

Ableitung thermischer Randbedingungen für lineare Antriebseinheiten

Dipl.-Ing. Matthias Ulmer, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe

Universität Stuttgart,

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Gliederung

1. Motivation und Zielsetzung
2. Temperaturabhängigkeit von Werkstoffen
3. Materialmodell zur Darstellung von Spulen
4. Quantifizierung von Bauteilübergängen
5. Bestimmung von Konvektionskoeffizienten und Emissivitäten
6. Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

- Präzisierung der Simulationsmodelle durch exakte Randbedingungen
- Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von Werkstoffparametern insbesondere bei Antrieben von großem Interesse
- Multiphysik-Simulationen ermöglichen die Kopplung der verschiedenen physikalischen Domänen um beispielsweise die Temperaturabhängigkeit bei der Kraftberechnung von Antrieben zu berücksichtigen

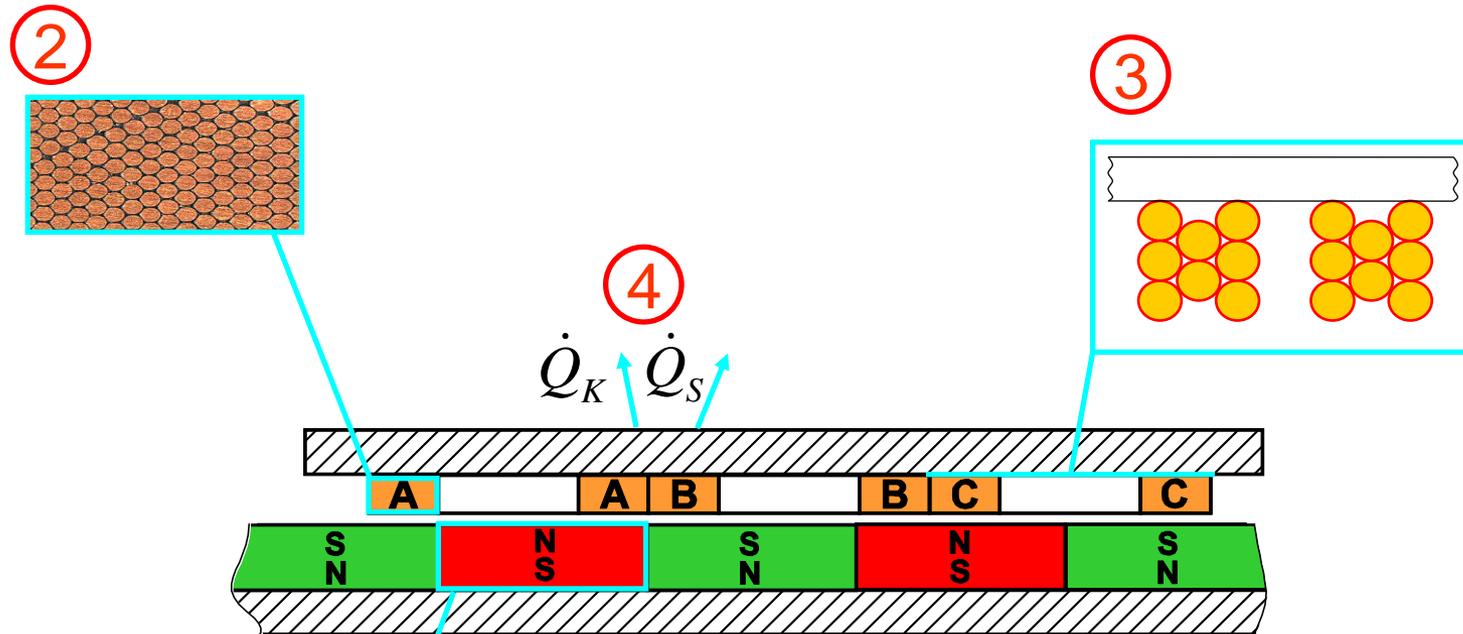
Thermische Grenzen einzelner Bauteile

Die thermischen Grenzen einzelner Bauteile sind zum einen durch technische Gesichtspunkte und zum anderen durch sicherheitsrelevante Aspekte definiert:

- Maximale Gehäusetemperatur
- Isolierklassen von Spulendrähten
- Sensorik (Wegmesssystem)
- Magnetwerkstoffe

Zielsetzung

- Beschreibung und Quantifizierung von thermischen Randbedingungen speziell für lineare Antriebseinheiten in möglichst allgemeiner Form



① $\xi(T) = \xi(T_0) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$

Temperaturabhängiges Verhalten von Werkstoffparametern

- Relative Änderung einer Materialeigenschaft in Abhängigkeit der Temperatur wird über den Temperaturkoeffizient beschrieben.
- Zusammenhang meist nicht linear und kann nur in begrenzten Intervallen linear betrachtet werden.
- Die Eigenschaft ist immer im Bezug auf eine Referenztemperatur definiert.
- Funktionsansatz für eine beliebige physikalische Größe:

$$\xi(T) = \xi(T_0) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (T - T_0)^2 + \dots + k_n \cdot (T - T_0)^n)$$

- Meist wird eine lineare Approximation mit $n=1$ verwendet:

$$\xi(T) = \xi(T_0) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

Hartmagnetische Werkstoffe

- Reversible Änderung der Remanenz in Abhängigkeit der Temperatur

Material	TKBR [%/K]
Gegossenes oder gesintertes SmCo	-0,005 % bis -0,07 %
gesintertes SmCo ₅	-0,04 %
gesintertes Sm ₂ Co ₁₇	-0,03 %
Ferrit	-0,2 %
Alnico	-0,01 % bis -0,025 %
gesintertes NdFeB	-0,07 % bis -0,16 %
Nd ₂ Fe ₁₄ B	-0,1 %

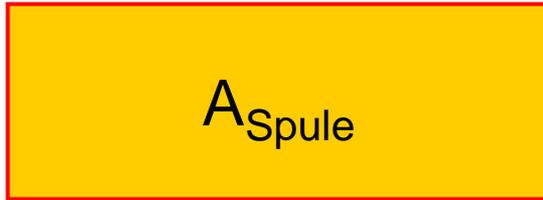
Quelle: <http://www.specamotor.de>

Fazit

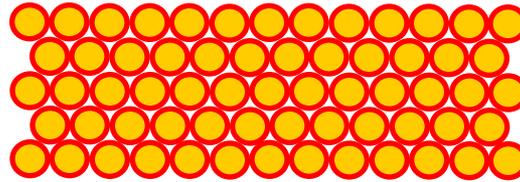
- Thermische Kenndaten von Werkstoffen meist gut durch die Hersteller dokumentiert
- Optimierung der thermischen Materialeigenschaften kaum möglich
- Schwierige Beschreibung der Eigenschaften bei Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien wie beispielsweise Spulen

Materialmodell für gewickelte Spulen

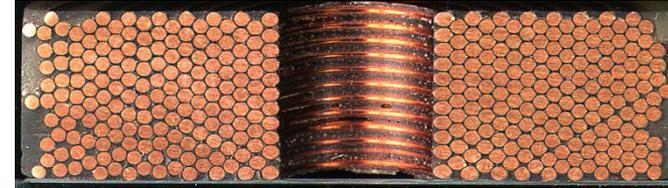
Simulationsmodell



Realität, ideal gewickelt



Spule im Schnitt



$$\Rightarrow A_{Spule} = A_{Kupfer} + A_{Luft} + A_{Lack}$$

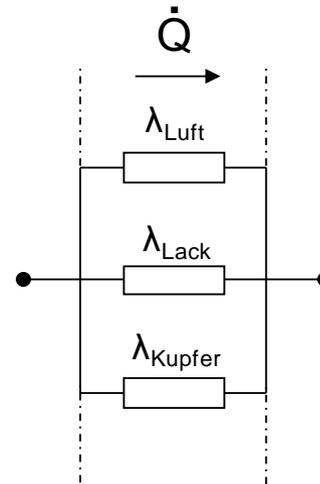
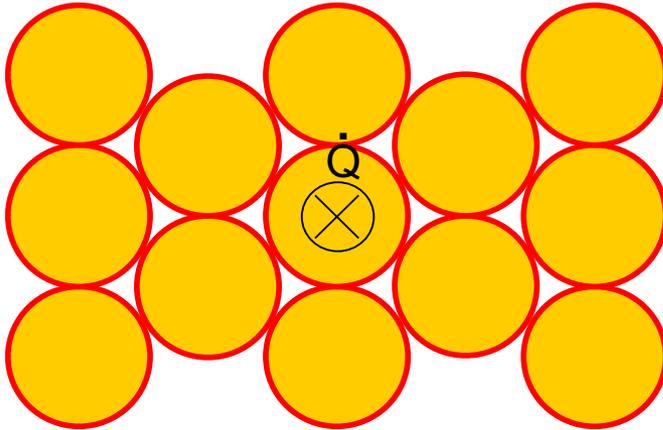
Ziel: Beschreibung eines Materialmodells in Abhängigkeit des verwendeten Spulendrahtes für 2D und 3D Simulationen.

Anteilige Berechnung der Materialeigenschaften:

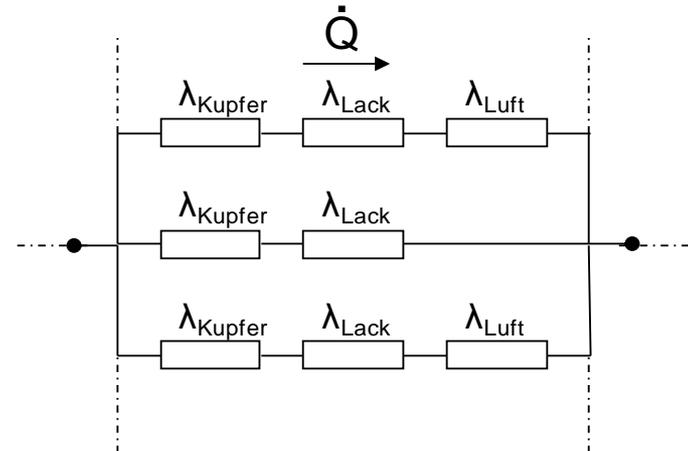
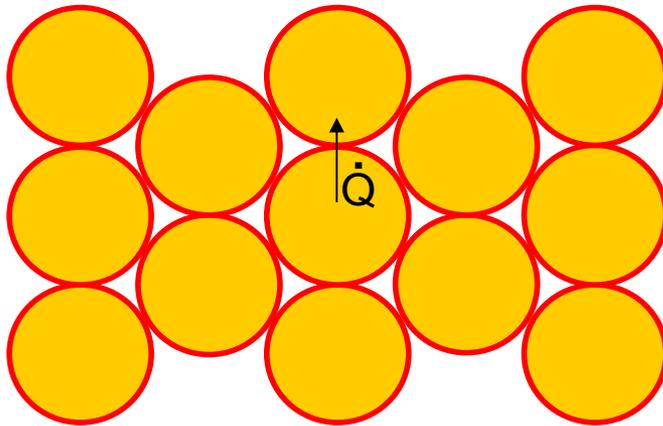
- Dichte ρ
- Wärmeleitfähigkeit λ
- Isobare Wärmekapazität c_p

Modellansatz

In Stromrichtung:



Senkrecht zur Stromrichtung:



Vergleich der Materialeigenschaften

In nachfolgender Tabelle sind die Materialeigenschaften im Vergleich dargestellt:

	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]			Isobare Wärmekapazität c_p [J/kgK]
Kupfer	8960	401			385
Luft	1,29	0,024			1010
Lack	1130	0,27			1900
Spule	5980	$\lambda_x=1$	$\lambda_y=281$	$\lambda_z=1$	428

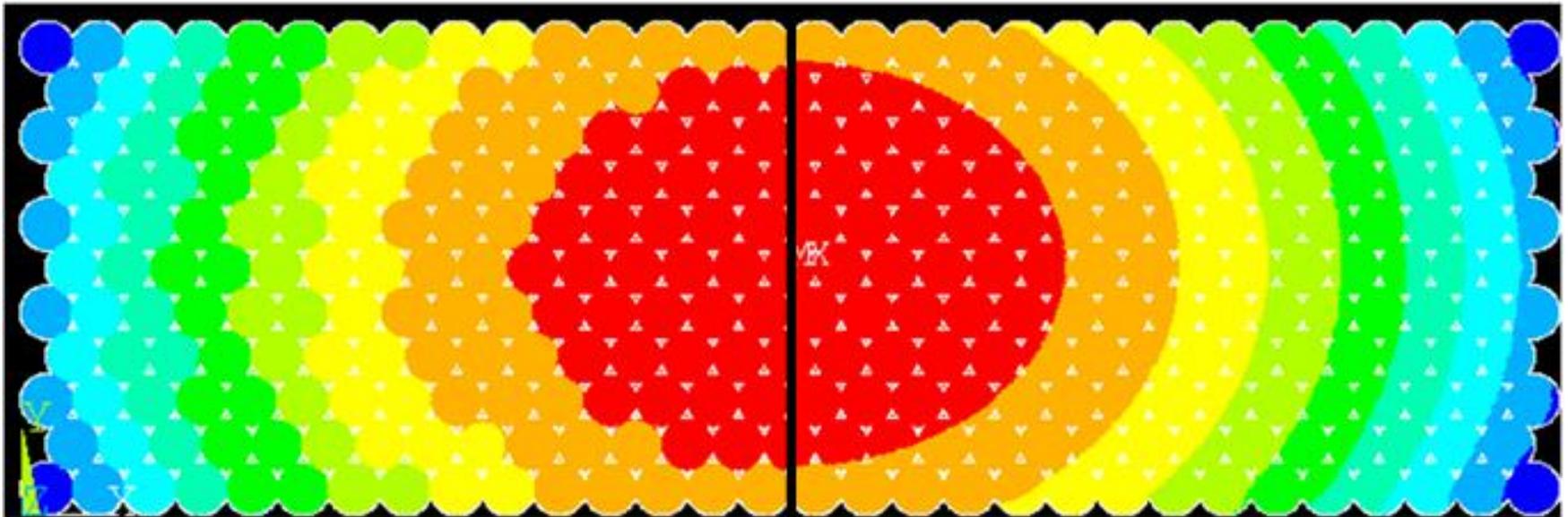
Fiktive Materialeigenschaften sind vom Aufbau und Durchmesser des Wickeldrahtes abhängig.

Verifikation des 2D-Simulationsmodells

- Aufbau eines 2D-Modells und Modellierung einzelner Wicklungen und Isolationen
- Vergleich des Mikromodells mit Volumenmodell aus fiktivem homogenen Material

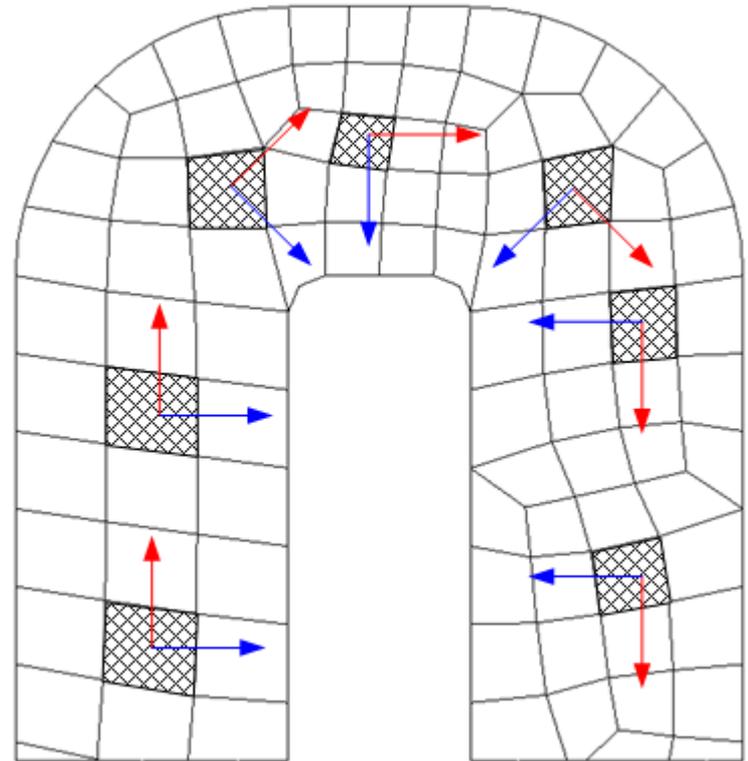
Modell aus Einzelmaterialien

Modell aus fiktivem homogenen Material

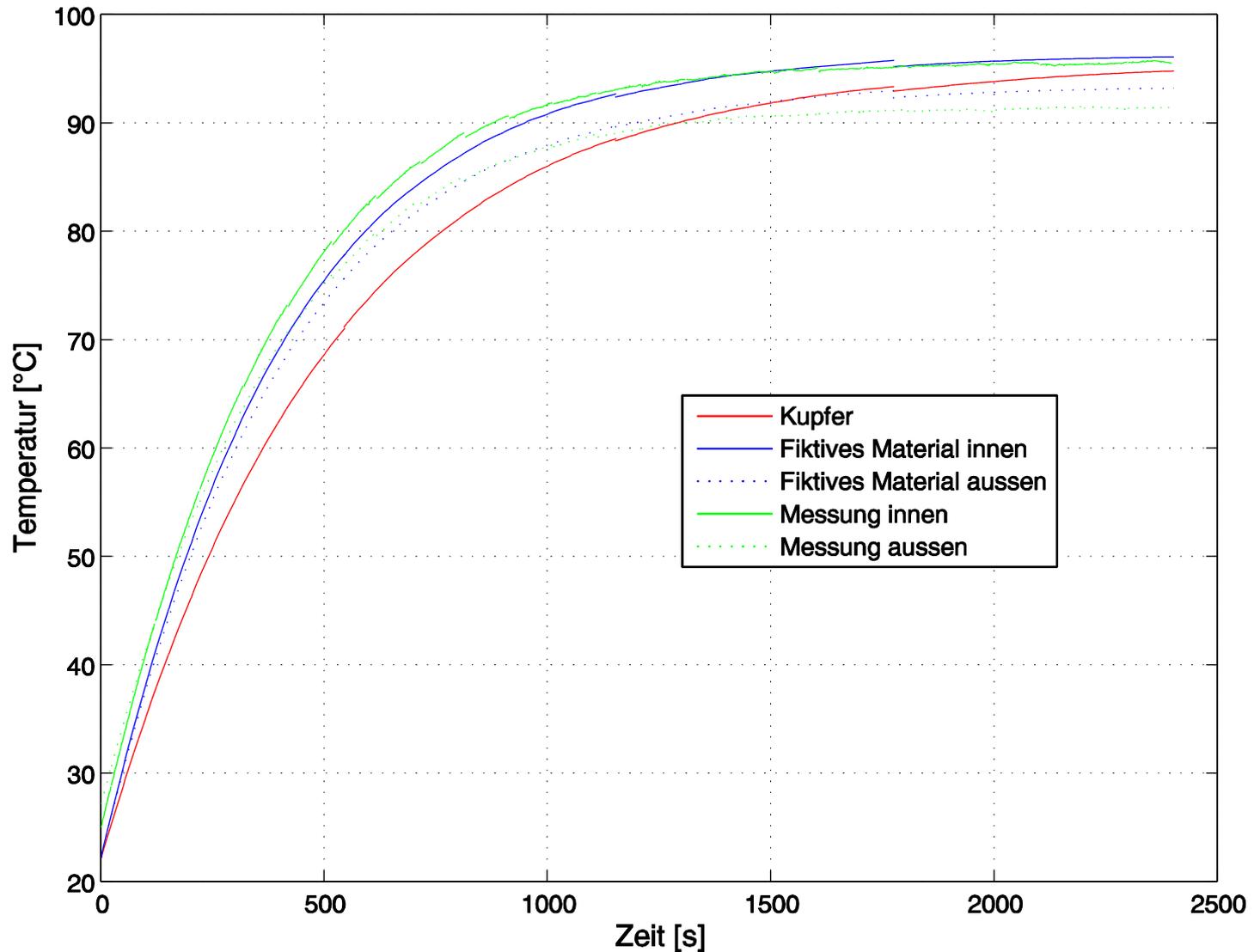


Dreidimensionale Erweiterung

- Für die dreidimensionale Erweiterung muss die Wickelrichtung in den Spulen berücksichtigt werden
- Dazu wurde ein Makro in APDL erstellt wodurch jedes Elementkoordinatensystem in Abhängigkeit der Wickelrichtung gedreht wird



Verifikation im Gesamtmodell

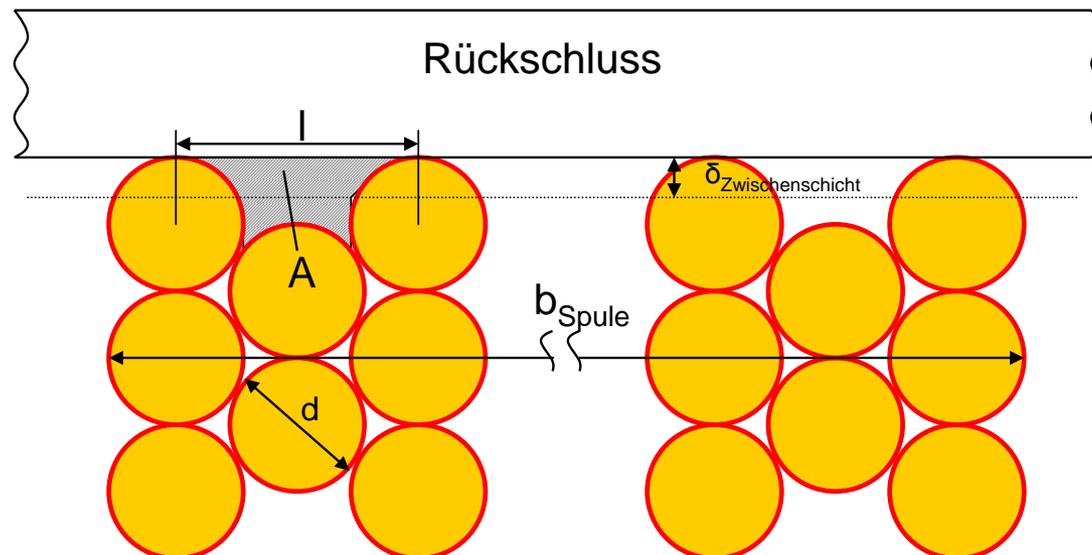


Fazit

- Durch die Erstellung des fiktiven Materials ist es nun möglich, das Temperaturprofil innerhalb der Spulenschenkel zu berücksichtigen und damit ein realitätsnahes dreidimensional Simulationsmodell für thermische Untersuchungen für lineare Antriebseinheiten zu erstellen.
- Problematisch ist nun noch die Anbindung der Spulen durch die strukturierte Oberfläche an angrenzende Bauteile

Übergang Spule - Rückschluss

- Übergang zwischen Spulen und Rückschluss ist struktur- und montagebedingt mit Zwischenräumen versehen
- Berücksichtigung in der Simulation durch thermische Kontaktbedingungen
- Die Quantifizierung wird ein Übergangskoeffizient entsprechend einer gedanklichen Zwischenschicht aus Luft



Thermische Leitwerte

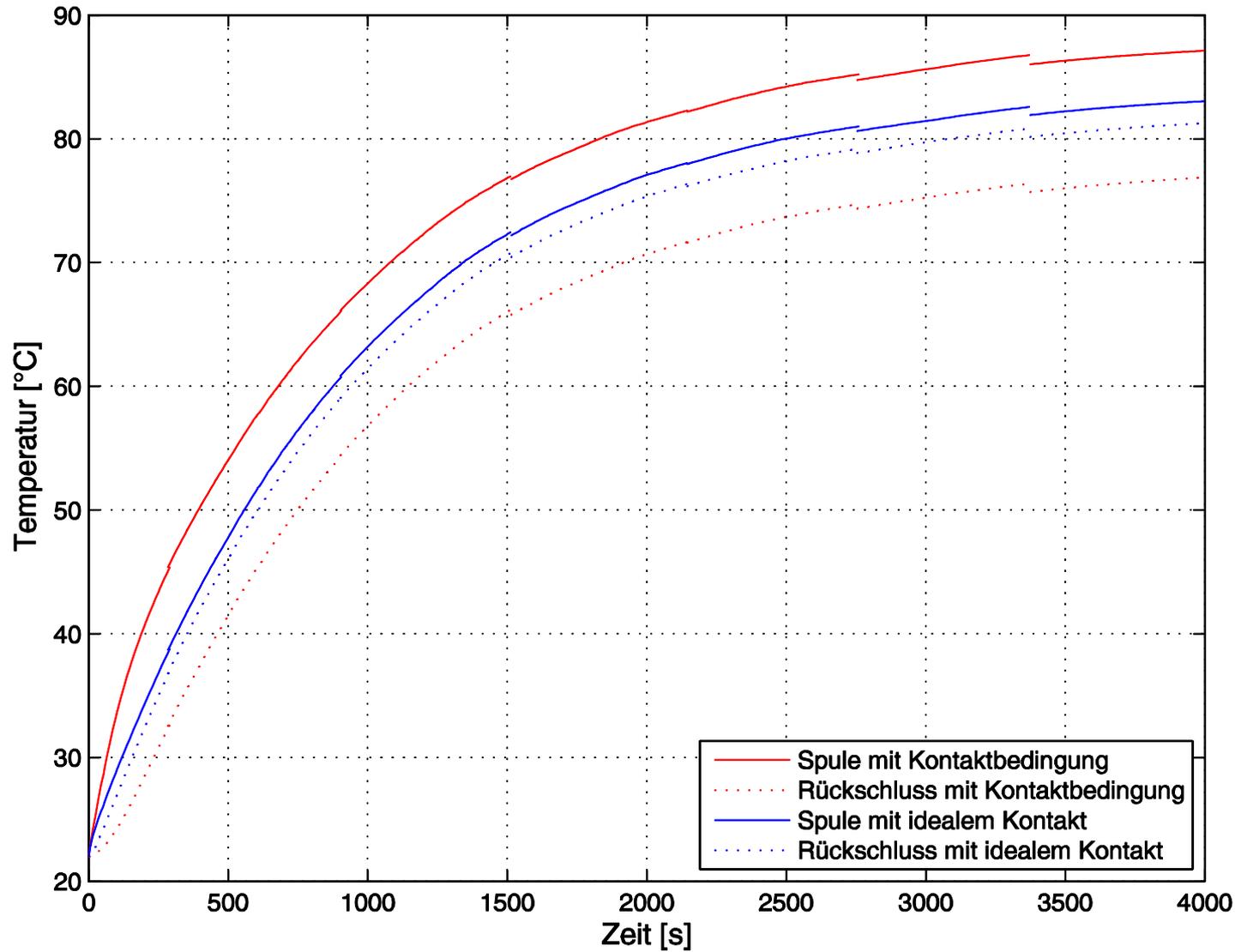
Berechnung des thermischen Leitwerts in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers:

$$G_{th}(d_W) = \frac{\lambda}{\delta_{Zwischenschicht}} = \frac{\lambda \cdot 4 \cdot \sqrt{3}}{d_W \cdot (3 \cdot \sqrt{3} - \pi)}$$

Wärmeleitwerte für gängige Drahtdurchmesser:

Drahtdurchmesser	Zwischenschicht	Wärmeleitwert
0,30 mm	0,09 mm	0,29 W/m ² K
0,45 mm	0,13 mm	0,19 W/m ² K
0,60 mm	0,18 mm	0,15 W/m ² K

Verifikation



Fazit

- Durch die Berücksichtigung der Kontaktbedingung zwischen Spulen und Rückschlussmaterialien konnte die Genauigkeit der Simulation weiter deutlich gesteigert werden
- Weitere Betrachtungen an den Außenflächen zur Ableitung der Wärme an die Umgebung notwendig

Bestimmung von Konvektionskoeffizienten

- Bestimmung der Konvektionskoeffizienten durch Strömungssimulation sehr zeitaufwändig und rechenintensiv
- Meist genügen überschlägig ermittelte Durchschnittswerte je Fläche

Anordnung	laminare Strömung	turbulente Strömung
senkrecht Platte, Rohr, Zylinder	$\alpha_K = 1,35 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta \vartheta}{h}}$	$\alpha_K = 1,5 \cdot \sqrt[3]{\Delta \vartheta}$
horizontal nach oben Platte	$\alpha_K = 1,75 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta \vartheta}{l_{\min}}}$	$\alpha_K = 1,95 \cdot \sqrt[3]{\Delta \vartheta}$
horizontal nach unten Platte	$\alpha_K = 1,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta \vartheta}{l_{\min}}}$	$\alpha_K = 1,05 \cdot \sqrt[3]{\Delta \vartheta}$

Quelle: Krause, W.: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik

Bestimmung der Emissivität

- Versuchsaufbau zur Bestimmung der Emissivität unbekannter Oberflächen mit Thermoelementen und Thermokamera
- Nur geringe Abhängigkeit der Emissivität von der Temperatur im Bereich 20-100°C

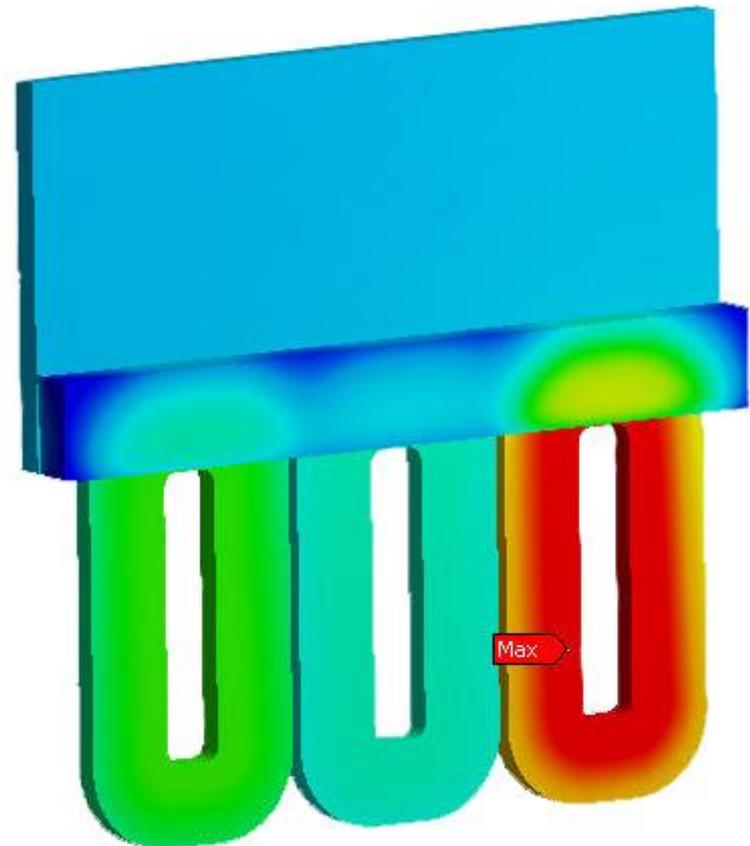
Oberfläche	Emmissivität ε
Backlackdraht	0,45 – 0,65
Eisen	0,65 – 0,8
Vergussmasse	0,95 – 1,00

Fazit

- Die Bestimmung der Emissivitäten konnte messtechnisch relativ gut erfasst werden. Allerdings können hierbei keine Alterungserscheinungen der Oberflächen berücksichtigt werden.
- Die Bestimmung der Konvektionskoeffizienten kann überschlägig mit dargestellter Tabelle vorgenommen werden, was bei linearen Antriebseinheiten zu guten Simulationsergebnissen geführt hat.
- Allgemein muss aber für detaillierte Betrachtungen eine Strömungssimulation durchgeführt werden.

Gesamtmotormodell

- Implementierung der ermittelten Randbedingungen im Gesamtmotormodell.
- Unterschiedliche Temperaturverläufe in den Spulen je nach Leistungseintrag zu erkennen.
- Einfluss der Kontaktbedingung zwischen Spulen und Halterung sichtbar.
- Detektion von Hot-Spots möglich



Zusammenfassung

- Quantifizierung verschiedener thermischer Randbedingung zur besseren Beschreibung der Simulationsmodelle abgeleitet
- Randbedingungen sind speziell für lineare Antriebseinheiten betrachtet worden, allerdings Möglichkeit zur Adaption auf andere elektromechanische Baugruppen möglich
- Verifikation der ermittelten Größen anhand von Messungen

Vielen Dank
für
Ihre Aufmerksamkeit!

Herzliche Einladung zum Arbeitskreis Elektromechanik!

16.00 – 17.30 Uhr