



# Innovative Leichtbaumaßnahmen an einer permanentenerregten Synchronmaschine – Simulationsbasierte Einflussanalyse auf das thermische Verhalten

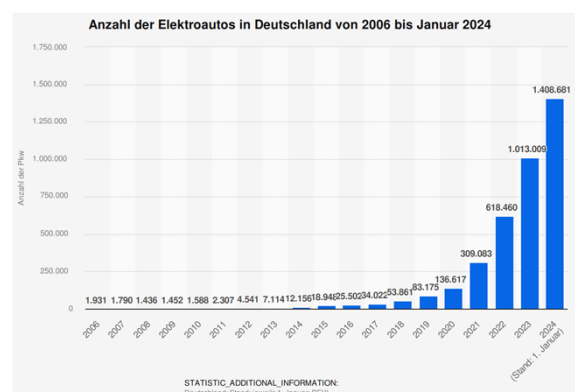
Dewald A.; Kern J.; Bause, K.; Ott, S.

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Motivation der Untersuchung

- Zunehmende Elektrifizierung in Deutschland
- Zur Erreichung der Klimaziele 2035 ist die Elektrifizierung notwendig
- Großes Potential in der Gewichtsreduktion von Motorkomponenten [1]



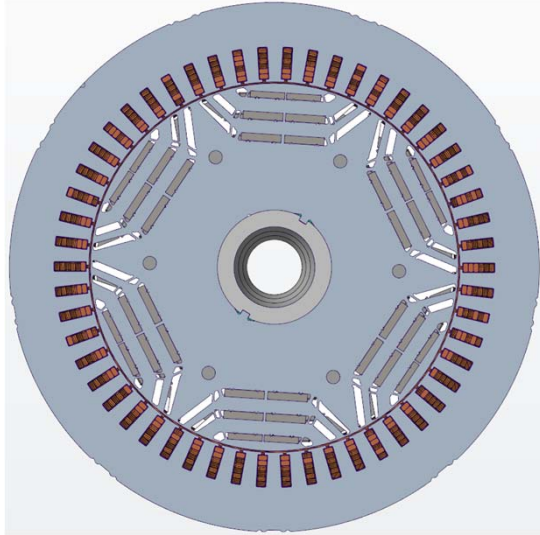
[2]

Steigerung der Effizienz im elektrischen Antriebsstrang gewünscht

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Dimensionen des Referenzmotors



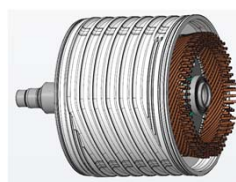
- Achsantrieb für PKW BEV Vorderachse
- Peak Leistung: 160 kW
- Dauerleistung: 117 kW
- Rotordurchmesser außen: 175 mm
- Rotordurchmesser innen: 55 mm
- Statordurchmesser außen: 255 mm
- Statordurchmesser innen: 179 mm
- Motorlänge: 134 mm

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D

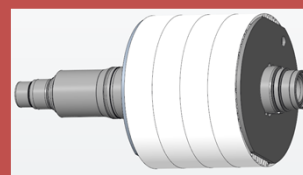


## Massenverteilung Referenzmotor

- Hauptbaugruppen im Traktionsmotor bilden
  - Rotor
  - Stator
- Untersuchte Komponente
  - Rotor

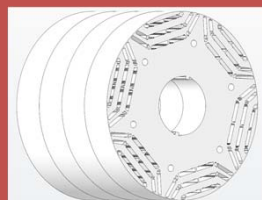
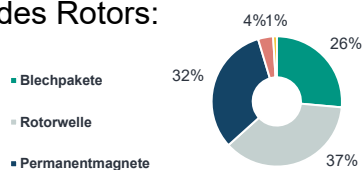


Traktionsmotor



Rotor

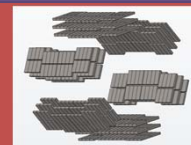
### Massenaufteilung des Rotors:



Blechpakete 26%



Rotorwelle 37%



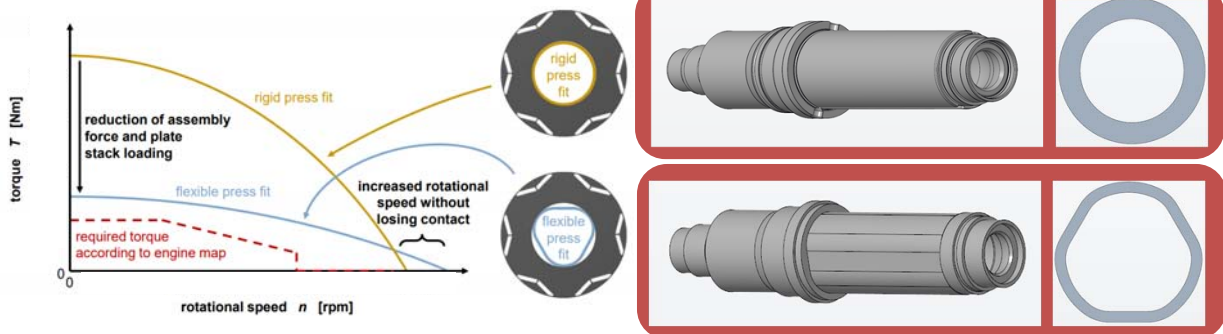
Permanentmagnete 32%

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Leichtbaumaßnahmen der Rotorwelle

- Gestaltänderung der Rotorwelle zum Polygon
  - Sorgt für Reduktion der Fügekräfte
  - Geringere Pressverbandauslegung notwendig
  - Besseres mechanisches Hochdrehzahlverhalten
  - Weniger Eigenspannungen im Produktionsprozess



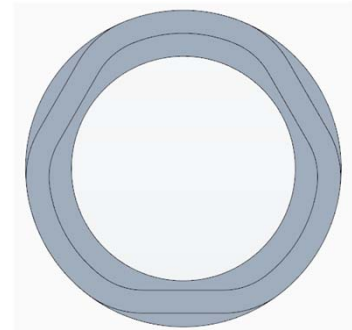
NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Designiterationen

Optimierte Rotorgeometrie durch Iterieren des Rotordesigns

- Die Erste Iteration sieht die Gestaltänderung der Rotorwelle zum Polygon vor
- Reduktion der Masse im Bereich der Welle-Naben-Verbindung von 47%
  - Wandstärke Referenzsystem: 8 mm
  - Nach Designiteration: 4 mm

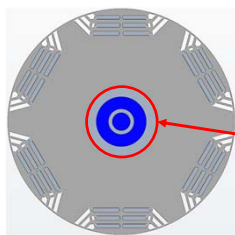


NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D

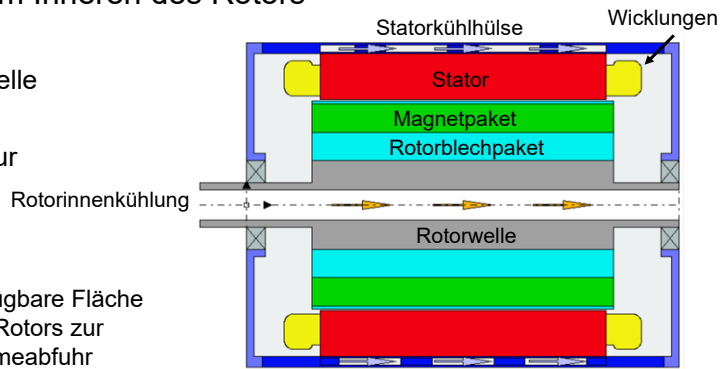


## Thermische Betrachtung des Systems

- Trockenlaufender E-Motor
- Antriebsverluste als Wärme frei
- Wärmeabfuhr erfolgt effektiv im Inneren des Rotors
- Kühlsystem
  - Durchlaufkühlung durch Rotorwelle
  - Wasser-Glykol-Lösung
  - 75°C Konditionierungstemperatur



Verfügbare Fläche  
des Rotors zur  
Wärmeabfuhr



[3]

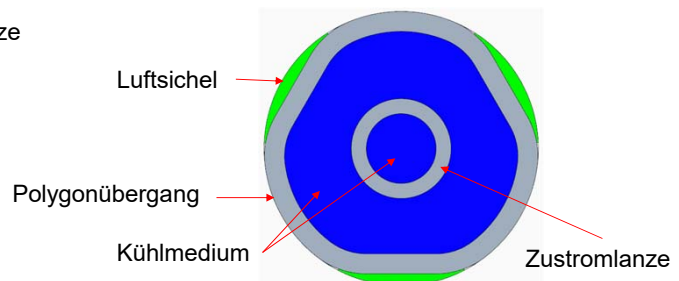
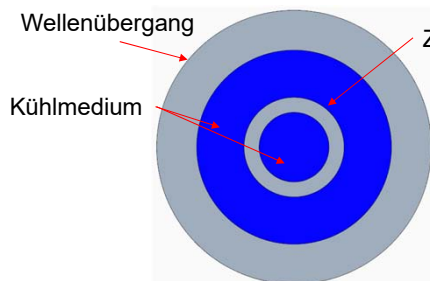
NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Thermische Problemstellung

- Gestaltänderung der Rotorwelle zum Polygon:
  - Signifikante Verringerung der Kontaktflächen
  - Verschlechterung der Wärmeübertragung wird vermutet

Außendurchmesser  
jeweils gleich



Die effektive Wärmeübertragungsfläche reduziert sich maßgeblich

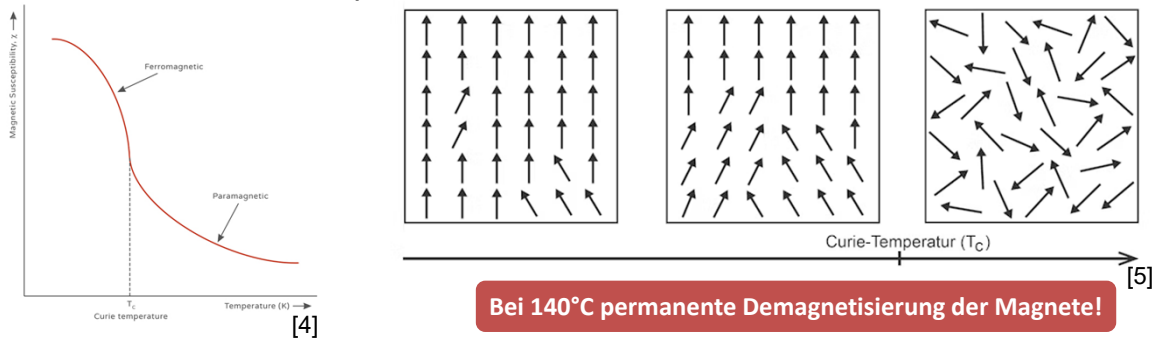
NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Bedeutung der Temperatur

- Thermische Begrenzung el. Maschinen:
  - Zersetzungstemperatur der Isoliermaterialien
  - Curietemperatur der Permanentmagnete

- Was ist die Curie Temperatur?



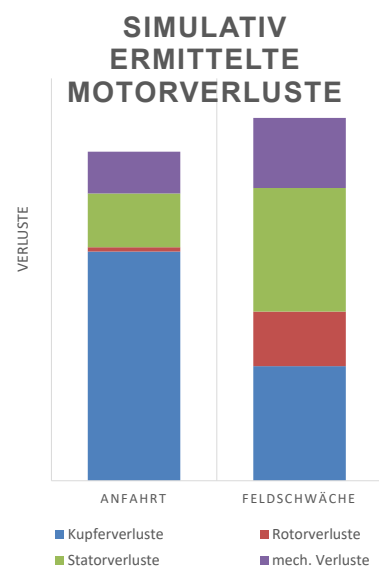
NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Festlegen des Versuchsplans

- Thermische Betrachtung von:
  - Anfahrt:  $n_A = 23\% n_{Max}$ ;  $M_A = 63\% M_{max}$
  - Feldschwäche:  $n_F = n_{max}$ ;  $M_F = 13\% M_{max}$

- Verlustleistungsverteilung abhängig vom Betriebspunkt
  - Kupferverluste abh. von Statorstrom
  - Eisenverluste abh. von E-Feld Drehfrequenz
  - Mech. Verluste abh. von Drehzahl



NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Thermische Untersuchung

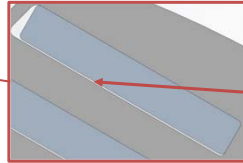
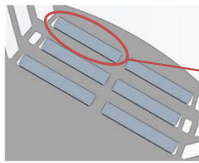
- ANSYS – Fluent
- Das Referenzsystem wird nur 2D untersucht

### 2D - Untersuchungen

- Ziele:
  - Referenzsystem abbilden
  - Initiale Temperaturabschätzung
  - Vereinfachung des 3D – Systems
  - Ersatzmodellierung:
    - Statorübergang
    - Magnetluftkavitäten

### 3D - Untersuchungen

- Ziele:
  - Temperaturverlauf des Rotorquerschnitts mit Fokus der Temperatur im Magnet sowie Kühlwasser
  - Strömungsanalyse der Rotorinnenkühlung
  - Vergleich der Betriebspunkte

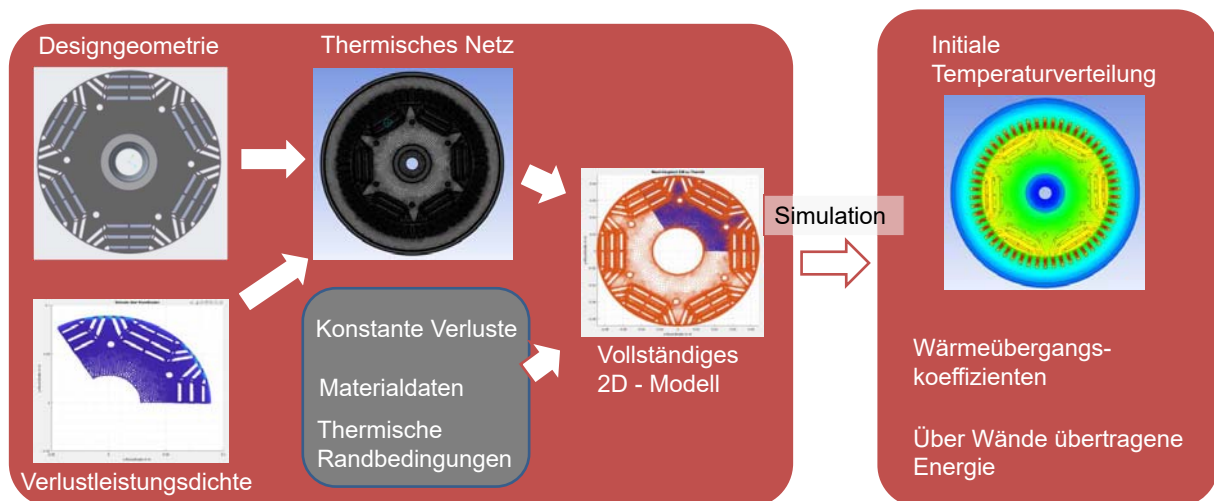


Luftkavität

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Ablauf der 2D-Simulationen



NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



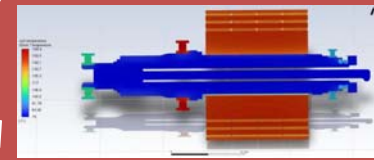
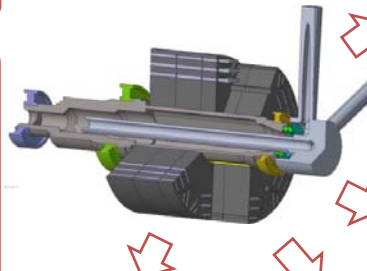
## Ablauf der 3D-Simulationen

### 2D - Ergebnisse

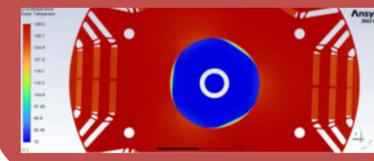
- Mittlere Verlustleistungsdichten
- Wärmeübergangskoeffizienten

### Weitere Eingangsgrößen

- Axiale Kühlmittelführung
- Einbringen der Lagerstellen und Gleitringdichtung
- Darstellung der Verzahnung als Fläche
- Ein- und Ausflussbedingungen

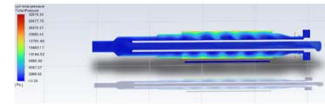
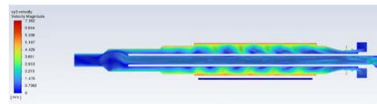


Temperaturverläufe



Druckverläufe

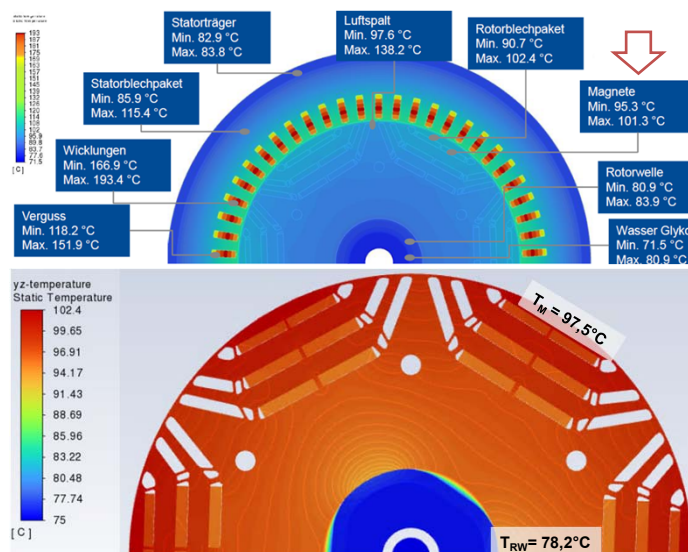
Strömungsgeschwindigkeiten



NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



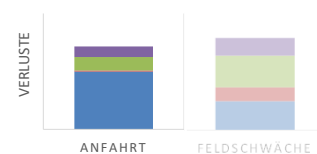
## Ergebnis Anfahren



### Anfahrts Betriebspunkt:

$$\eta_A = 23\% \quad n_{Max}; \quad M_A = 63\% \quad M_{max}$$

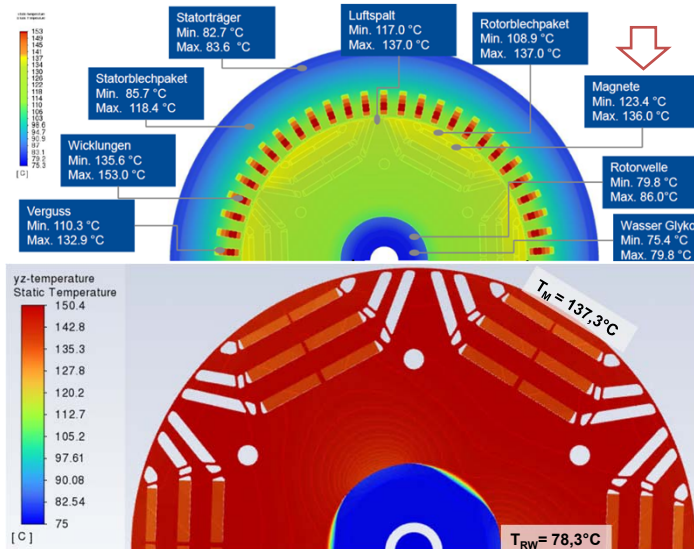
- Die Luftsiceln im Polygon sorgen für eine leicht höhere Temperatur in den Magneten
- Einfluss des Polygons auf Magnettemperatur während Anfahrt vernachlässigbar
- Grund sind geringe Eisenverluste im Rotor (rot)



NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



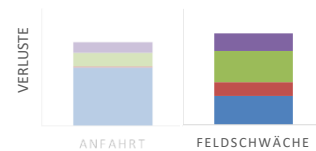
## Ergebnis Hochdrehzahl



Feldschwäche Betriebspunkt:

$$n_F = n_{\max}; M_F = 13\% M_{\max}$$

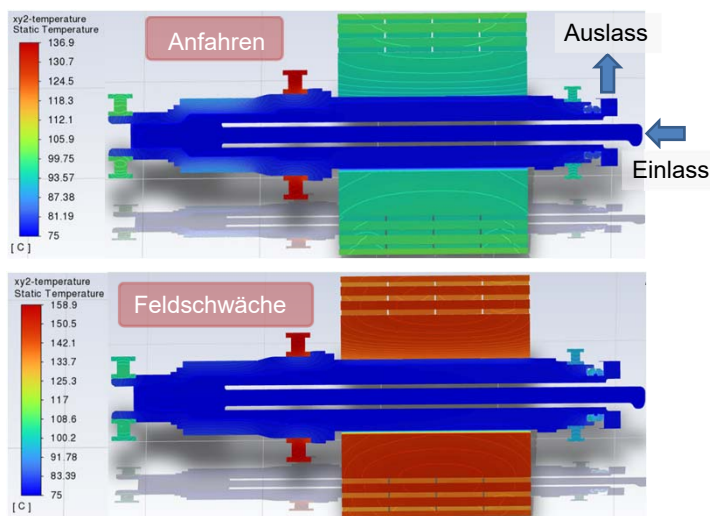
- Die Polygonform sorgt für hohe Temperaturgradienten zwischen Welle und Rotorblech
- Die mittlere Magnettemperatur steigt deutlich als beim Referenzsystem
- Steigenden Rotorverluste (rot), in der Magnetumgebung



NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Ergebnis Kühlsystem mit Polygonwelle



- Rotorverluste
  - Anfahrt: 38 W
  - Feldschwäche: 475 W
- Max. Kühlleistungen
  - Anfahrt: - 398 W
  - Feldschwäche: - 503 W

- Wärmeabfuhr stagniert mit höheren Verlusten
- Förderung des Fluids nicht das Problem
- Temperatur der Rotorwelle in beiden Betrieben bei  $78^\circ\text{C}$

- Geringer konvektiver Übergang Problematisch

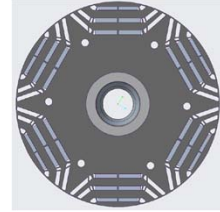
NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



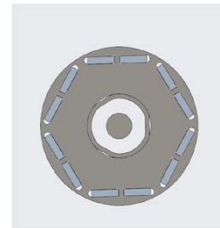


## Fazit und Ausblick

- In beiden Betriebspunkten, Magnete unter  $T_C = 140^\circ\text{C}$ 
  - Bei Polygon im Feldschwächebereich grenzwertig ( $T_M = 137,5^\circ\text{C}$ )
- Polygonform thermisch vernachlässigbar im Anfahrbereich
- Negativer Einfluss der Polygonform auf Temperatur im Feldschwächebereich
- Erkenntnisse fließen in weitere Iterationen ein
  - Darunter Hochdrehzahlauslegung
- Ermöglichen des Vergleichs der Designiterationen in 3D untereinander



Referenzmaschine



Designvorschlag

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Referenzen

- [1] <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1103>
- [2] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>
- [3] [10.1109/ICEMS.2019.8922026](https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922026)
- [4] <https://www.sciencefacts.net/curie-temperature.html>
- [5] <https://www.supermagnete.de/magnetismus/curietemperatur>

NAFEMS DACH Konferenz 2024: Konferenz für Berechnung & Simulation im Engineering, 10. – 12. Juni 2024, Bamberg, D



## Kontakt Daten

- **Anton Dewald**
- Mail: [anton.dewald@kit.edu](mailto:anton.dewald@kit.edu)
- Tel.: +49 721 608 – 44798
- Karlsruher Institut für Technologie
- **IPEK – Institut für Produktentwicklung**

