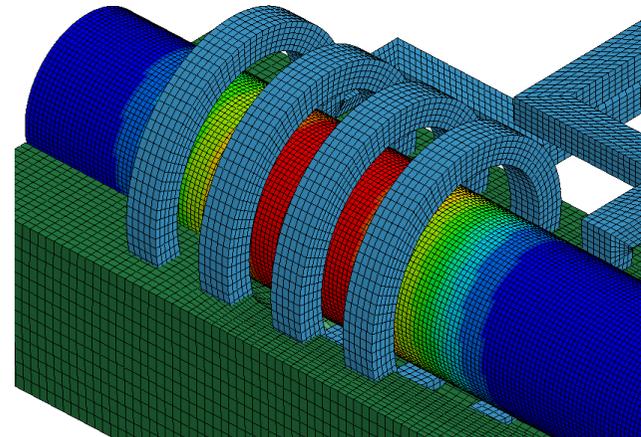


---

# Simulation des Presshärtens unter Berücksichtigung der induktiven Bauteilerwärmung

Multiphysics solver in LS-DYNA R7

---



Dipl.-Ing. Christian Scheffler  
Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik  
17.03.2014

# Inhalt

- Kurzvorstellung Fraunhofer Institut IWU
- LS-DYNA R7 Multiphysics Solver für EM-Probleme
- Simulation der induktiven Erwärmung + IHU-Prozess in LS-DYNA R7
- Zusammenfassung

# Das Fraunhofer IWU im Profil



## Kompetenzfelder

Werkzeugmaschinen  
Mechatronik  
Funktionsleichtbau  
Spanende Technologien  
Umformtechnologien  
Füge- und Montagetechnologien  
Produktionsmanagement

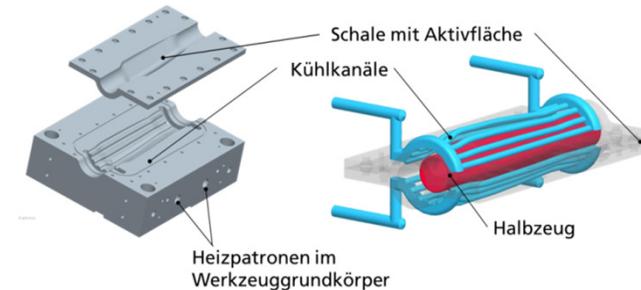
## im Verbund mit

- Technischer Universität Chemnitz
- Fraunhofer-Gesellschaft
- Maschinen-, insbesondere Werkzeugmaschinenbauern
- deutscher und internationaler Automobilindustrie
- Zulieferindustrie (Umformung, Zerspanung, Werkzeugbau)

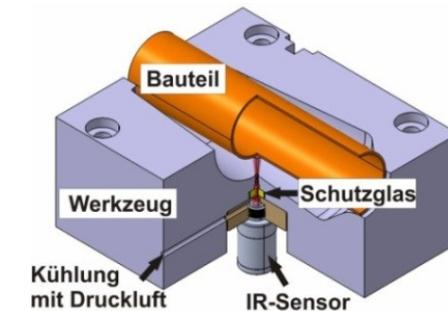
# Temperierte Innenhochdruckumformung

## Unsere Fachkompetenz

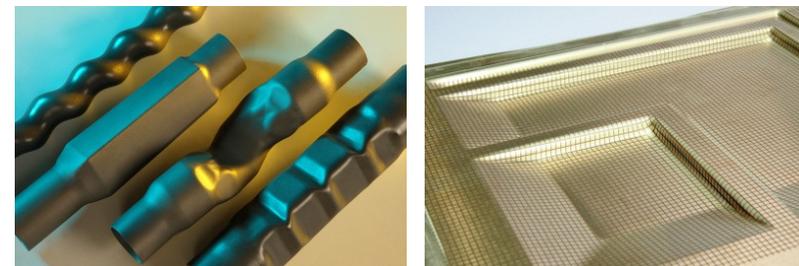
- Weiterentwicklung der wirkmedienbasierten Umformprozesse
  - Einsparung von Zwischenglühoperationen und Vorformstufen
  - prozessintegrierte Wärmebehandlung
  - Umformung von Aluminium, Magnesium, Stahl, Titan und Kunststoff
- Werkzeug- und Prozessentwicklung
  - Sicherstellung der erforderlichen Temperaturgradienten für Umform- und Abkühlphase im Werkzeug
- Entwicklung von Verfahrenskombinationen
  - IHU & Presshärten
  - IHU & superplastische Umformung



Konturnahe Werkzeugkühlung



Werkzeugintegrierter Temperatursensor



Warmumgeformte Bauteile

# Elektromagnetische Umformung - EMU

## Unsere Fachkompetenz

- Analyse und **Auslegung des multiphysikalischen Prozesses**
- Fertigungsgerechte **Bauteilgestaltung**
- Auslegung von **Verfahrenskombinationen** und **Prozessketten**
  - Tiefziehen mit integrierter EMU
  - elektromagnetisches Füge mit anschließender IHU
- Auslegung von **Füge- und Trennoperationen**
- **Simulation** des Umform- und Fügeprozesses
  - elektromagnetisch-strukturmechanisch gekoppelte Simulation
  - vereinfachter hocheffizienter Simulationsstrategien
  - numerische Bestimmung der Verbundfestigkeit bei Fügen
- Entwicklung und Umsetzung von **Werkzeugkonzepten**
  - Induktoren
  - Feldformer
  - Matrizen



Stoßstromanlage für die EMU

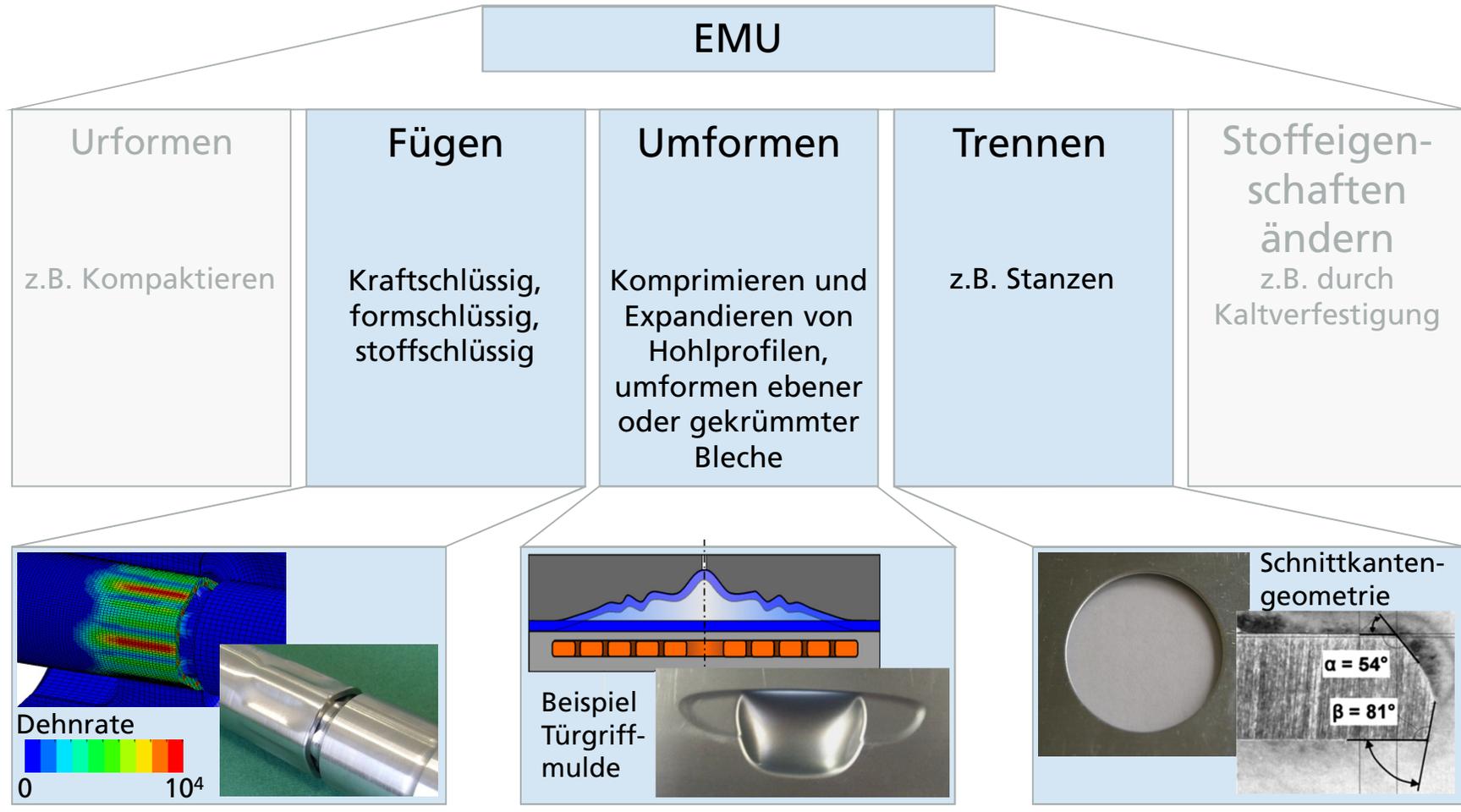


EMU geformte Türgriffmulde



Fügeverbindungen (artgleiche und artfremde Werkstoffe)

# Anwendungsgebiete der Elektromagnetischen Umformung

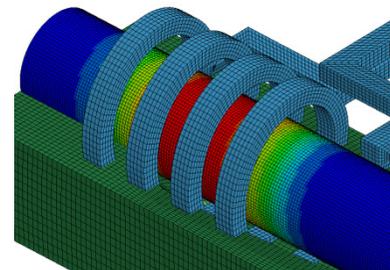
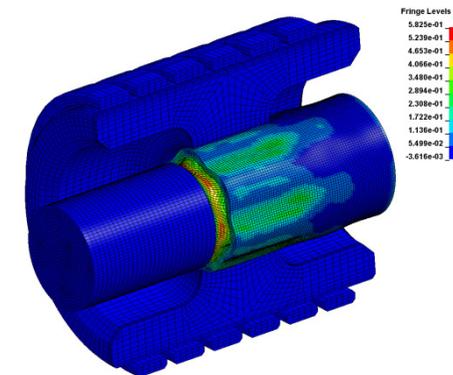
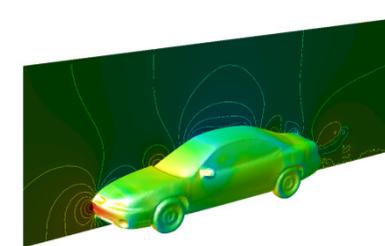
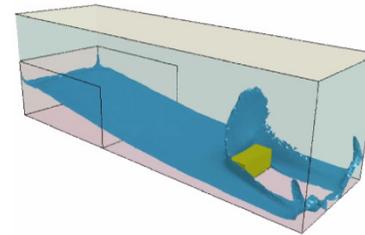


# LS-DYNA R7 Multiphysics Solver für EM-Probleme

## LS-DYNA R7

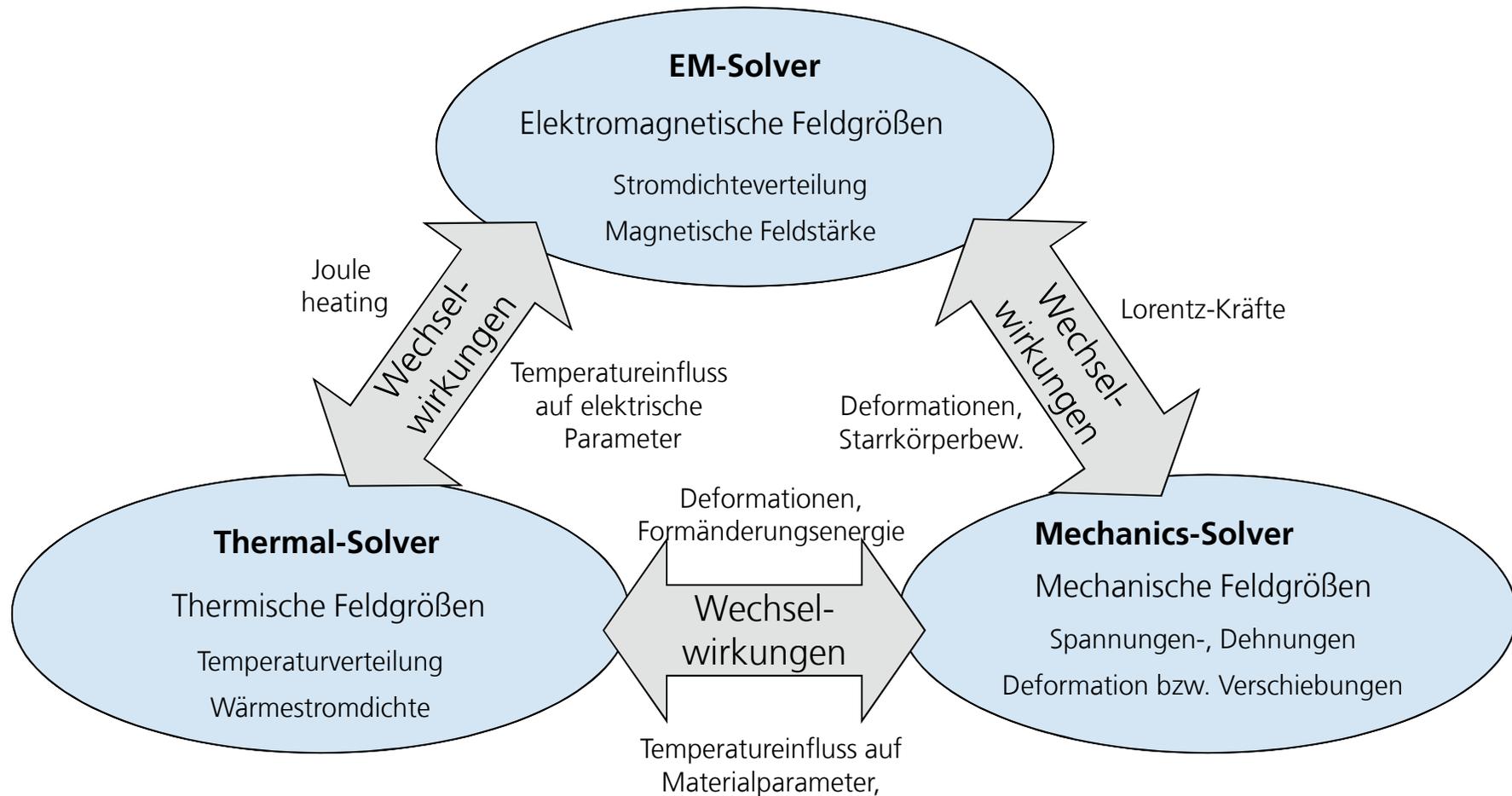
- Erweiterung auf Multiphysics-Bereich
- ICFD-Solver (Inkompressible Fluide)
- CFD-Solver (für kompressible Fluide)
  
- Elektromagnetischer Solver 2D axi/3D für transiente Probleme
- Anwendung für :  
Elektromagnetische Umformung /Schweißen/Schneiden  
→ Kopplung zu mechanischen Solver

Induktive Erwärmung  
→ Kopplung zu thermischen Solver



# LS-DYNA R7 Multiphysics Solver für EM-Probleme

- Wechselwirkungen zwischen den Solvern in der gekoppelten Simulation



C. Scheffler

# Keywords für EM-Simulation induktive Erwärmung

## ■ Steuerung EM-Solver

### **\*EM\_CONTROL**

<b>\$</b>	<b>emsol</b>	<b>numls</b>	<b>emdtinit</b>	<b>emdtmax</b>	<b>emtinit</b>	<b>emtend</b>	<b>ncyclFem</b>	<b>ncyclBem</b>
	<b>2</b>	<b>200</b>	<b>2.5</b>	<b>2.5</b>		<b>1.5e+1</b>	<b>100000</b>	<b>100000</b>

emsol:

EQ.1: Wirbelstrom-Solver (transiente Rechnung), z.B. Elektromagnetische Umformung

EQ.2: induktiver Erwärmungs-Solver (Wirbelstrom-Problem)

EQ.3: Solver zur Lösung quasistatischer elektrischer Potentialprobleme (kein Wirbelstromproblem),  
z.B. ohmsche Erwärmung bei Gleichstrom (quasi DC)

numls: Anzahl Micro-Timesteps

emdtinit/emdtmax: Macro-Timestep

emtend: Zeit bei der EM-Solver gestoppt wird

# Keywords für EM-Simulation induktive Erwärmung

- Definition Strom/Potentialrandbedingungen

## **\*EM\_CIRCUIT**

```
$# circid   circtyp   lcid       r/f       l/a       c/t0      v0  
      2         11         170000    930        0
```

```
$ sidCurr  sidVin  sidVout  partId  
      103
```

circrype=Randbedingungstyp Strom/Spannung:

EQ.11: Definition eines eingprägter Stromes mit Amplitude und Frequenz im segment set sidCurr

r/f=Frequenz eingprägter Strom

l/a=Stromamplitude eingprägter Strom

sidCurr=segment set durch das eingprägter Strom fließt (Querschnitt Induktor)

# Keywords für EM-Simulation induktive Erwärmung

- Berechnung zulässiger Zeitschritt EM-Solver

## **\*EM\_CONTROL\_TIMESTEP**

<b>\$#</b>	<b>tstype</b>	<b>dtconst</b>	<b>lcid</b>	<b>factor</b>
	<b>3</b>			<b>1.0</b>

tstype EQ.3: Berechnung zulässiger timesteps  $dt_{\max}$  für EM-Solver über An-Rechnung für \*EM\_CONTROL emsol=1

→ Setzen der Anzahl Micro-Timesteps NUMLS des induktiven Solvers:  $NUMLS > t_{\text{macro}}/dt_{\text{max}}$

# Keywords für EM-Simulation induktive Erwärmung

- Einige weitere EM-spezifische Keywords

## **\*EM\_BOUNDARY**

```
$#  ssid  btype
      110     9
```

btype:

EQ.9: entfernt Oberflächensegmente aus BEM (→ mag. Vektorpotential  $\mathbf{A}=0$ )

## **\*EM\_EOS\_PERMEABILITY**

```
$#  eosid  eostype  lcid
      1       2     22
```

eostype:

EQ.2: definiert Permeabilität durch B-H-Kurve (nichtlineares magnetisches Materialverhalten, aber keine Hysterese!)

Entwicklerstadium!

# Simulation - Zeitschrittweite

## Maximale Zeitschrittgröße

- LS-DYNA benutzt impliziten Solver für Zeitintegration der EM-Gleichungen  
→ kein Stabilitätskriterium im Sinne der expliziten CFL-Bedingung vorhanden
- Transiente Lösung der nichtlinearen PDE's fordert aber:
  - a) Einhaltung eines Grenzwertes für die Genauigkeit der zeitlichen Lösung,  
→ **Stabilität bedeutet nicht gleichzeitig Genauigkeit!**  
  
Einhaltung maximale Zeitschrittgröße, z.B. um die transiente Lösung für eingeprägte sinusförmige Ströme korrekt zu erhalten (Richtwert: mind. 20 Zeitschritte pro 1/f)
  - b) je nach Typ der implizit zu lösenden nichtlinearen PDE gibt es aber **Konvergenzkriterien**,  
hier für die Elektromagnetische Diffusions-Gleichung

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \mu \sigma l_e^2$$

mit  $\mu = \mu_0 \mu_r$  Permeabilität  
 $l_e$  minimale Element-Kantenlänge  
 $\sigma$  elektr. Leitfähigkeit

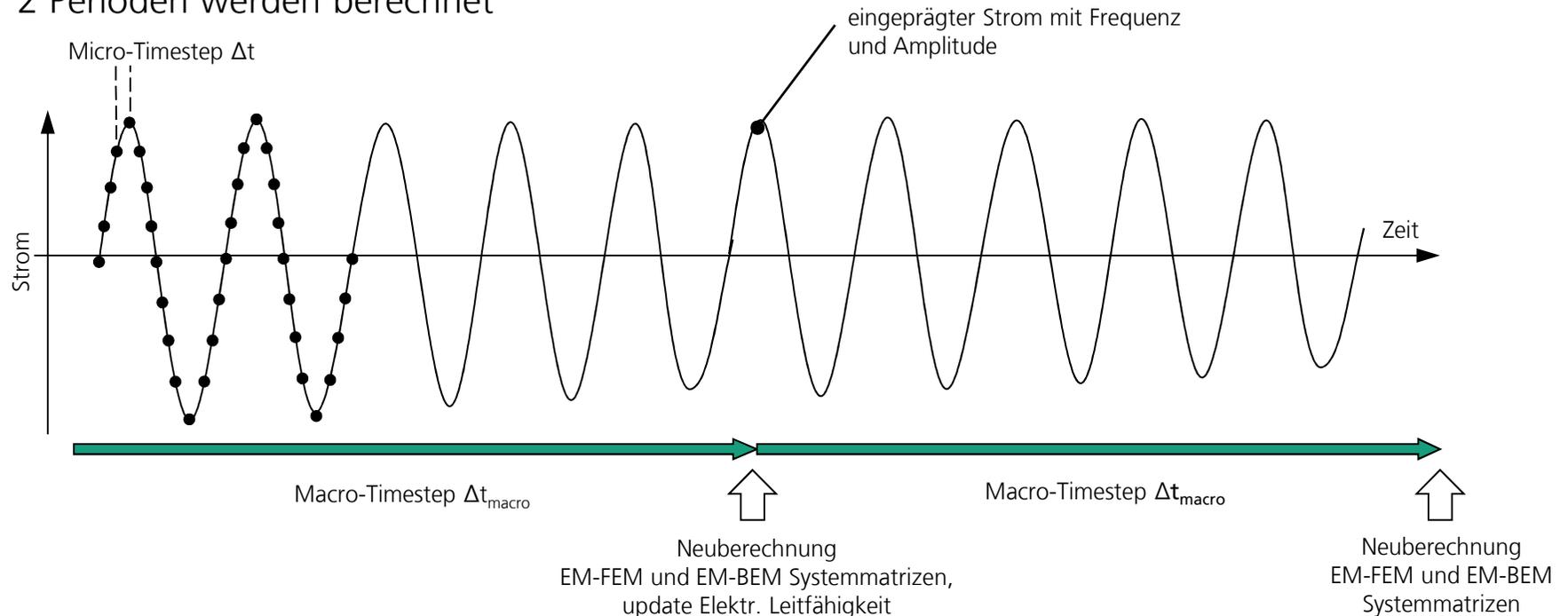
→ letztere Bedingung meist maßgebend

- Problem in unterschiedlichen Zeiträumen, Lösung transientes Wirbelstromproblem beschränkt auf kurze Zeiträume ( $\mu\text{s}$ ), induktive Erwärmung aber in Größenordnung Sekunden (s)!

# Arbeitsweise inductive heating solver

## Lösung

- 2 Perioden werden berechnet



- Mittelwertbildung der jouschen Verluste im Element über alle Micro-Timesteps

$$\bar{p}_{\Omega} = \frac{1}{NUMLS} \sum_{n=1}^{NUMLS} \int_{\Omega} \frac{1}{\sigma} \|j_n\|^2 d\Omega$$

# Induktive Erwärmung in der Prozesskette Presshärten

## Prozess

- partielle Erwärmung des Bauteils → Tailored Tempering-Prozess
- erwärmter Bauteilbereich → hohen Abkühlgeschwindigkeit, martensitisches Gefüge
- nicht erwärmter Bereich je nach Prozessführung, ein ferritisch-perlitisches oder ferritisch-bainitisches Gefüge
- Einstellen anforderungsgerechter mechanischer Eigenschaften im Werkstoff bzw. Bauteil gezielt und lokal begrenzt, z.B. hohe Festigkeit oder hohe Bruchdehnung, z.B. zur Aufnahme von Deformationen, → graduierte Festigkeit

## Bauteil Radiusdemonstrator

- Demonstrator für Ausformungsverhalten unterschiedlicher Radien an presshärtbaren Teilen
- Material LH800/22MnB5



C. Scheffler

# Induktive Erwärmung Anlagentechnik

## Induktor

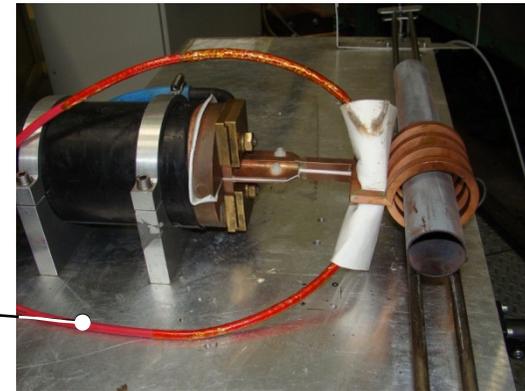
- Eldec SDF Generator 25kW+25kW Leistung
- 2 unterschiedliche Stromfrequenzen am Leistungsausgang,
  - Hochfrequenz-Bereich (HF) ca. 150-350kHz
  - Mittelfrequenz-Bereich (MF) ca. 10-25kHzje nach Induktivität des Systems Werkstück+Induktor
- Ströme sind weitestgehend sinusförmig
- Amplituden zwischen 300-2000A für HF  
200-5000A für MF  
je nach Induktivität Werkstück+Induktor



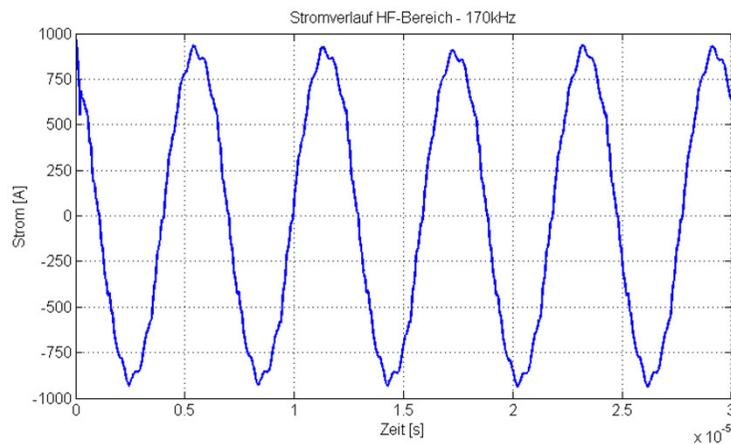
# Induktive Erwärmung - Anlagentechnik

## Strommessung

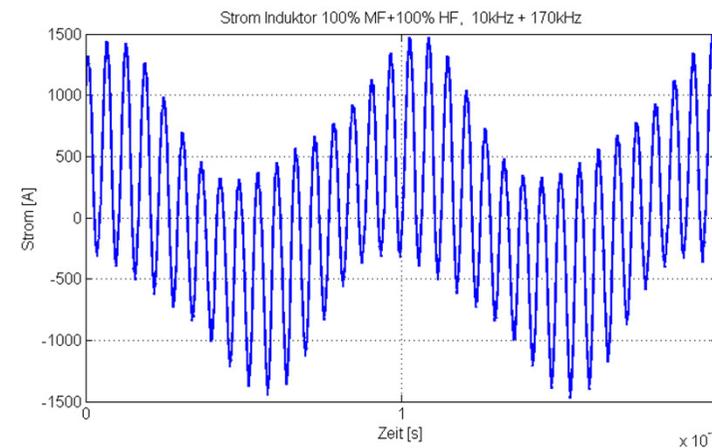
- Bestimmung des eingepprägten Stromes für Simulation  
→ Abgleich zu Aussagen von Induktorhersteller  
(Welcher Strom bei welcher Induktivität?)
- Messung mit Rogowski-Spule um hochfrequente Schwingungen zu erfassen



HF 170kHz



HF 170kHz + MF 10kHz



# Fragestellungen im Bereich induktive Erwärmung

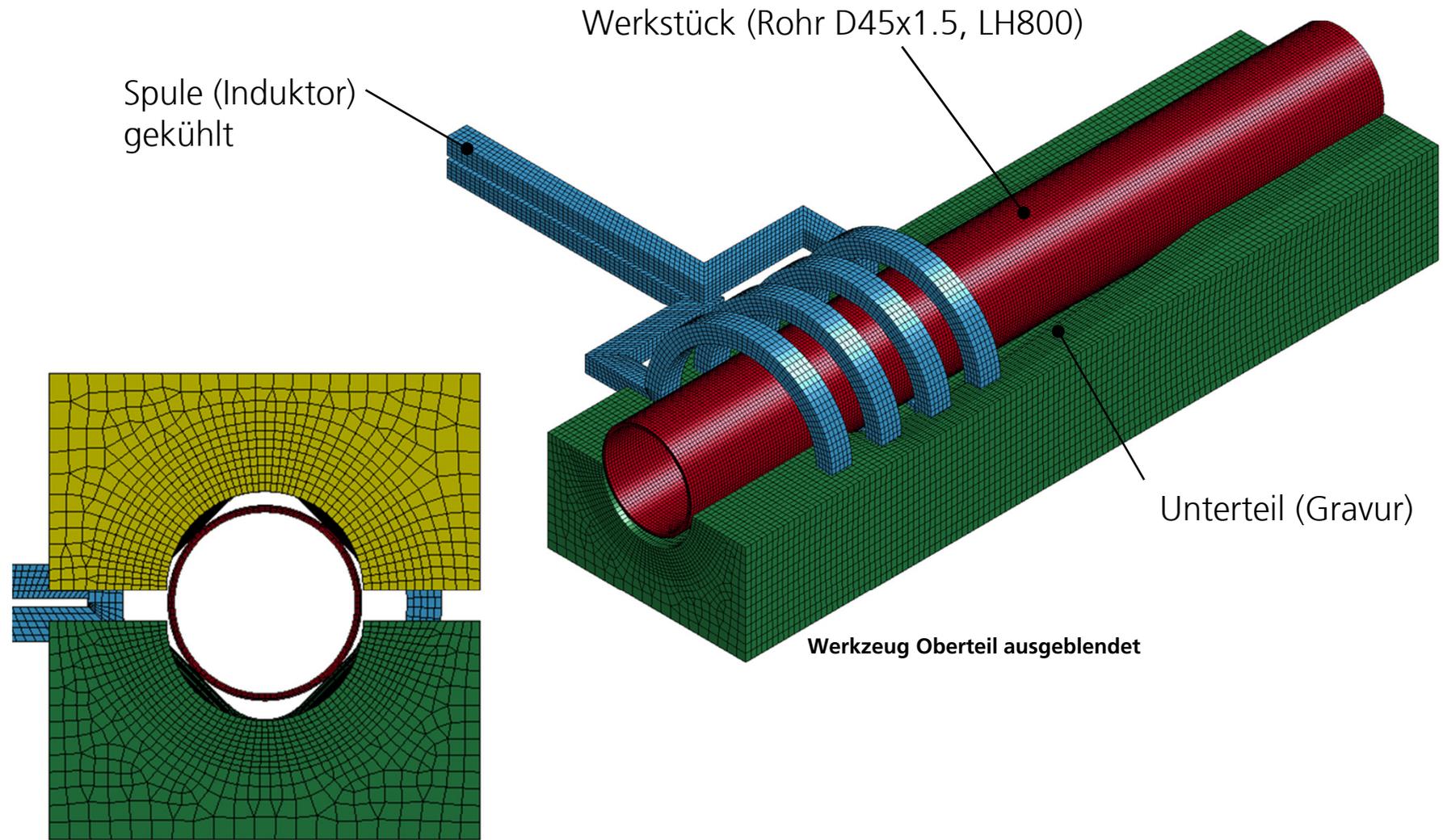
## Erwärmungscharakteristik

- Temperaturfeldverteilung in Bauteil:  
Eindringung Temperatur, Temp.-verteilung außerhalb der Induktorspule, etc.
- Entwicklung des Temperaturfeldes über der Zeit unter Betrachtung unterschiedlicher RB's in der Simulation

## Entwicklung Induktoren

- Ermittlung charakteristischer Parameter, z.B. **Induktivität**, Ohmscher Widerstand für konstruiert Induktor-Varianten  
→ Beschränkungen für Induktivität des Systems Werkstück+Induktor in den meisten Induktorsysteme, hier z.B.  $L=0.05...1.0\mu\text{H}$
- Auswirkungen bei Integration der Induktoren in Werkzeuge

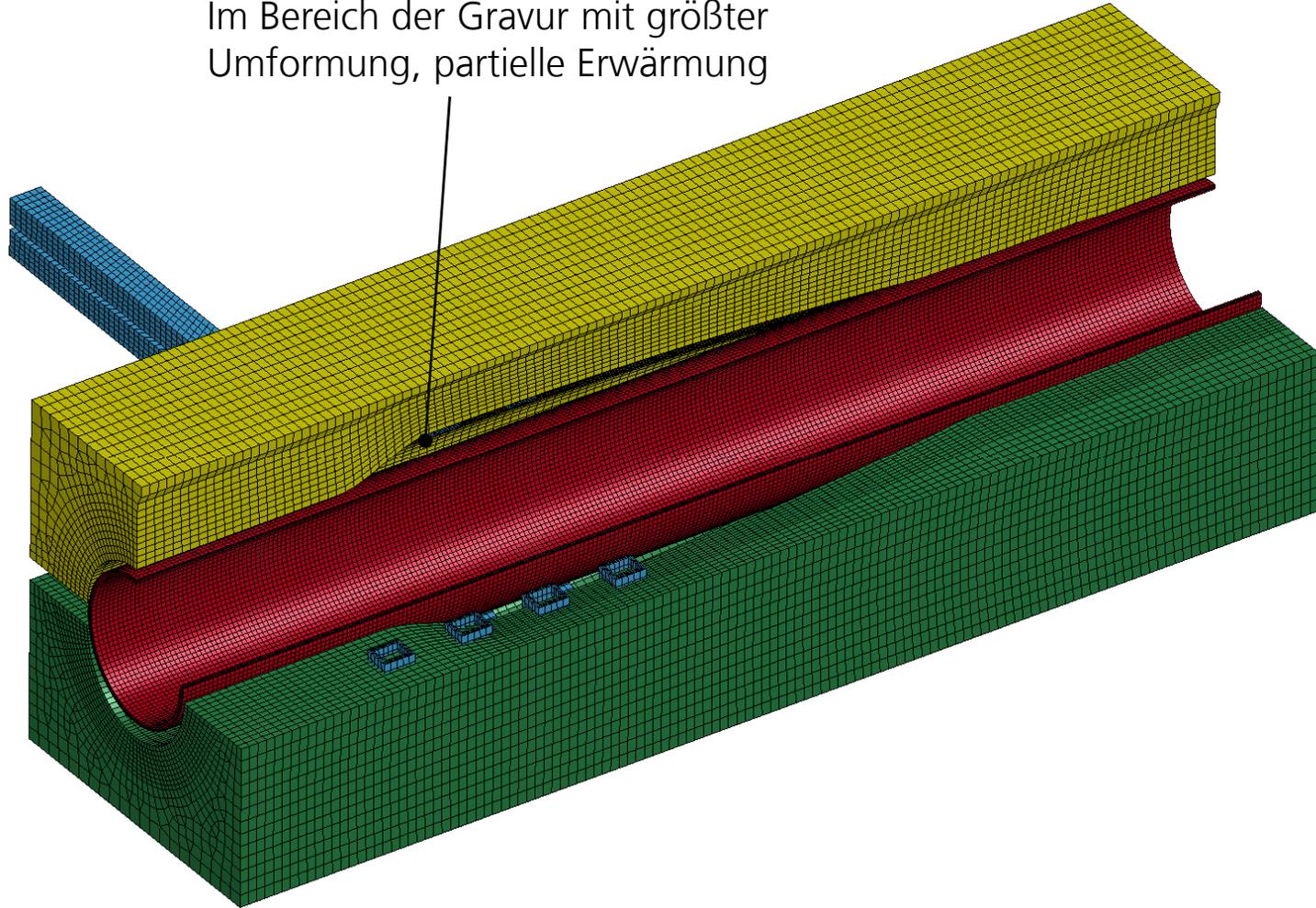
# Modellaufbau



C. Scheffler

# Modellaufbau

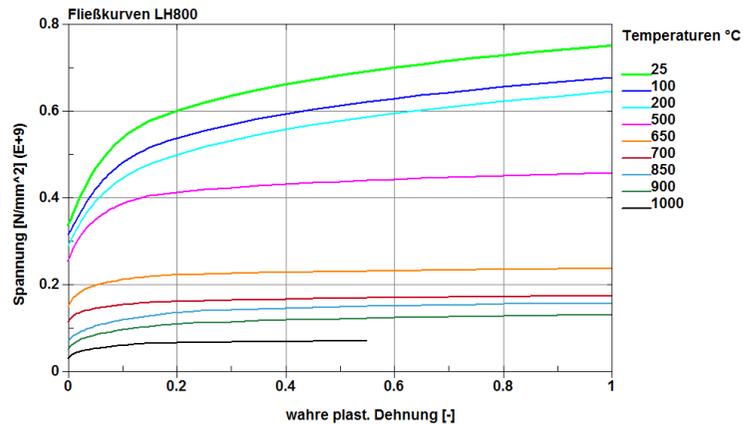
Im Bereich der Gravur mit größter Umformung, partielle Erwärmung



C. Scheffler

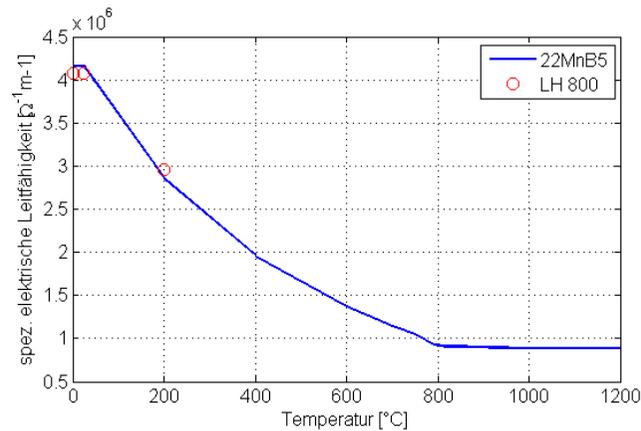
# Modellaufbau – Kennwerte

- Temperaturabhängige Fließkurven sind Standard (\*MAT\_ELASTIC\_VISCOPLASTIC\_THERMAL)



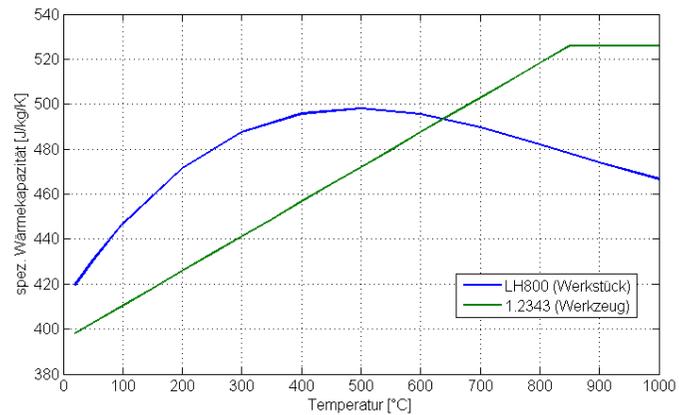
→ hier Möglichkeit der Phasenmodellierung mit \*MAT\_244

- Elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur  $\sigma = \sigma (T)$   
\*EM\_EOS\_TABULATED1

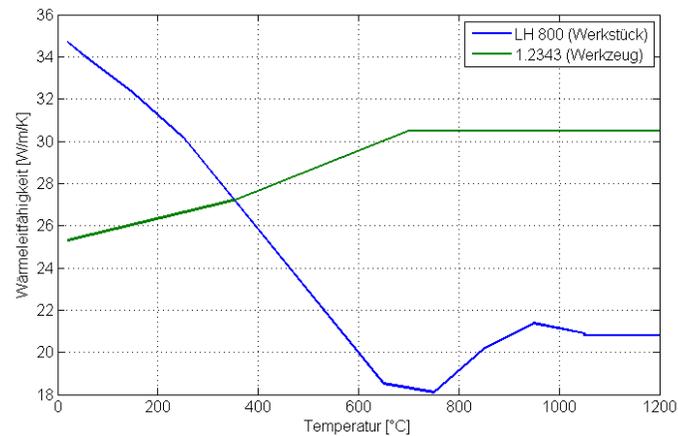


# Modellaufbau – Kennwerte

## ■ Temperaturabhängige spez. Wärmekapazität $c_p$

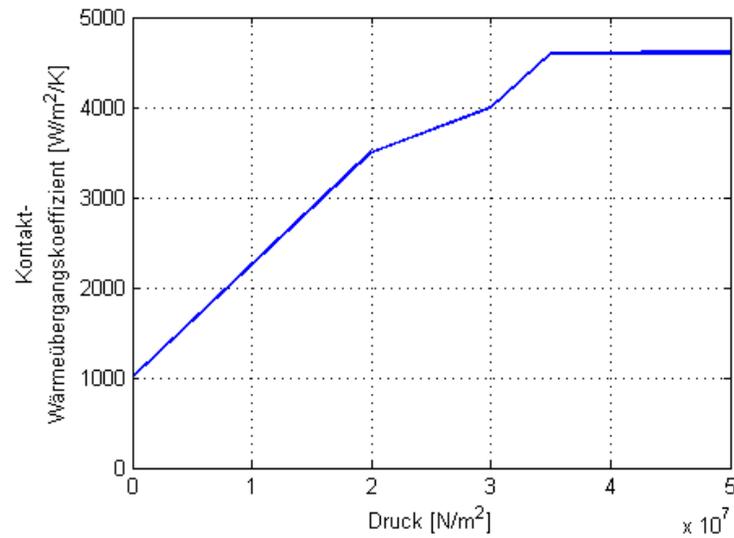


## ■ Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit $k$



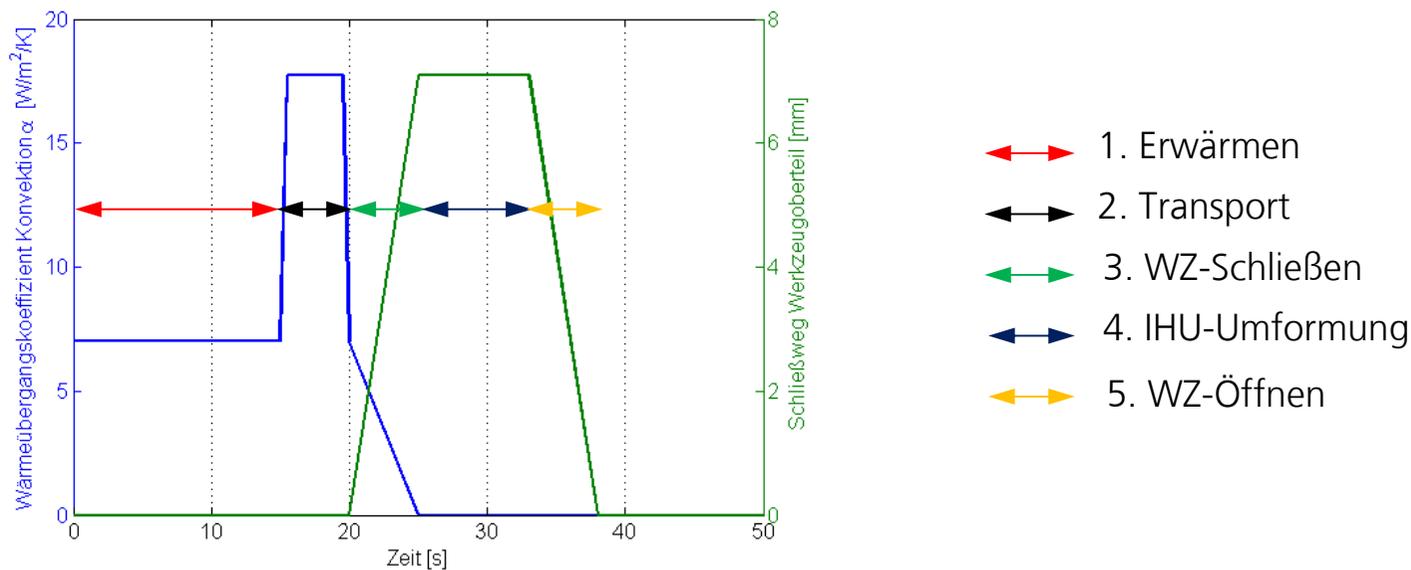
# Modellaufbau – Kennwerte

- Kontakt-Wärmeübergangskoeffizient  $h_c$  ist druckabhängig definiert



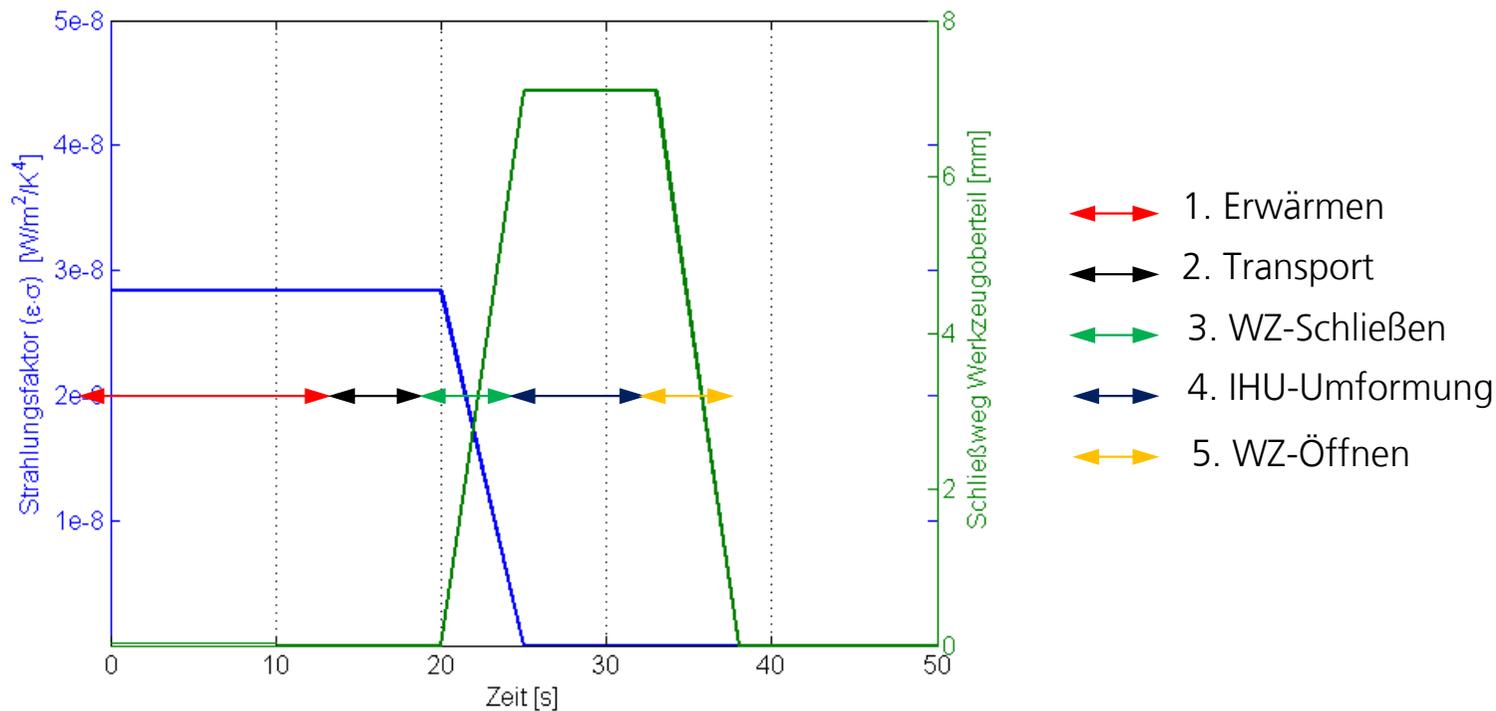
# Modellaufbau – Randbedingungen thermisch, mechanisch

- Wärmeübergangskoeffizienten freie, erzwungene Konvektion?
  - aus CFD berechnen (conjugate heat transfer problem mit ICFD Solver LS-DYNA R7), heat transfer coefficients aus Temperaturgradient berechenbar
  - VDI Wärmeatlas
    - gewählt für freie Konvektion:  $\alpha = 7.0$
    - gewählt für erzwungene Konvektion:  $\alpha = 17.8$  (Bewegung ca. 0.5m/s)
- Segment set von Aussenseite Rohr



# Modellaufbau – Randbedingungen thermisch, mechanisch

- Emissionskoeffizienten für Strahlung?  
→ aus Oberflächenfarbe-, struktur schätzen  
aufgrund der hellen x-tec Verzunderungsschutzbeschichtung:  $\varepsilon = 0.5$
- Segment set von Aussenseite Rohr

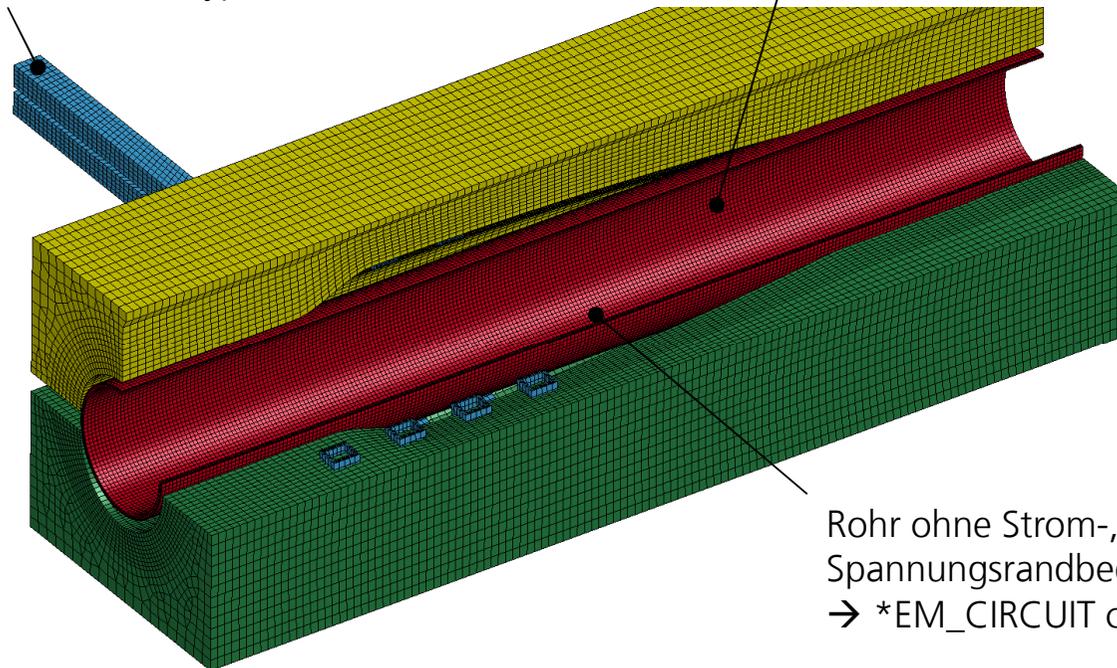


C. Scheffler

# Modellaufbau – Randbedingungen EM

Induktor mit eingprägtem Strom  
10kHz oder 170kHz definiert  
(Amplitude, Frequenz)  
\*EM\_CIRCUIT circrtp=11

~ mag. Vektorpotential  $A=0$  bei 170kHz(!)  
→ für Segment set Rohrrinnenwand  
\*EM\_BOUNDARY btype=9

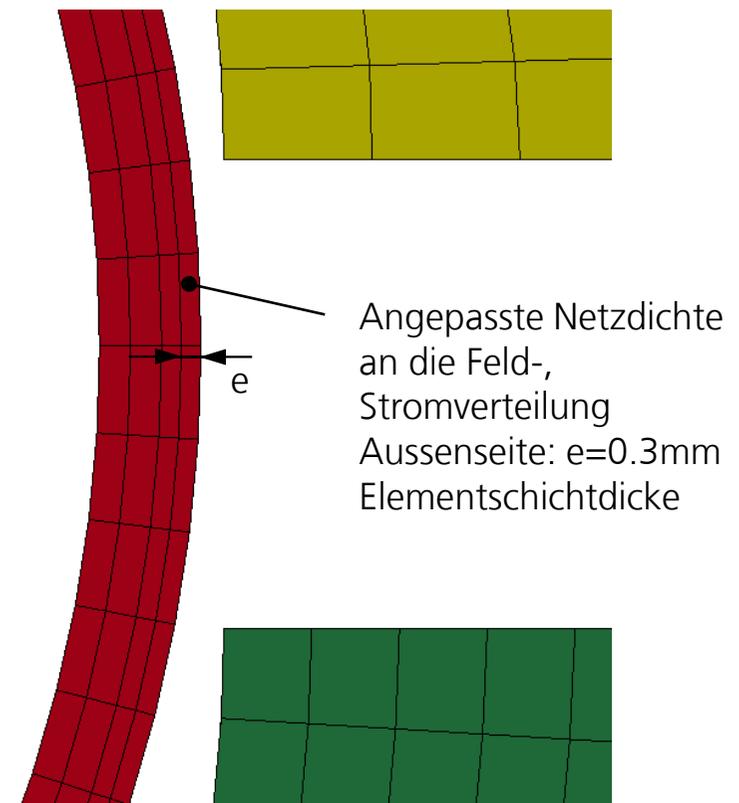


Rohr ohne Strom-,  
Spannungsrandbedingung  
→ \*EM\_CIRCUIT circrtp=5

# Modellaufbau - Vernetzungseigenschaften

## Was ist bei Vernetzung zu beachten?

- Spacing für Vernetzung des Bauteils zur besseren Abbildung Eindringtiefe des Feldes  
→ Vorab-Abschätzung der erwarteten Feldverteilung, mind. 1 Element pro Eindringtiefe, besser 2-3 Elemente
- Prismen und Tetraeder vermeiden  
→ Berechnung von Feldgrößen teilweise nicht korrekt)



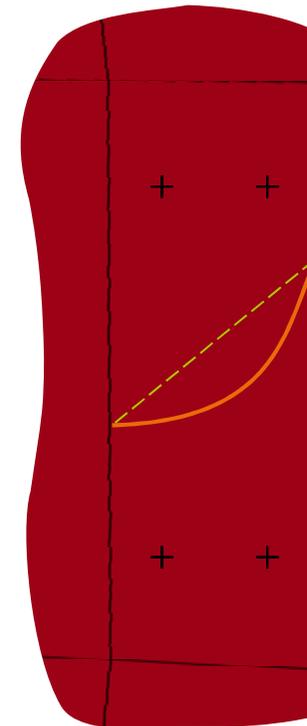
# Charakteristische Größen EM-Berechnung

## Eindringtiefe

- bei Eindringtiefe  $\delta$  Feldabfall auf  $\sim 37\%$ , aber aufgrund  $j^2$ -Zusammenhang im ohmschen Quellterm  $j^2/\sigma\rho$  Absinken der Wirbelstromverluste in dieser Tiefe auf  $\sim 14\%$
- Eindringtiefe verschiedener Werkstoffe gibt Richtwert für Netzgröße

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}$$

	10kHz	170kHz	170kHz
E-Kupfer	0.66 mm	0.16 mm	-
Aluminiumleg. AA6016	1.0 mm	0.26 mm	-
Stahl DC04	1.9 mm ( $\mu_r=1.0$ )	0.46 mm ( $\mu_r=1.0$ )	0.2 mm ( $\mu_r\sim 50$ )
Stahl 22MnB5/LH800 (25°C)	2.5 mm ( $\mu_r=1.0$ )	0.61 mm ( $\mu_r=1.0$ )	0.35 mm ( $\mu_r\sim 25$ )
Stahl 22MnB5/LH800 (800°C)	5.0 mm ( $\mu_r=1.0$ )	1.22 mm ( $\mu_r=1.0$ )	1.22 mm ( $\mu_r=1.0!$ )



# Charakteristische Größen EM-Berechnung

## Vernetzungseinfluss

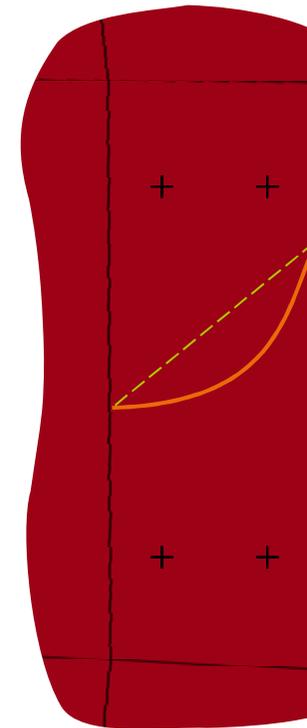
- Fehlberechnung des ohmschen Quellterms  $\frac{j^2}{\sigma\rho}$

durch lineare Approximation von Feldgrößen im Element  
(FEM-Edge-Formulierung für H-Feld in Leiter)

→ Wert des Volumenintegrals=Wärmeproduktion pro Volumen  
wird nicht korrekt berechnet!

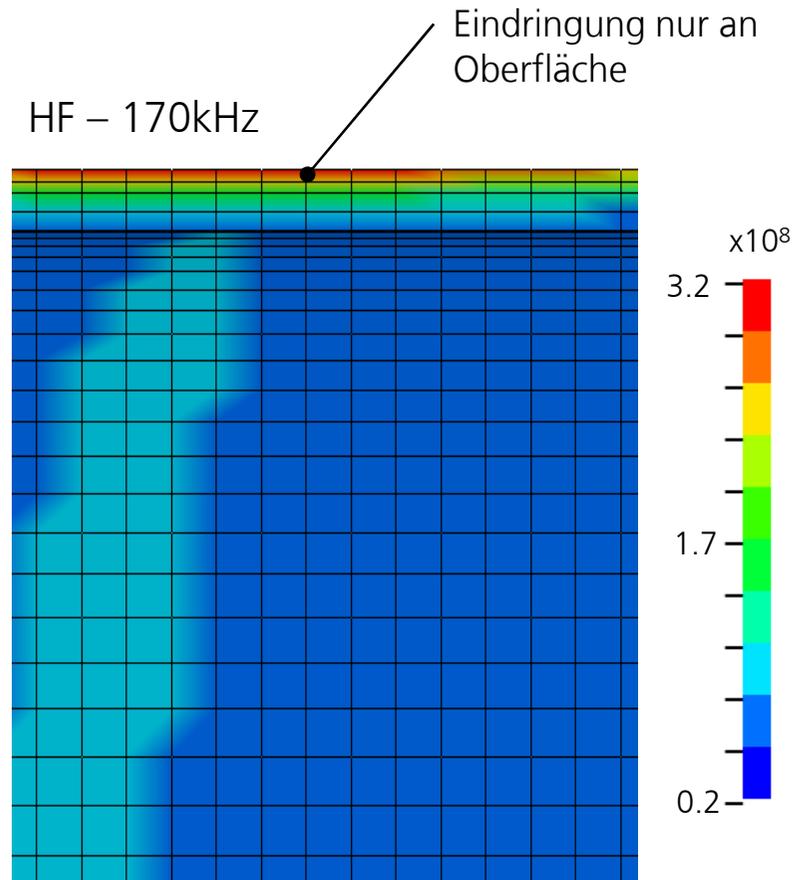
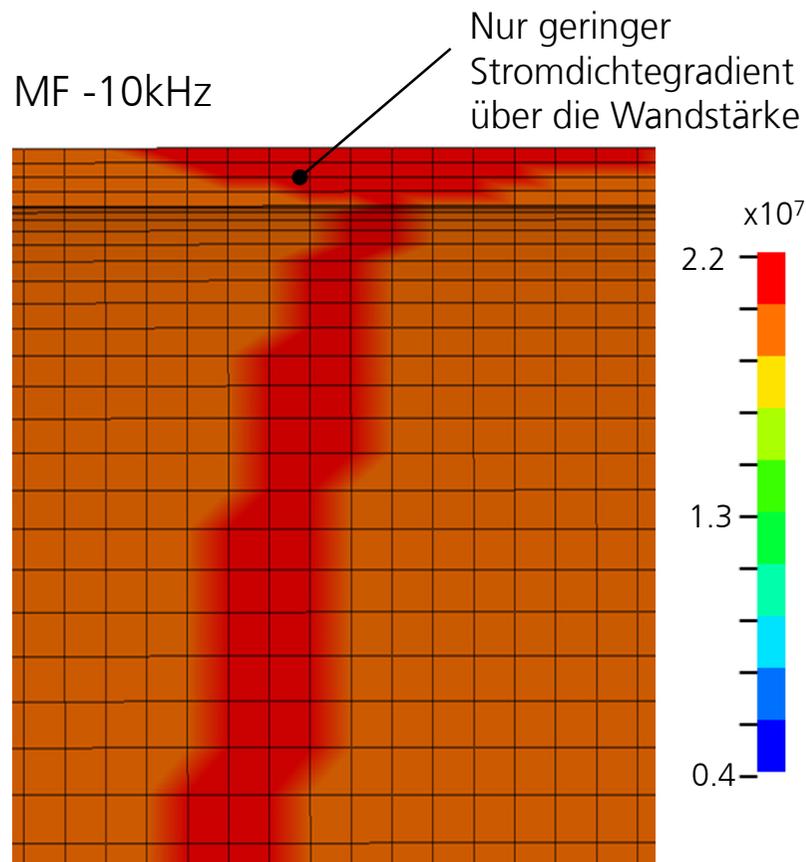
$$p_{\Omega} = \int_{\Omega} \frac{1}{\sigma} \|j\|^2 d\Omega$$

- Fehlberechnung der Stromdichte bei zu großen Elementen  
→ großer Gradient nicht abbildbar



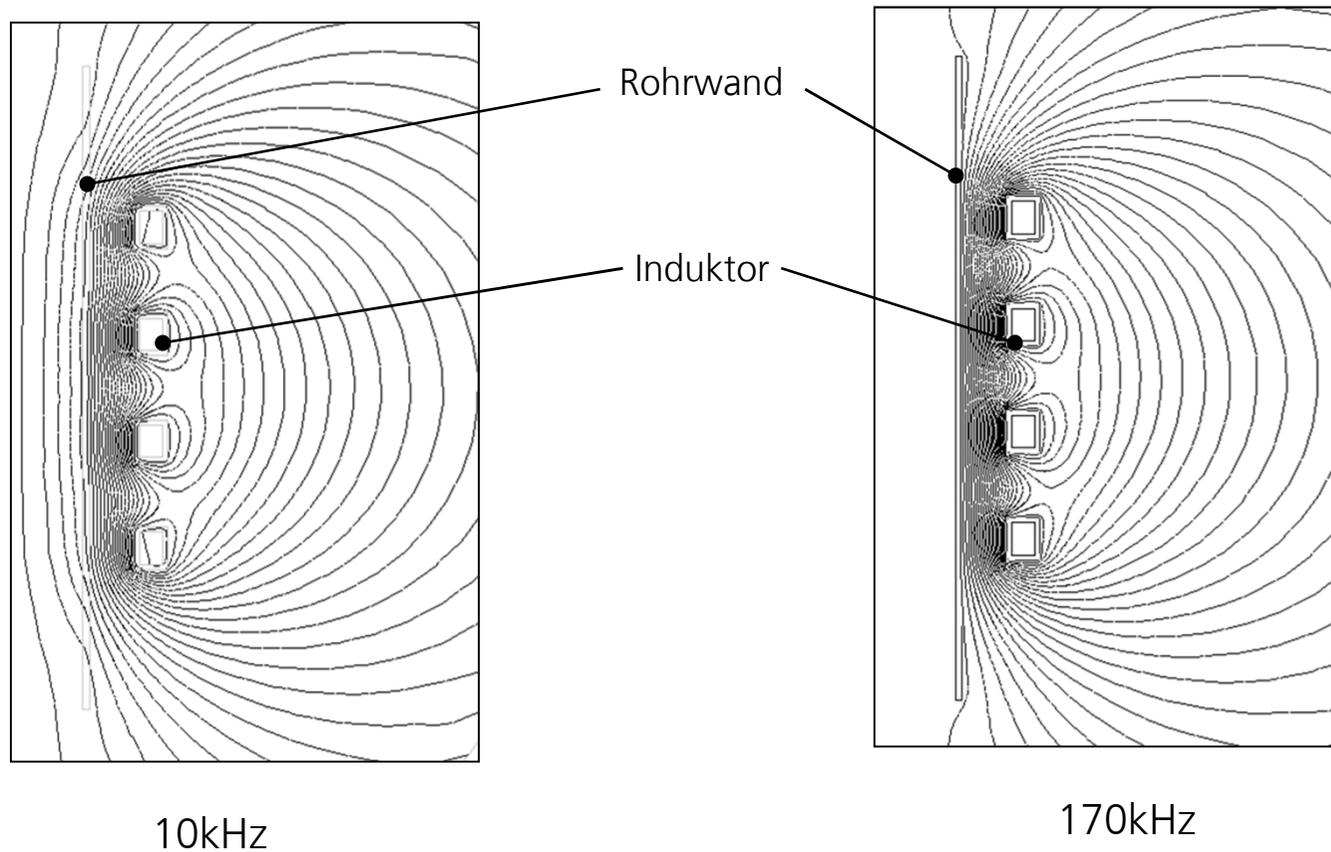
# Ergebnisse

## Stromdichte $j_{\text{sum}}$ über die Wandstärke



# Ergebnisse - Feldverteilung

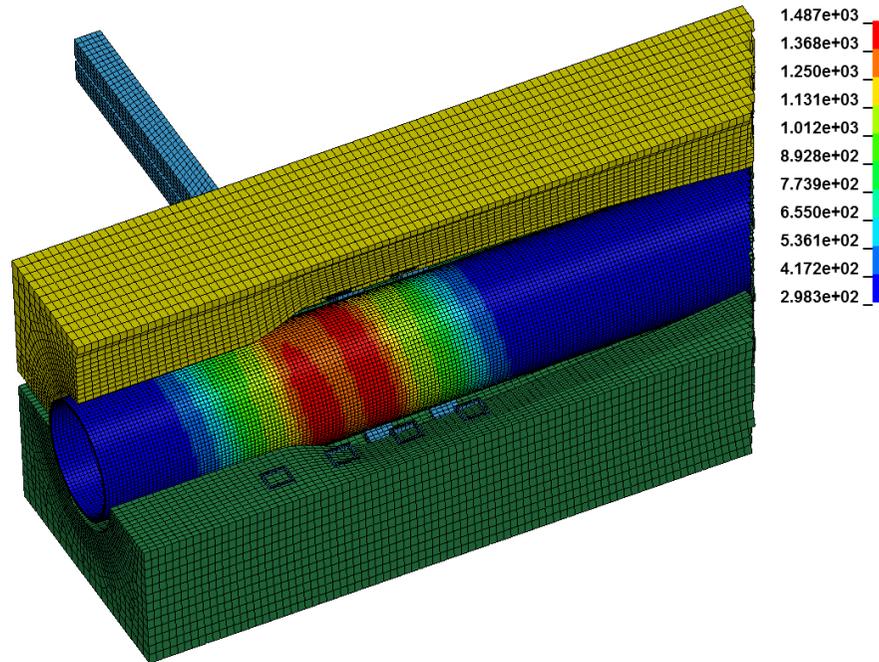
## Feldlinien mag. Vektorpotential (ANSYS)



C. Scheffler

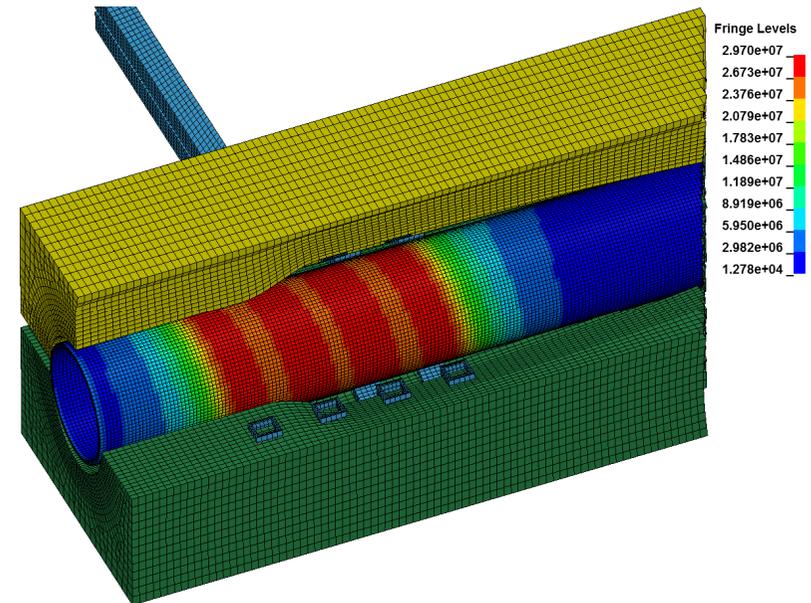
# Ergebnisse

Temperaturfeld [K]

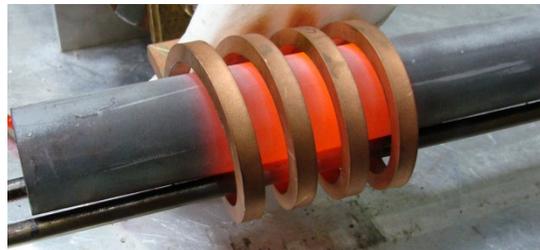


t=15.0s

J-Feld [A/m<sup>2</sup>]

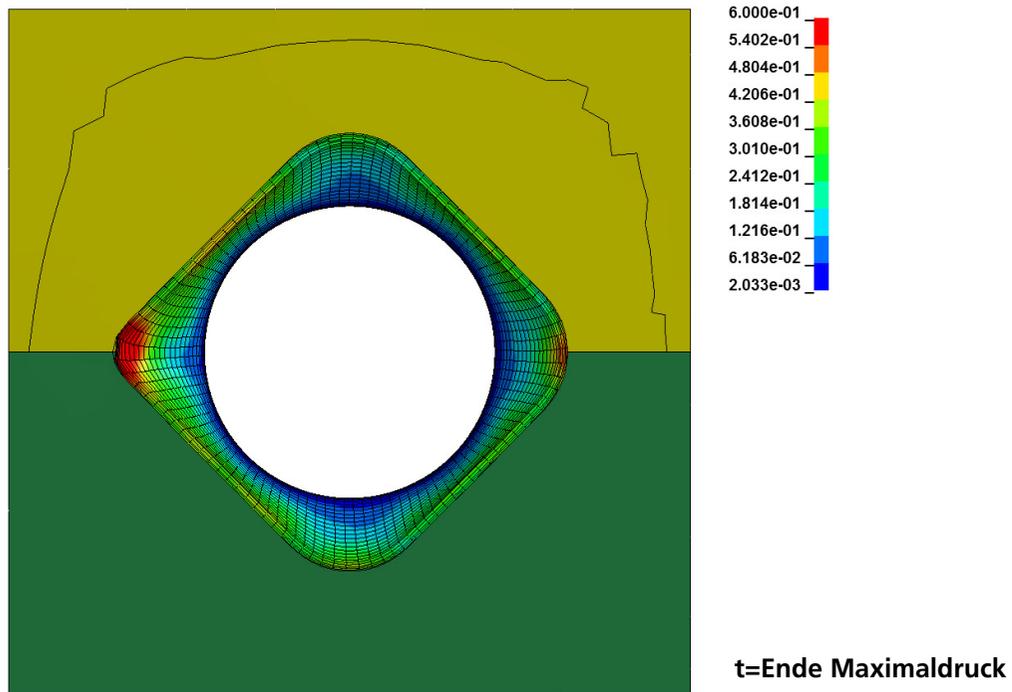


t=15.0s



# Ergebnisse

Equivalent Plastic strain [-]

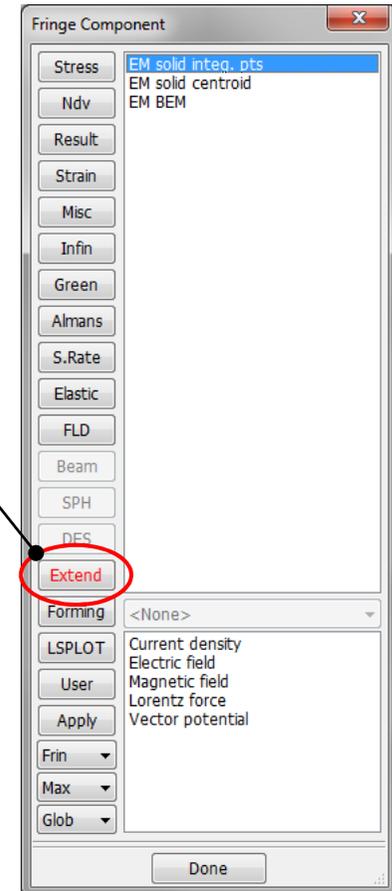


Radienausformbarkeit bei vorhandenem Temperaturfeld und Innendruck okay.

# Ergebnisse – Darstellung LS-Prepost

- Darstellung von magnetischen, elektrischen Feldgrößen in LS-Prepost als fringe plot oder Vektordarstellung
  - Stromdichte
  - elektr. Feldstärke
  - magnetische Flussdichte
  - Lorentzkraft
  - mag. Vektorpotential
  - für induktive Erwärmung
  - Elektrische Leitfähigkeit
  - Ohmscher Wärmequellterm

EM-Feld Feld-, und skalare Größen



- angezeigte Feld-Werte für den inductive heating solver (EMSOL=2) sind **spezieller Mittelwert** über alle Micro-Time-Steps NUMLS z.B. für die Stromdichte

$$j = \sqrt{\frac{1}{NUMLS} \cdot \sum_{n=1}^{NUMLS} \|j_n\|^2}$$

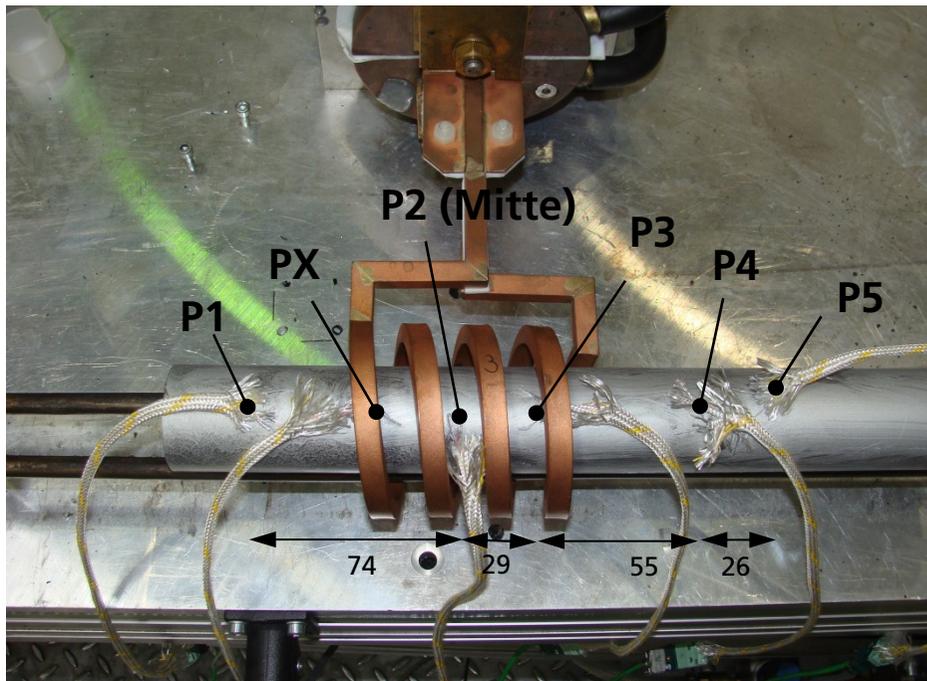
→ physikalische Bedeutung begrenzt

# Ergebnisse – Messung Temperatur-Zeit-Verlauf

- Messung Erwärmung, Abkühlung an ausgewählten Punkten des Demonstrators  
→ Abgleich zur Simulation

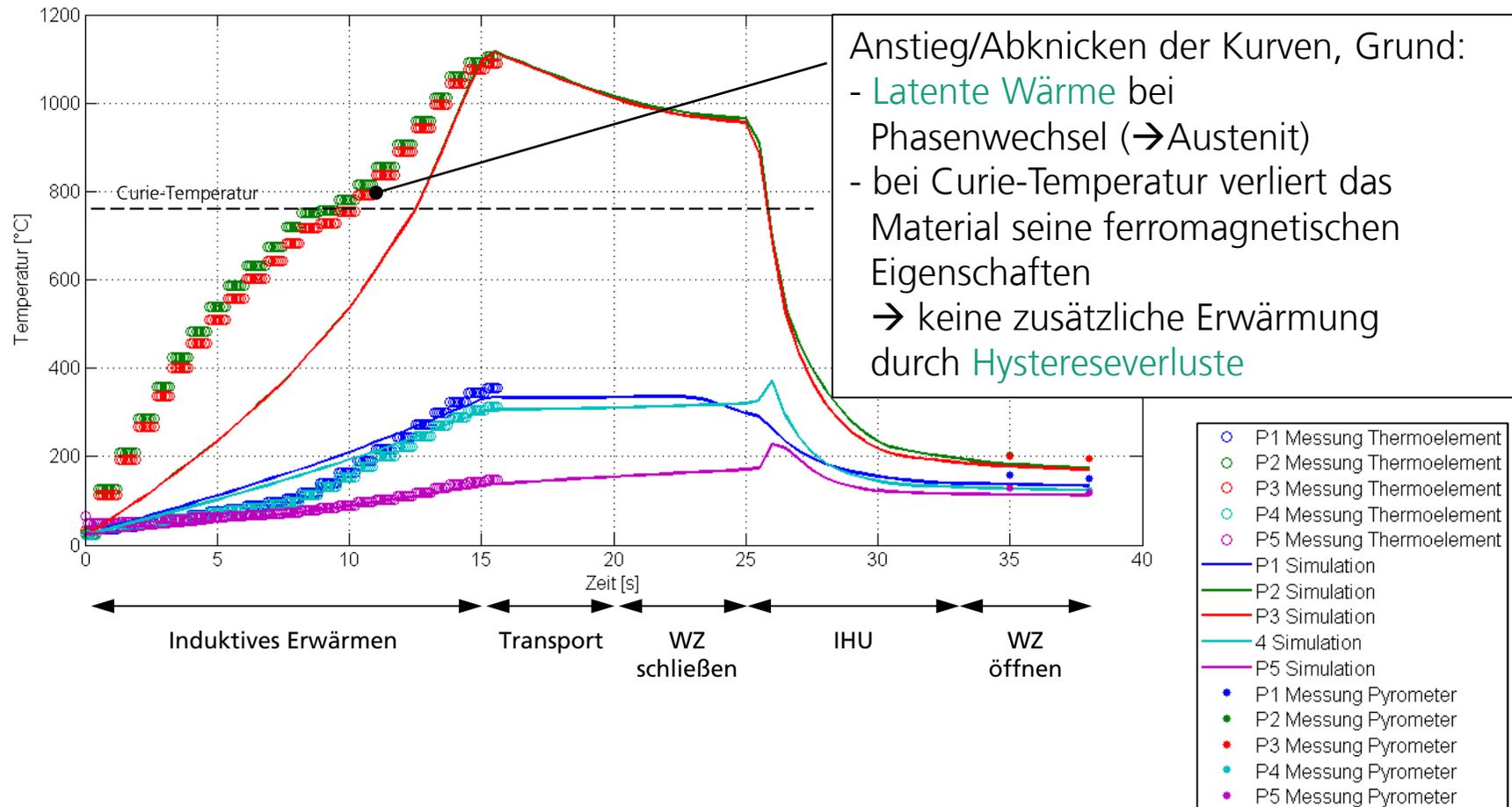
Erwärmungsmessung mit Thermoelement kontinuierlich

Abkühlungsmessung durch Handpyrometer zu wenigen Zeitpunkten



# Ergebnisse – Temperatur-Zeit-Verlauf

## ■ Temperatur-Zeitverlauf an ausgewählten Punkten



C. Scheffler

# Ergebnisse – Globale Ergebnisparameter

- Induktivität Gesamtsystem Werkstück + Induktor  
aus circuit3D\_xxx file entnehmbar für \*EM\_CIRCUIT circtype=1,2 oder 3 Rechnung

```
time          voltage      charge      current  resistanceD resistanceJ inductance  mutual 1  mutual 2
0.0000E+00    0.2000E+04  0.6600E+00  0.6970E+02  0.1471E-02  0.0000E+00  0.4583E-06  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
0.2000E-07    0.2000E+04  0.6600E+00  0.1394E+03  0.1471E-02  0.0000E+00  0.4583E-06  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
0.4000E-07    0.1999E+04  0.6600E+00  0.2090E+03  0.1471E-02  0.0000E+00  0.4583E-06  0.0000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
...
```

## Ergebnis:

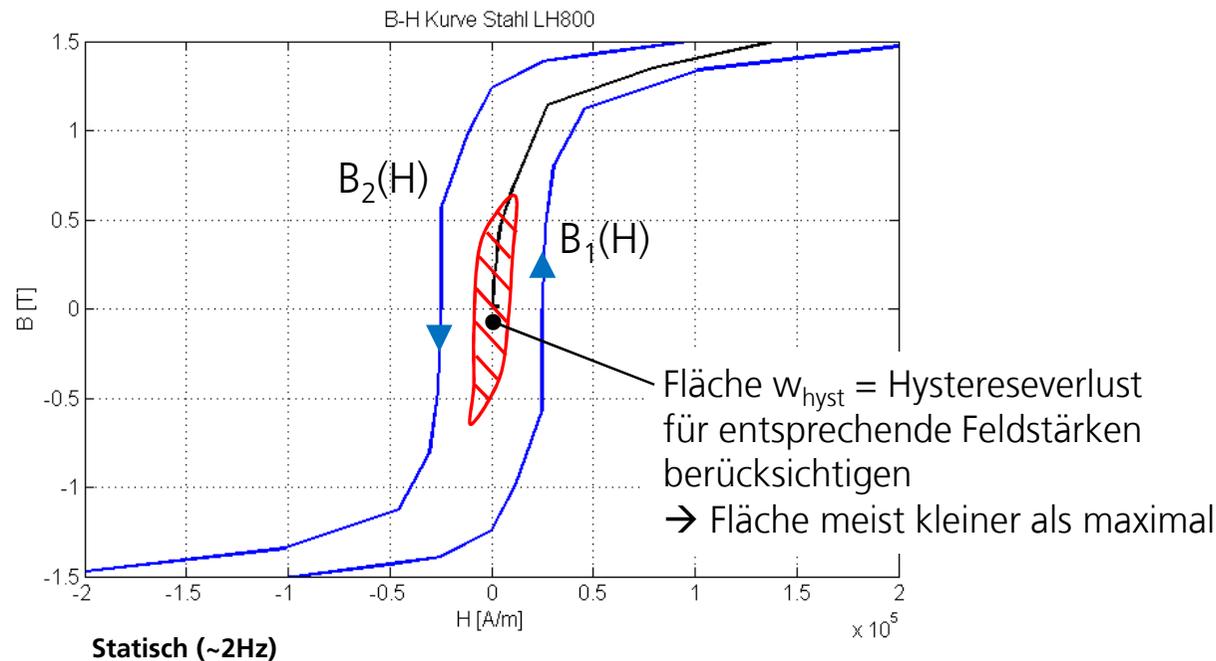
Induktivität 458nH

→ Induktor für Anlage geeignet.

Induktivität ist abhängig von verschiedenen Faktoren (z.B. Abmessungen Induktor, Abmessungen Werkstück, spez. Leitfähigkeit, Frequenz...), deshalb Rechnung für genaue Werte der 3D-Geometrie notwendig.

# Berücksichtigung weiterer Effekte

- Berücksichtigung Hysterese-, Ummagnetisierungsverluste



- Hysteresekurven für den Frequenzbereich der induktiven Erwärmung notwendig  
→ oft signifikante Unterscheidung von statischen Hysteresekurven

# Berücksichtigung weiterer Effekte

- Ummagnetisierungsverluste pro Umlauf und Volumeneinheit

$$w_{hys} = \int_{-\infty}^{\infty} (B_2(H) - B_1(H)) dH \quad [\text{J/m}^3]$$

für die Verluste bei der Frequenz  $f$  ergibt sich die Wärmequellendichte

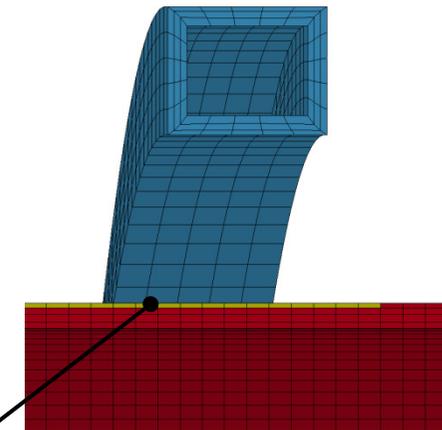
$$q_{hyst} = w_{hyst} \cdot f \quad [\text{W/m}^3]$$

- Erfassbar in LS-DYNA durch Wärmequellterm mit Keyword

```
*LOAD_HEAT_GENERATION_SET
$#  sid  lcid  cmult  wblcid  cblcid  tblcid
    2   -101 1.000000  0      0      0
```

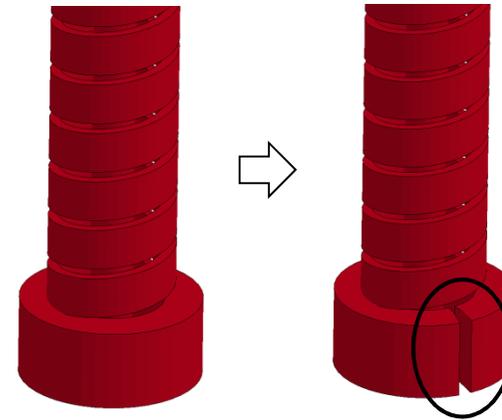
Negative curve id, Wärmequellendichte abhängig von Temperatur definierbar (sinkt auf null oberhalb Curie-Temperatur)

Solid element set für Bereich mit hoher mag. Feldstärke (beachte Eindringtiefe Feld, für 170kHz z.B. nur die oberste Elementschicht, für 10kHz gesamte Rohr-Wandstärke)

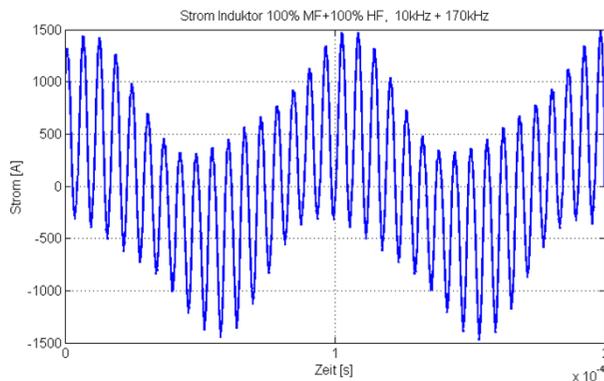


# Einschränkungen EM-Solver LS-DYNA

- Topologie-Probleme BEM bei speziellen Geometrien, z.B. Rohr ändert sich zu Vollkörper
  - Aufschneiden der Geometrie oder alternativ
  - Innensegmente exkludieren mit \*EM\_BOUNDARY



- Problem eingepprägter Strom mit mehreren überlagerten Frequenzen



→ mehrfache Definition \*EM\_CIRCUIT mit unterschiedlichen Frequenzen momentan nicht möglich

# Einheiten

- Empfehlung für Einheitensystem bei gekoppelten Elektromagnetisch-Thermisch-Mechanischen Rechnungen: → SI-Einheiten (m, kg, s, K)

	USI	Equivalent kg*m*s			ex 1	ex 2
Masse	kg	kg	m	s	g	g
Länge	m				mm	mm
Zeit	s				s	ms
Energie	J	1	2	-2	1.e-9 J	1.e-3 J
Kraft	N	1	1	-2	1.e-6 N	N
Spannung	Pa	1	-1	-2	Pa	1.e6 Pa
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1	-3	0	1.e6 kg/m <sup>3</sup>	1.e6 kg/m <sup>3</sup>
Wärmekapazität	J/kg/K	0	2	-2	1.e-6 J/kg/K	J/kg/K
Thermische Leitfähigkeit	J/m/s	1	1	-3	1.e-6 J/m/s	1.e3 J/m/s
Strom	A	0.5	0.5	-1	1.e-3 A	A
Widerstand	Ω	0	1	-1	1.e-3 Ω	Ω
Induktivität	H	0	1	0	1.e-3 H	1.e-3 H
Kapazität	F	0	-1	1	1.e3 F	F
Spannung	V	0.5	1.5	-2	1.e-6 V	V
B-Feld	T	0.5	-0.5	-1	T	1.e3 T
Elektrische Leitfähigkeit	Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	0	-2	1	1.e6 Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	1.e3 Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>

Ende Präsentation

Ende Präsentation