

# **Dreidimensionale transient thermische Analyse eines Lineardirektantriebs mit MAXWELL und ANSYS**

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

Universität Stuttgart,  
Institut für Konstruktion und Fertigung in der  
Feinwerktechnik,  
Stuttgart, Germany

# Vorstellung

Dipl.-Ing. Matthias Ulmer

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik  
Universität Stuttgart

## Arbeitsgebiete:

- Grundlegende Untersuchungen zur Dimensionierung von Lineardirektantrieben
- Betrachtung des thermischen Verhaltens von Antrieben
- FEM-Simulation mit MAXWELL und ANSYS
- Schaltungssimulation mit Matlab/Simulink

# Gliederung

1. Motivation und Zielsetzung
2. Grundlagen
3. Berechnung der Verluste
4. Thermische Analyse
5. Experimentelle Verifikation
6. Zusammenfassung und Ausblick

## Motivation

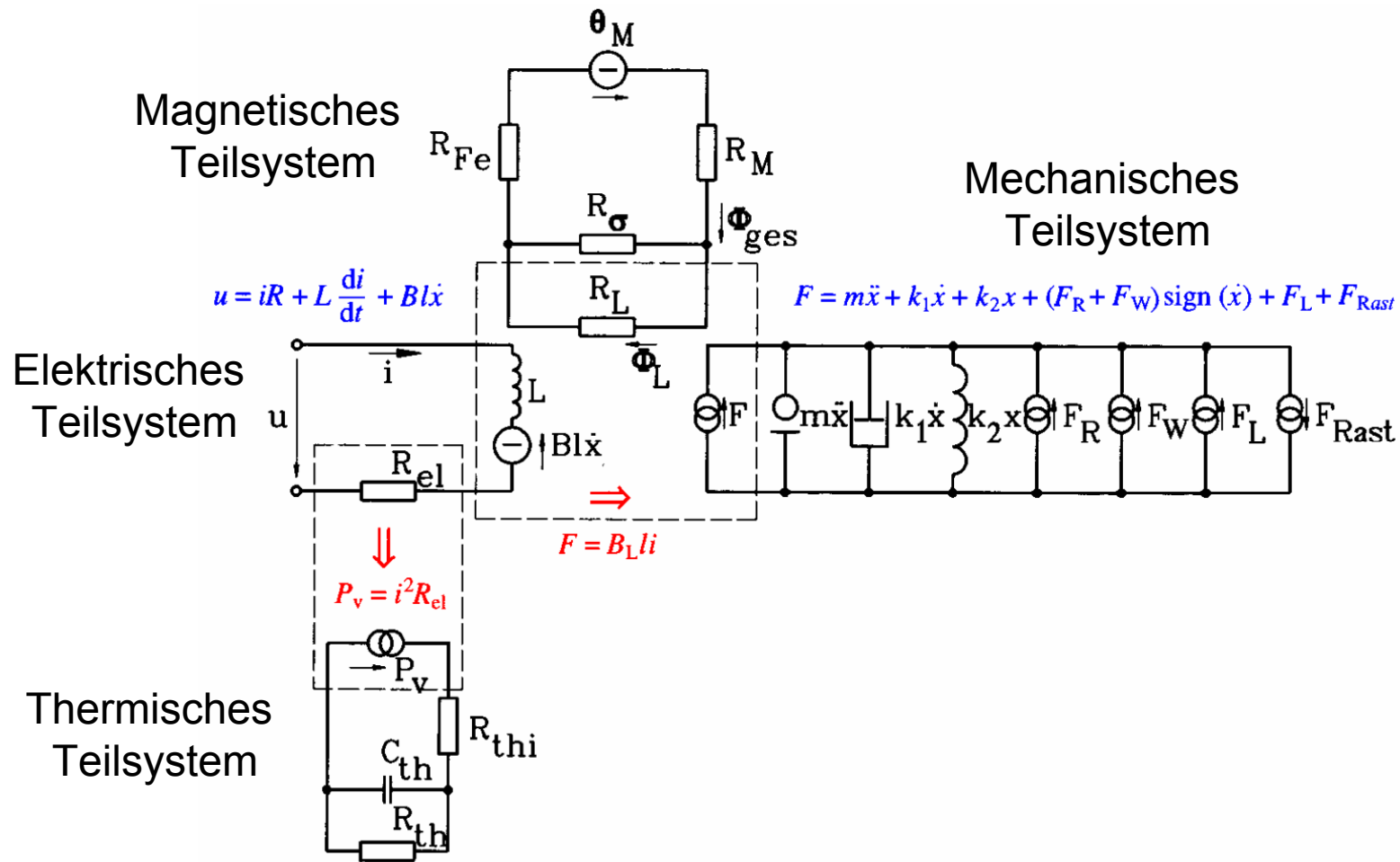
- Stärkere Verbreitung des Einsatzes von Lineardirektantrieben
- Große Variantenvielfalt möglich
- Keine Anpassung durch Getriebe wie bei rotatorischen Motoren mit rotations-translations-Umformern möglich
- Antriebe müssen auf die jeweiligen Anforderungen kostengünstig ausgelegt und dimensioniert werden
- Dies ist nur durch simulative Untersuchungen im Vorfeld möglich

## Zielsetzung

- Betrachtung eines elektrodynamischen Lineardirektantriebs bei vorgegebenen Fahrprofilen
- Bestimmung der relevanten Verlustleistungen im Antrieb
- Thermische Auslegung unter Berücksichtigung bei unterschiedlichen Randbedingungen
- Verifikation der Simulation durch Messungen

# Grundlagen

## Abstrahierte Teilsysteme im Antrieb



Grundstruktur eines elektrodynamischen Lineardirektantriebs

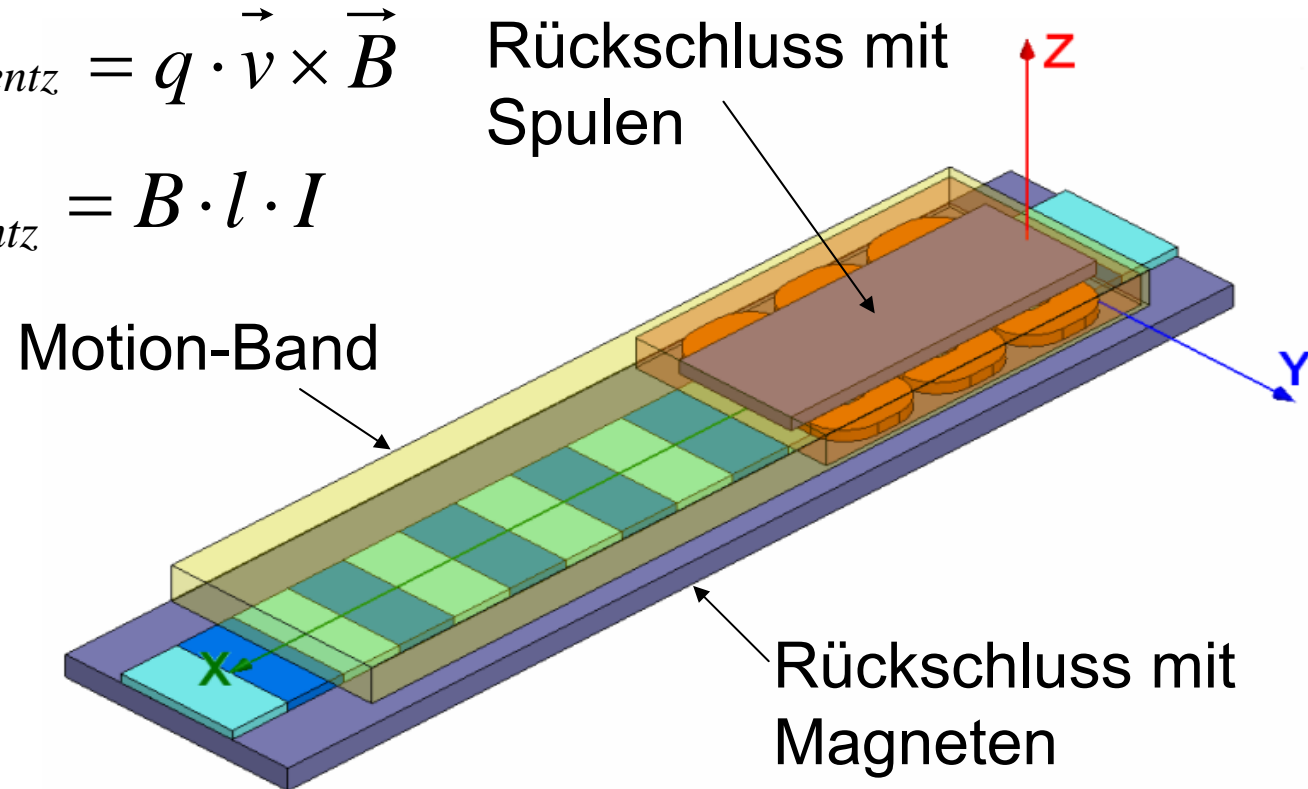
# Grundlagen Elektrodynamisches Wirkprinzip

## Dreisträngiger heteropolarer elektrodynamischer Antrieb

Wirkprinzip:

Allgemein:  $\vec{F}_{Lorentz} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

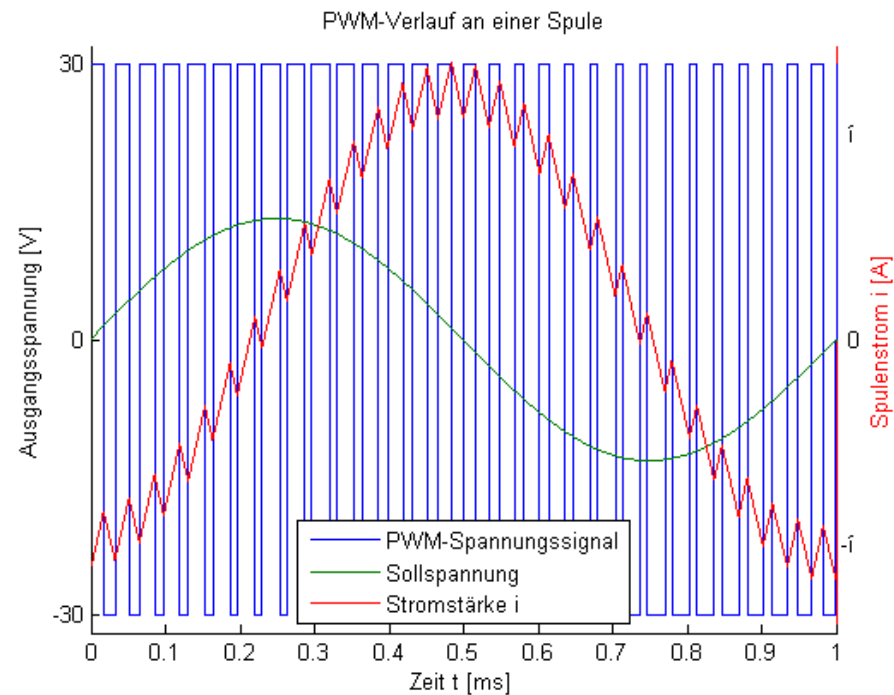
Vereinfacht:  $F_{Lorentz} = B \cdot l \cdot I$



# Grundlagen Ansteuerung des Antriebs

- Durch heteropolare Bauart des Antriebs sind große Verfahrbereiche möglich
- Positionsabhängige Kommutierung notwendig
- Verwendung einer Pulsweitenmodulierten Ansteuerung der drei Spulen

$$f_{\text{PWM}} > 30 \text{ kHz}$$





# Verlustleistungen in Lineardirektantrieben

Aufteilung der Verlustleistung in folgende Teile:

$$P_V = P_{Ohm} + P_W + P_{Hys} + P_R$$

$P_V$  : Gesamtverlustleistung

$P_{Ohm}$  : ohmsche Verlustleistung

$P_W$  : Wirbelstromverluste (Bewegung / PWM)

$P_{Hys}$  : Hystereseverluste

$P_R$  : Reibungsverluste

# Verlustleistungen in Lineardirektantrieben

## Ohmsche Verlustleistung

$$P_{Ohm} = i^2 \cdot R_{Spule}$$

## Wirbelstromverluste:

$$\bar{P}_W = \frac{1}{24} \cdot b^3 \cdot l \cdot h \cdot \kappa \cdot \omega^2 \cdot \bar{B}_\perp^2$$

## Hystereseverluste:

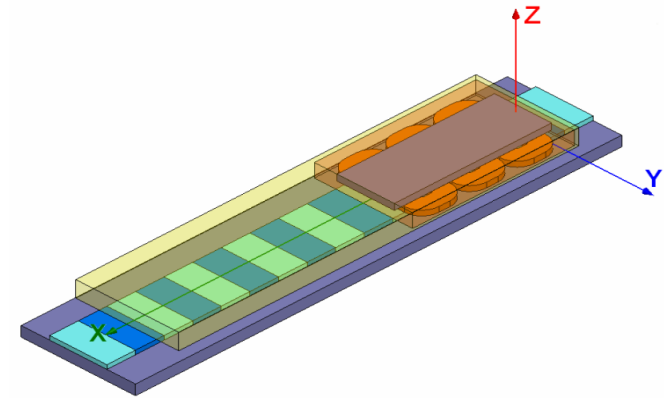
$$P_{Hys-max} = f \cdot V_{FE} \cdot W_{Hys-max} \quad \text{mit} \quad W_{Hys-max} = 2 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} B dH$$

## Reibungsverluste:

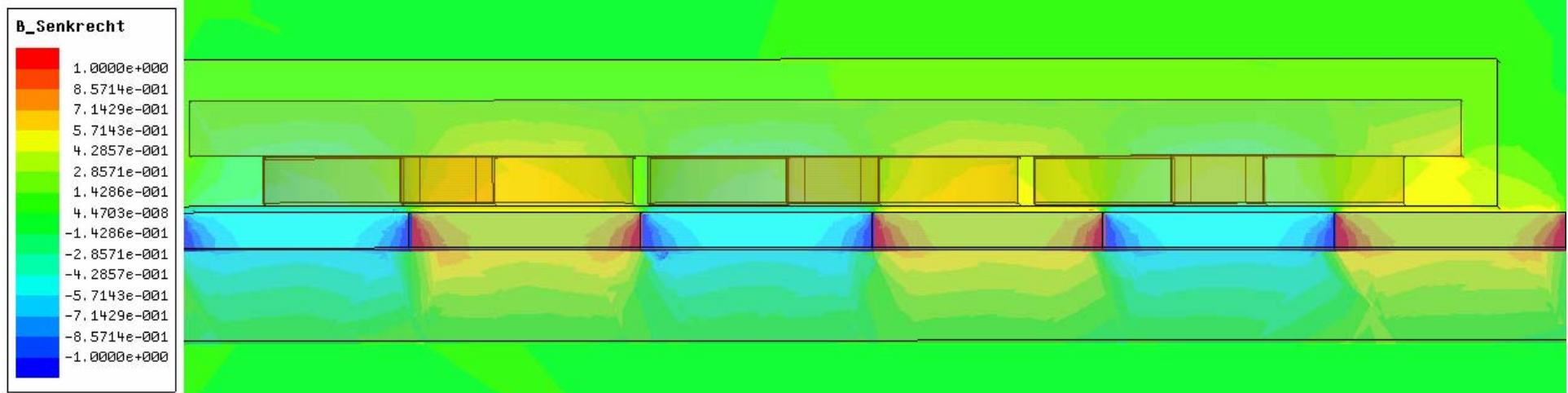
$$P_R = F_R \cdot v \quad \text{mit} \quad F_R = \mu \cdot F_N$$

# Quasistatische Analyse in MAXWELL

- Berechnung einer Kraft-Weg-Kennlinie
- Bestimmung von magnetischen Feldverläufen



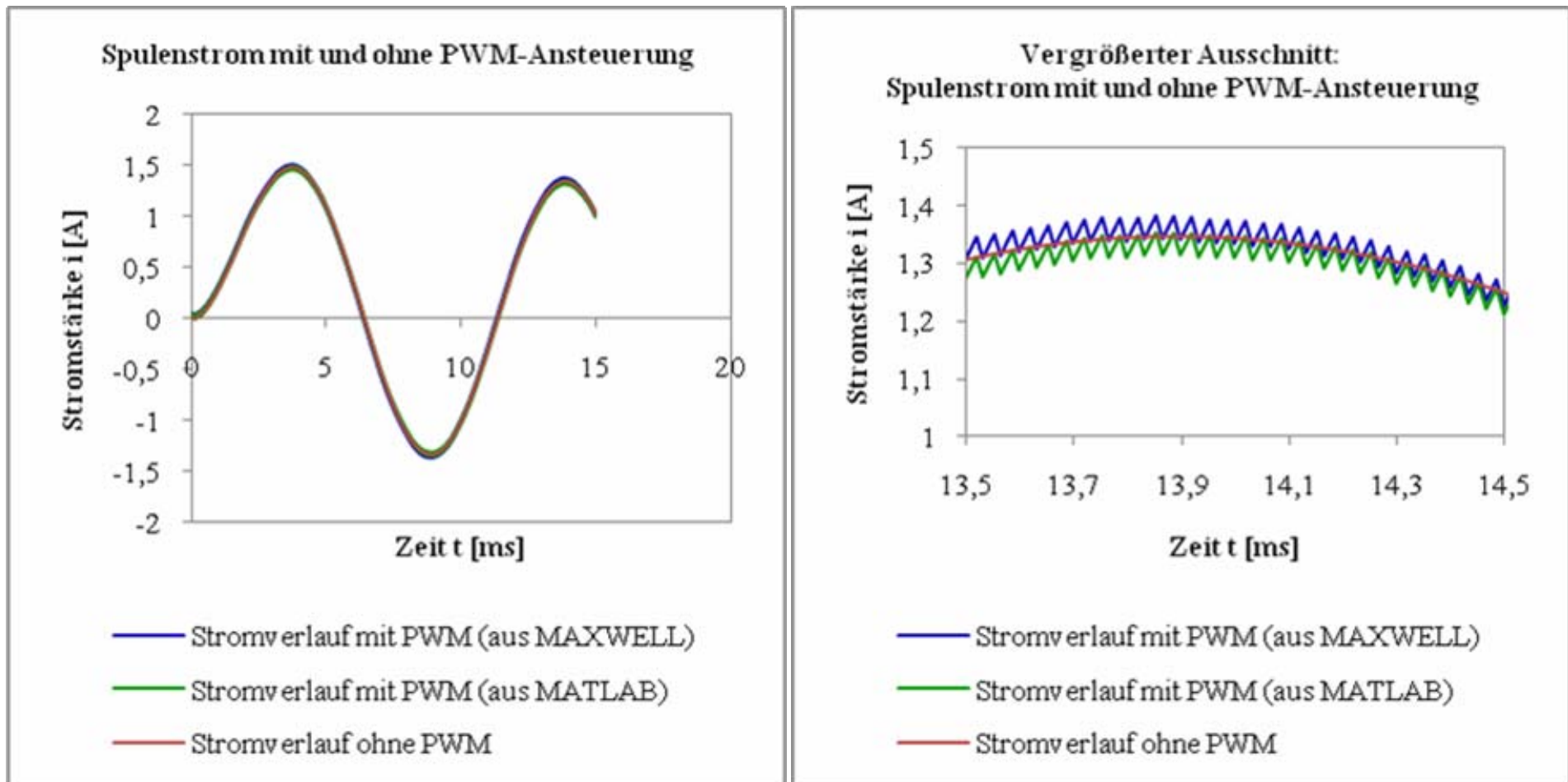
Plot über das senkrechte B-Feld zwischen +/- 1.0 Tesla



## Transiente Analyse mit PWM-Ansteuerung

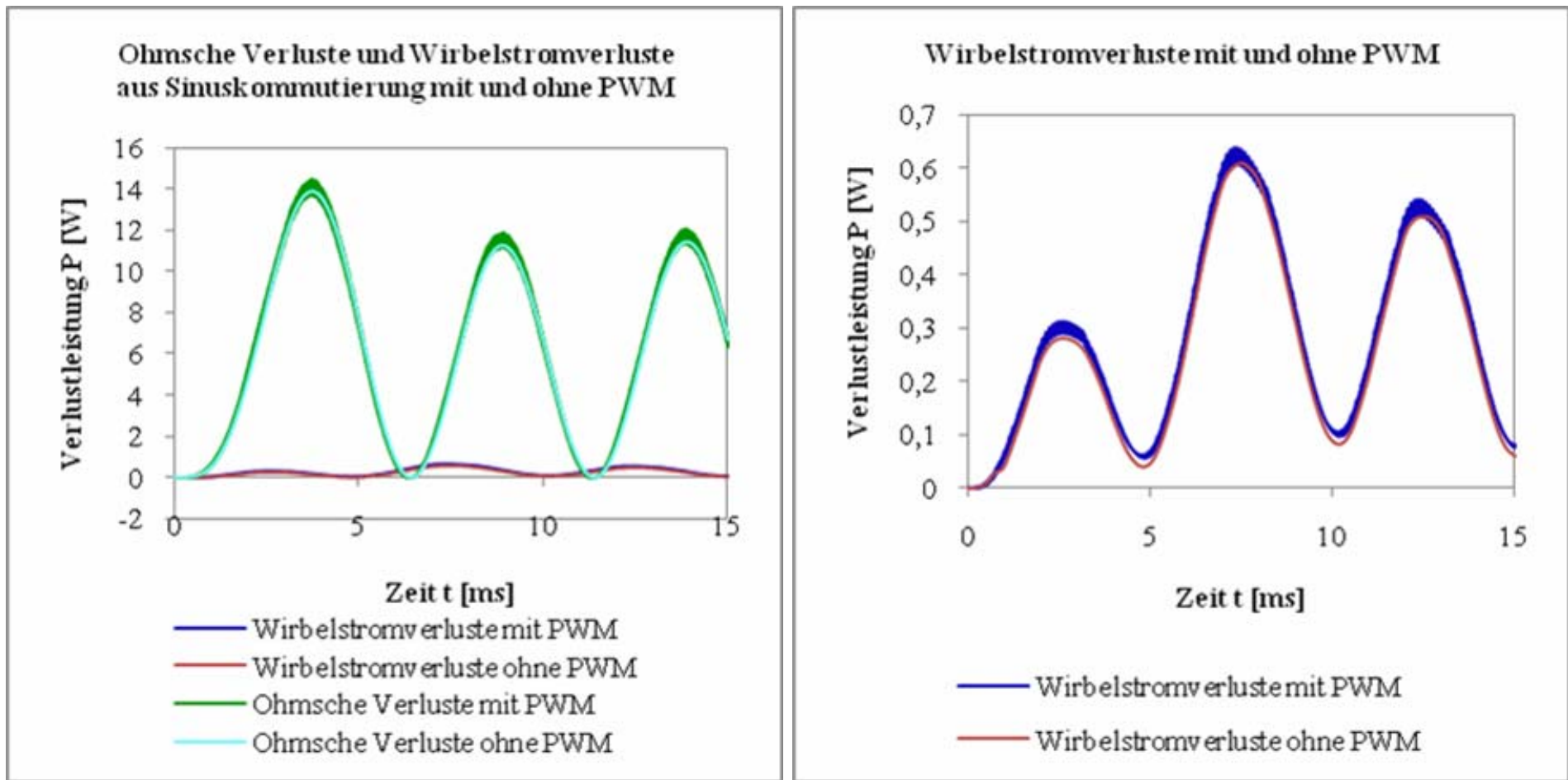
- Vorgabe eines PWM-Signals in MAXWELL und MATLAB
- Vergleich des Stromverlaufs mit Sinussignal
- Transiente Simulation eines Anfahrvorgangs
- Berechnung der Verluste für ein vorgegebenes  
Verfahrprofil

# Ergebnisse der transienten Analyse



Stromverlauf kann vereinfacht als Sinussignal verwendet werden

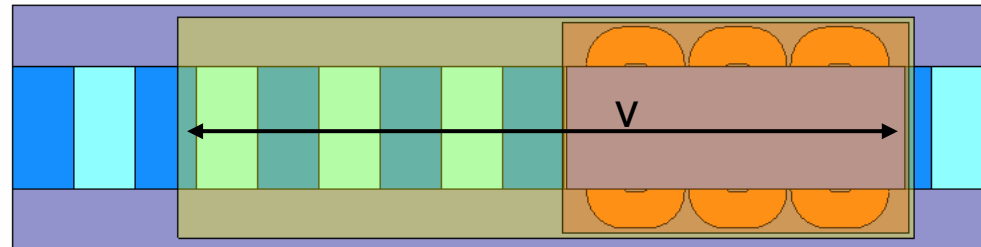
# Berechnung der Verluste



Wirbelstromverluste durch PWM-Signal können im Vergleich zu den ohmschen Verlusten vernachlässigt werden

# Strom- und Geschwindigkeitsverläufe im oszillierenden Betrieb

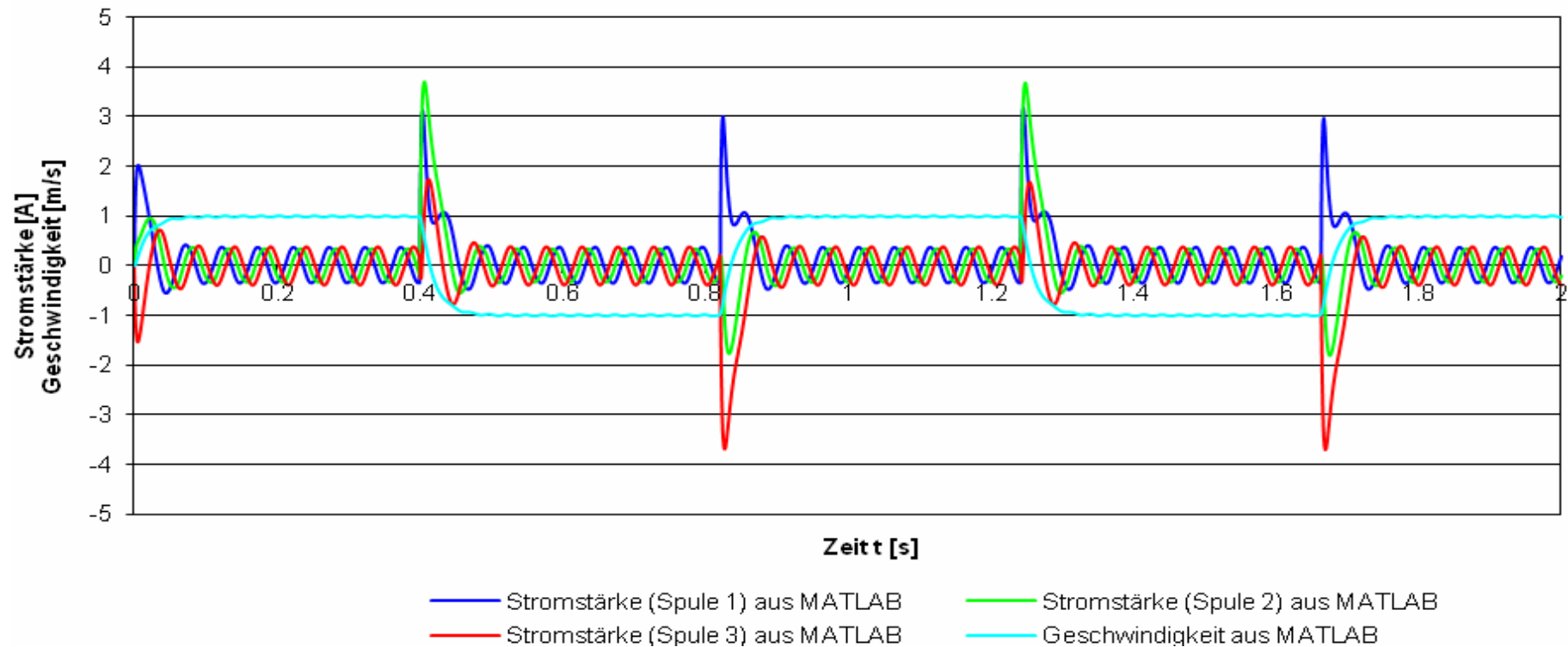
Oszillierender Betrieb:



- Der Motor fährt ein sinusförmiges Wegsignal mit vorgegebener Maximalgeschwindigkeit ab
- Es können unterschiedliche Amplituden und Geschwindigkeiten berücksichtigt werden

# Strom- und Geschwindigkeitsverläufe im oszillierenden Betrieb

Strom- und Geschwindigkeitsverlauf des oszillierenden Motors



Berechnung eines konstanten mittleren Stromwertes für ein vorgegebenes Fahrprofil



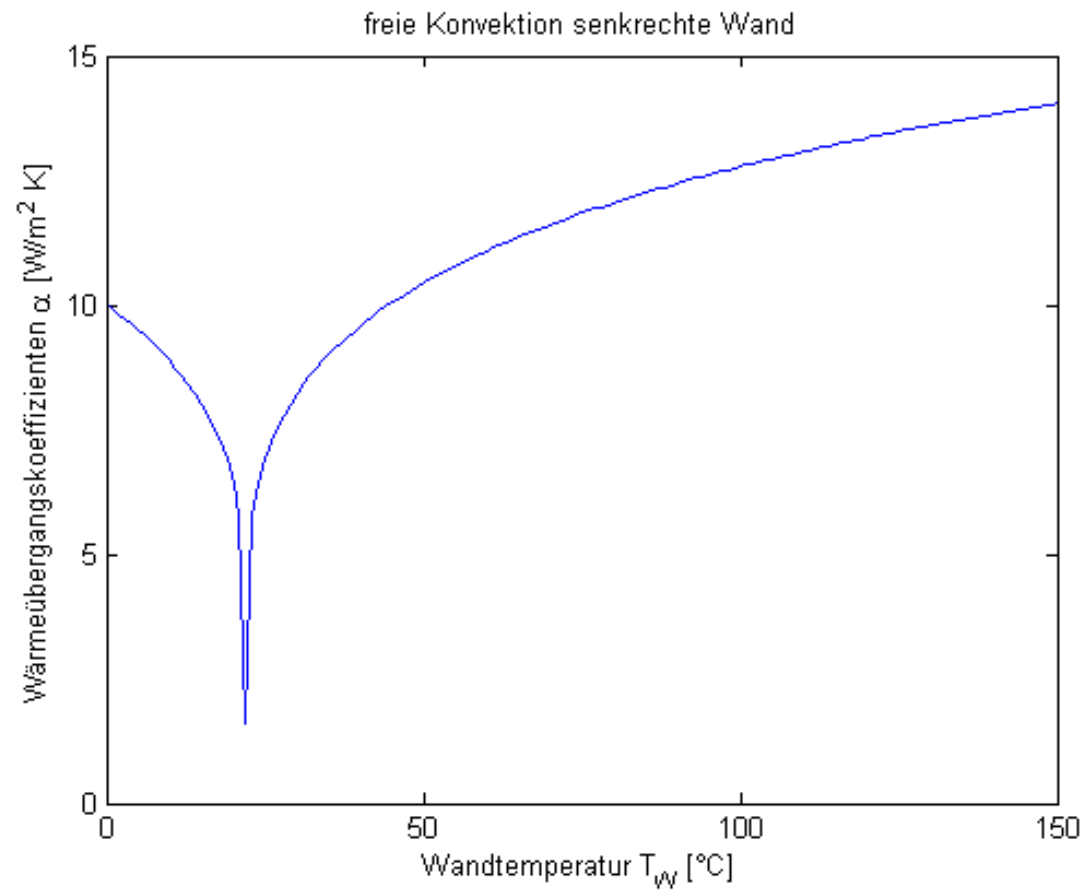
# Thermische Simulation

- Vorgabe der berechneten Verlustleistungen aus MAXWELL und MATLAB als konstanter Mittelwert für ein vorgegebenes Fahrprofil
- Definition der Randbedingungen:
  - Konvektion & Strahlung an der Systemgrenze
  - Wärmeleitung innerhalb der Spulen
  - Wärmeübergang zwischen Spulen und Rückschluss

## Bestimmung der Konvektions- und Strahlungskoeffizienten

- Definition der Konvektion an der Systemgrenze
- Abhängig von der Geometrie, Strömungsgeschwindigkeit und der Temperaturdifferenz an der Systemgrenze
- Ermittlung über dimensionslose Kennzahlen der Ähnlichkeitstheorie und den entsprechenden Korrelationsgleichungen in Abhängigkeit der Temperatur
- Nur gültig für ein im Vorfeld definiertes Verfahrprofil

# Freie Konvektion an einer senkrechten Wand



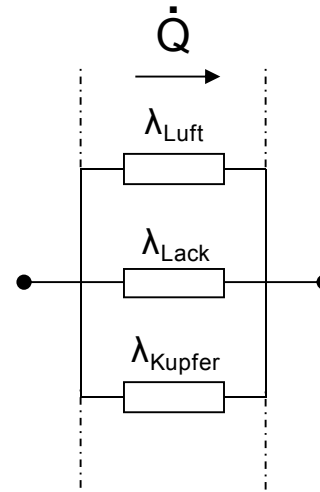
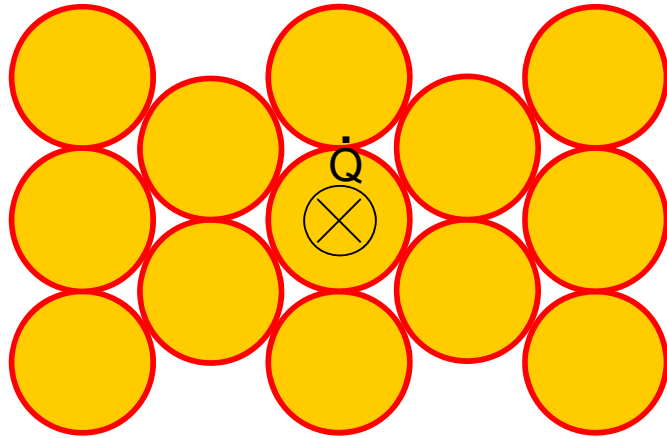
# Wärmeleitung in der Spule

Ziel: Berücksichtigung der Wärmeleitung innerhalb der Spule

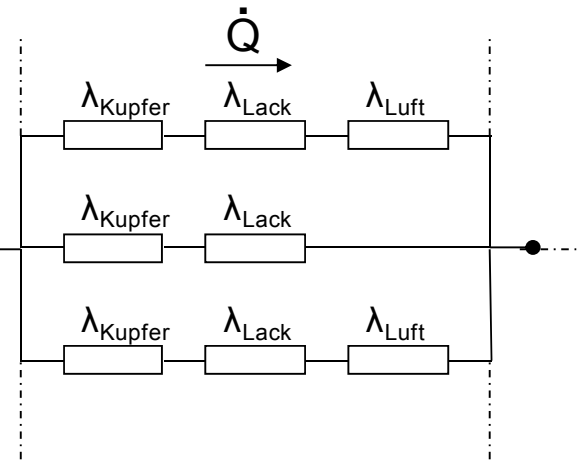
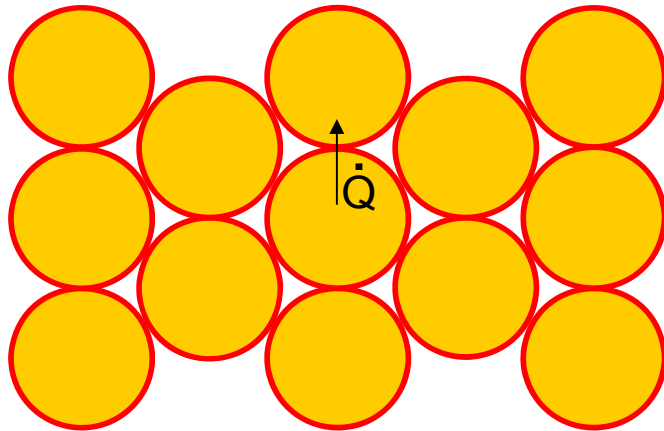
- Spule wird als Volumenkörper abgebildet, einzelne Windungen im dreidimensionalen abzubilden ist zu aufwändig
- Möglichkeit durch Modifikation der Materialeigenschaften
- Entwicklung eines „fiktiven“ Materials mit anisotropen thermischen Eigenschaften

# Wärmeleitung in der Spule

In Stromrichtung:



Senkrecht zur Stromrichtung:



# Realisierung der Wärmeleitung innerhalb der Spule im Simulationsmodell

Berücksichtigung im Modell als Vollmaterial mit fiktiven Materialeigenschaften entsprechend der Geometrie:

$A_{Spule}$

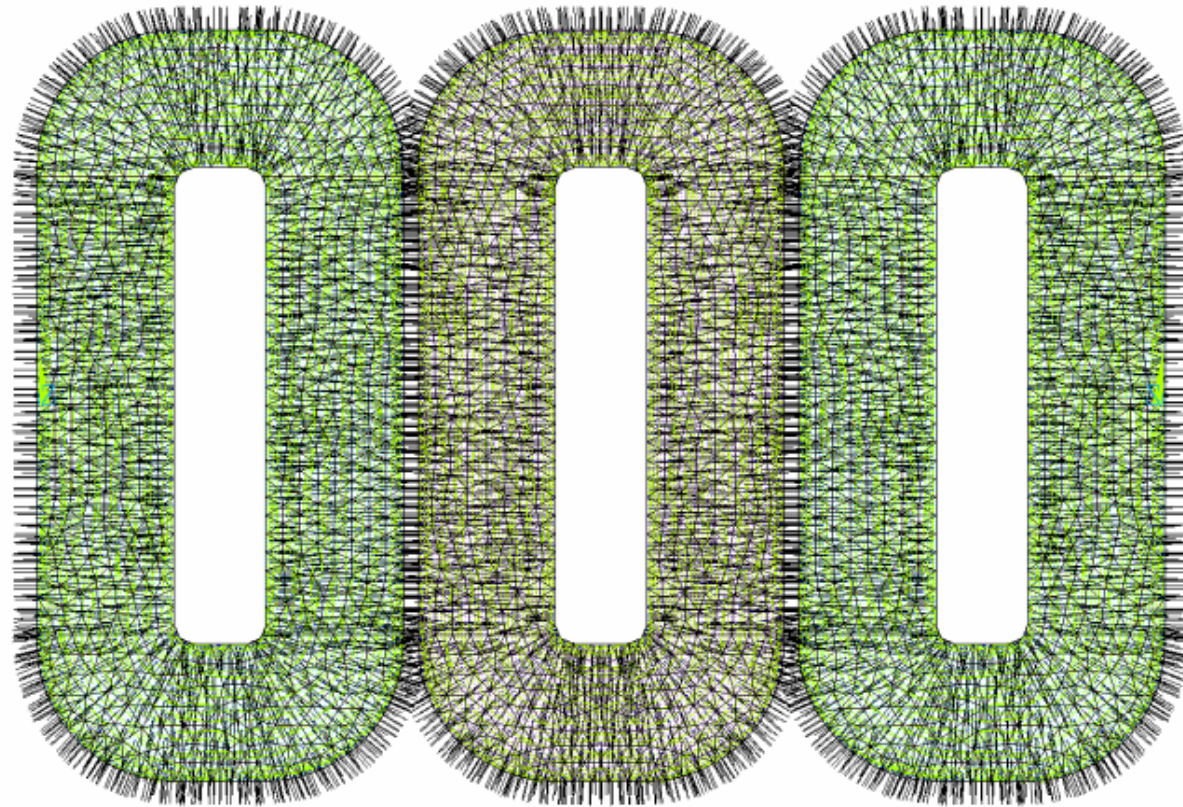
$$A_{Spule} = A_{Kupfer} + A_{Luft} + A_{Lack}$$

Anteilige Berechnung der Materialeigenschaften:

- Dichte  $\rho$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- Isobare Wärmekapazität  $c_p$

## Wärmeleitung in der Spule

Für die Berücksichtigung der anisotropen Materialeigenschaften ist eine Drehung der einzelnen Elementkoordinatensysteme notwendig



# Realisierung der Wärmeleitung innerhalb der Spule im Simulationsmodell

Vergleich der Materialeigenschaften:

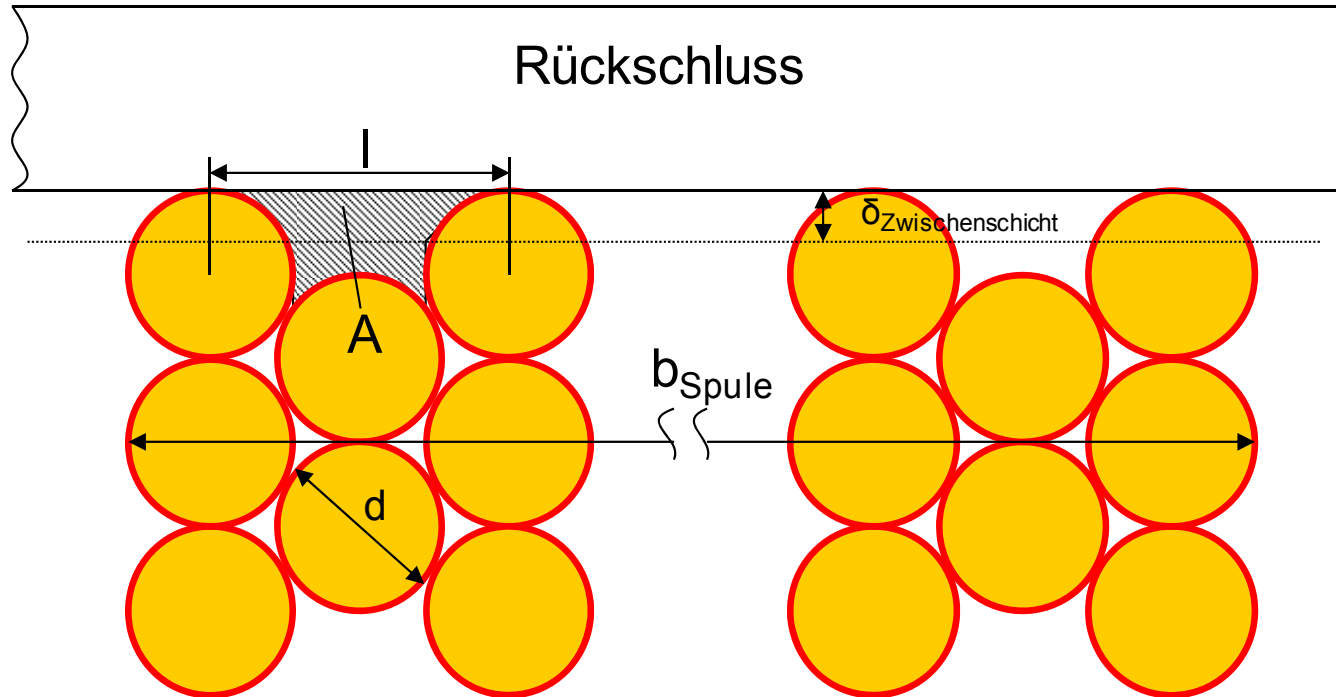
	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]			Isobare Wärmekapazität $c_p$ [J/kgK]
Kupfer	8960	401			385
Luft	1,29	0,024			1010
Lack	1130	0,27			1900
Spule	5980	$\lambda_x=0,6$	$\lambda_y=281$	$\lambda_z=1$	428

Durch die Erstellung des fiktiven Materials ist es nun möglich, das Temperaturprofil innerhalb der Spulenschenkel zu berücksichtigen und damit ein realitätsnahes Simulationsmodell der Spulen zu erstellen.



# Wärmeübergang Spule – Rückschluss

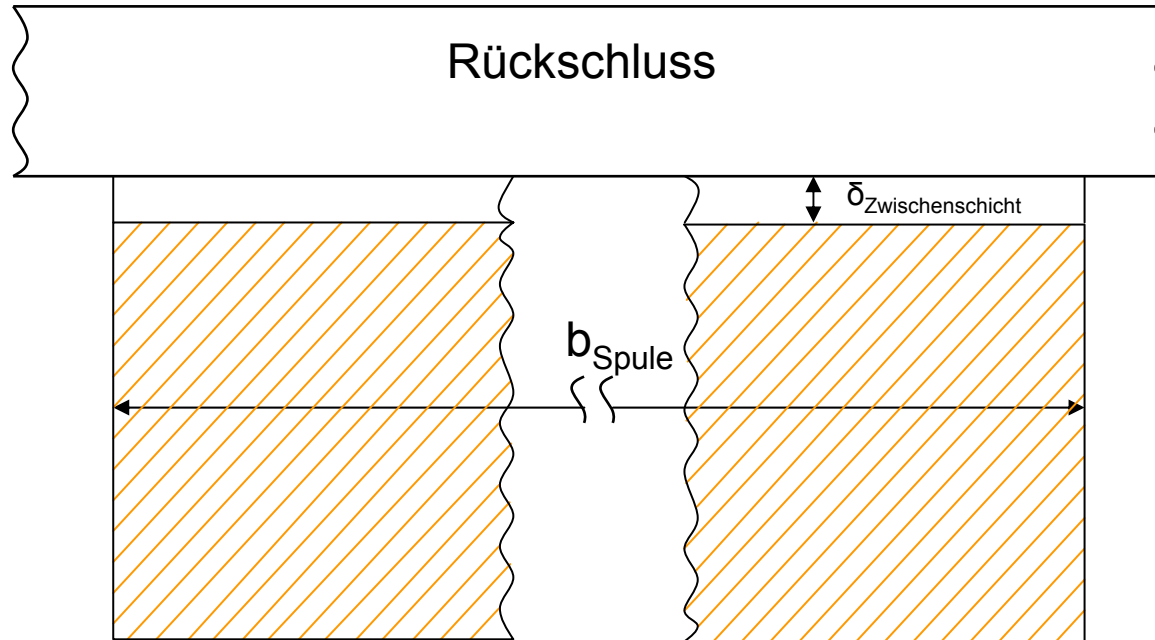
Real:



$$\Rightarrow \delta_{Zwischenschicht} = \frac{A}{l} = \frac{d}{4\sqrt{3}} \cdot (3\sqrt{3} - \pi)$$

# Wärmeübergang Spule – Rückschluss

Modell:



Alternativ: Definition des Wärmeübergangs in der Kontaktbedingung zwischen Spule und Rückschluss

$$\text{Wärmeleitwert: } G_{Zwischenschicht} = \frac{\lambda_{Zwischenschicht}}{\delta_{Zwischenschicht}}$$

## Temperaturabhängigkeit der Randbedingungen

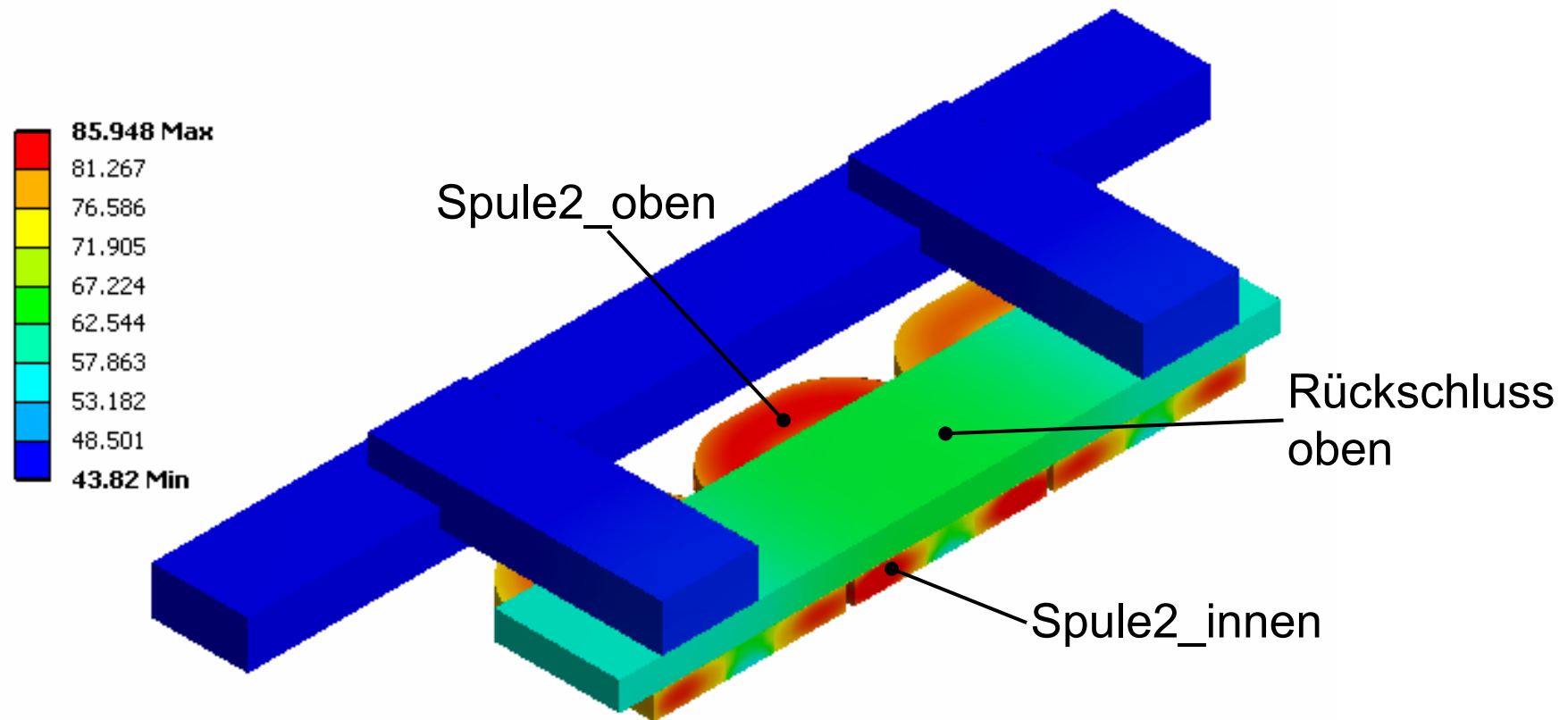
- Änderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit der Temperatur

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta \nu) \quad \text{mit} \quad \alpha_{Cu} = 3,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

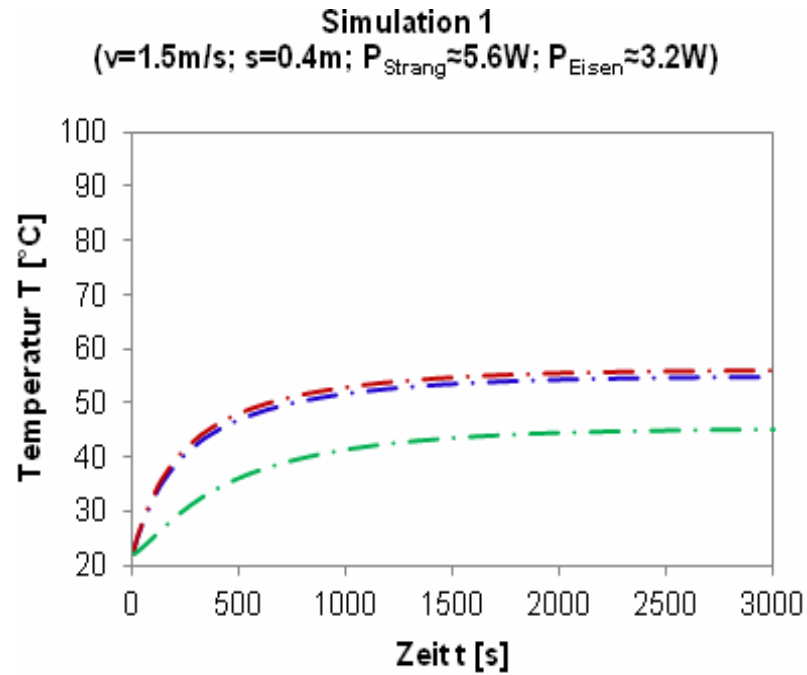
- Stromstärke wird im Rahmen der verfügbaren Spannung an der Endstufe angepasst
- Berücksichtigung in der Simulation nach jedem Zeitschritt
- Bei Konvektion und Strahlung durch direkte tabellarische Vorgabe in ANSYS

# Ermittlung der Temperaturverteilung

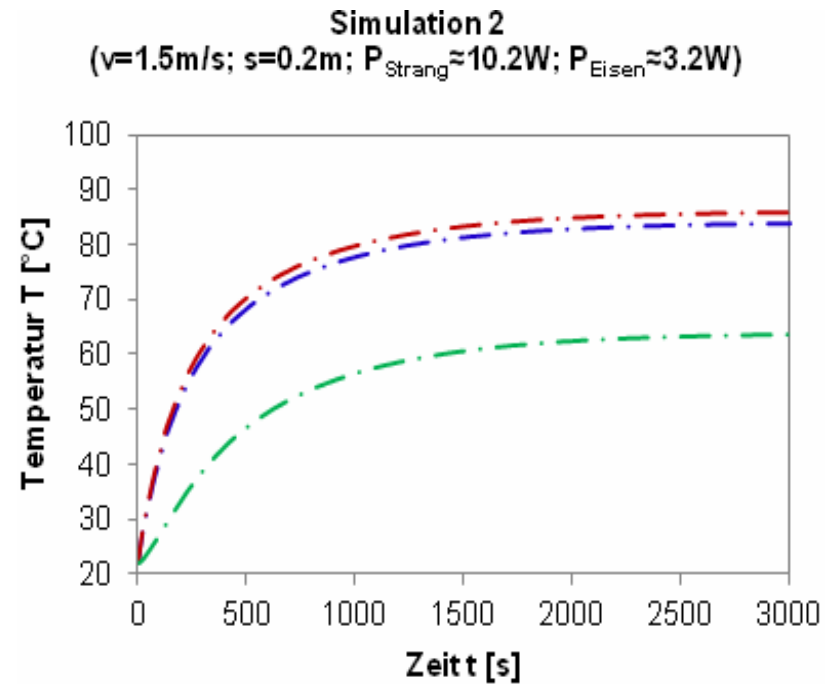
Aufnahme von Temperaturverläufen an ausgewählten Punkten über der Zeit



# Ergebnisse der Simulation



- · — · Spule2\_oben\_Simulation
- · — · Spule2\_innen\_Simulation
- · — · Rückschluss oben Simulation



- · — · Spule2\_oben\_Simulation
- · — · Spule2\_innen\_Simulation
- · — · Rückschluss oben Simulation

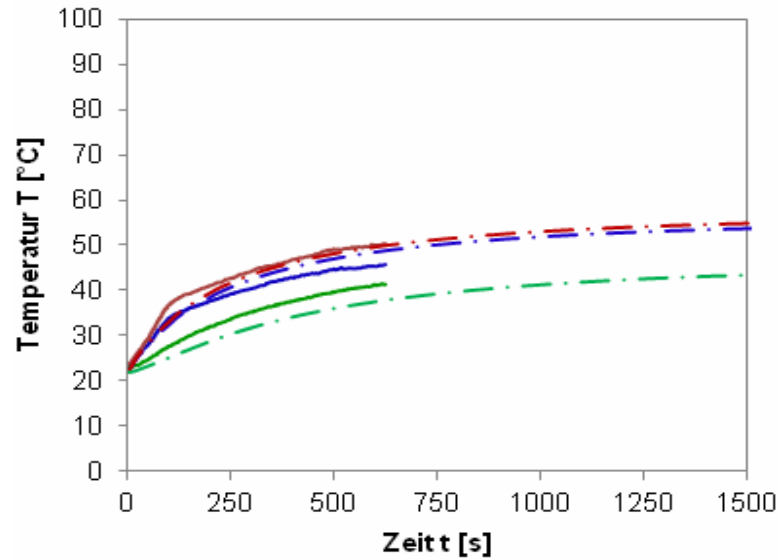
# Experimentelle Verifikation

- Aufnahme von Temperaturkennlinien mit Thermoelementen Typ K
- 8-kanaliger Temperaturmessverstärker mit LABVIEW-Oberfläche



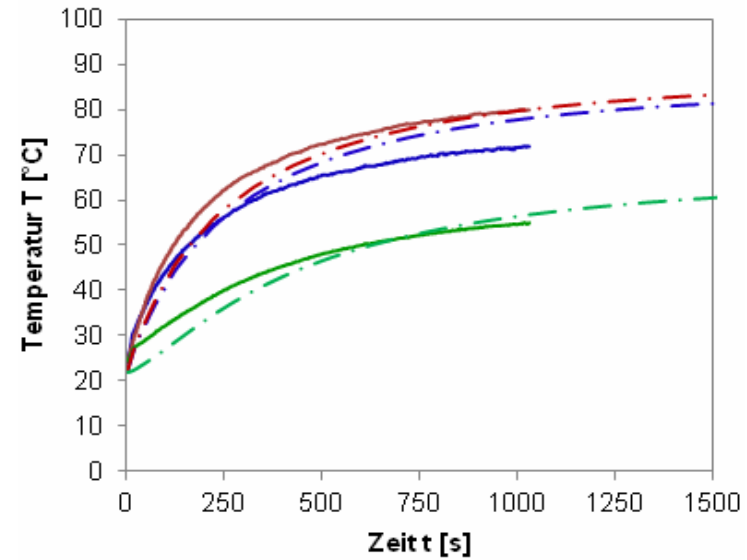
# Vergleich Simulation - Messung

Vergleich Messung - Simulation 1  
 ( $v=1.5\text{m/s}$ ;  $s=0.4\text{m}$ ;  $P_{\text{Strang}} \approx 5.6\text{W}$ ;  $P_{\text{Eisen}} \approx 3.2\text{W}$ )



- Spule2\_oben\_Messung
- Spule2\_innen\_Messung
- Rückschluss\_oben\_Messung
- · - Spule2\_oben\_Simulation
- · - Spule2\_innen\_Simulation
- · - Rückschluss oben Simulation

Vergleich Messung - Simulation 2  
 ( $v=1.5\text{m/s}$ ;  $s=0.2\text{m}$ ;  $P_{\text{Strang}} \approx 10.2\text{W}$ ;  $P_{\text{Eisen}} \approx 3.2\text{W}$ )



- Spule2\_oben\_Messung
- Spule2\_innen\_Messung
- Rückschluss\_oben\_Messung
- · - Spule2\_oben\_Simulation
- · - Spule2\_innen\_Simulation
- · - Rückschluss oben Simulation

# Bewertung der Ergebnisse

## Grenzen der Simulation

- Definition der Materialkenndaten
- Berechnung der Verluste (Änderung der Verluste durch geregelte Ansteuerung)
- Thermische Randbedingungen (Emissions- und Konvektionskoeffizienten)

## Grenzen der Messung

- Messgenauigkeit der Thermoelemente
- Anbringung der Thermoelemente
- Vergleichbare Messbedingungen (Raumtemperatur, Sonneneinstrahlung,...)



## Zusammenfassung

- Simulative Bestimmung des thermischen Verhaltens eines dreisträngigen Flachspulantriebs für ein vorgegebenes Fahrprofil
- Abbildung des Temperaturprofils innerhalb der Spulen
- Definition des Wärmeübergangs zwischen Spulen und Rückschluss
- Experimentelle Verifikation der Simulation am realen Motormodell
- Durch systematischen Einsatz der FEM und numerischer Lösung der Differentialgleichungen konnte ein relativ genaues Modell zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften im Antrieb erstellt werden

## Ausblick

- Weitere Verfahrenprofile und Ansteuerungen am Motormodell untersuchen
- Detaillierung weiterer Komponenten im Modell
- Quantifizierung des Optimierungspotentials bei unterschiedlichen Kühlmöglichkeiten
- Anwendung des thermischen Modells auf weitere Motorbauformen

Vielen Dank  
für  
Ihre Aufmerksamkeit!

Herzliche Einladung zum Arbeitskreis Elektromechanik!  
16.20 – 18.00 Uhr, Raum K7 Eifel