

Inhalt der Vorlesung

Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

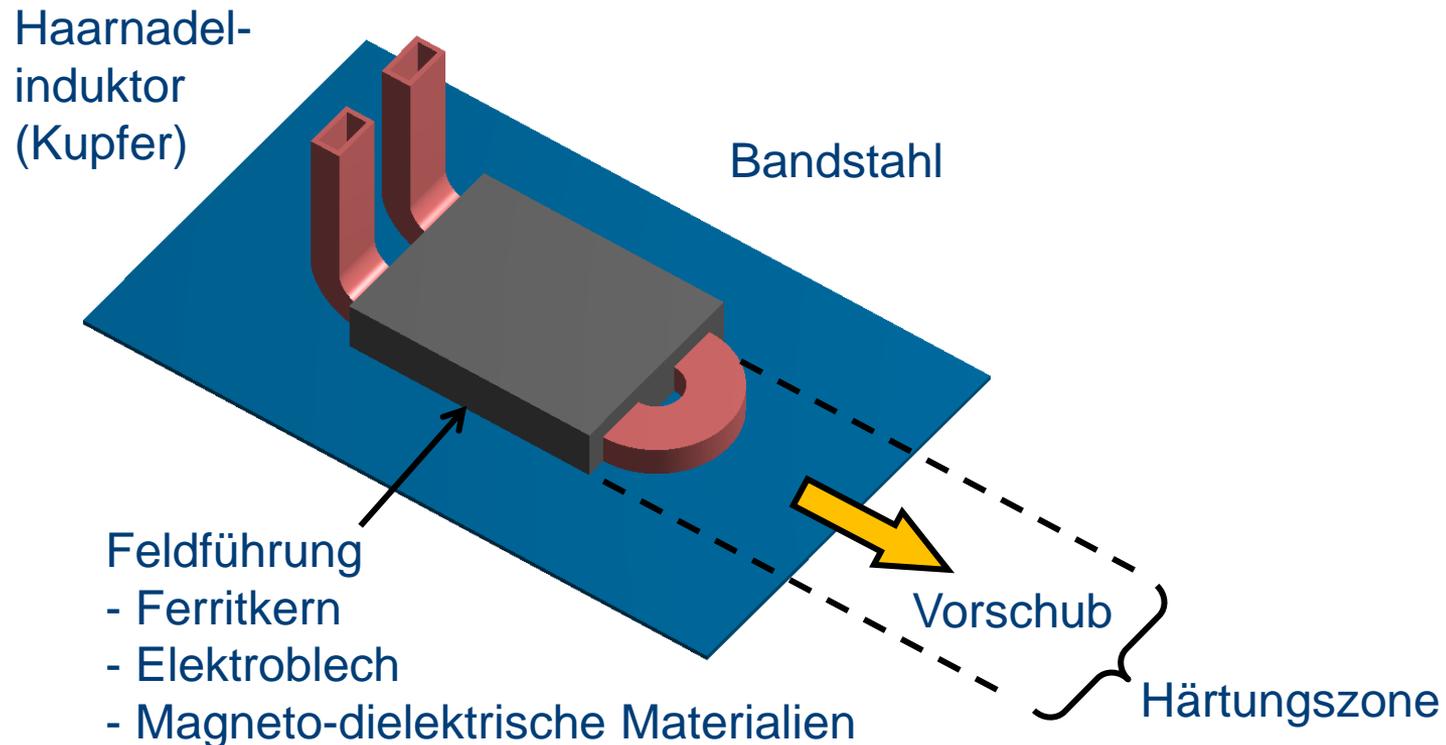
1. Einführung / Übersicht über Verfahren / Simulation zur Wirtschaftlichkeitsanalyse
2. Grundlagen der Wärmelehre, Simulation von Temperaturfeldern
3. Energieeffizienz / Konduktive Erwärmung (Praxis und Simulation)
4. Maxwell-Gleichungen / Leistungsumsetzung / Wirkungsgrad
5. Induktionserwärmung 1: Umrichter, Schmelzöfen, Schmieden
6. Induktionserwärmung 2: Querfeld, Härten, Schweißen
7. **Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)**
Bidirektionale Kopplung, Zeitskalen, Gefügeableitung, Verzug
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



1. Modellbildung für die bidirektional gekoppelte FEM-Simulation

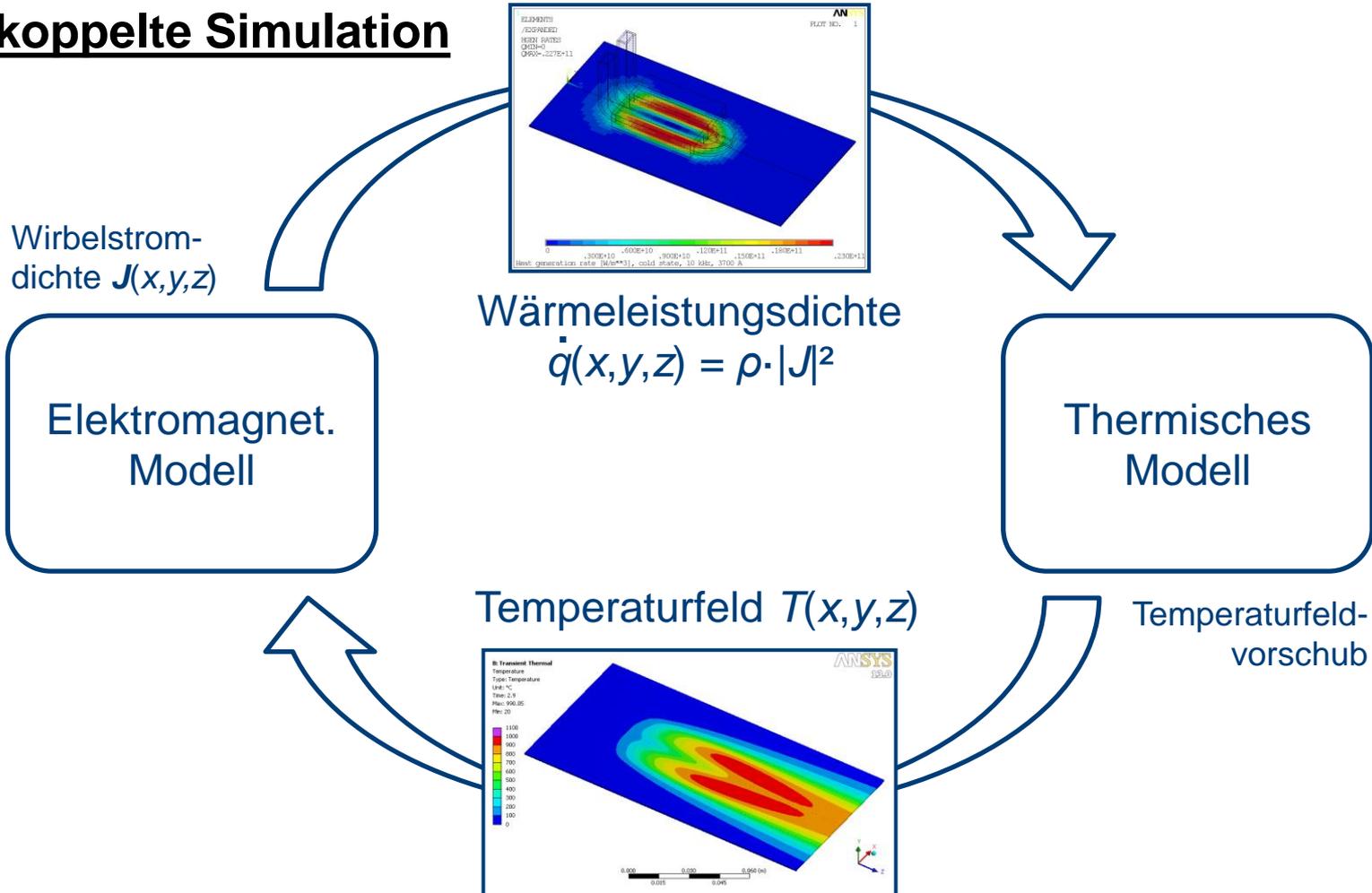
Modellbeispiel

Zonenselektive Erhitzung von Bandstahl



1. Modellbildung für die bidirektional gekoppelte FEM-Simulation

Gekoppelte Simulation



1. Modellbildung für die bidirektional gekoppelte FEM-Simulation

Elektromagnetisch: Maxwell-Gleichungen

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{B} \text{ ist quellenfrei} \quad \rightarrow \quad \vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\dot{\vec{B}}$$

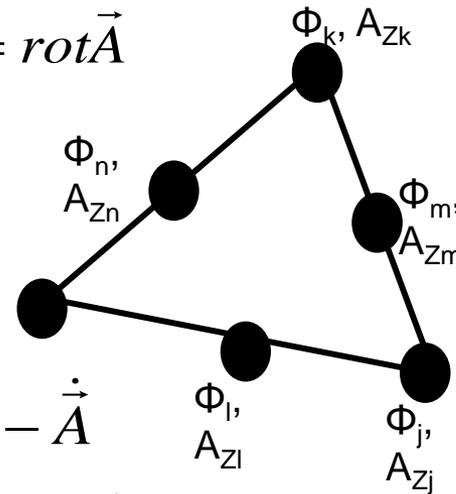
$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\operatorname{rot} \dot{\vec{A}}$$

$$\operatorname{rot}(\vec{E} + \dot{\vec{A}}) = 0 \quad \rightarrow \quad \text{wirbelfrei}$$

$$\vec{E} + \dot{\vec{A}} = -\operatorname{grad} \Phi \quad \rightarrow \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} \Phi - \dot{\vec{A}}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} = \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} \right) = \sigma (-\operatorname{grad} \Phi - \dot{\vec{A}})$$

Vektorpotenzial wird berechnet,
daraus alles Weitere:



Hinweis:
 σ sind μ sind
temperaturabhängig!

$$p(t) = \kappa \cdot E^2(t) \quad \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

1. Modellbildung für die bidirektional gekoppelte FEM-Simulation

Thermisch: Wärmeleitungs-Gleichung

$$c_p \rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} \vartheta) + \textcircled{p}$$

*Hinweis:
 c_p sind λ sind
temperaturabhängig!*

Die Wärmequellendichte aus der elektromagnetischen Berechnung stellt die Eingangsgröße und damit das Koppelglied von Elektromagnetik zur Temperatur dar

Die Temperaturentwicklung wird über einem Zeitschritt berechnet und anschließend an die Elektromagnetik zurückgekoppelt zur Anpassung der dortigen Materialdaten → neue Wärmequellendichte...

1. Modellbildung für die bidirektional gekoppelte FEM-Simulation

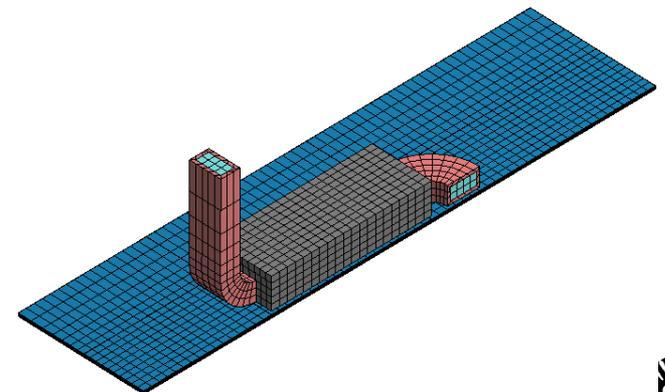
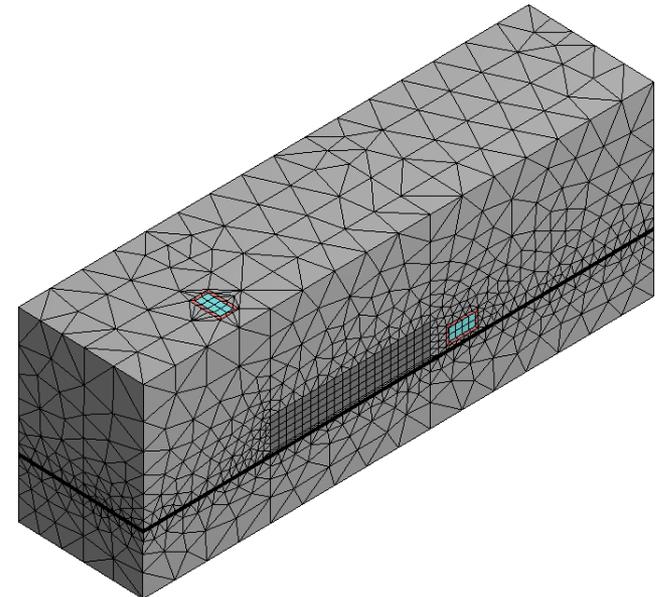
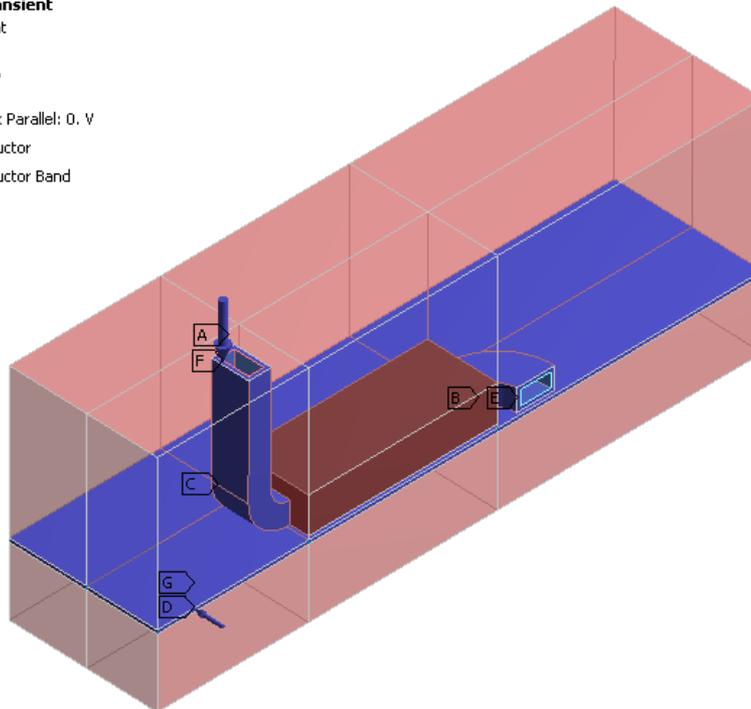
Elektromagnetisches Modell

- Bandstahl, Induktor, Luft
- Temperaturabhängiger elektrischer Widerstand $\rho(T)$ und $B(H)$ -Kurve

A: Magnetic Transient

Magnetic Transient
Time: 2.e-004 s
17.10.2011 14:06

- A** Magnetic Flux Parallel: 0. V
- B** Source Conductor
- C** Source Conductor Band
- D** Voltage: 0. V
- E** Voltage: 0. V
- F** Current:
- G** Current: 0. A



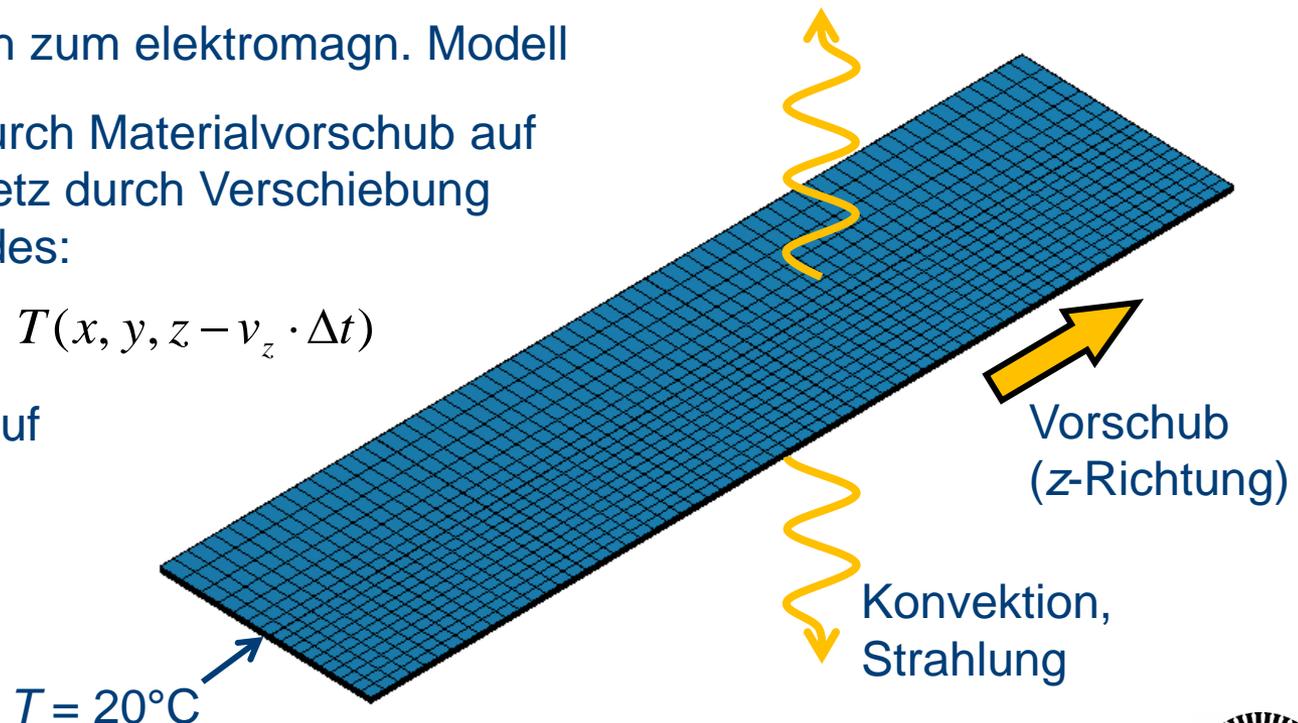
1. Modellbildung für die bidirektional gekoppelte FEM-Simulation

Thermisches Modell

- Nur Bandstahl
- $\lambda(T)$ und $c(T)$ temperaturabhängig
- FEM-Netz identisch zum elektromagn. Modell
- Wärmetransport durch Materialvorschub auf *ortsfestem* FEM-Netz durch Verschiebung des Temperaturfeldes:

$$T_{\text{shifted}}(x, y, z) = T(x, y, z - v_z \cdot \Delta t)$$

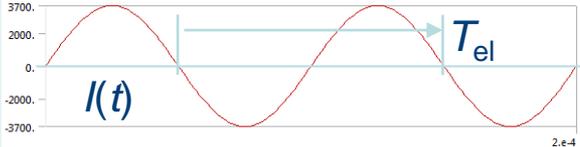
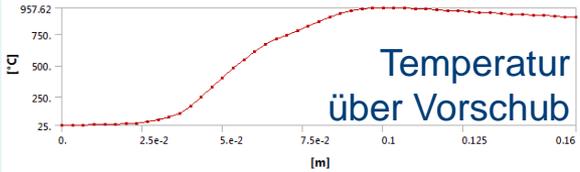
- Abkühlsimulation auf separatem Modell



2. Iterative elektromagnetisch-thermische Lösung

Unterschiedliche Zeitskalen beider Domänen

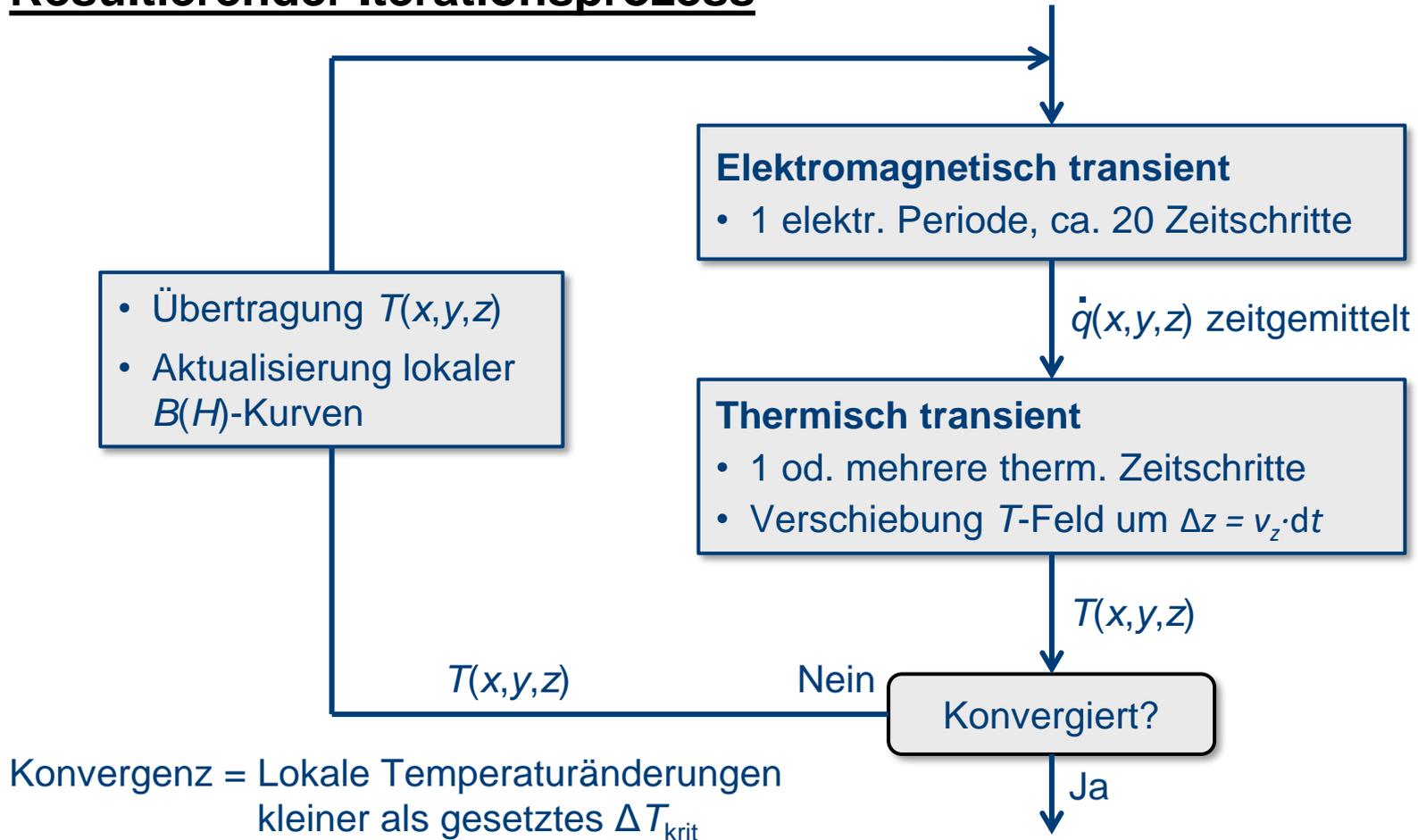
Transiente Zeitschrittsimulation auf beiden Seiten:

	Elektromagnetisch	Thermisch
Perioden- bzw. Prozessdauer	 $f = 1 \dots 500 \text{ kHz}$ $\rightarrow T_{el} \approx 2 \mu\text{s} \dots 1 \text{ ms}$	 ca. 0.5 ... > 2 sec
Erforderliche Schrittweite	$\Delta t \approx 100 \text{ ns} \dots 50 \mu\text{s}$ (ca. 20 Schritte je Periode)	$\Delta t \approx 10 \dots 50 \text{ ms}$

- Folge: Gesamtzeit 500 ms : Schrittweite 50 μs = **10000 Schritte !!!**
- **Lösung:**
 - Simulation jeweils einer vollständigen elektrischen Periode mit "kleinem" Δt
 - Zeitmittelung der Wärmeleistungsdichte
 - Simulation eines bzw. mehrerer thermischer Zeitschritte mit "großem" Δt

2. Iterative elektromagnetisch-thermische Lösung

Resultierender Iterationsprozess



2. Iterative elektromagnetisch-thermische Lösung

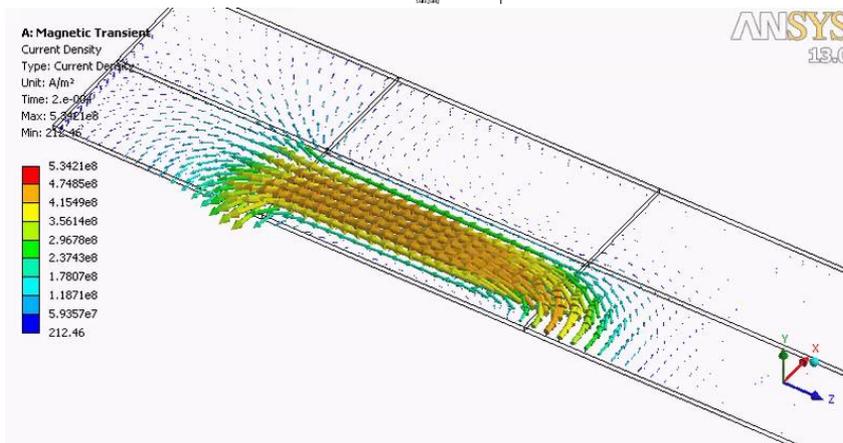
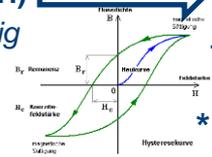
Elektromagnetische Simulation

$$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} = \text{rot} \vec{H}$$

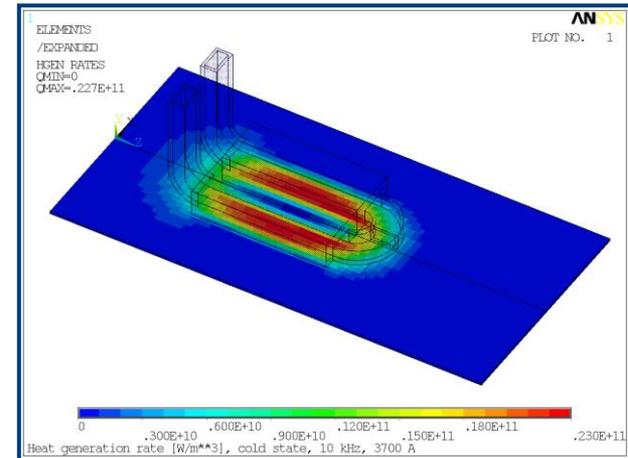
$$\vec{H} = \frac{1}{\mu(\vec{H})} \vec{B}$$

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

$$\kappa \cdot \omega^2 \cdot A^2 = \dot{q}$$



Induzierte Wirbelstromdichte \mathbf{J} (RT)



Wärmeleistungsdichte \dot{q} ,
gemittelt über elektr. Periode

$$\dot{q}(\vec{r}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \dot{q}_i(\vec{r}) \quad \text{mit} \quad \dot{q}_i(\vec{r}) = \rho(T(\vec{r})) \cdot [J_i(\vec{r})]^2$$

$$\vec{r} = (x, y, z) \quad N = \text{Anzahl Zeitschritte (1/2 Periode)}$$

*: elektronikt...

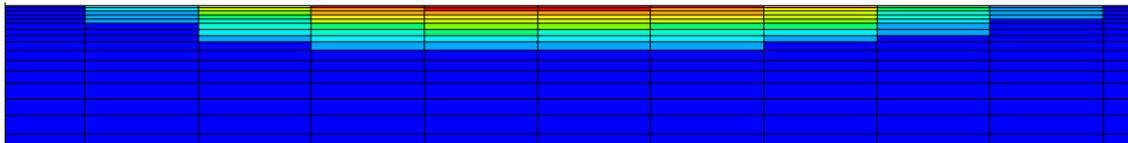


2. Iterative elektromagnetisch-thermische Lösung

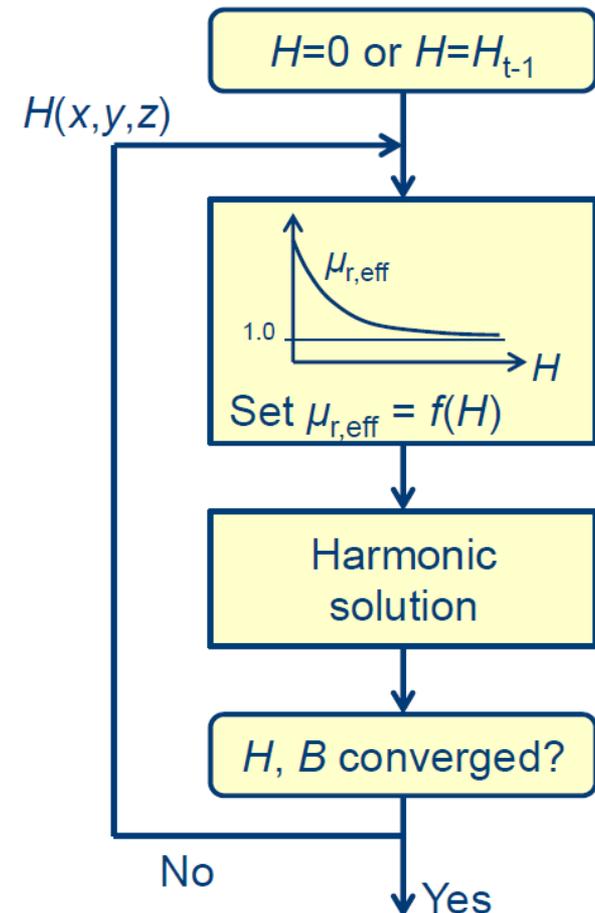
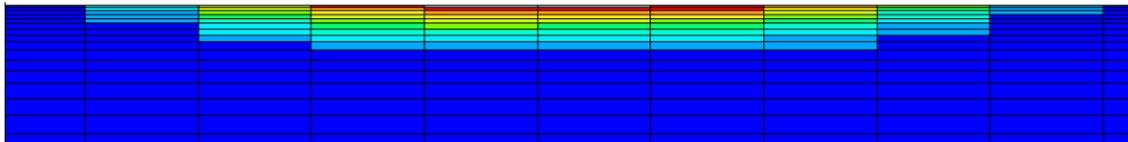
Alternative zur transienten Simulation → adaptiv harmonisch

- Spart weitere Berechnungszeit
- Permeabilität wird in jedem Element angepasst basierend auf lokaler Magnetfeldstärke

• Transient:



• Adaptive harmonic:

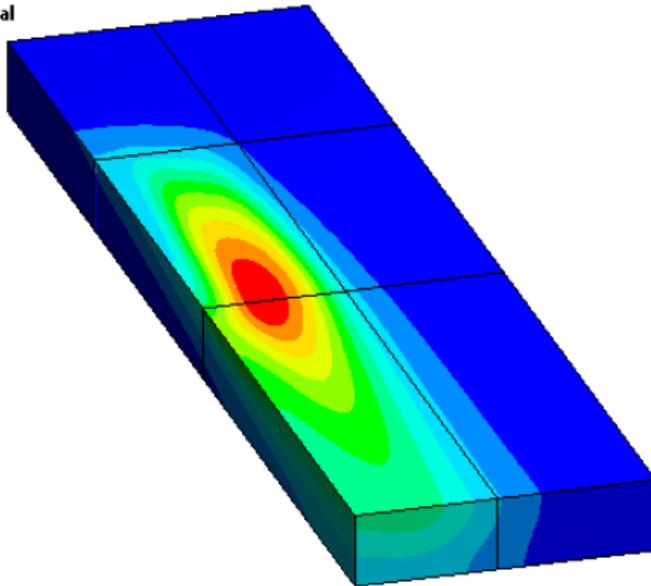
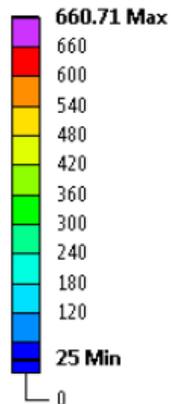


2. Iterative elektromagnetisch-thermische Lösung

Alternative zur transienten Simulation → adaptiv harmonisch

- Vergleich der Ergebnisse

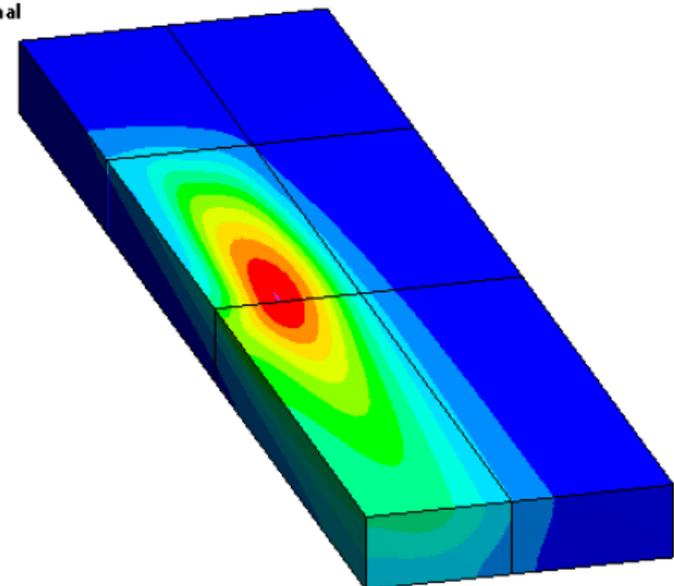
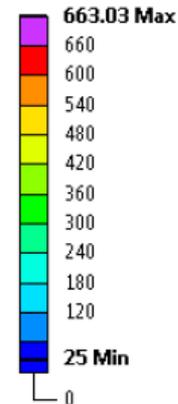
C: Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2.7



Transient solution

→ $T_{\max} = 661^{\circ}$

C: Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2.7

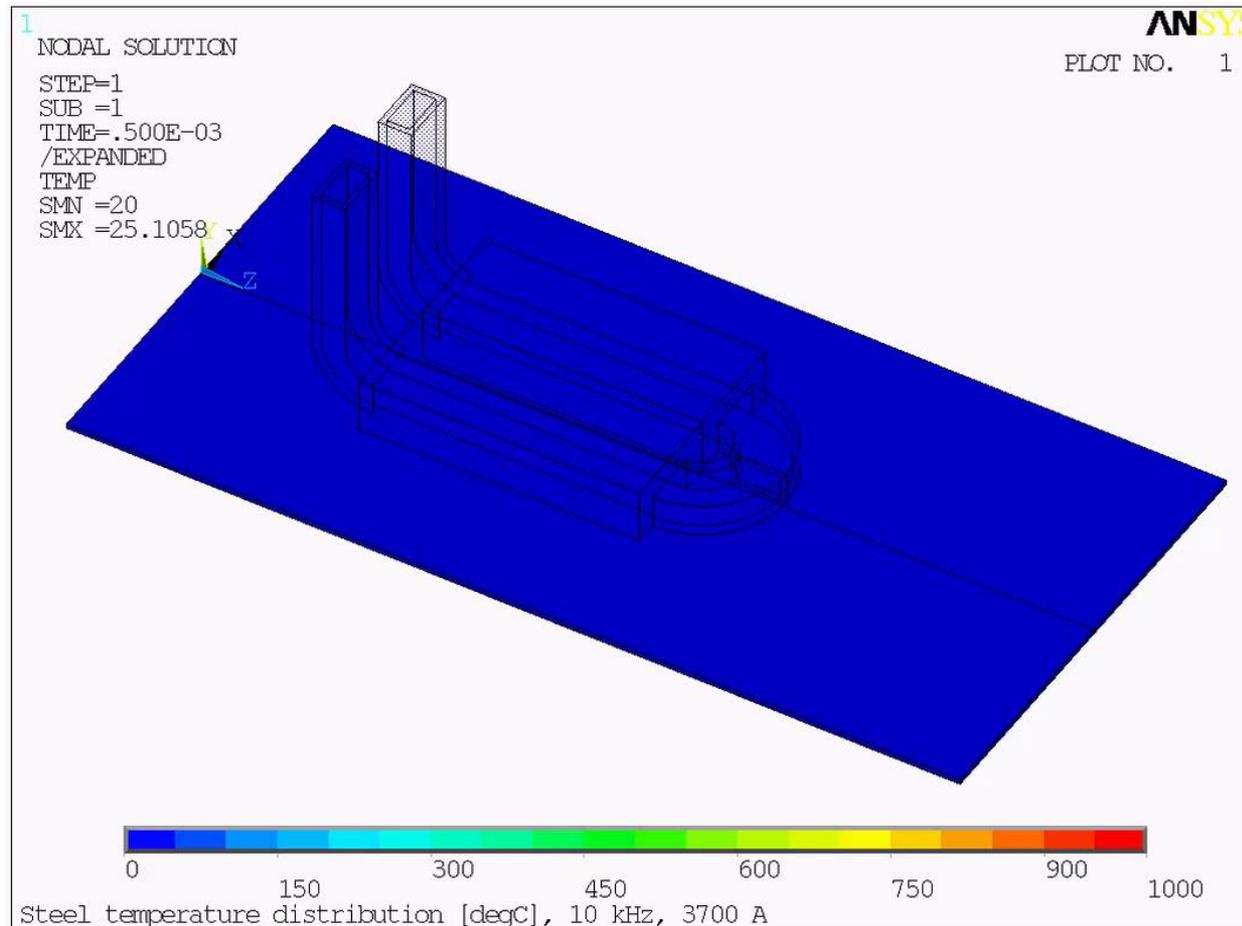


Adaptive harmonic solution

→ $T_{\max} = 663^{\circ}\text{C}, I = 5149\text{ A}$

2. Iterative elektromagnetisch-thermische Lösung

Thermische Simulation - Temperaturfeld



3. Temperaturabhängige Materialeigenschaften

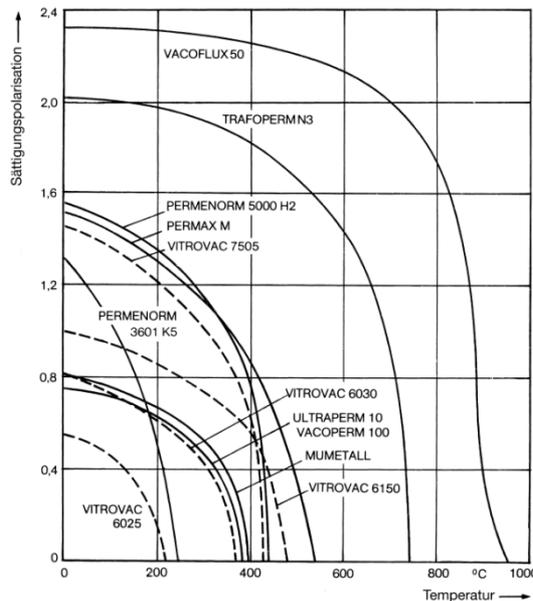


Thermische Charakteristik von $B(H)$ -Kurven

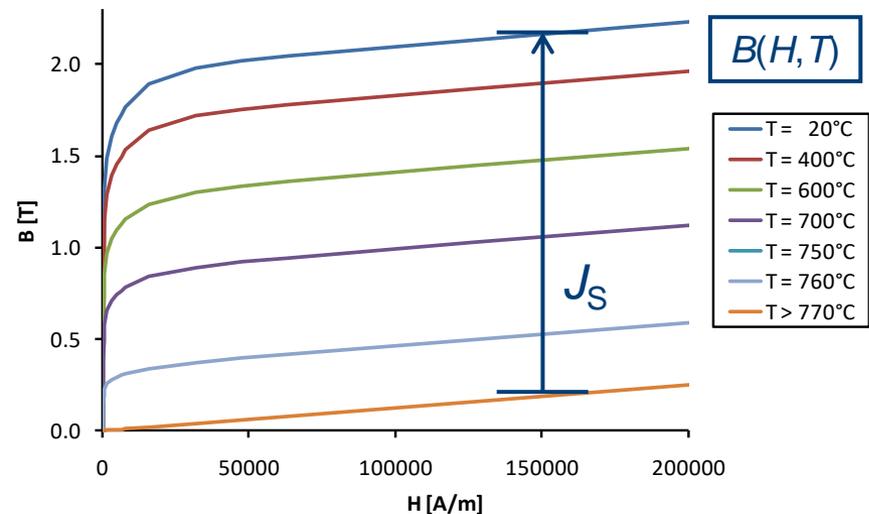
$$B(H, T) = \mu_0 H + J(H, T) = \mu_0 \cdot [1 + \chi(H, T)] \cdot H$$

Für $H \rightarrow \infty$: $J = J_S(T)$ (Sättigungspolarisation)

Typischer Verlauf $J_S(T)$:



Quelle:
VAC Hanau



➔ Starke Änderung des magn. Verhaltens zw. Raum- und Zieltemperatur (ca. 950°C)

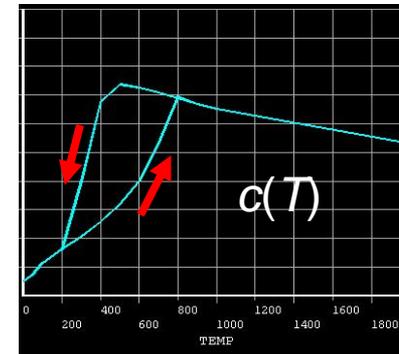
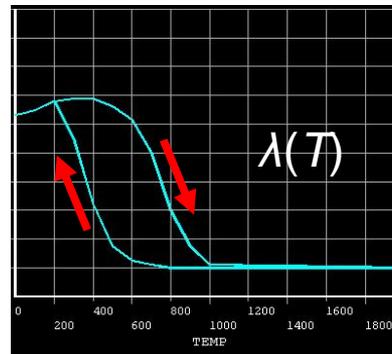
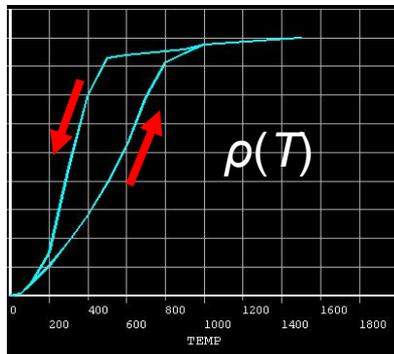
➔ J_S verschwindet oberhalb T_{Curie}



3. Temperaturabhängige Materialeigenschaften

Weitere temperaturabhängige Materialeigenschaften

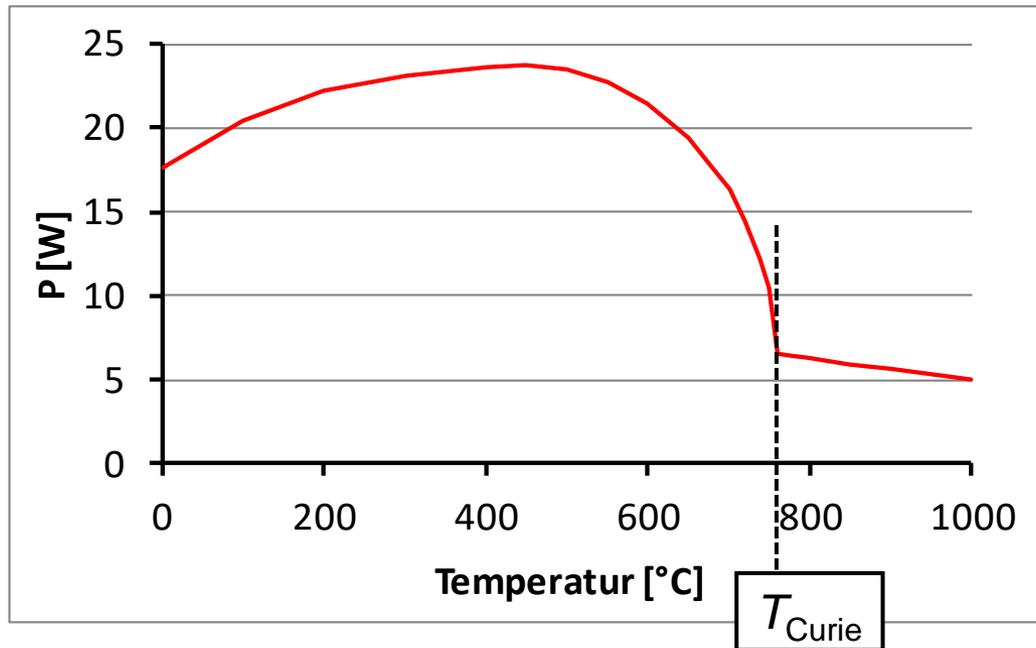
- Spezifischer elektrischer Widerstand $\rho(T)$
- Spezifische Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$
- Spezifische Wärmekapazität $c(T)$



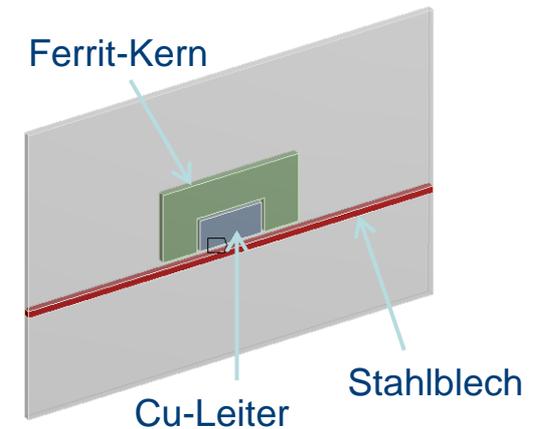
➔ Jeweils unterschiedliche Kurven für Heizen und Kühlen
(für Induktionsheizen nur Heizkurven benutzt)

3. Temperaturabhängige Materialeigenschaften

Einfluss des Temperaturganges $B(H, T)$ und $\rho(T)$ auf die Wärmeleistung



2D-Testmodell:



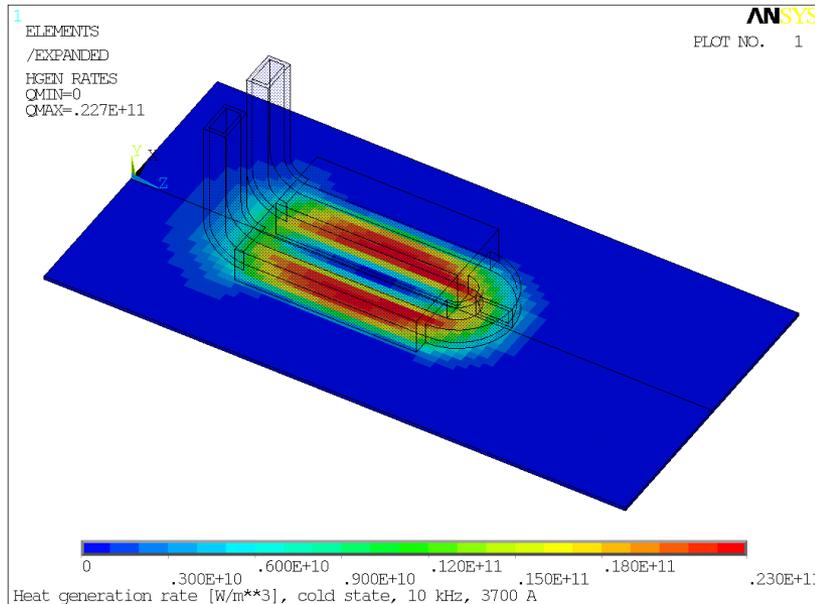
Auswertung der Gesamtwärmeleistung im Blech bei homogen gesetzter Blechtemperatur

➔ Variation der Wärmeleistung um bis zu Faktor 5 im Temperaturbereich!

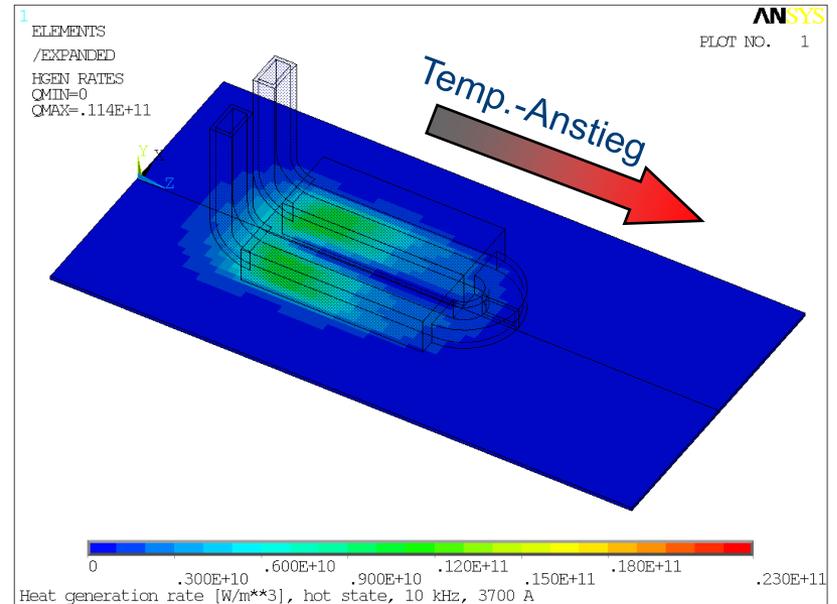
3. Temperaturabhängige Materialeigenschaften

Einfluss des Temperaturganges $B(H, T)$ und $\rho(T)$ auf die Wärmeleistung

Wärmeleistungsdichte am 3D-Modellbeispiel:



Kalter Zustand (25°C)

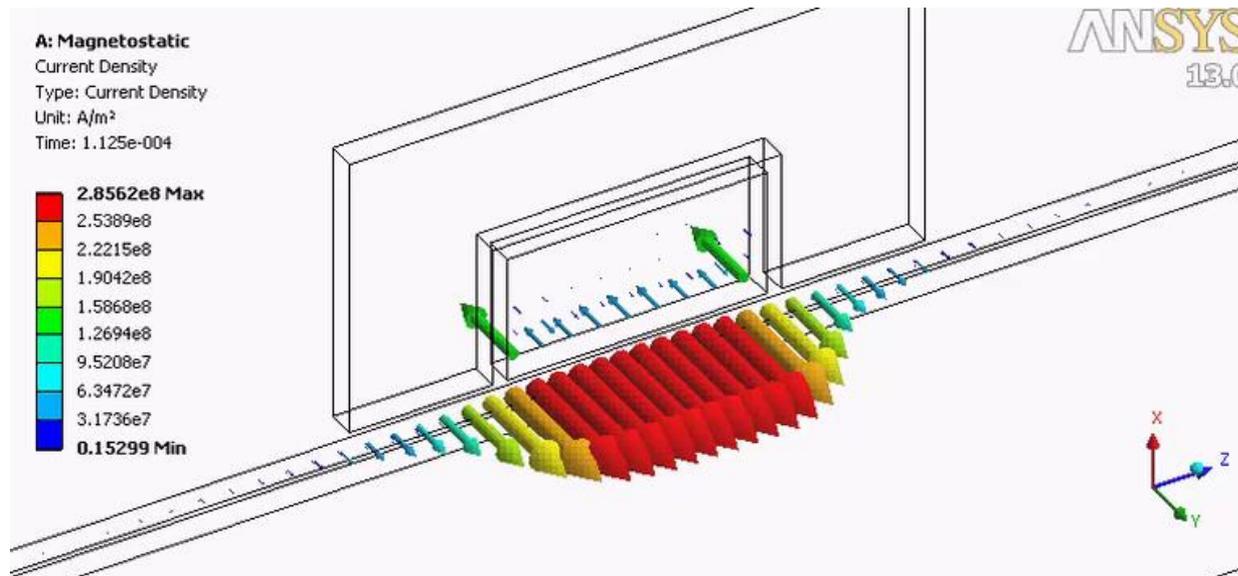


Stationärer Heißzustand
(25...ca. 950°C)

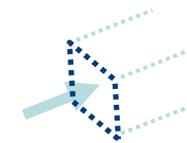
4. Wirbelstromgerechte FEM-Vernetzung

Wirbelstromausprägung (2D-Testmodell)

Wirbelstromdichte unter Induktorleiter



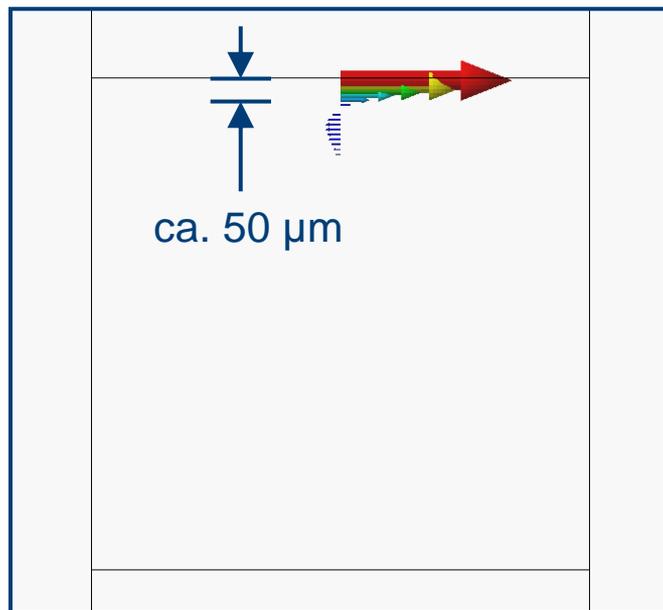
Folgende Bilder:
Blickrichtung entlang Stahlstreifen
auf Schnittfläche



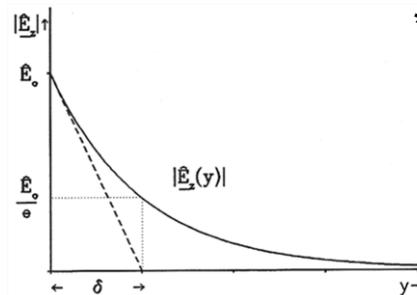
4. Wirbelstromgerechte FEM-Vernetzung

Wirbelstromausprägung (2D-Testmodell)

Keine magnetische Sättigung
($I_{\text{peak}} = 10 \text{ A}$, $B_{\text{max}} \approx 0.76 \text{ Tesla}$)

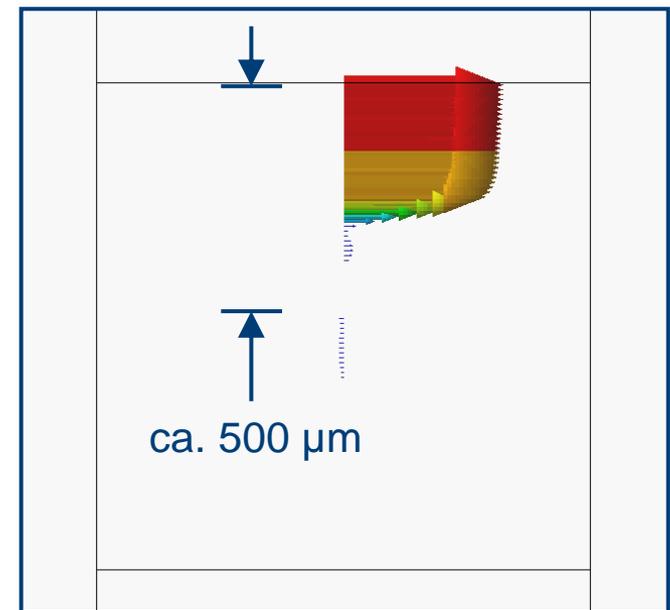


$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu}}$$



In δ werden 86,5% der Leistung umgesetzt

Magnetisch gesättigt
($I_{\text{peak}} = 1000 \text{ A}$, $B_{\text{max}} \approx 2.1 \text{ Tesla}$)



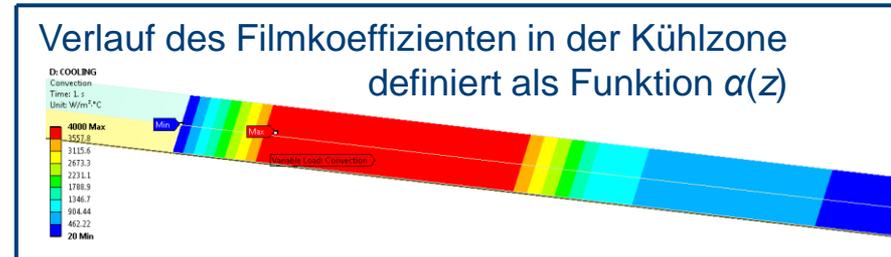
Wirbelstromdichte im Stahlquerschnitt, $f = 10 \text{ kHz}$



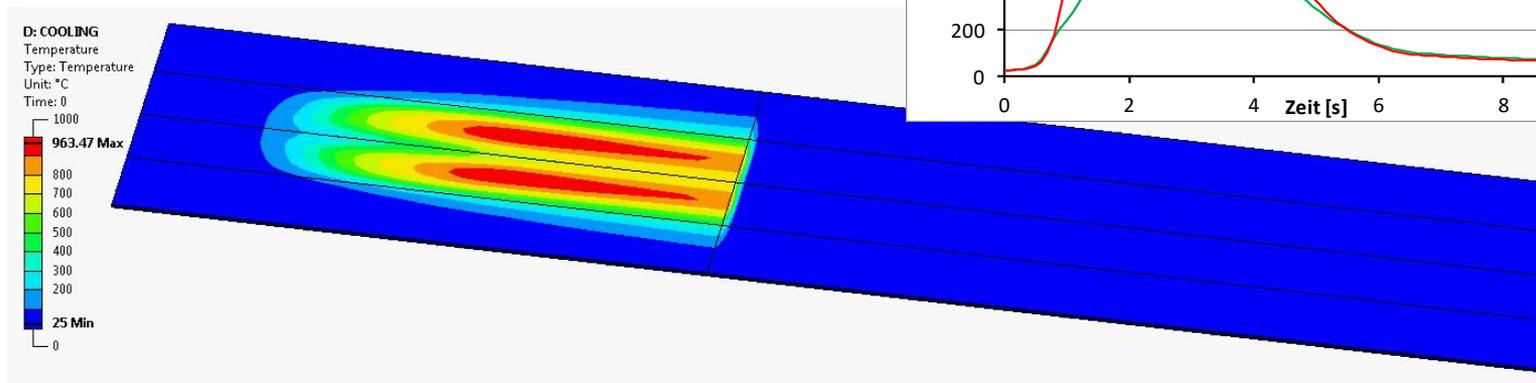
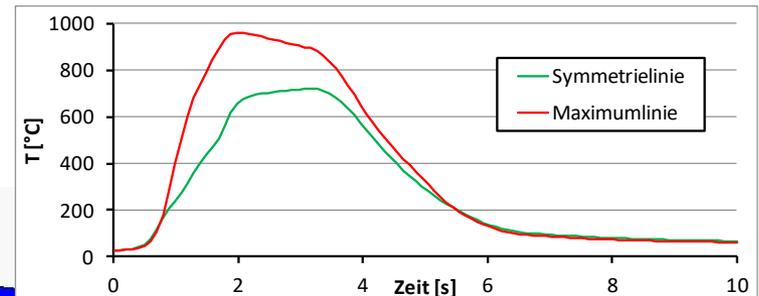
5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzug

Kühlung

- separates, verlängertes FEM-Modell
- rein thermisch-transiente Simulation ohne Elektromagnetik
- Randbedingungen:
 - Temperaturfeld aus Heizsimulation
 - ortsabhängiger Filmkoeffizient in Kühlzone
 - Größe des Wärmeübergangskoeffizienten grundsätzlich abhängig von Kühlungsart
- Vorschub des Temperaturfeldes



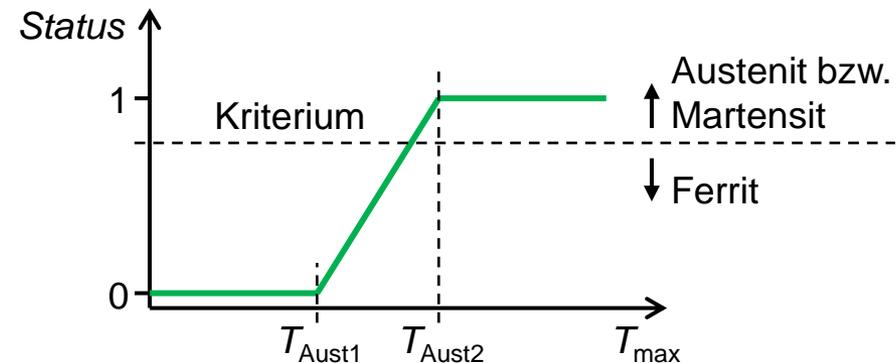
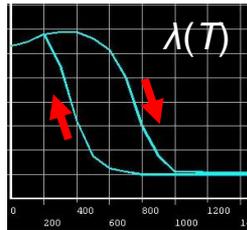
Temperaturverlauf über Zeit



5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzug

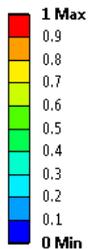
Ableitung des Gefügestatus aus dem Temperaturverlauf

- Voraussetzung für Härtung: Umwandlung Ferrit → Austenit → Martensit
- Kriterium: Am Ort im Zeitverlauf erreichte Höchsttemperatur?
- gefügeabhängige Änderung der Materialeigenschaften in der Kühlzone →



E: DISPLAY MATERIAL STATUS

Austenite Status
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1



Gefügestatus:

Blau = Ferrit,

Rot = Austenit bzw. Martensit (= gehärtete Bereiche)

5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzuga

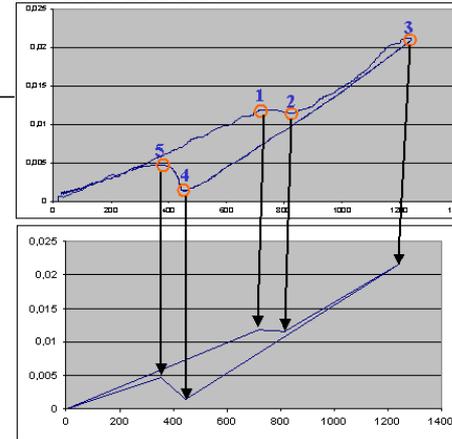
STAZ- oder STAAZ- Methode

- Berechnungsablauf

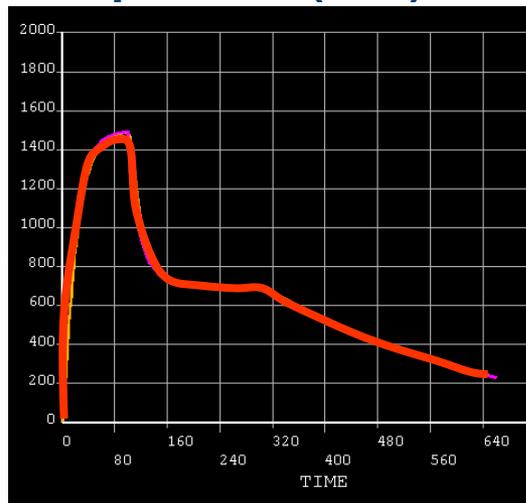
Dilatogramm



Idealisierung
Interpolation



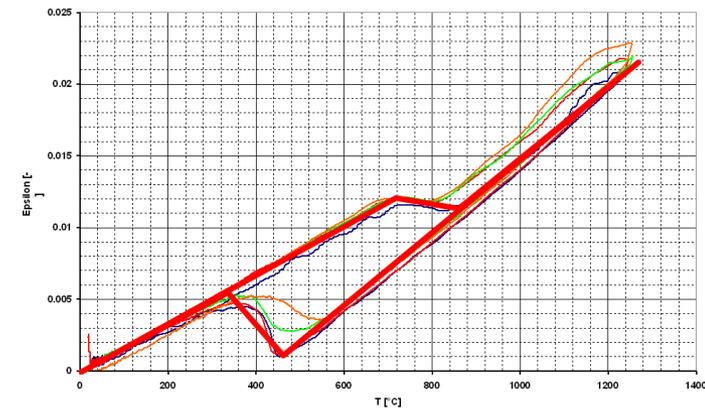
Temperatur f(Zeit)



Gefüge~~X~~teil f(Zeit)



thermische Dehnung



5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzug

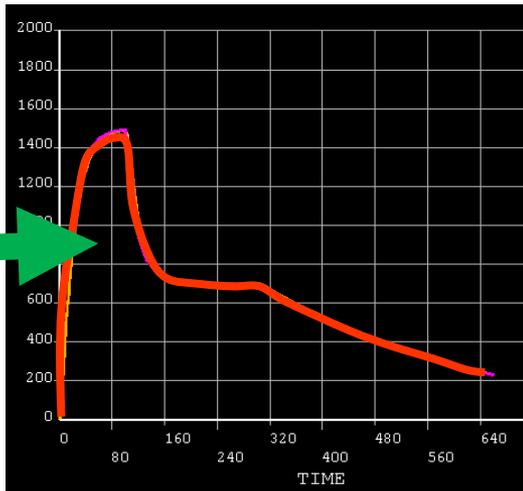
Gefügekinetik nach Leblond oder Denise

- Berechnungsablauf

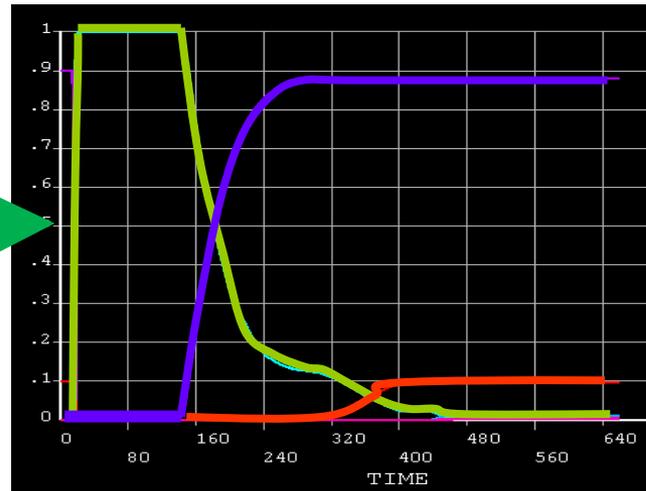
$$p_i(T, t) = p_{i,eq}^{ji}(T) \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau^{ji}(T)} \right)^{n(T)}} \right)$$

Dilatogramm → ZTU-Schaubild → Kinetik: Leblond Parameter

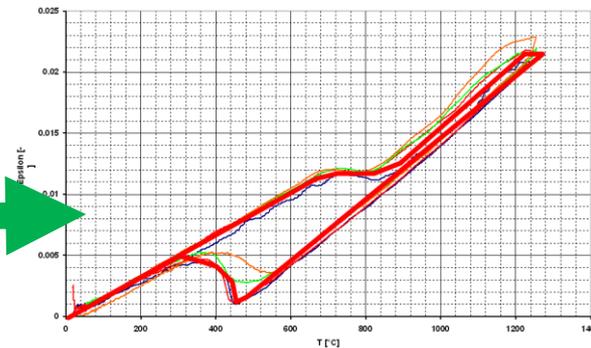
Temperatur f(Zeit)



Gefügeanteil f(Zeit)



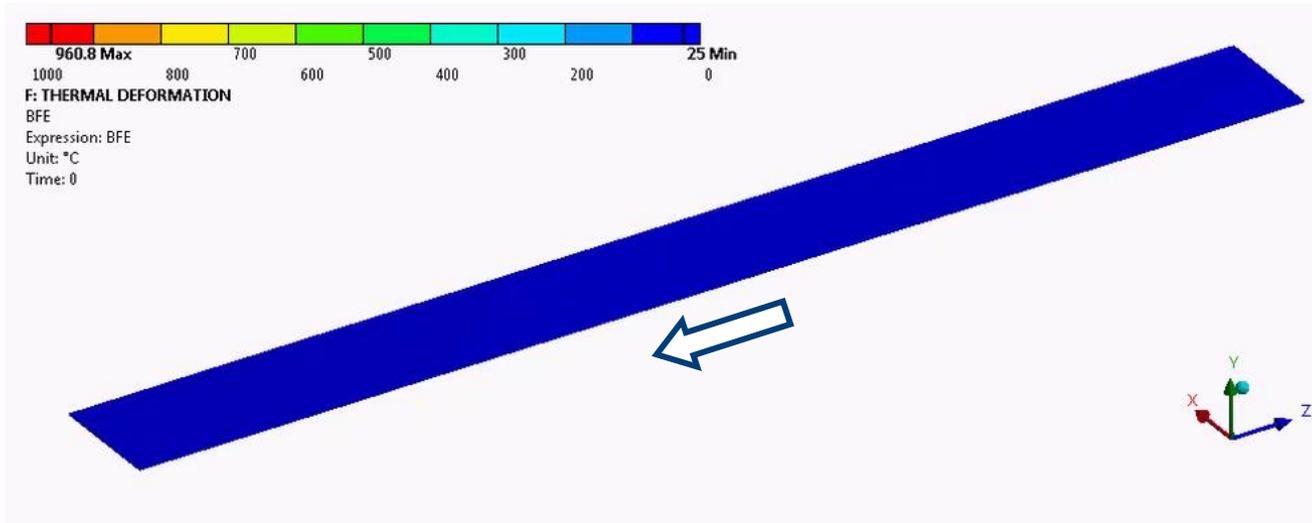
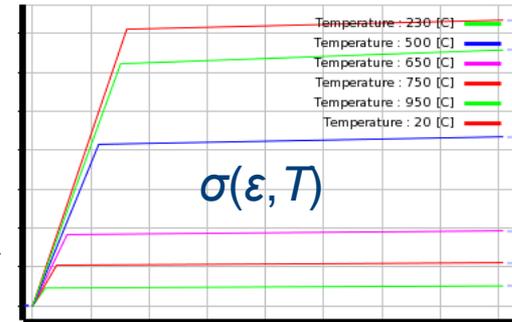
thermische Dehnung



5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzug

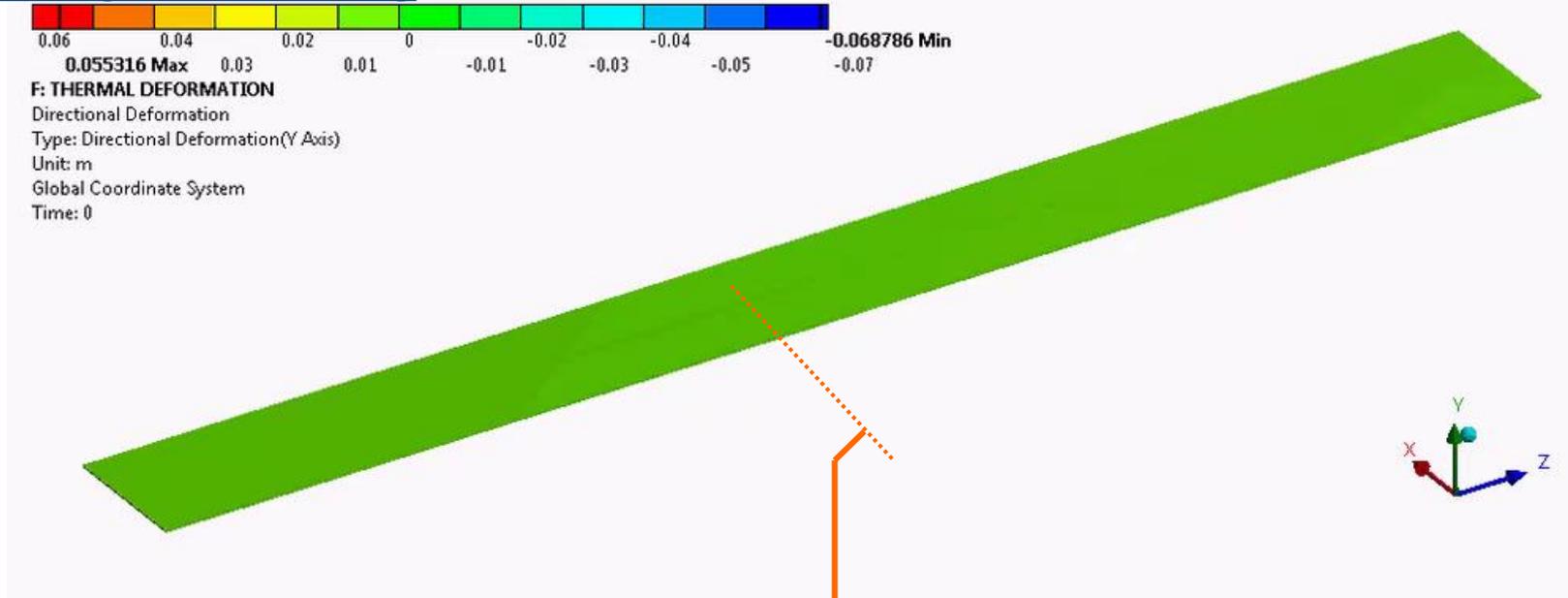
Verzugsberechnung

- verlängertes mechanisches FEM-Modell
- Temperaturabhängige elastoplastische Materialdaten aus Warmzugversuchen und Dilatogrammen →
- freie Lagerung
- Verschiebung des vorberechneten Temperaturfeldes über das Modell

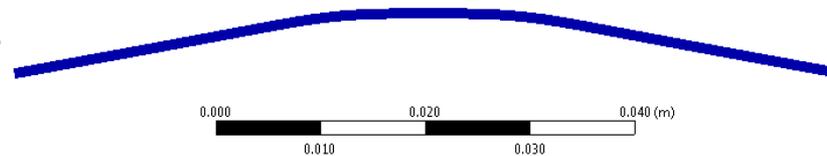


5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzug

Verzugsberechnung



Deformation des
Querschnittes



5. Kühlung, Gefügeauswertung, Verzug

Avrami (bzw.: Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorow) zur Beschreibung der Umwandlung:

Ferrit → Austenit

Austenit → Perlit

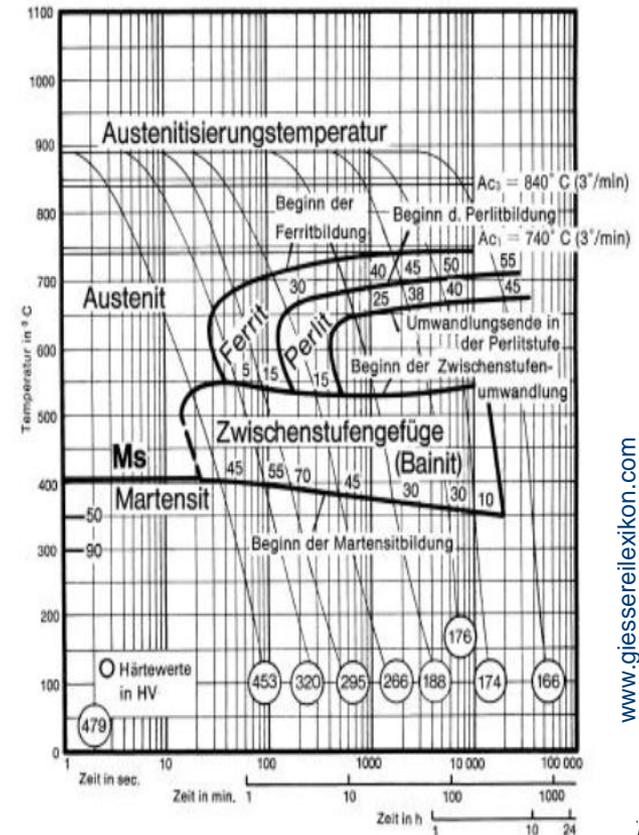
Austenit → Bainit

$$f = 1 - e^{-k \cdot t^n}$$

Koistinen-Marburger zur Beschreibung:

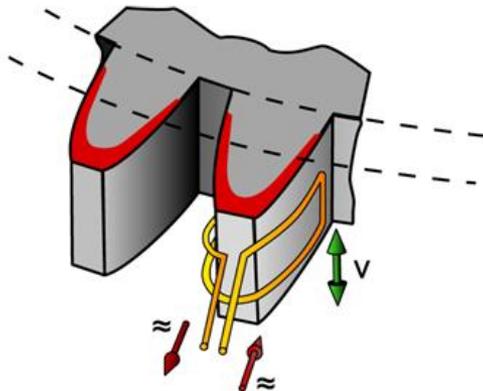
Austenit → Martensit

$$RA = \exp[-B(M_S - T_U)]$$

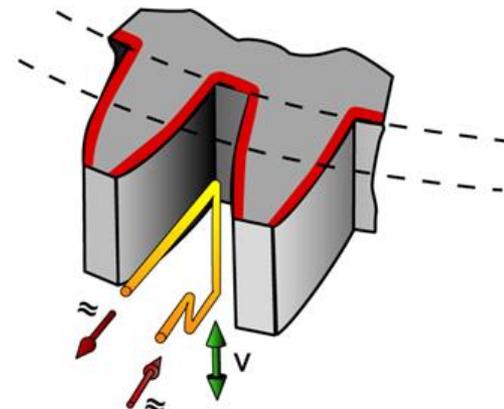


6. Schrägverzahnung

- Ziel ist beim Zahnhärten häufig, ein konturgetreues Härteprofil zu erreichen
 - reibungsbelasteter Bereich gehärtet
 - innerer Bereich weiterhin duktil
- Bei großen Bauteilen realisierbar über **Einzelzahnflankenhärtung** oder **Einzelzahnlückenhärtung**



$m \geq 3,5 \text{ mm}$



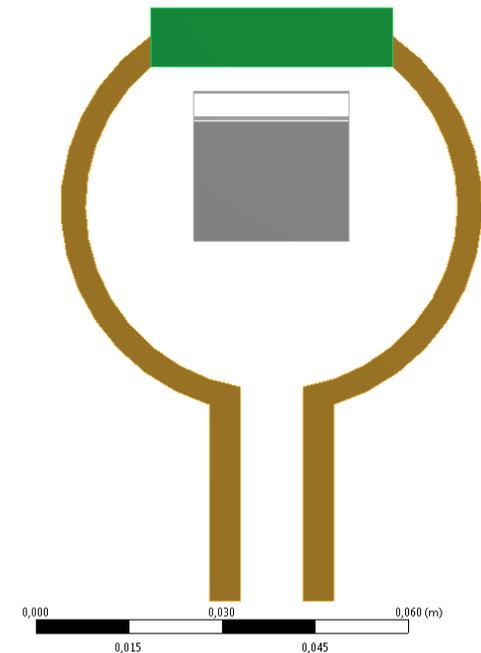
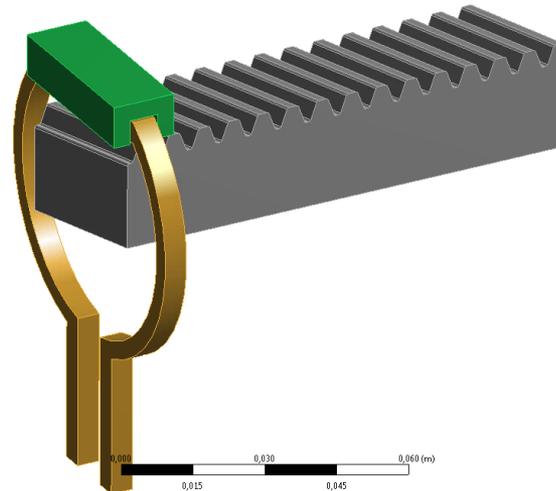
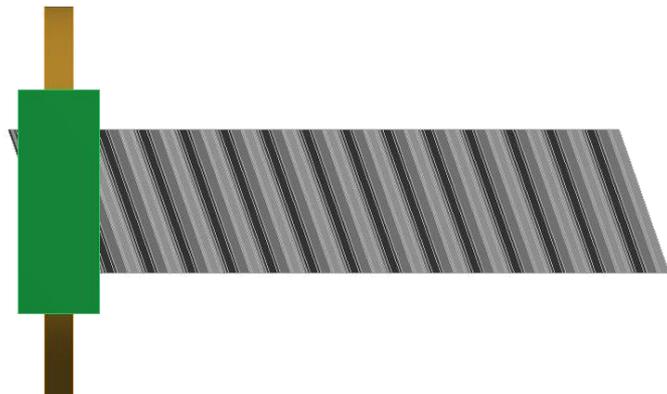
$m \geq 2,5 \text{ mm (HF)}$

$m \geq 6,0 \text{ mm (MF)}$

6. Schrägverzahnung

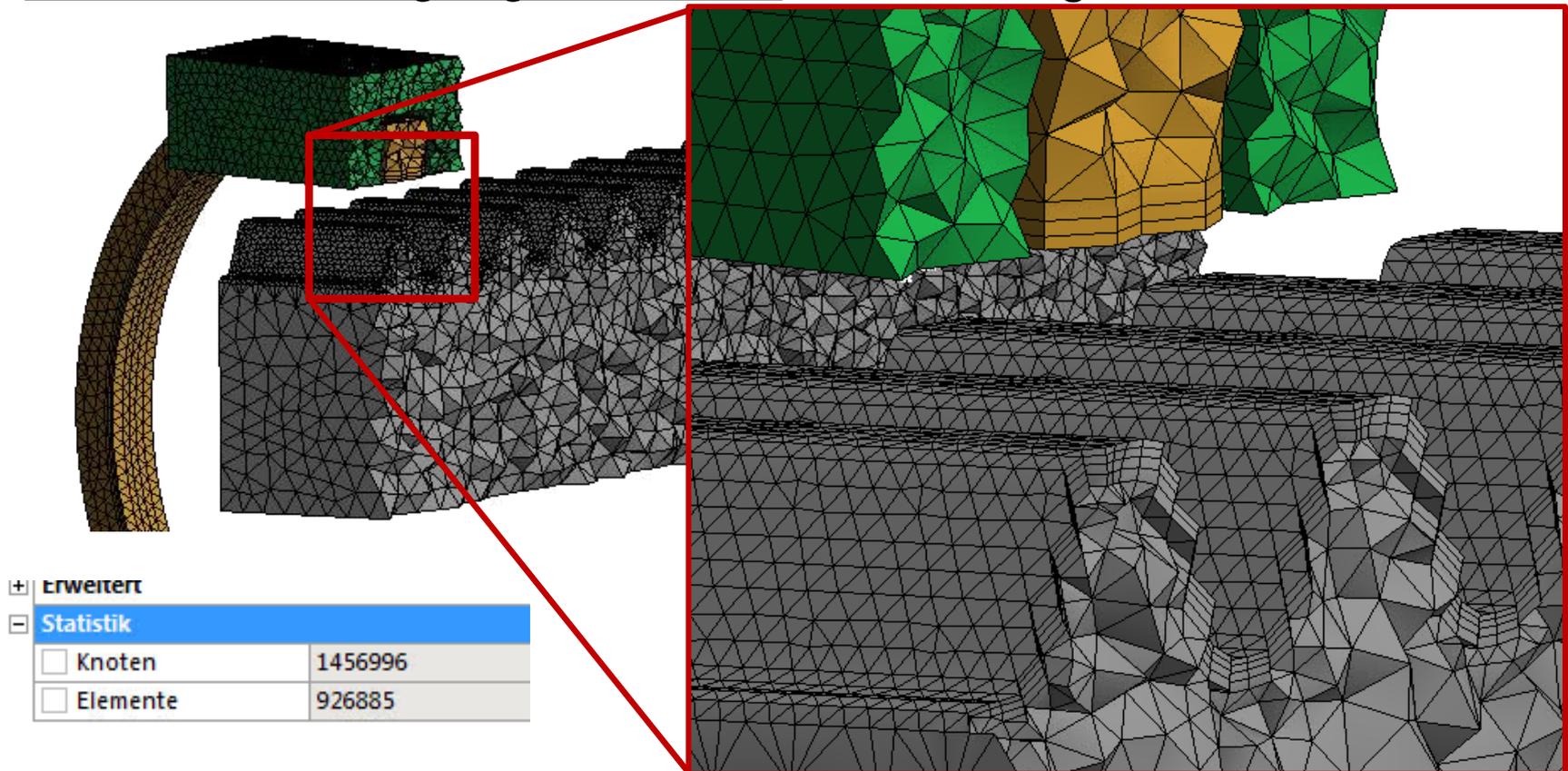
- Bei kleineren Modulen nicht umsetzbar...
- Simulationsmodelle unterstützen bei der Ermittlung eines geeigneten Induktionsprozesses zur Härtung einer Schrägverzahnung

Versuch 1: „Steigbügelinduktor“



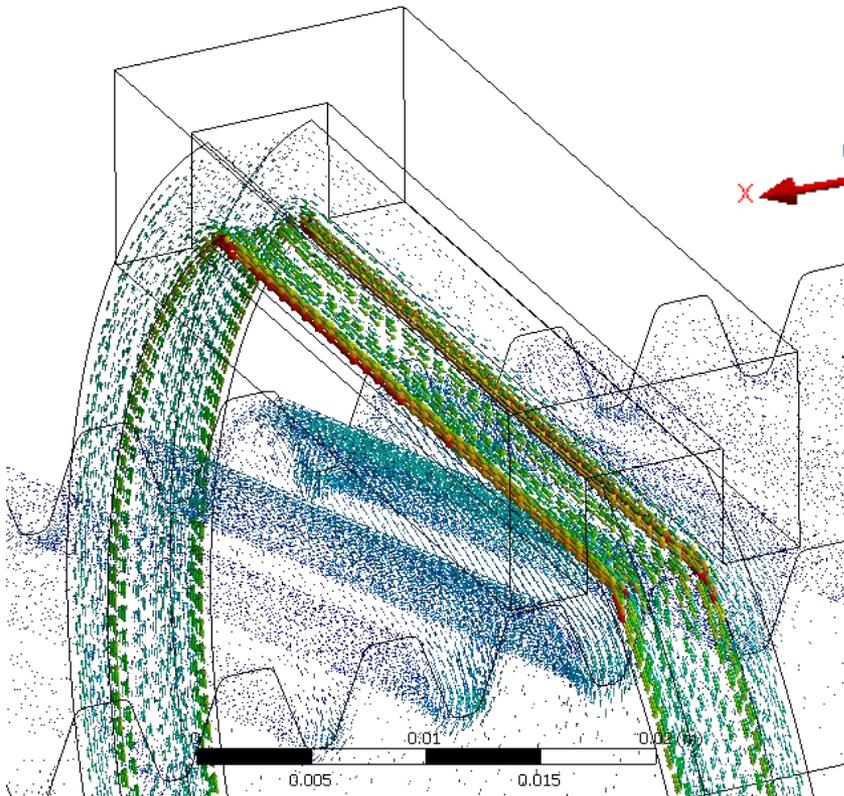
6. Schrägverzahnung

Versuch 1: „Steigbügelinduktor“: Vernetzung

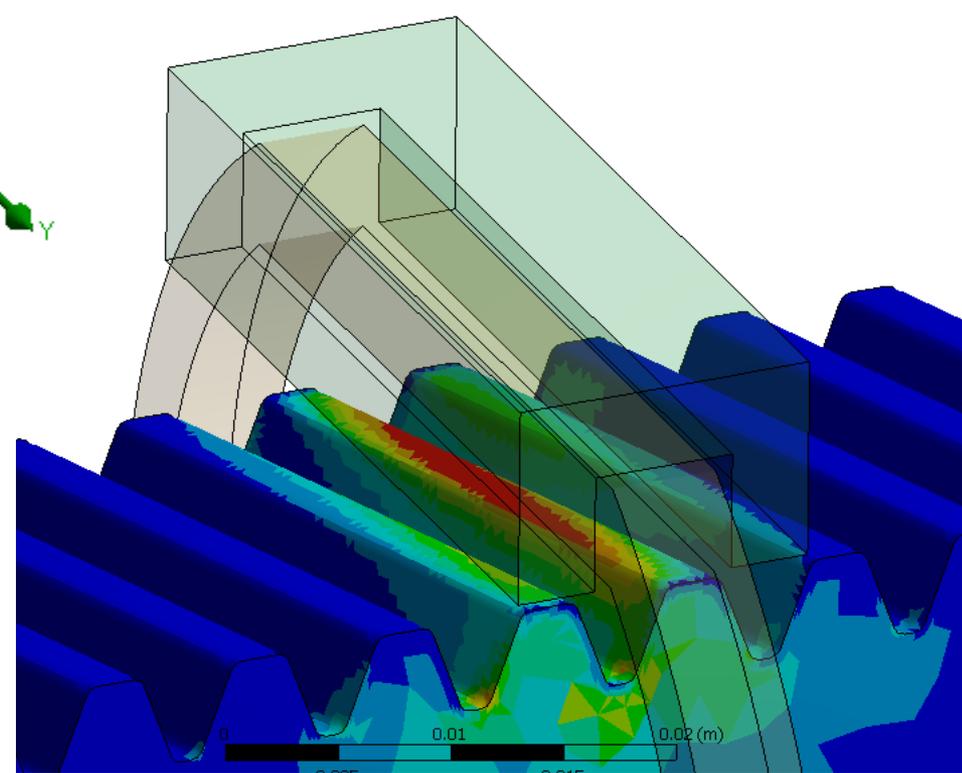


6. Schrägverzahnung

Versuch 1: „Steigbügelinduktor“: Elektromagnetische Erregung



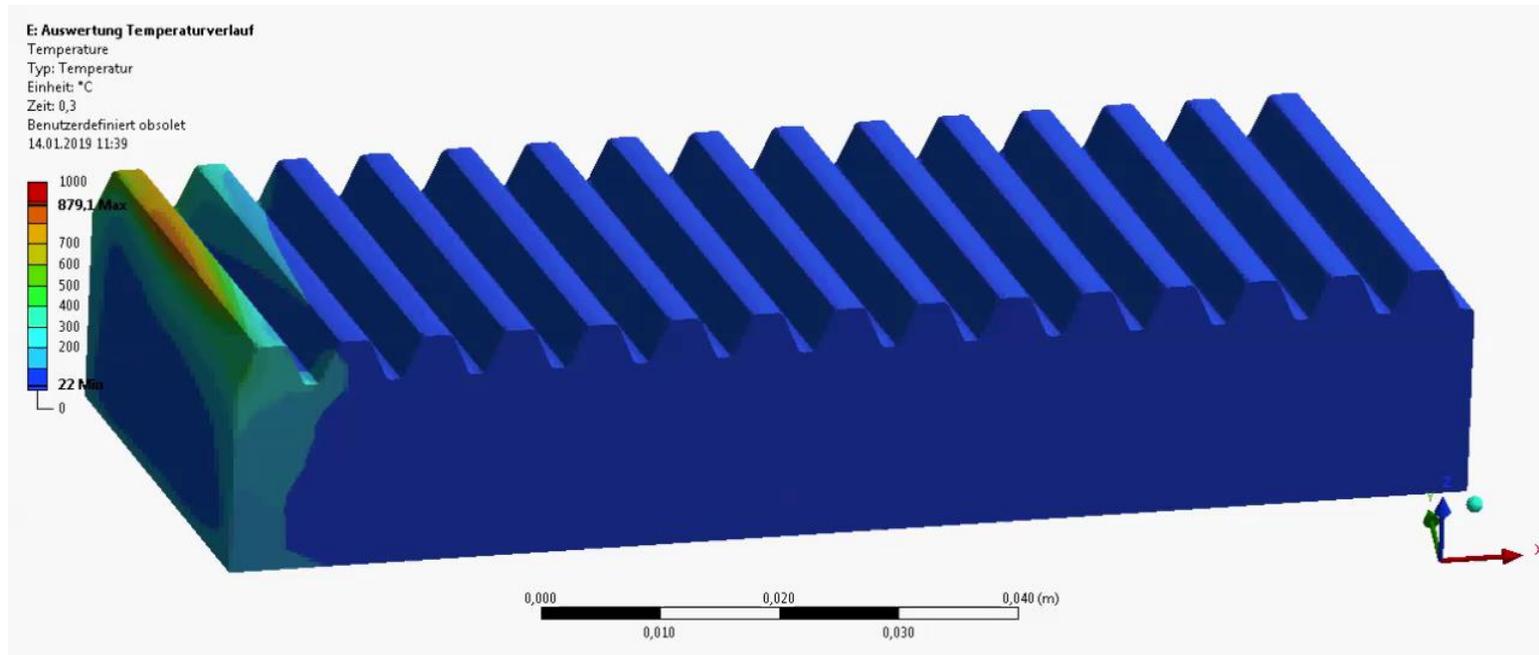
Stromdichte (Induktor + Zahnstange)



Wärmequelle in Zahnstange

6. Schrägverzahnung

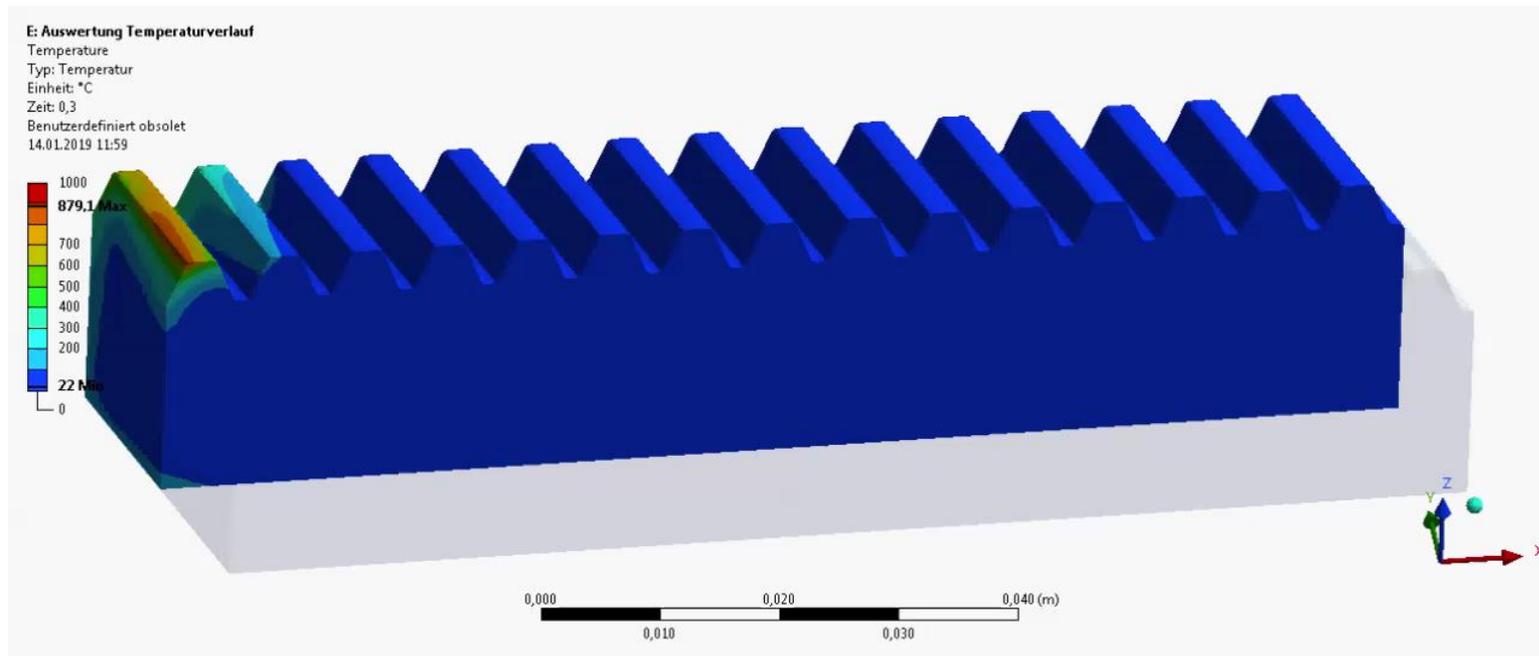
Versuch 1: „Steigbügelinduktor“: Simulationsergebnis



Temperatur von außen betrachtet

6. Schrägverzahnung

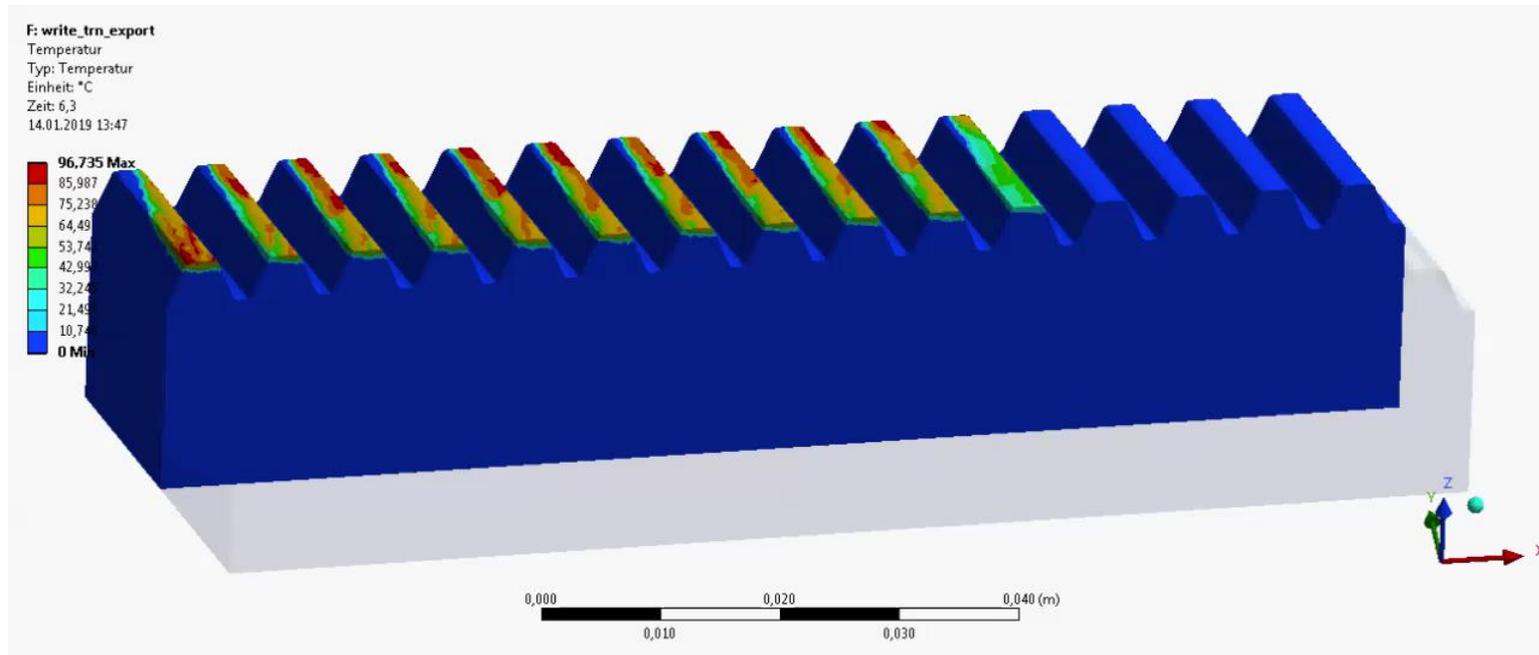
Versuch 1: „Steigbügelinduktor“: Simulationsergebnis



Temperatur im Längsschnitt betrachtet

6. Schrägverzahnung

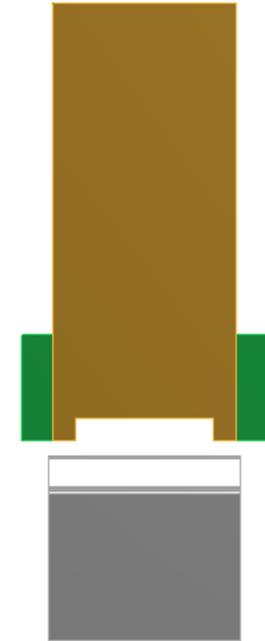
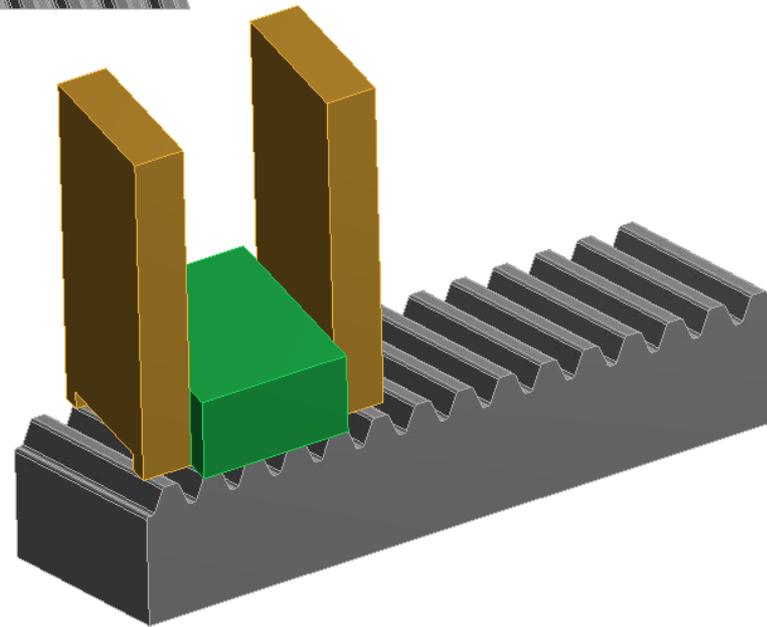
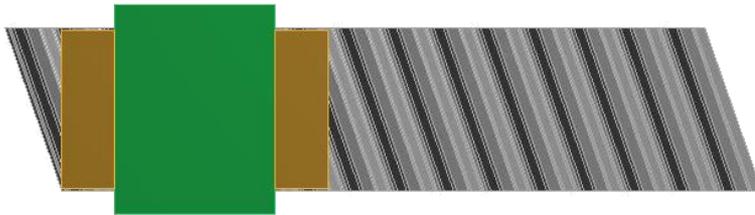
Versuch 1: „Steigbügelinduktor“: Simulationsergebnis



Martensitentwicklung im Längsschnitt betrachtet

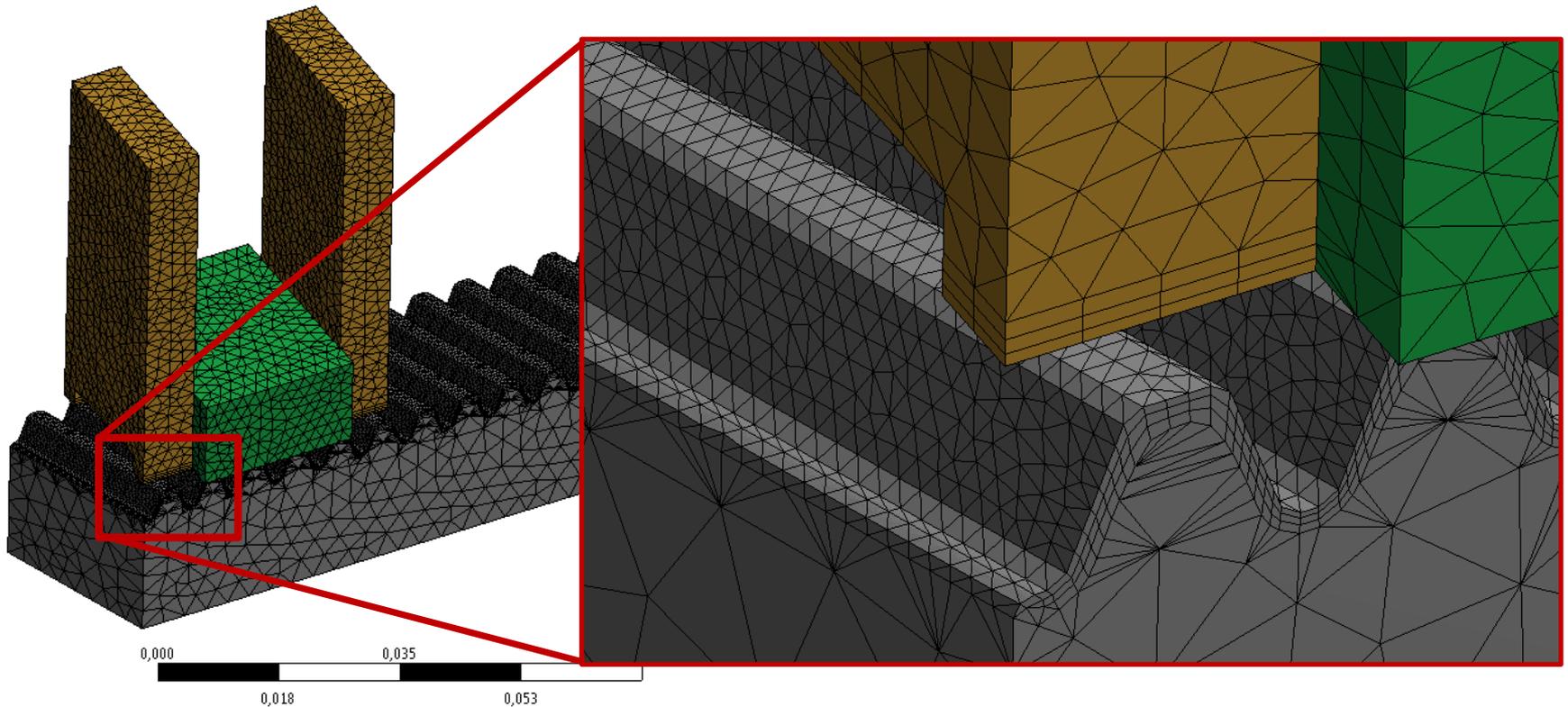
6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“



6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Vernetzung



6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

E: Auswertung Temperaturverlauf

Temperatur

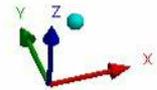
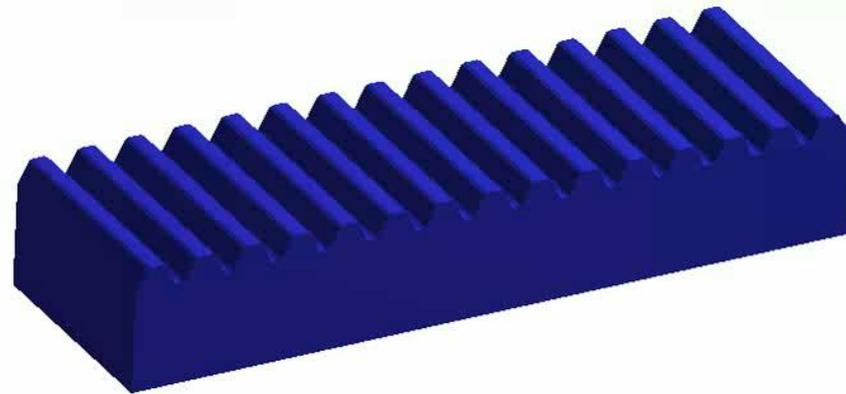
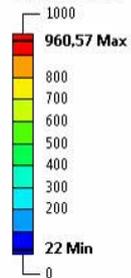
Typ: Temperatur

Einheit: °C

Zeit: 5,325

Benutzerdefiniert obsolet

01.02.2019 13:13



Temperatur von außen betrachtet

6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

E: Auswertung Temperaturverlauf

Temperatur

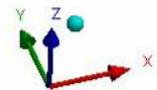
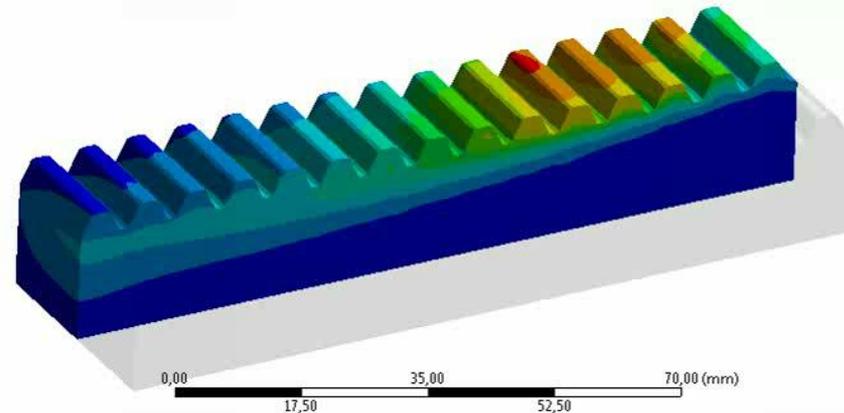
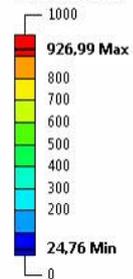
Typ: Temperatur

Einheit: °C

Zeit: 5,325

Benutzerdefiniert obsolet

01.02.2019 13:12

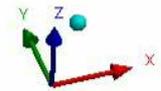
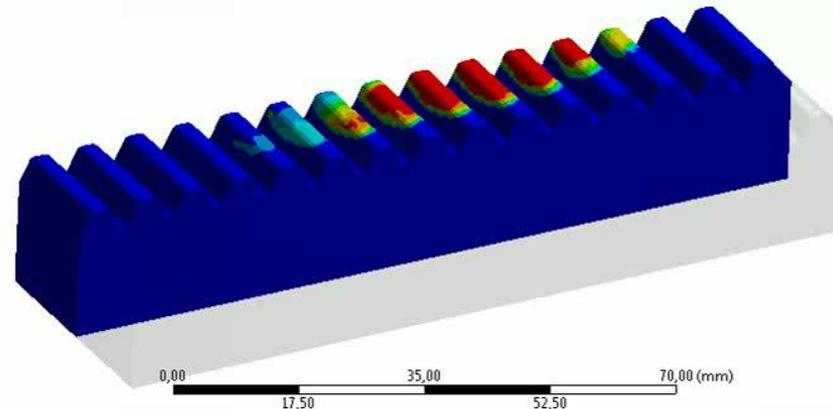
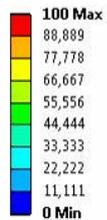


Temperatur im Längsschnitt betrachtet

6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

F: write_trn_export
Temperatur
Typ: Temperatur
Einheit: °C
Zeit: 5,325
01.02.2019 13:11

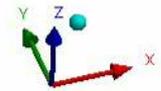
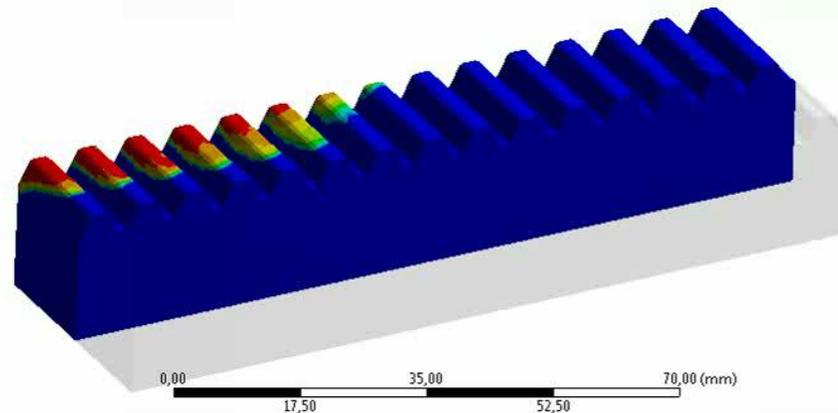
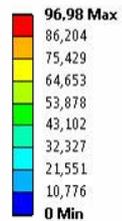


Austenitentwicklung im Längsschnitt betrachtet

6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

F: write_trn_export
Temperatur
Typ: Temperatur
Einheit: °C
Zeit: 5,325
01.02.2019 10:56

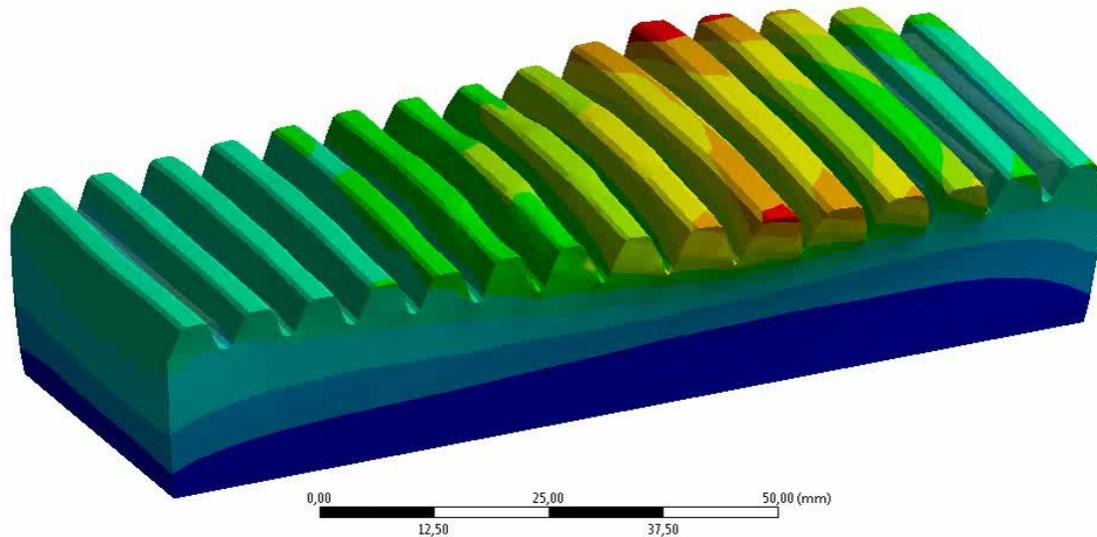
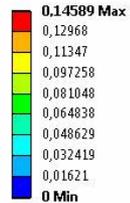


Martensitentwicklung im Längsschnitt betrachtet

6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

G: Mechanik
Gesamtverformung
Typ: Gesamtverformung
Einheit: mm
Zeit: 5,325
05.02.2019 00:32



Deformation während des Prozesses

6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

G: Mechanik

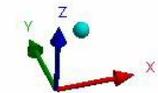
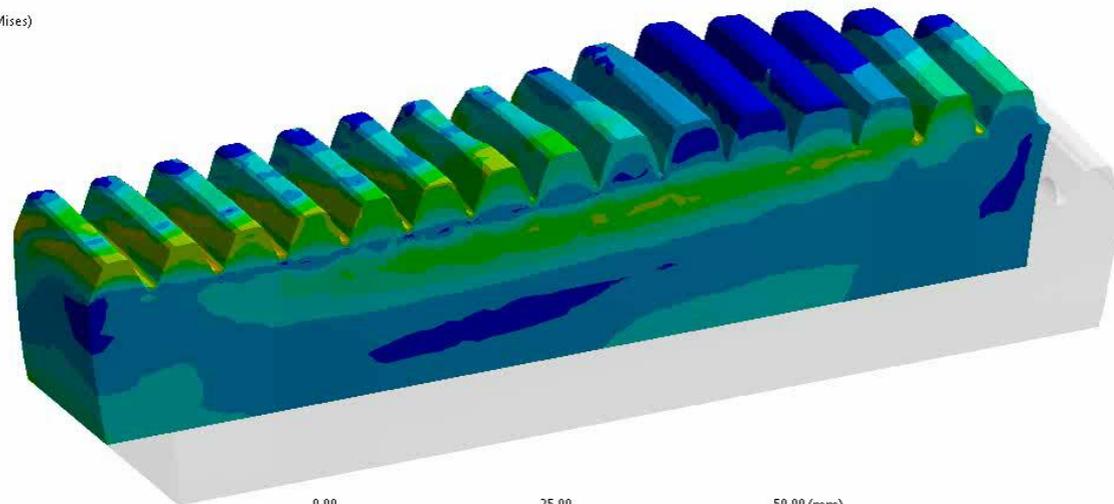
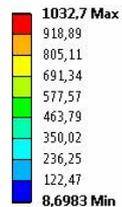
Vergleichsspannung

Typ: Vergleichsspannung (von Mises)

Einheit: MPa

Zeit: 5,325

05.02.2019 00:38

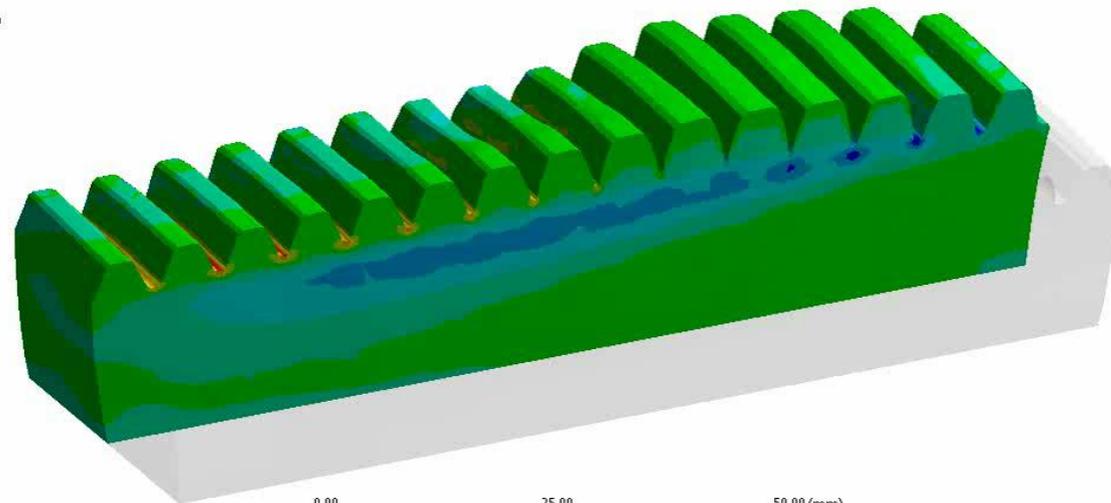
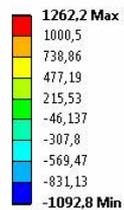


Vergleichsspannung (v. Mises) während des Prozesses

6. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

G: Mechanik
Normalspannung
Typ: Normalspannung(X-Achse)
Einheit: MPa
Global Coordinate System
Zeit: 5,325
05.02.2019 00:33

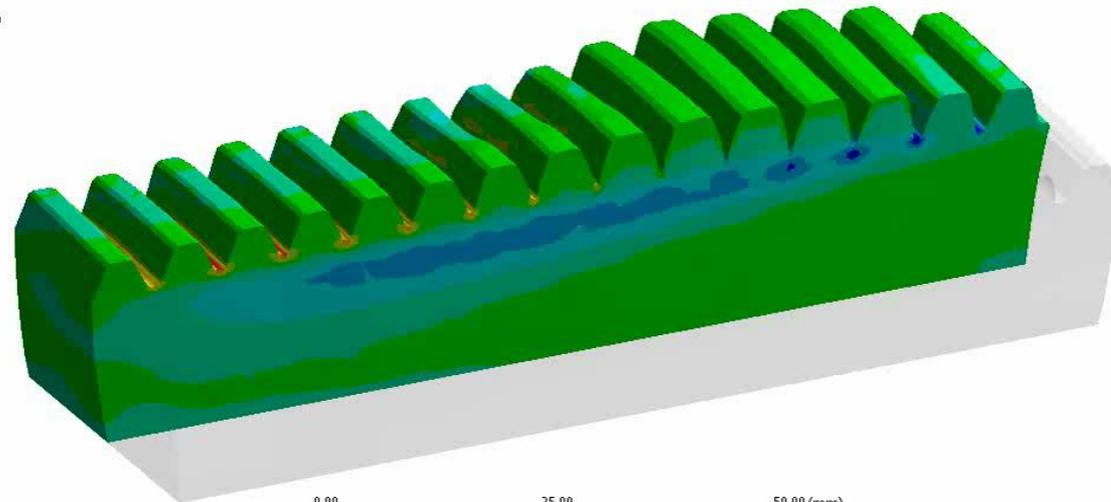
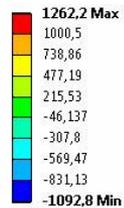


Normalspannung während des Prozesses

7. Schrägverzahnung

Versuch 2: „Linearinduktor“: Simulationsergebnis

G: Mechanik
Normalspannung
Typ: Normalspannung(X-Achse)
Einheit: MPa
Global Coordinate System
Zeit: 5,325
05.02.2019 00:33



Normalspannung während des Prozesses

Optimierung eines induktiven Erwärmungsprozesses mit Hilfe der numerischen Simulation

Problemstellung:

Ein Stahl-Werkstück wurde innerhalb eines Querwalzprozesses umgeformt. Die sich ergebende Geometrie kann dem folgenden Bild entnommen werden:



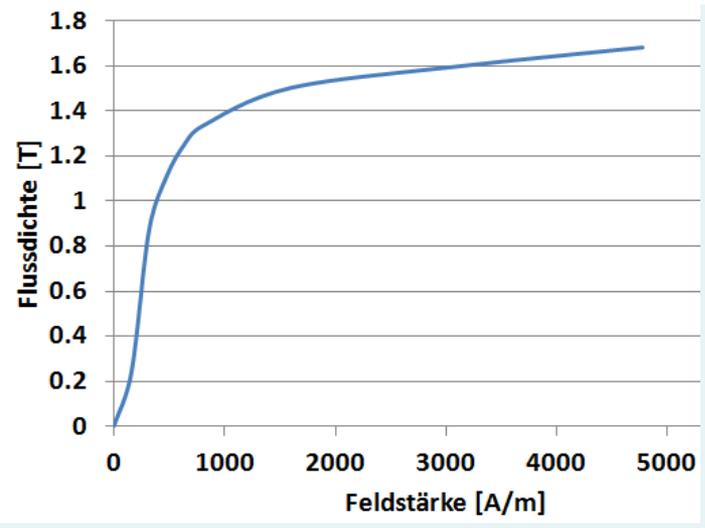
Für einen nachfolgenden Schmiedeprozess soll das Werkstück möglichst homogen durch eine Induktionsheizung erwärmt werden.

Übung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Werkstückdaten:

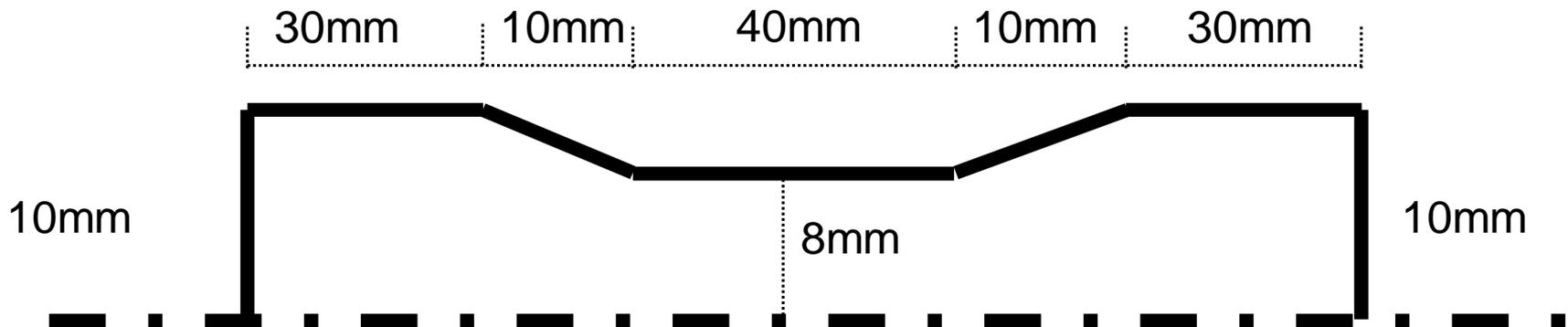
elektrische Leitfähigkeit	2.000.000 S/m
Permeabilität (BH-Kennlinie)	
thermische Leitfähigkeit	60,5 W/mK
Wärmekapazität	434 J/kgK



Übung



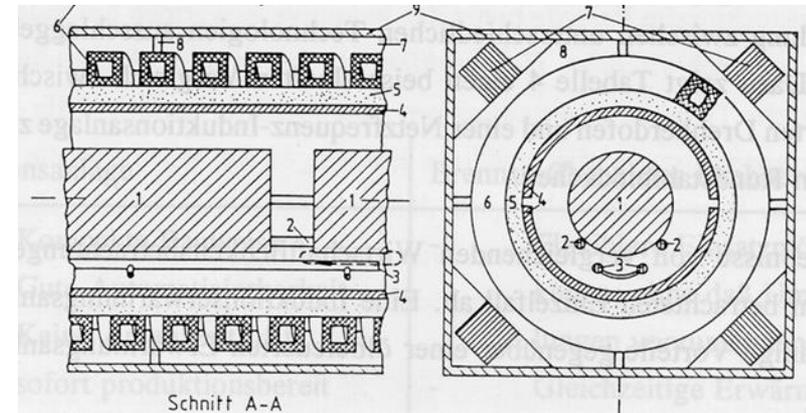
Abmessungen:



Übung

Induktordaten:

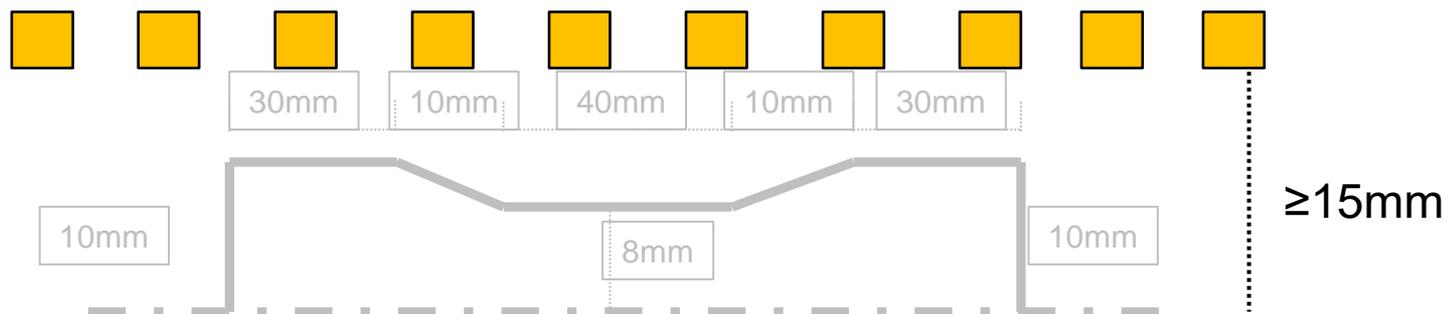
elektrische Leitfähigkeit: 58.000.000 S/m
diamagnetisch
innerhalb der thermischen Berechnung
vernachlässigt (aktiv gekühlt)



Abmessungen:

Querschnittsfläche: 5mm x 5mm

Nur eine Spule → in jeder Windung fließt der gleiche Strom



Aufgabe:

Legen Sie die induktive Erwärmung so aus, dass nach 30 Sekunden Erwärmungszeit eine möglichst homogene Temperatur im Werkstück herrscht.

Maximaltemperatur: 900°C

Minimaltemperatur: 750°C

Erstellen Sie ein elektromagnetisch-thermisch gekoppeltes Simulationsmodell mit der ANSYS Workbench

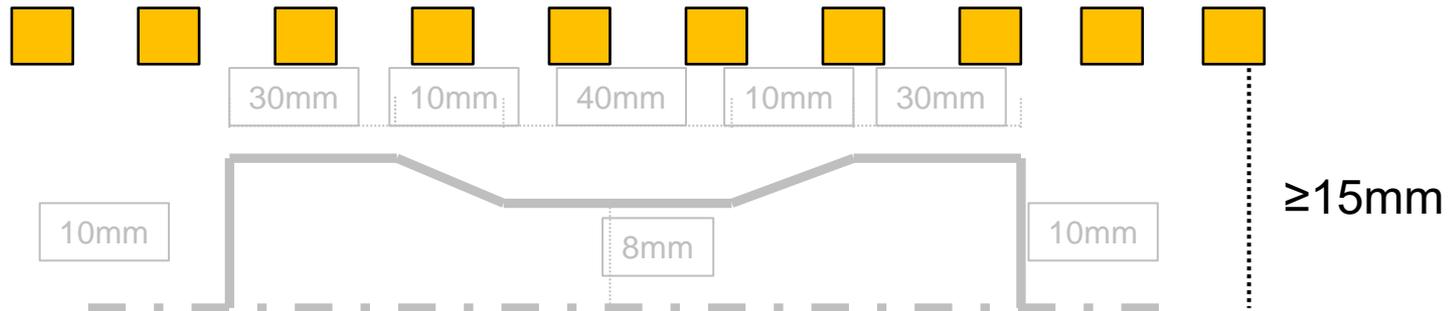
Thermische Randbedingungen:

Wärmeübergangskoeffizient: 20 W/m²K

Emissionskoeffizient: 0,8

Parameterraum:

Folgende Größen dürfen variiert werden:



- 1.) Radialer Abstand zur Rotationsachse (aber mindestens 15mm)
- 2.) Axialer Abstand zwischen den Windungen
- 3.) Anzahl Windungen
- 4.) Stromstärke
- 5.) Einsatz Feldführungselemente ($\mu_r = 30$) (auch hier 15mm Mindestabstand zur Rotationsachse)

Übung

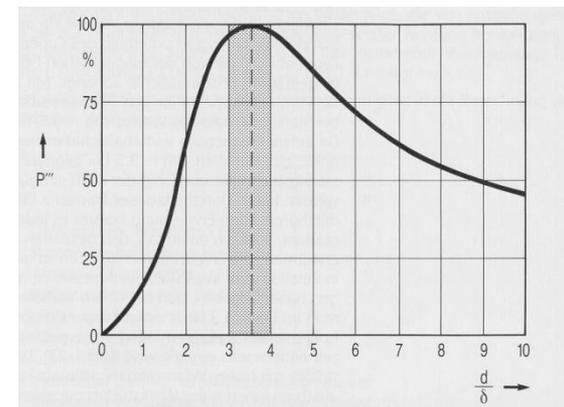
Frequenz:

Berechnen Sie zunächst unter Annahme hoher magnetischer Feldstärken ($\mu_r = 1$) im Werkstück die für eine rasche induktive Durcherwärmung geeignete Frequenz!

Ansatz:

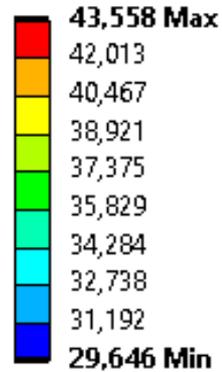
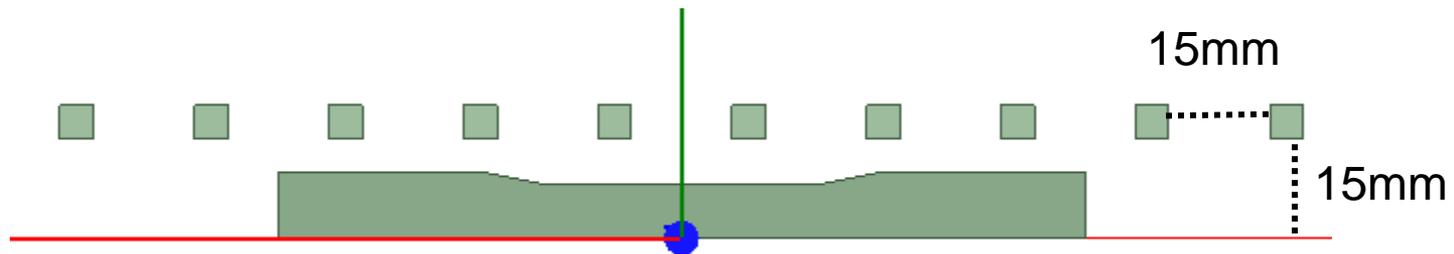
Zur Generierung einer hohen Wärmeleistungsdichte sollte ein Verhältnis d/δ im Bereich zwischen 3 und 4 gewählt werden.

Da hier zwei verschiedene Durchmesser vorliegen (16mm und 20mm) soll eine Frequenz gefunden werden, die einen guten Kompromiss darstellt.



Übung

Startzustand: 10 Windungen, gleichmäßig verteilt

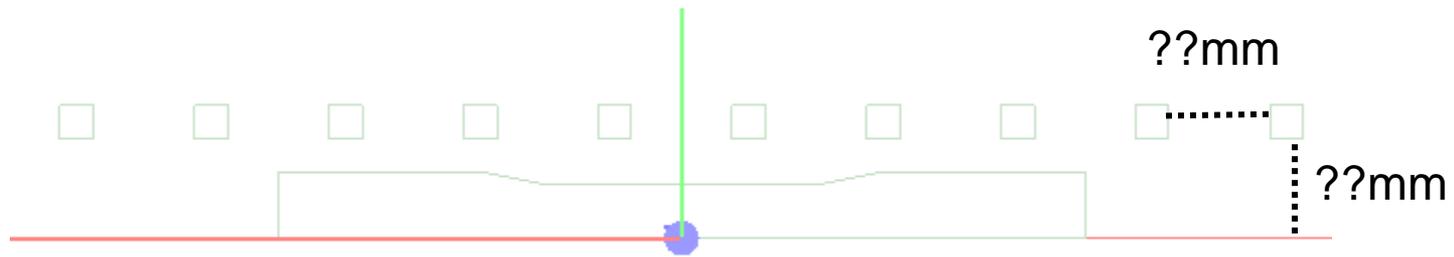


Strom: 1000 A
Frequenz: 50 Hz

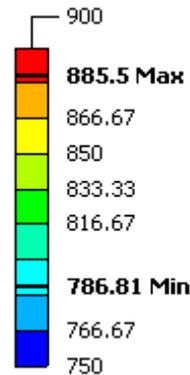


Übung

?? Windungen, ???????? verteilt



Möglicher
Zielzustand:



Strom: ? A
Frequenz: ? kHz

