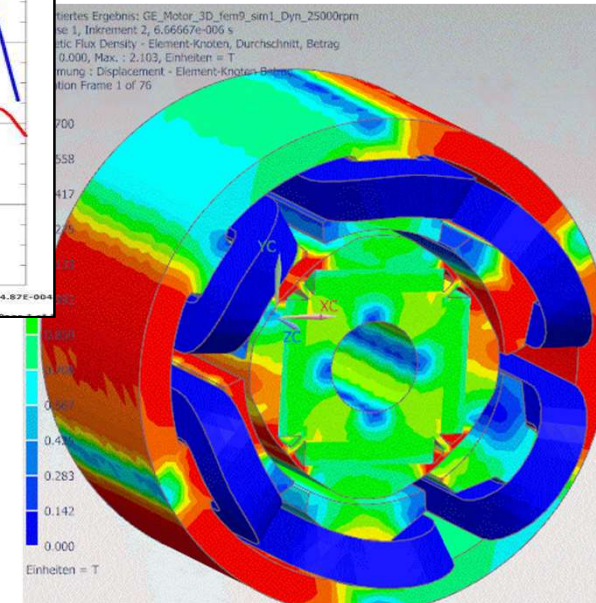
e) Modellaufbau und Simulation 3D



2D-Simulation



Messung



3D-Simulation

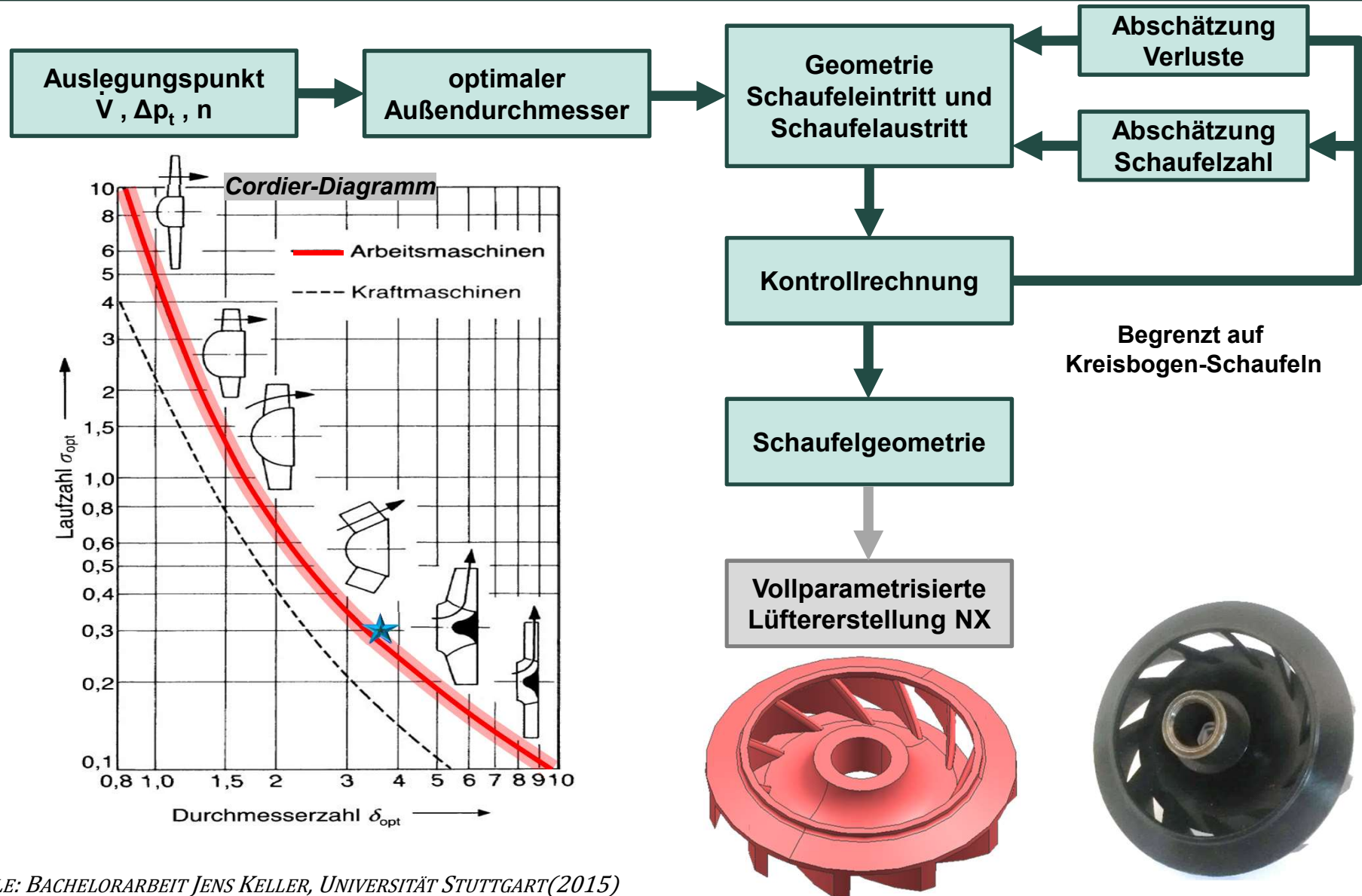
▪ Aufnahmeleistung	2367 W	2195 W	≈2180 W
▪ Abgabeleistung	2293 W	1998 W	2094 W

➔ *3D Berechnung bei kurzen Motoren näher an Realität*

1. Metabo stellt sich vor
2. Magnetfeldsimulation 2kW-BLAC Motor mit NX Magnetics
 - a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell
 - b) Aufbau des FE-Modells zur Verlustleistungsberechnung
 - c) Ansteuerung des sinuskommutierten BLAC-Motors
 - d) Simulationsergebnisse 2D
 - e) Modellaufbau und Simulation 3D
3. **CHT-Simulation des Antriebsstrangs mit NX Thermal/Flow**
 - a) **Auslegung eines energieeffizienten Lüfters**
 - b) **Exkurs: Wärmeübertragungsmechanismen**
 - c) **Modellierung der Wärmeübertragung**
 - d) **Auswertung der Simulationsergebnisse**
4. Fazit

3. CHT-Simulation mit NX Thermal/Flow

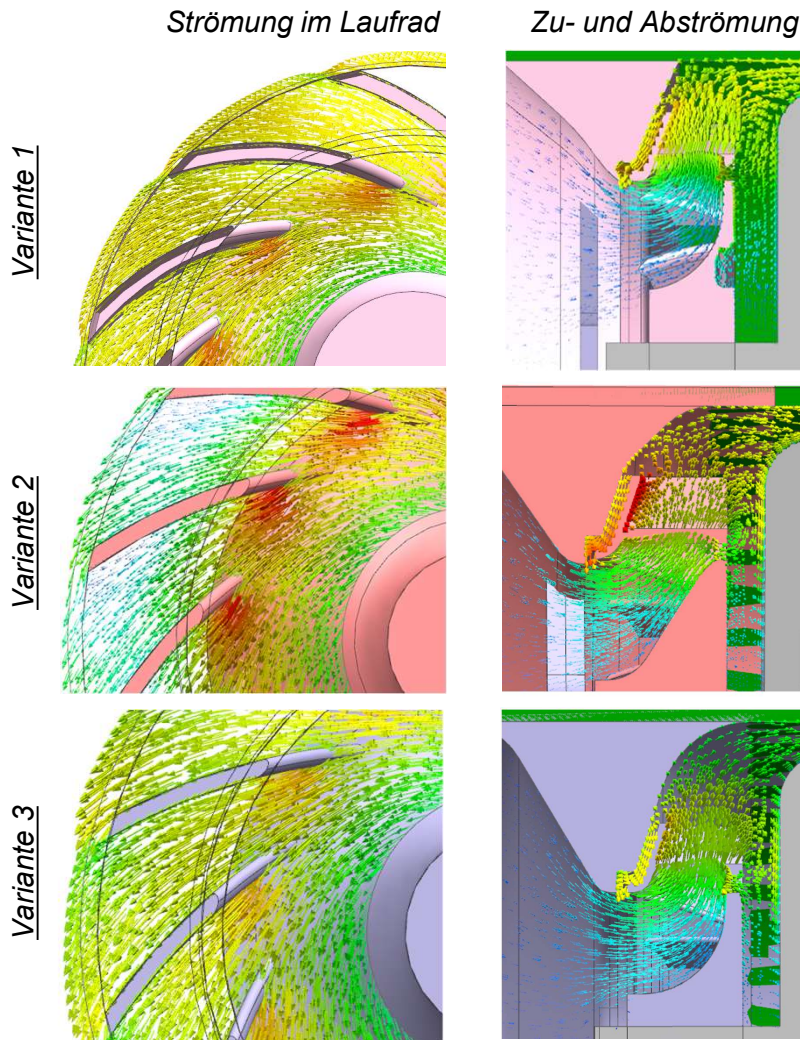
a) Auslegung eines energieeffizienten Lüfters



QUELLE: BACHELORARBEIT JENS KELLER, UNIVERSITÄT STUTTGART(2015)

3. CHT-Simulation mit NX Thermal/Flow

a) Auslegung eines energieeffizienten Lüfters

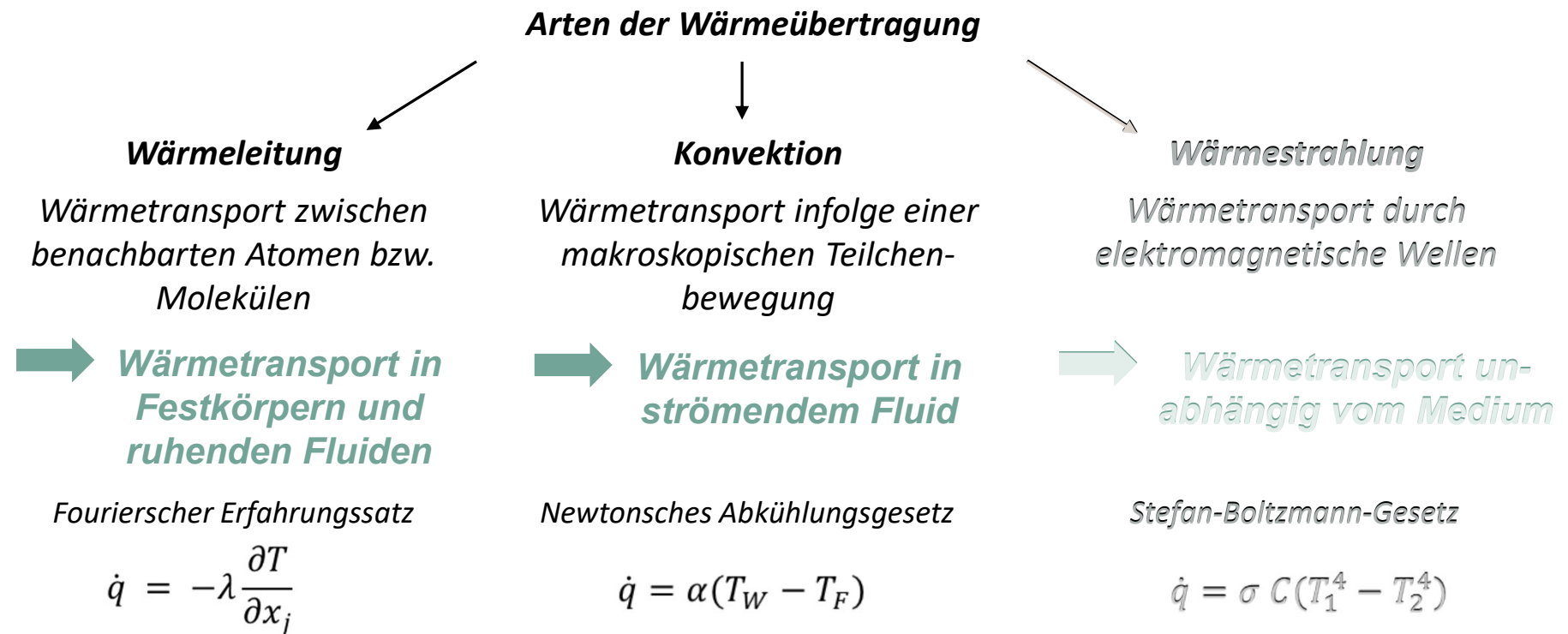


	<i>Menge</i>	<i>Druck</i>	<i>Effizienz</i>
	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Geometrie			
Außendurchmesser	60 mm	57 mm	50 mm
Schaufelzahl	11	13	13
Nabenausführung	radial	diagonal	radial
Luftmenge	19 l/s	22,8 l/s	18,6 l/s
Totaldruckdifferenz	2122 Pa	2859 Pa	1709 Pa
Antriebsleistung	73,7 W	98 W	56 W

Wärmeübertragungsmechanismen

Die Beschreibung des Wärmetransports basiert auf den Hauptsätzen der Thermodynamik

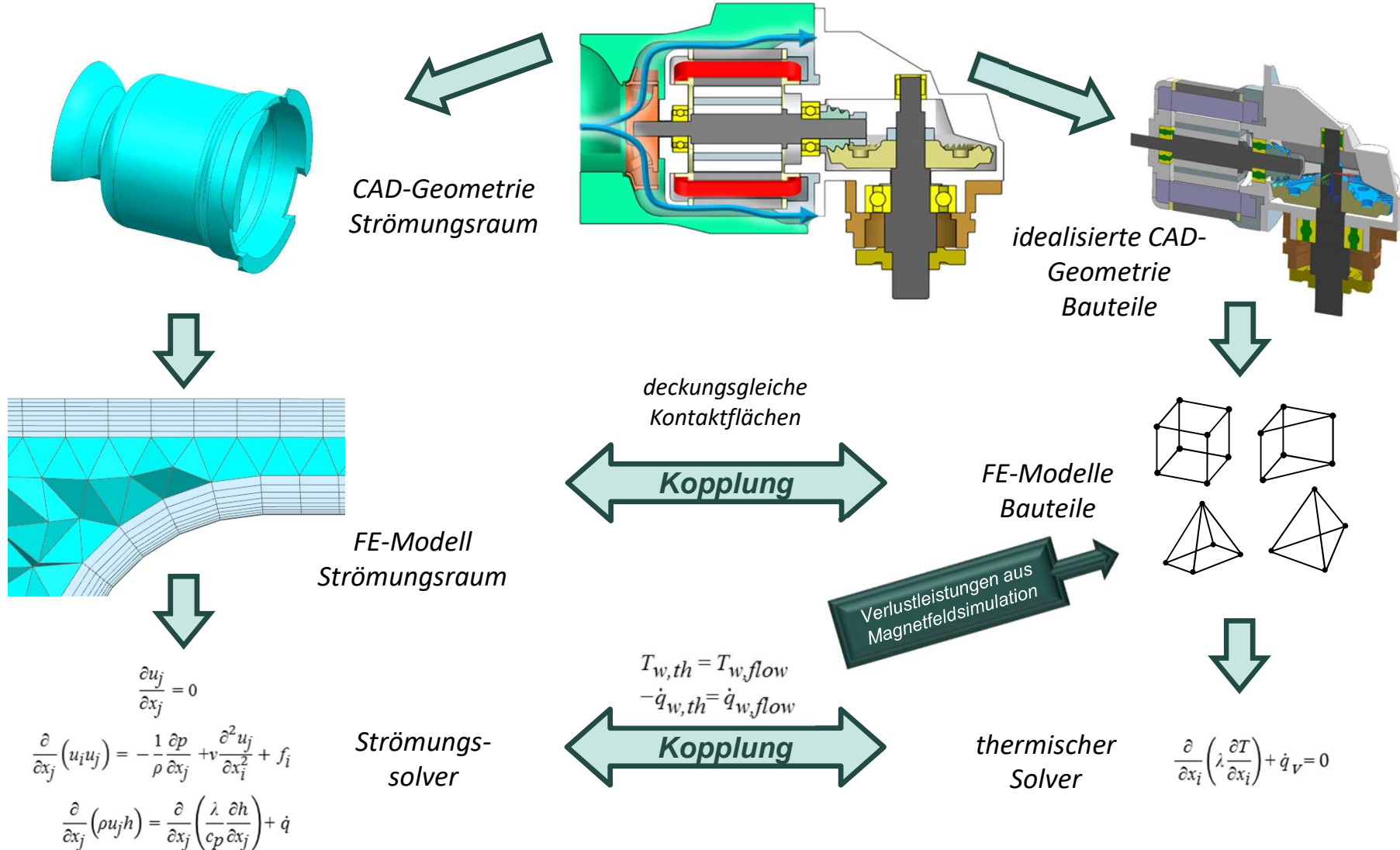
- **Erster Hauptsatz:** Energieerhaltung im thermischen System
→ im stationären Fall ist die zugeführte Wärme gleich der abgeführten Wärme
- **Zweiter Hauptsatz:** Richtung des thermischen Prozesses
→ Wärme wird immer in Richtung des fallenden Temperaturgradienten übertragen



3. CHT-Simulation mit NX Thermal/Flow

c) Modellierung der Wärmeübertragung

Allgemeine Vorgehensweise

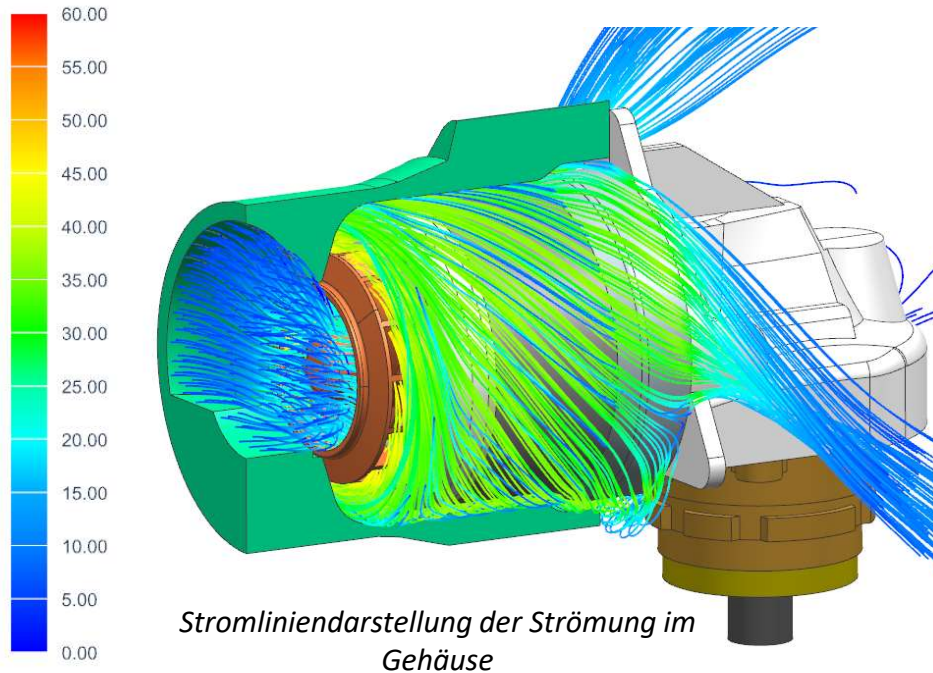


QUELLE: MASTERARBEIT JENS KELLER, UNIVERSITÄT STUTTGART(2017)

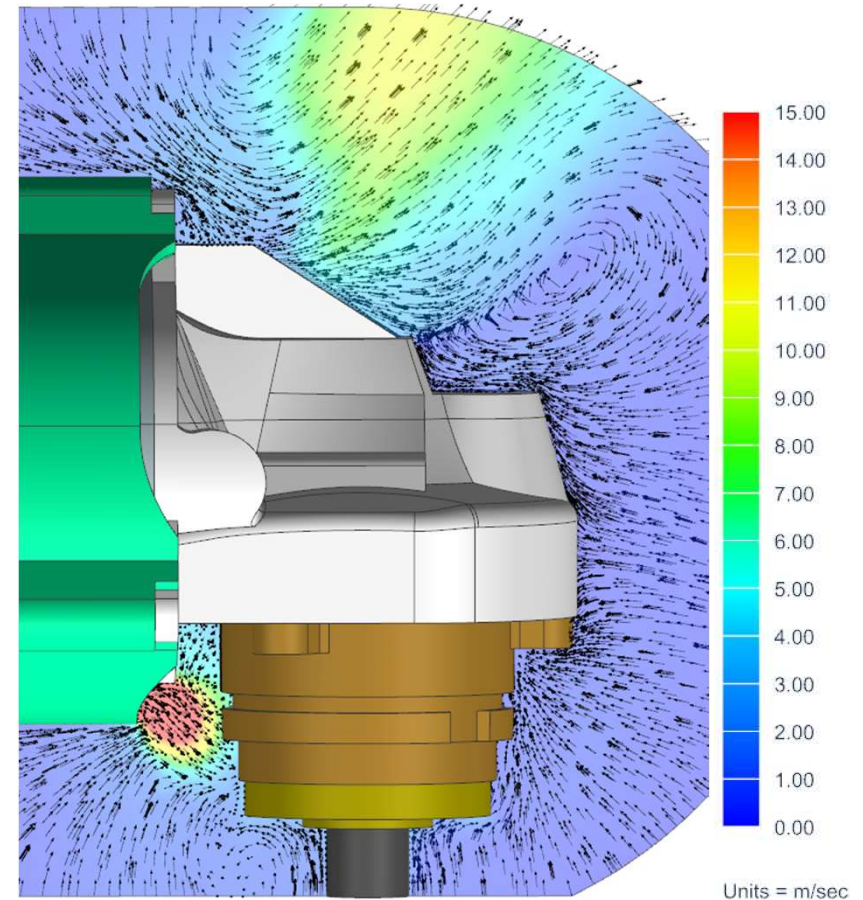
3. CHT-Simulation mit NX Thermal/Flow

d) Auswertung der Simulationsergebnisse

Kühlluftströmung



Vektordarstellung der Strömungsgeschwindigkeit (Schnitt in Symmetrieebene)



- *Strömung weist im Bereich des Motors einen starken Drall auf*
- *Kühlluftausströmung verursacht am Getriebegehäuse turbulente Strömungsverhältnisse*

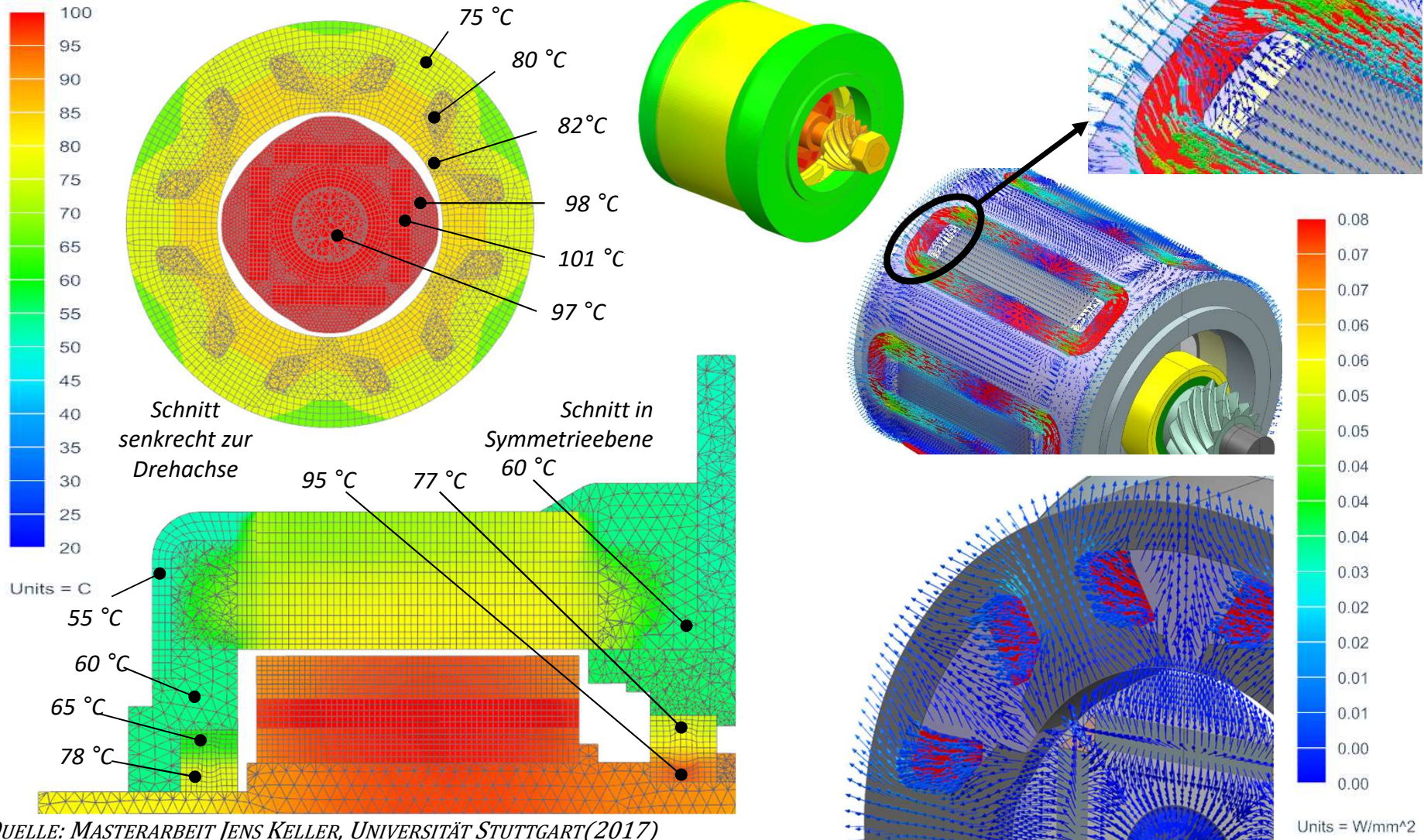
➔ **Günstige Voraussetzungen für Kühlung**

QUELLE: MASTERARBEIT JENS KELLER, UNIVERSITÄT STUTTGART(2017)

3. CHT-Simulation mit NX Thermal/Flow

d) Auswertung der Simulationsergebnisse

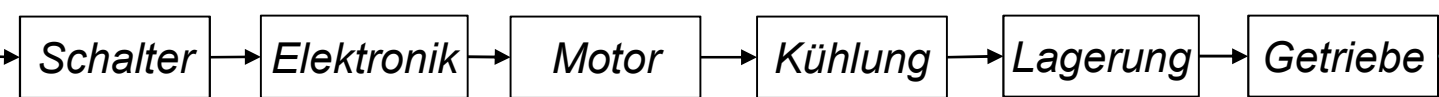
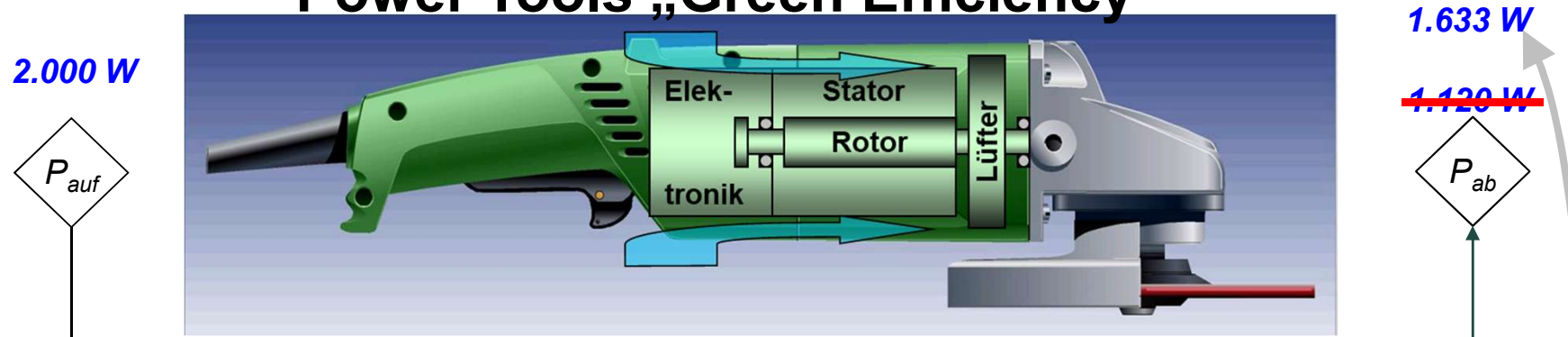
Temperaturverteilung und Wärmeflüsse im Motor



1. Metabo stellt sich vor
2. Magnetfeldsimulation 2kW-BLAC Motor mit NX Magnetics
 - a) Benchmark NX Magnetics – ANSYS Maxwell
 - b) Aufbau des FE-Modells zur Verlustleistungsberechnung
 - c) Ansteuerung des sinuskommutierten BLAC-Motors
 - d) Simulationsergebnisse 2D
 - e) Modellaufbau und Simulation 3D
3. CHT-Simulation des Antriebsstrangs mit NX Thermal/Flow
 - a) Auslegung eines energieeffizienten Lüfters
 - b) Exkurs: Wärmeübertragungsmechanismen
 - c) Modellierung der Wärmeübertragung
 - d) Auswertung der Simulationsergebnisse
4. Fazit

Forschungsprojekt

Power Tools „Green Efficiency“



Bisher (Universalmotor)	25 W	409 W	383 W	100 W	$\eta = 0.56$
Projektzielwerte	120 W	150 W	100 W	40 W	$\eta = 0.80$
Simulation WS 2kW-BLAC	111 W	<u>147 W</u> NX Magnetics	<u>56 W</u> NX Thermal/Flow	53 W	<u>$\eta = 0.82$</u>

Messung: $\eta = 0.81$

NX Magnetics

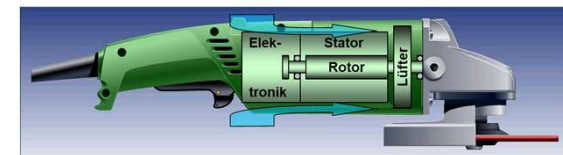
- + *2D Berechnung: Motorleistungen und Verlustleistungsberechnung*
- + *Visuelle Darstellung der Magnetflussdichten zur Blechschnittauslegung*
- + *3D Berechnung vor allem im Bereich kurzer Motoren*
- *Reifegrad des 3D-Solvers*
- *Kopplung zu Erweiterungssoftware (Matlab, Scilab, ...)*

NX Thermal/Flow

- + *Abbildung der komplexen thermischen Zusammenhänge im Antriebsstrang möglich*
- + *Beitrag zum besseren Verständnis der Wärmeübertragung im Antriebsstrang*
- *Großer Aufwand im Bereich der Kopplung von Netzen*
- *Manuelle Grenzschichtvernetzung bei komplexer Geometrie*



***Bestandteil der ganzheitlichen
Antriebsstrangsimulation bei Metabo***



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

