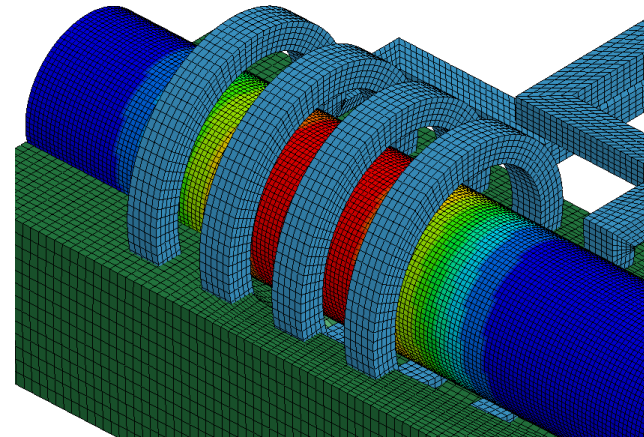

Simulation des Presshärtens unter Berücksichtigung der induktiven Bauteilerwärmung

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

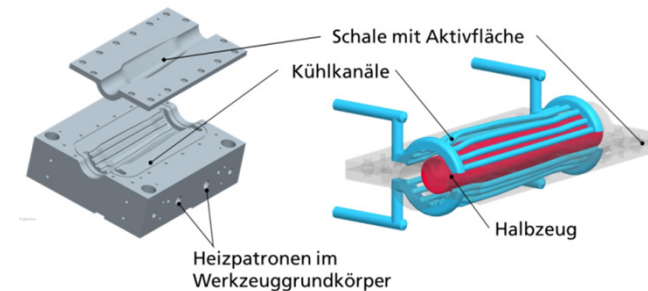
im Verbund mit

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

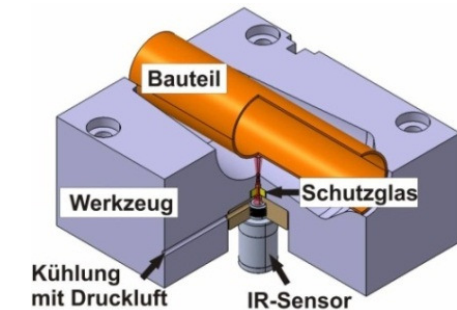
Temperierte Innenhochdruckumformung

Unsere Fachkompetenz

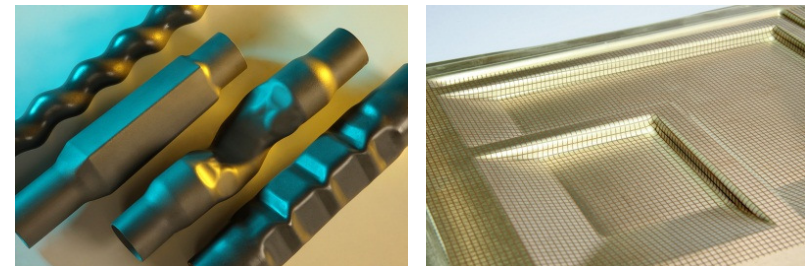
- Weiterentwicklung der wirkmedienbasierten Umformprozesse
 - Einsparung von Zwischenglühoperationen und Vorformstufen
 - prozessintegrierte Wärmebehandlung
 - Umformung von Aluminium, Magnesium, Stahl, Titan und Kunststoff
- Werkzeug- und Prozessentwicklung
 - Sicherstellung der erforderlichen Temperaturgradienten 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

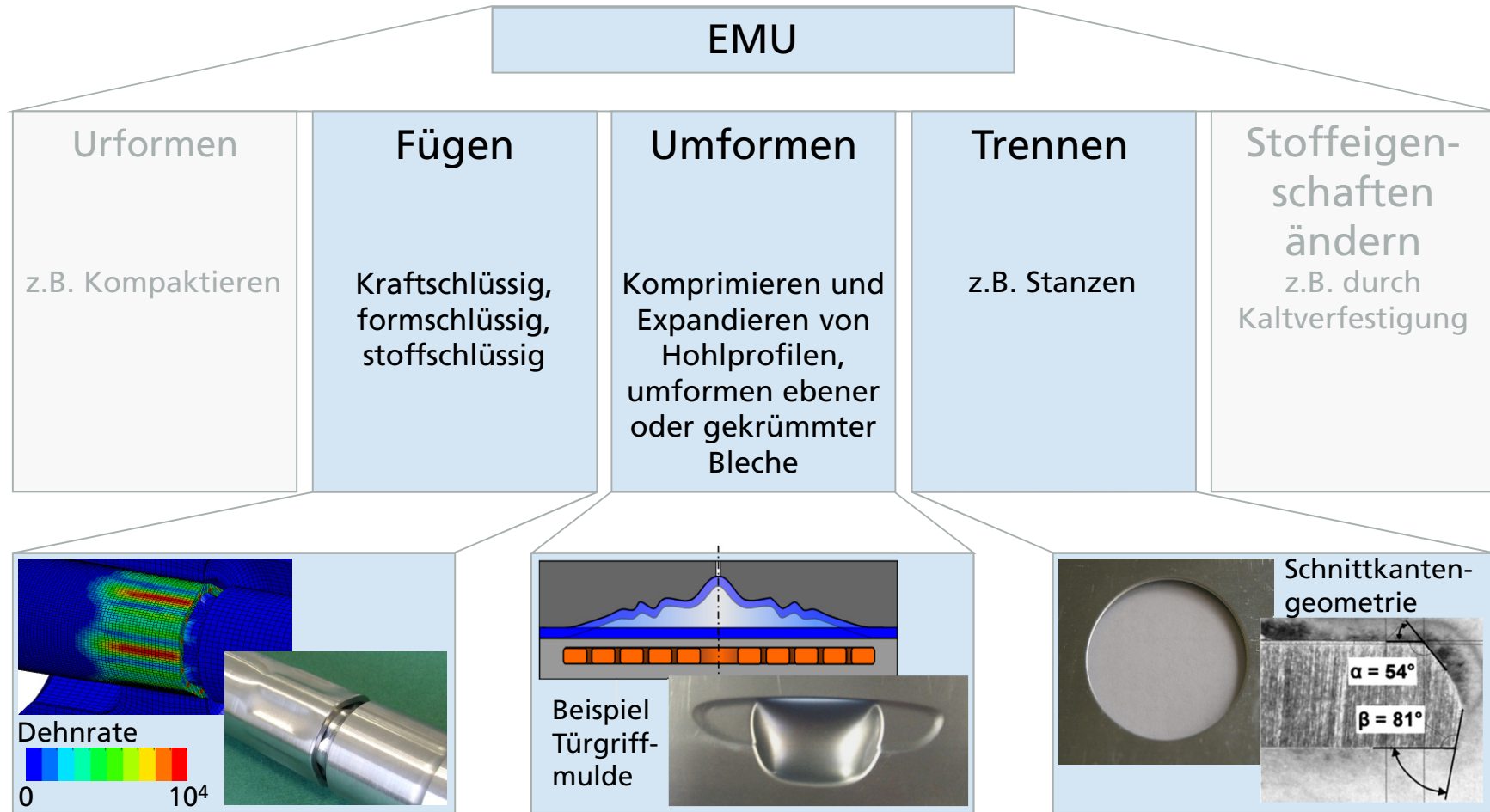


EMU geformte Türgriffmulde



Fügeverbindungen (artgleiche und artfremde Werkstoffe)

Anwendungsgebiete der Elektromagnetischen Umformung

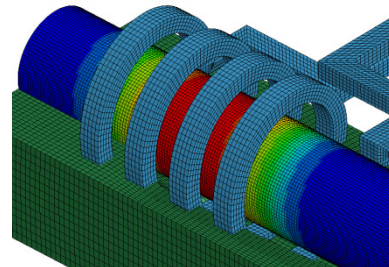
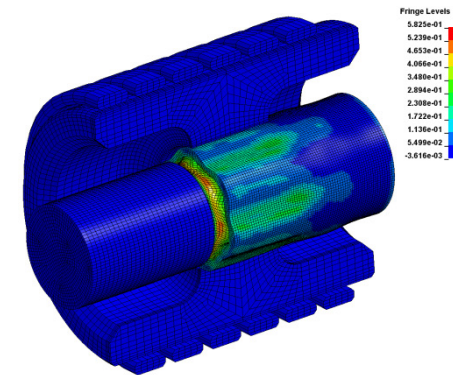
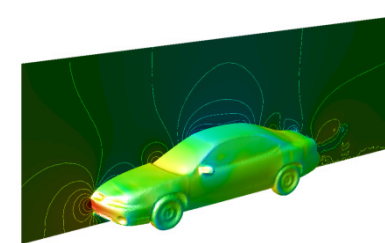
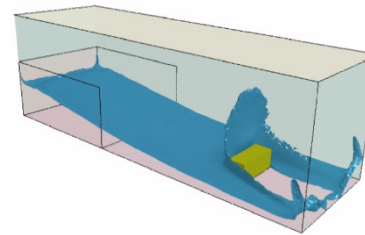


LS-DYNA R7 Multiphysics Solver für EM-Probleme

LS-DYNA R7

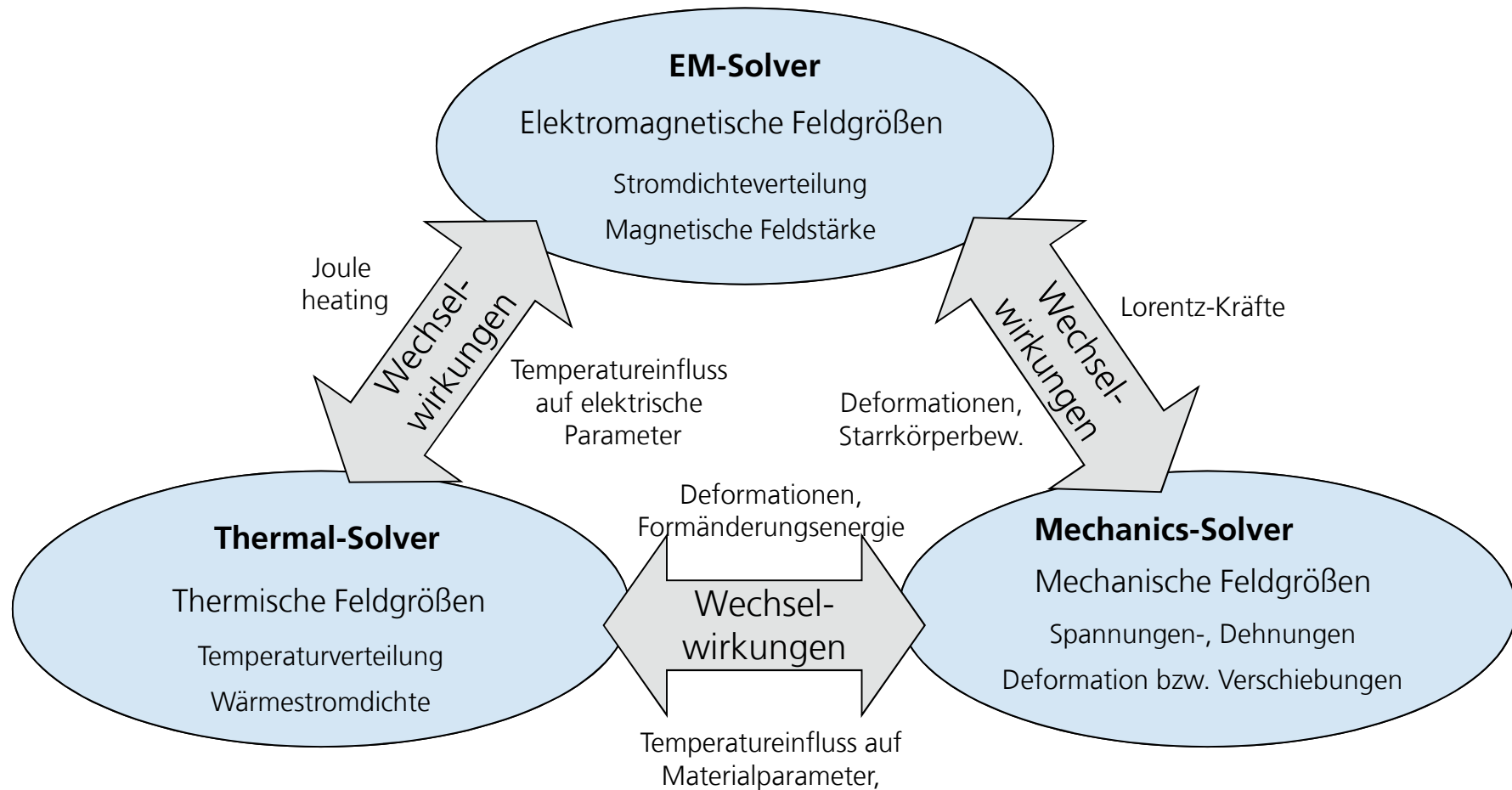
- Erweiterung auf Multiphysics-Bereich
- ICFD-Solver (Inkompressible Fluide)
- CFD-Solver (für kompressible Fluide)
- Elektromagnetischer Solver 2D axi/3D für transiente Probleme
- Anwendung für :
Elektromagnetische Umformung /Schweißen/Schneiden
→ Kopplung zu mechanischen Solver

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**

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

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			

circtype=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**

\$#	tstype	dtconst	lcid	factor
	3			1.0

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: $NUMLS > t_{\text{macro}}/dt_{\max}$

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 **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
 σ elektr. Leitfähigkeit

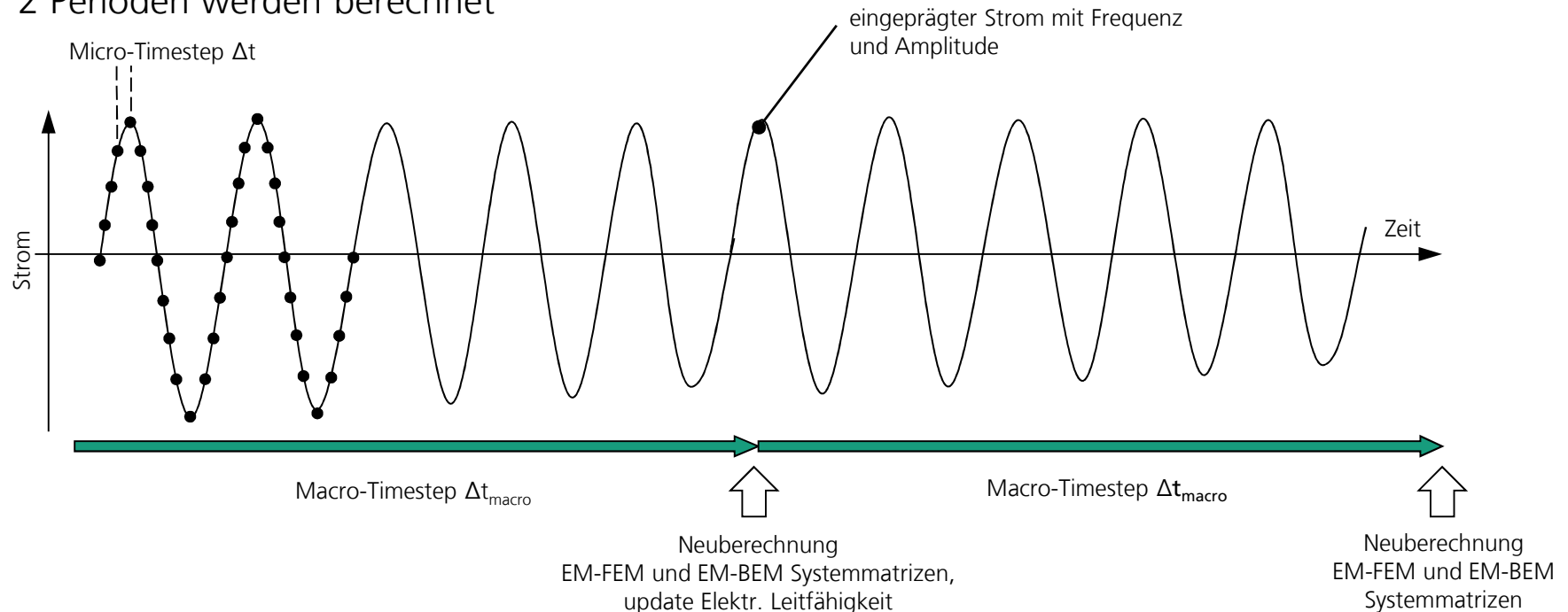
→ letztere Bedingung meist maßgebend

- Problem in unterschiedlichen Zeiträumen, Lösung transientes Wirbelstromproblem beschränkt auf kurze Zeiträume (μs), induktive Erwärmung aber in Größenordnung Sekunden (s)!

Arbeitsweise inductive heating solver

Lösung

- 2 Perioden werden berechnet



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

$$\overline{p_{\Omega}} = \frac{1}{NUMLS} \sum_{n=1}^{NUMLS} \int_{\Omega} \frac{1}{\sigma} \|j_n\|^2 d\Omega$$

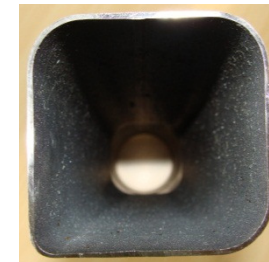
Induktive Erwärmung in der Prozesskette Presshärten

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, → gradierte Festigkeit

Bauteil Radiusdemonstrator

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



C. Scheffler

Induktive Erwärmung Anlagentechnik

Induktor

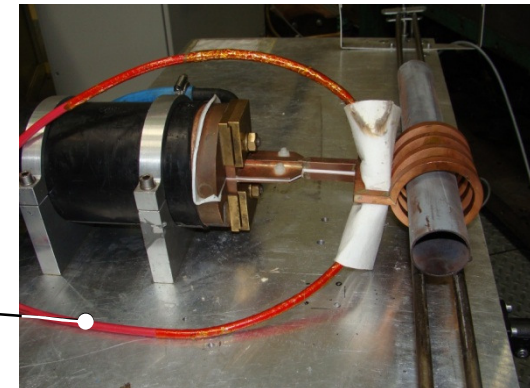
- Eldec SDF Generator 25kW+25kW Leistung
- 2 unterschiedliche Stromfrequenzen am Leistungsausgang,
 - Hochfrequenz-Bereich (HF) ca. 150-350kHz
 - Mittelfrequenz-Bereich (MF) ca. 10-25kHzje nach Induktivität des Systems Werkstück+Induktor
- Ströme sind weitestgehend sinusförmig
- Amplituden zwischen 300-2000A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



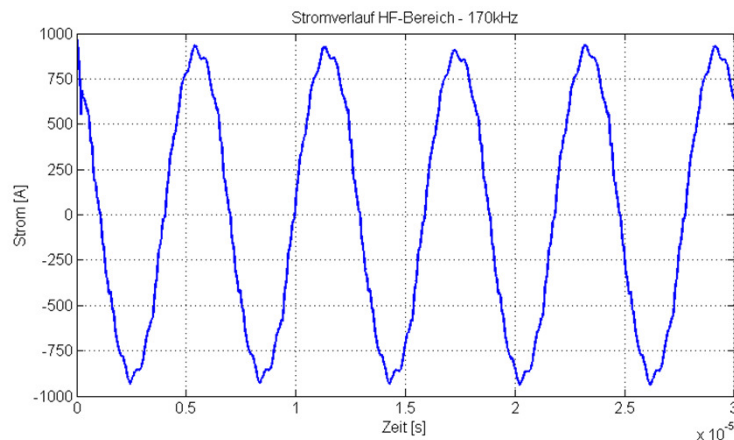
Induktive Erwärmung - Anlagentechnik

Strommessung

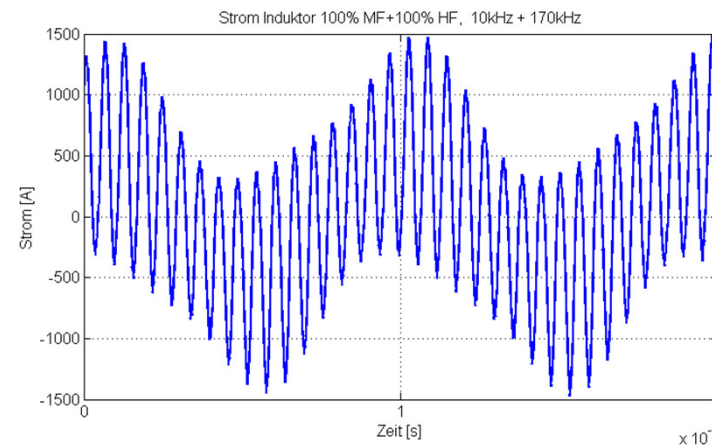
- Bestimmung des eingepprägten Stromes für Simulation
→ Abgleich zu Aussagen von Induktorhersteller
(Welcher Strom bei welcher Induktivität?)
- Messung mit Rogowski-Spule um hochfrequente Schwingungen zu erfassen



HF 170kHz



HF 170kHz + MF 10kHz



Fragestellungen im Bereich induktive Erwärmung

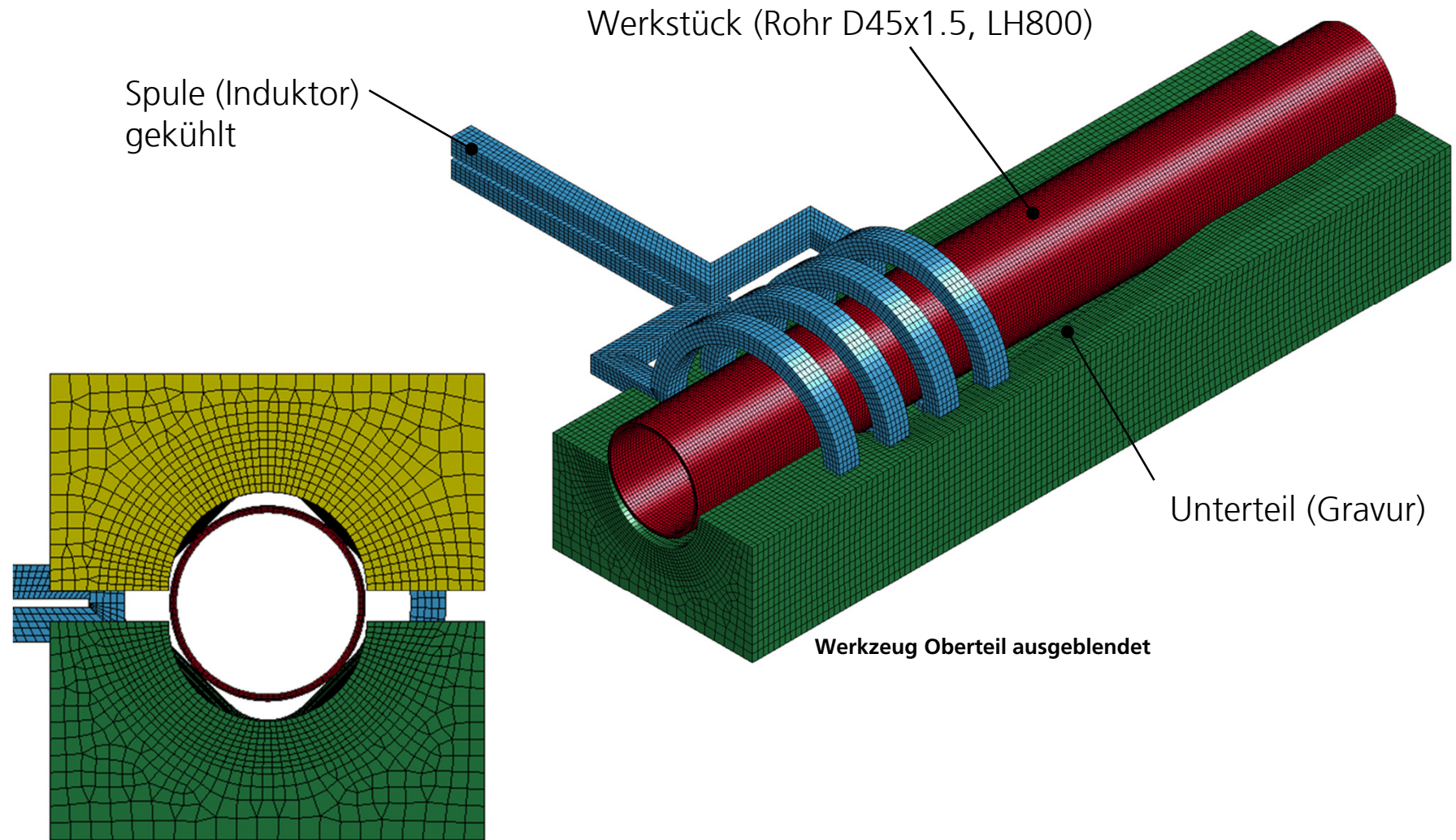
Erwärmungscharakteristik

- 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. $L=0.05...1.0\mu H$
- Auswirkungen bei Integration der Induktoren in Werkzeuge

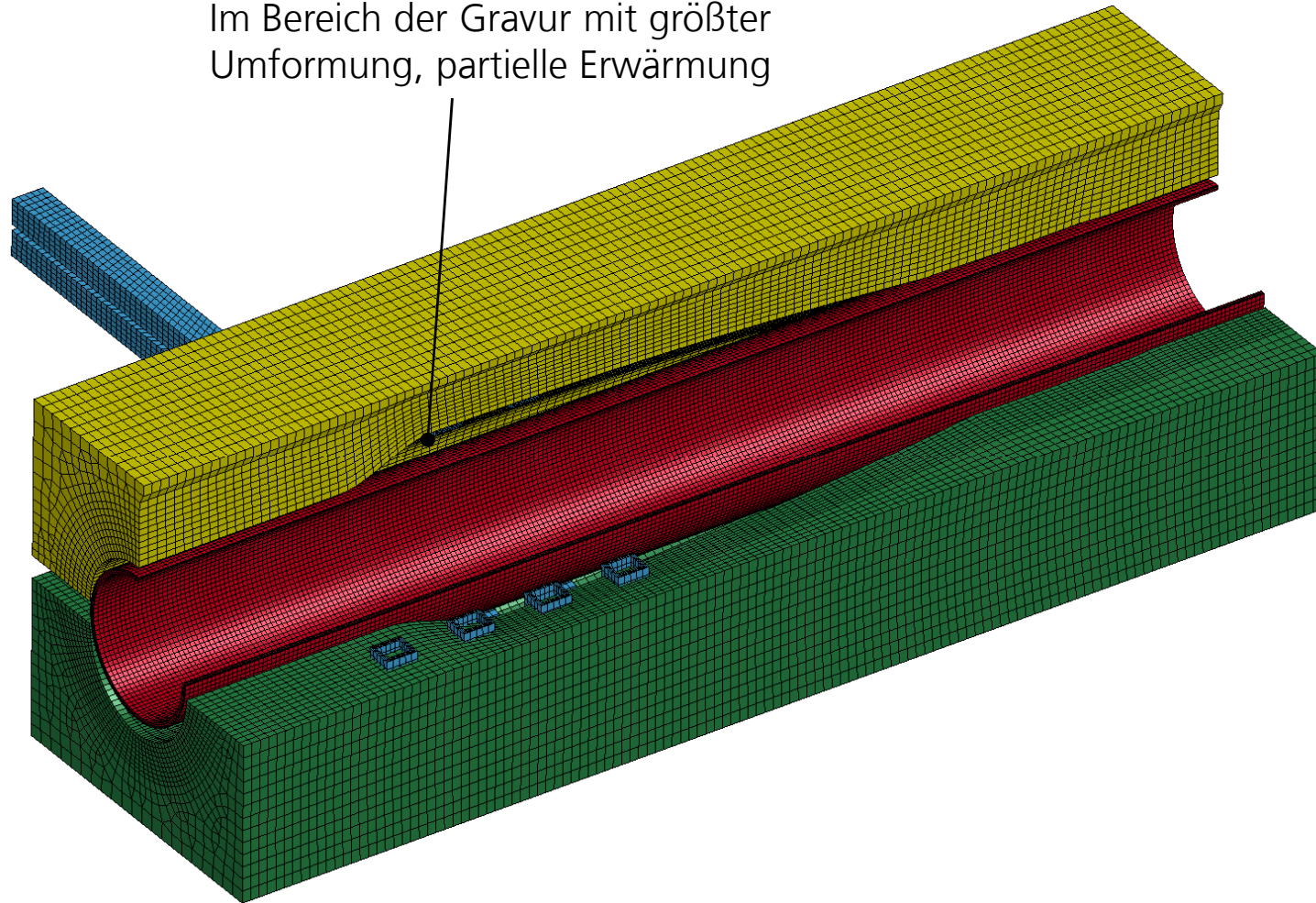
Modellaufbau



C. Scheffler

Modellaufbau

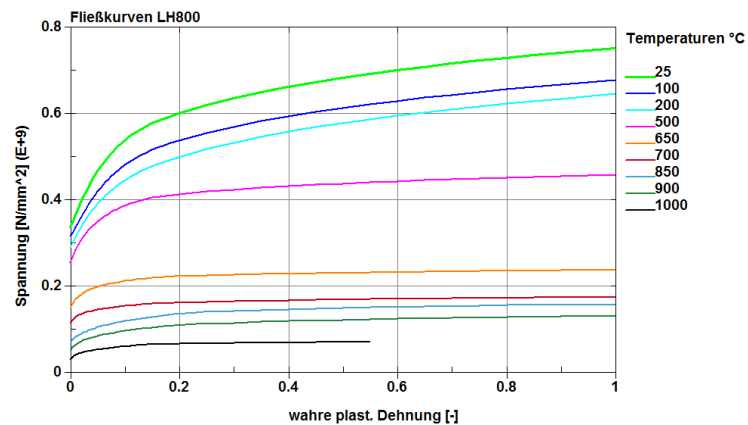
Im Bereich der Gravur mit größter Umformung, partielle Erwärmung



C. Scheffler

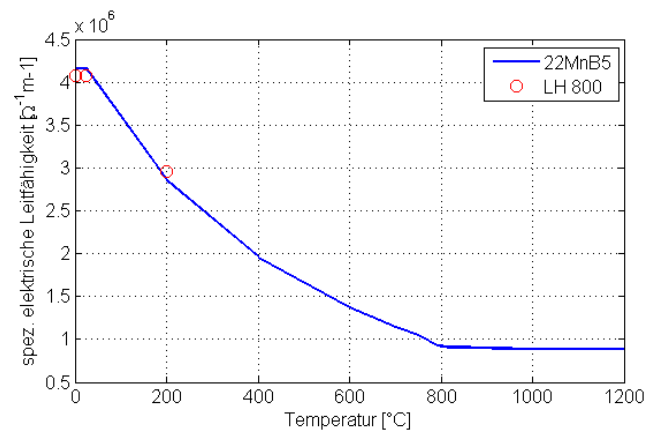
Modellaufbau – Kennwerte

- Temperaturabhängige Fließkurven sind Standard (*MAT_ELASTIC_VISCOPLASTIC_THERMAL)



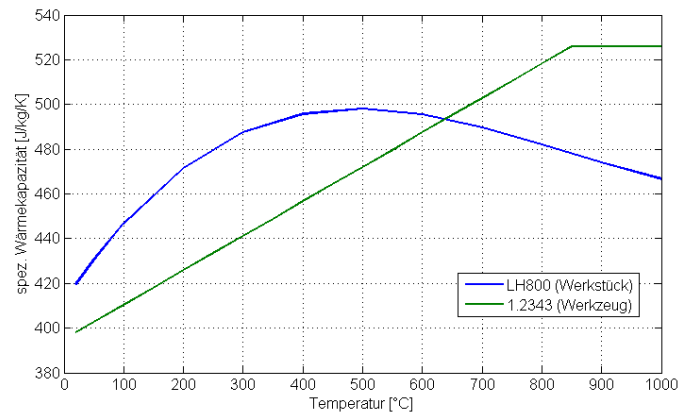
→ hier Möglichkeit der Phasenmodellierung mit *MAT_244

- Elektrische Leitfähigkeit als Funktion der Temperatur $\sigma = \sigma(T)$
*EM_EOS_TABULATED1

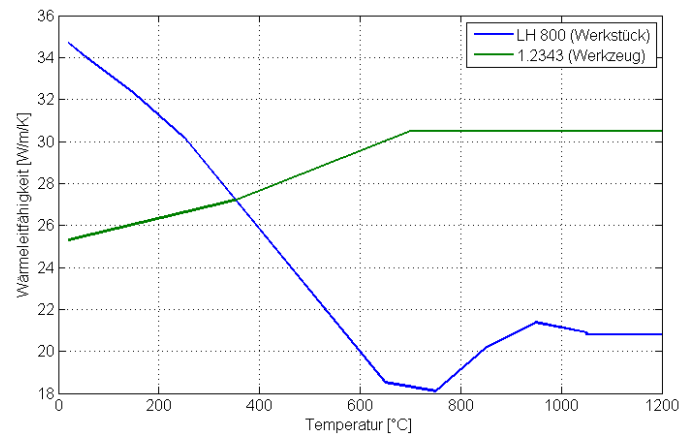


Modellaufbau – Kennwerte

■ Temperaturabhängige spez. Wärmekapazität c_p

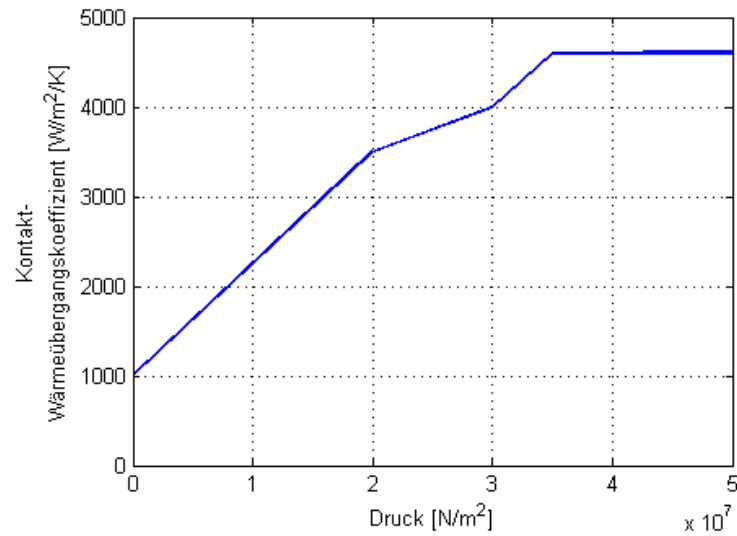


■ Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit k



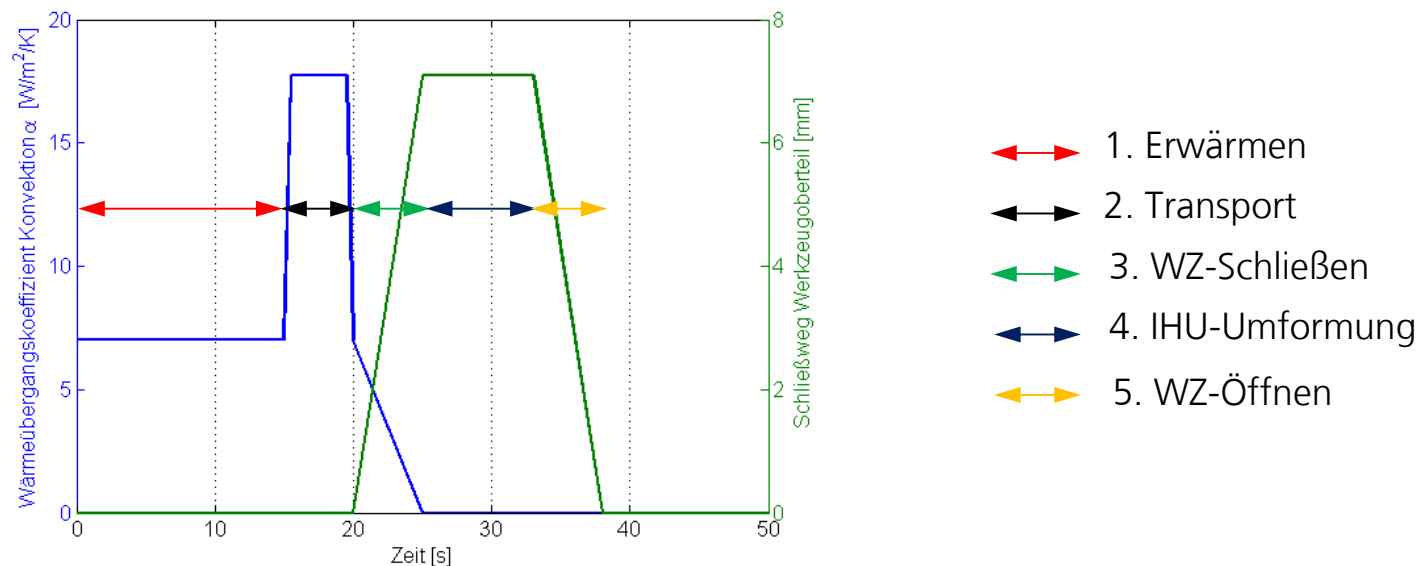
Modellaufbau – Kennwerte

- Kontakt-Wärmeübergangskoeffizient h_c ist druckabhängig definiert



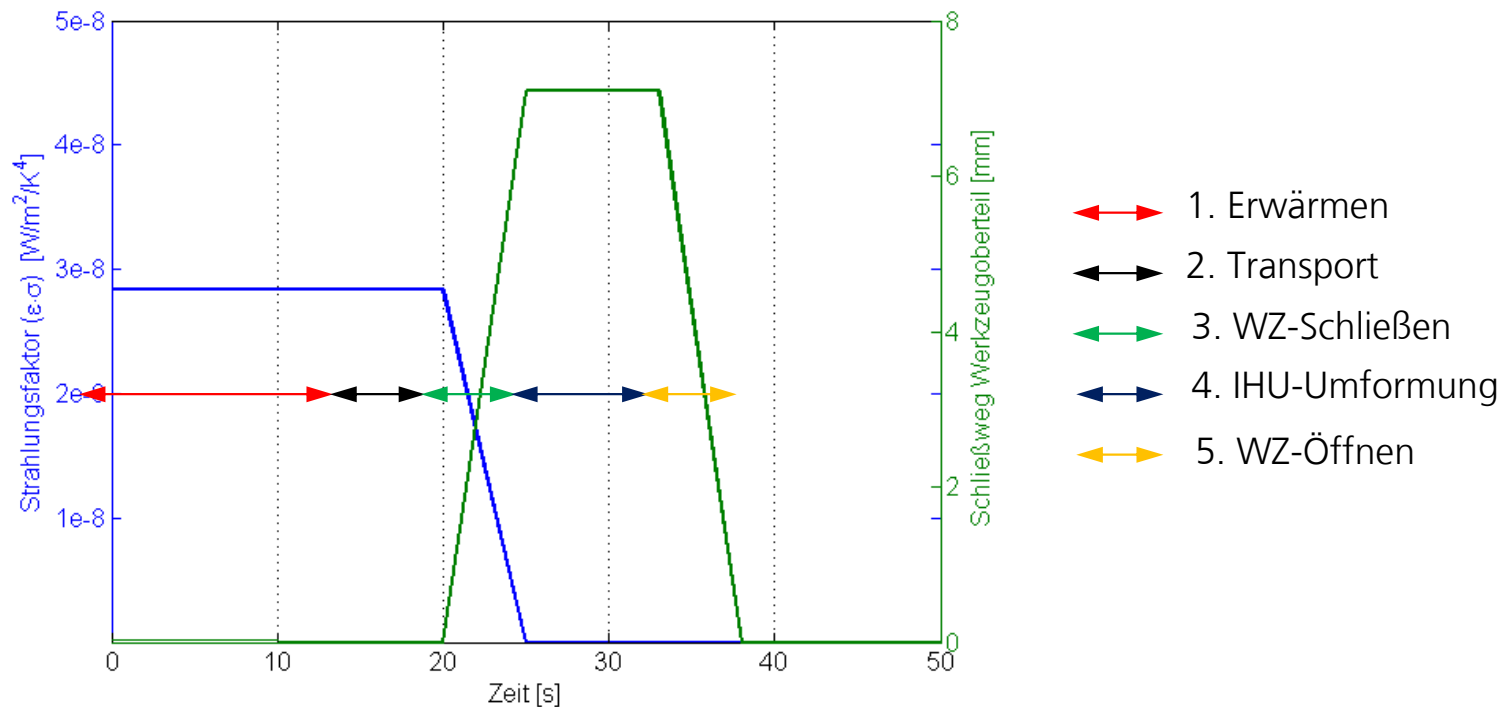
Modellaufbau – Randbedingungen thermisch, mechanisch

- 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

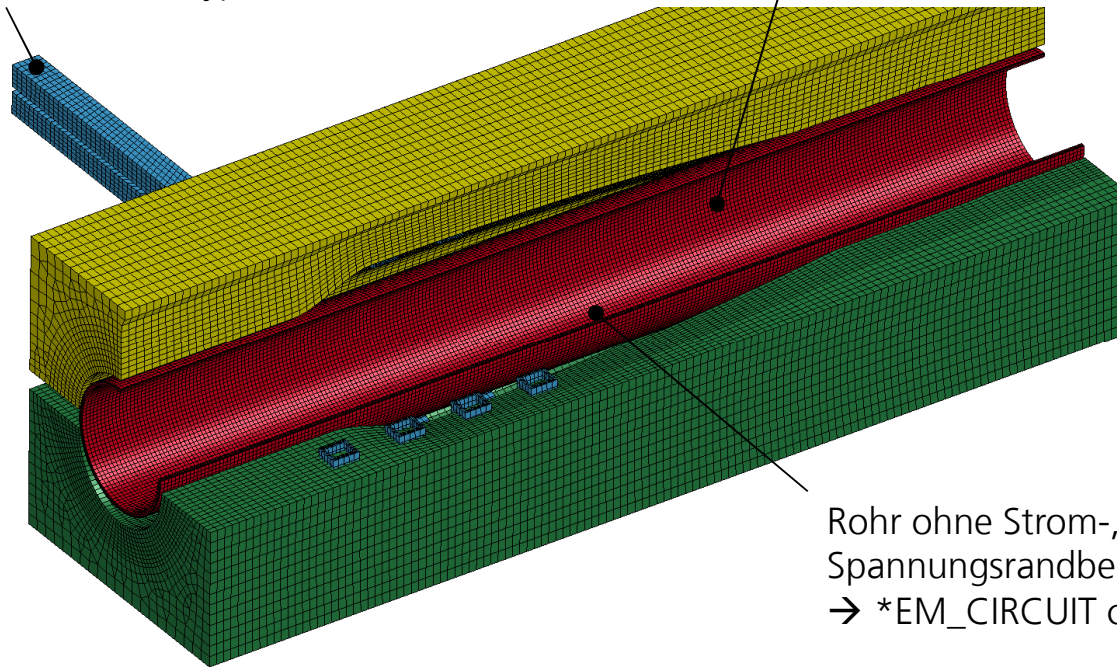


C. Scheffler

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

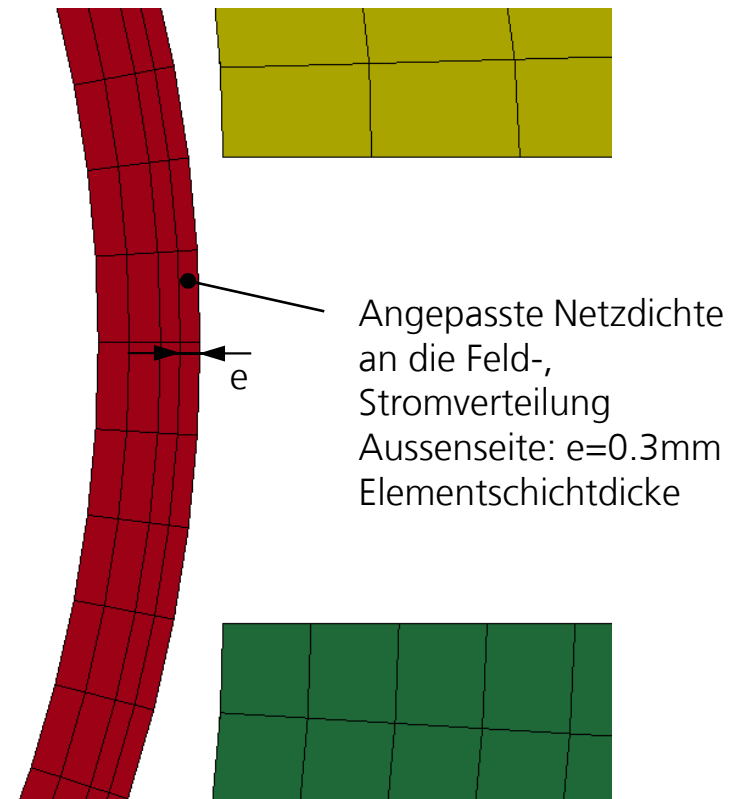


Rohr ohne Strom-,
Spannungsrandbedingung
→ *EM_CIRCUIT circrtp=5

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)



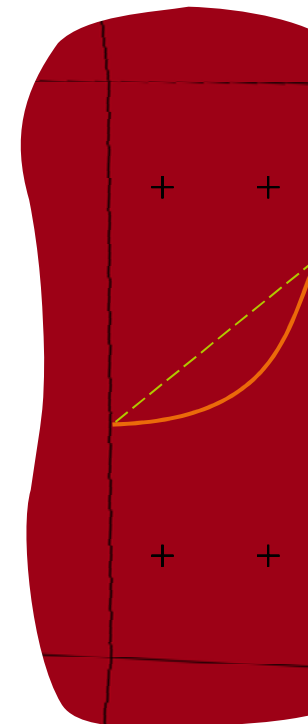
Charakteristische Größen EM-Berechnung

Eindringtiefe

- bei Eindringtiefe δ Feldabfall auf ~37%, aber aufgrund j^2 -Zusammenhang im ohmschen Quellterm $j^2/\sigma\rho$ Absinken der Wirbelstromverluste in dieser Tiefe auf ~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

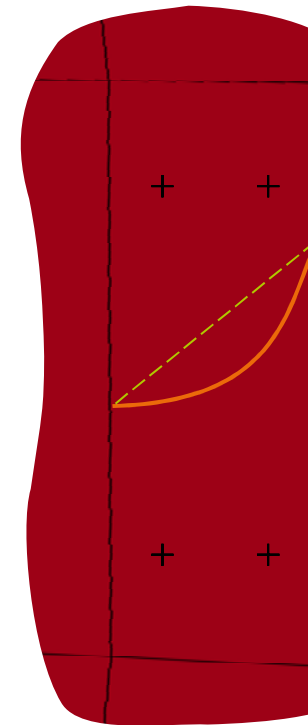
- Fehlberechnung des ohmschen Quellterms $\frac{j^2}{\sigma\rho}$

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

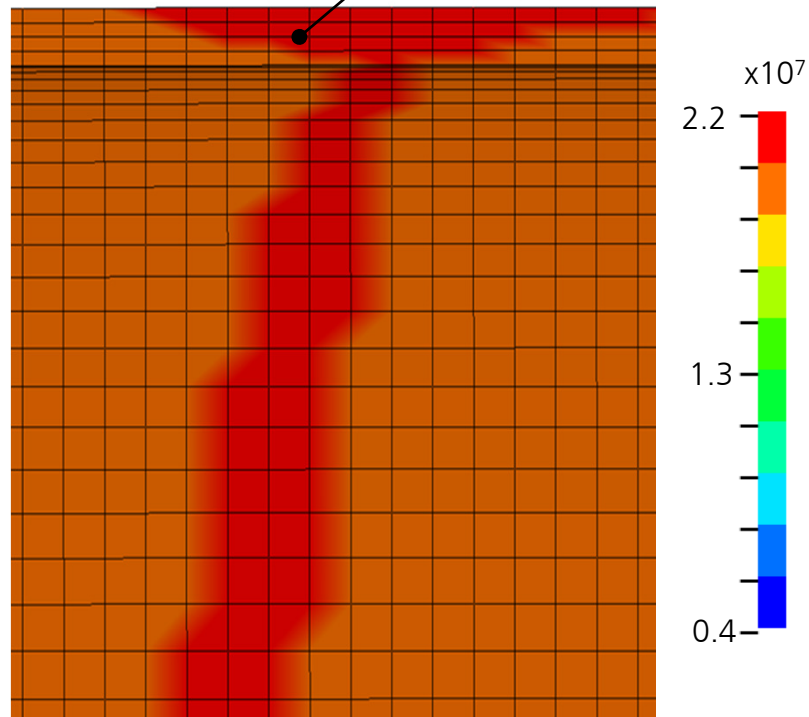


Ergebnisse

Stromdichte j_{sum} über die Wandstärke

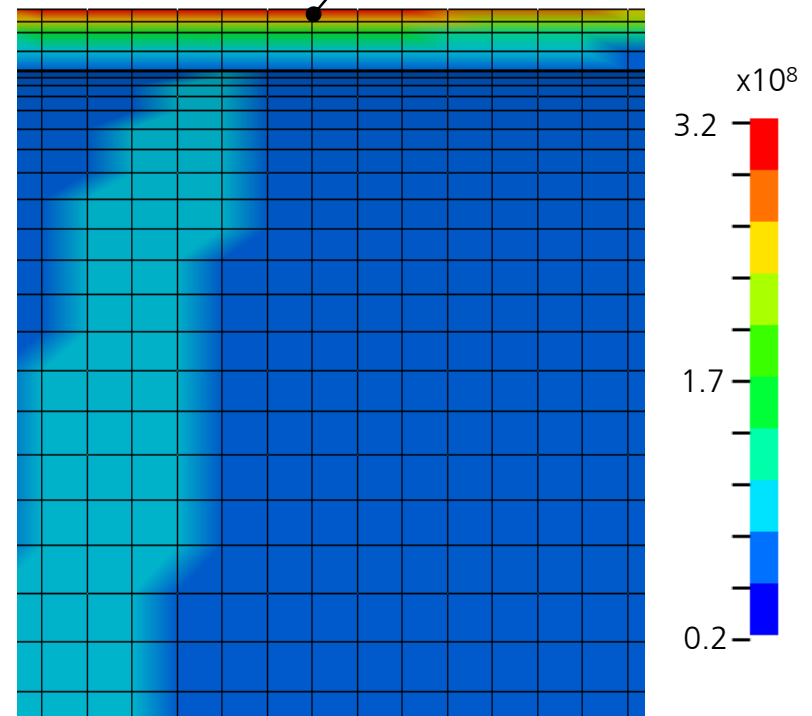
MF - 10kHz

Nur geringer
Stromdichtegradient
über die Wandstärke



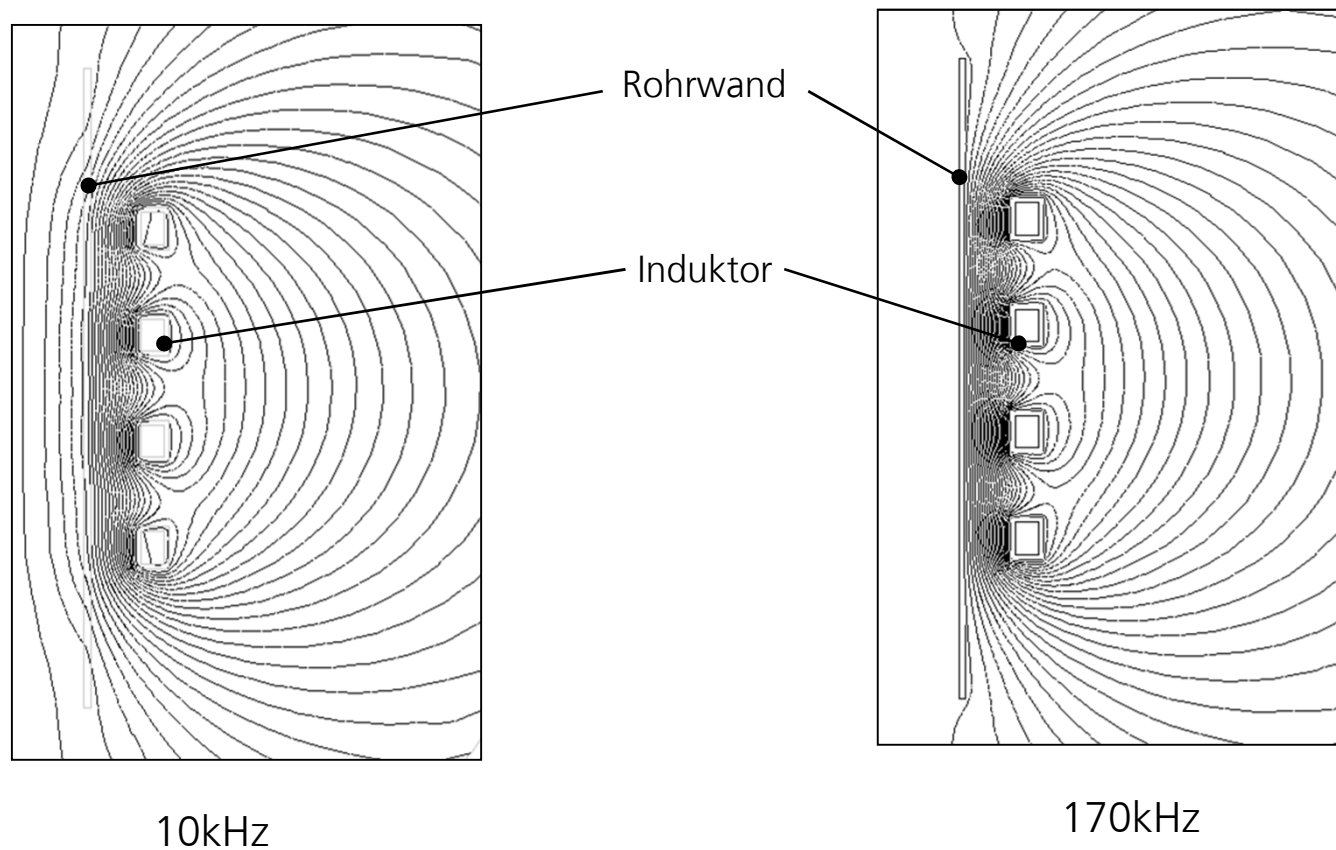
HF - 170kHz

Eindringung nur an
Oberfläche



Ergebnisse - Feldverteilung

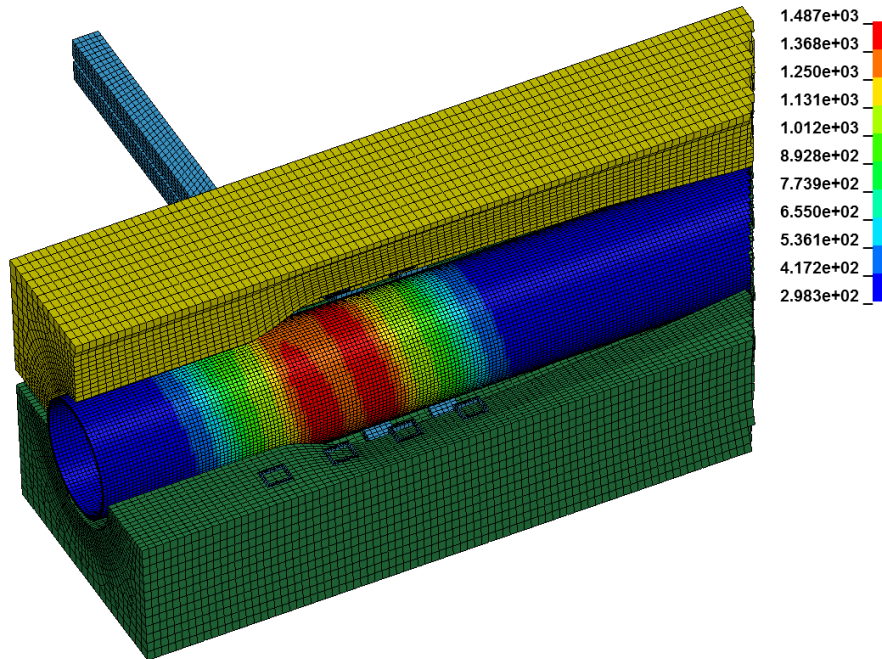
Feldlinien mag. Vektorpotential (ANSYS)



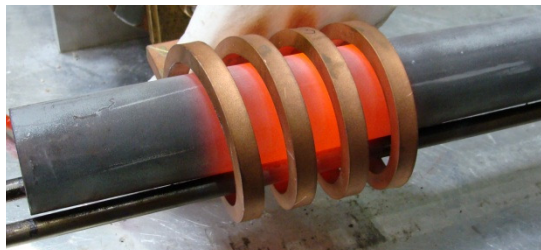
C. Scheffler

Ergebnisse

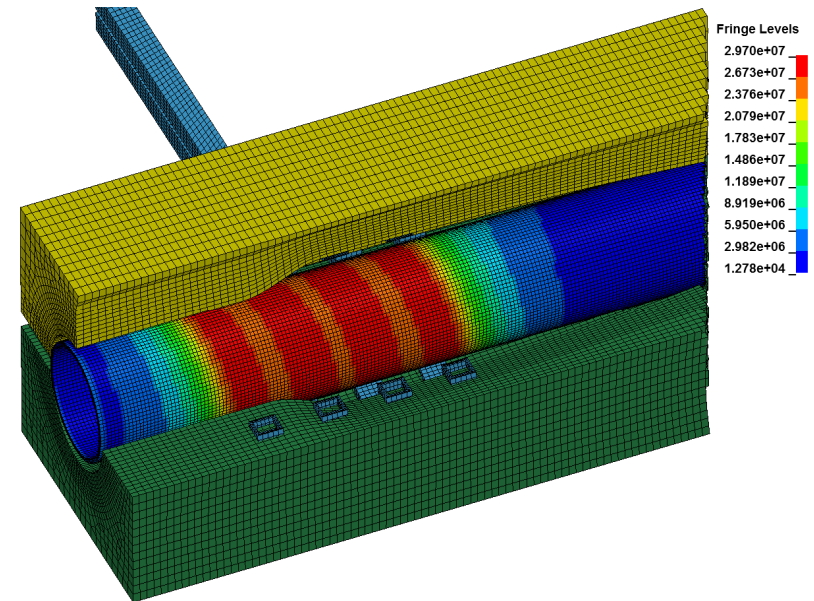
Temperaturfeld [K]



t=15.0s



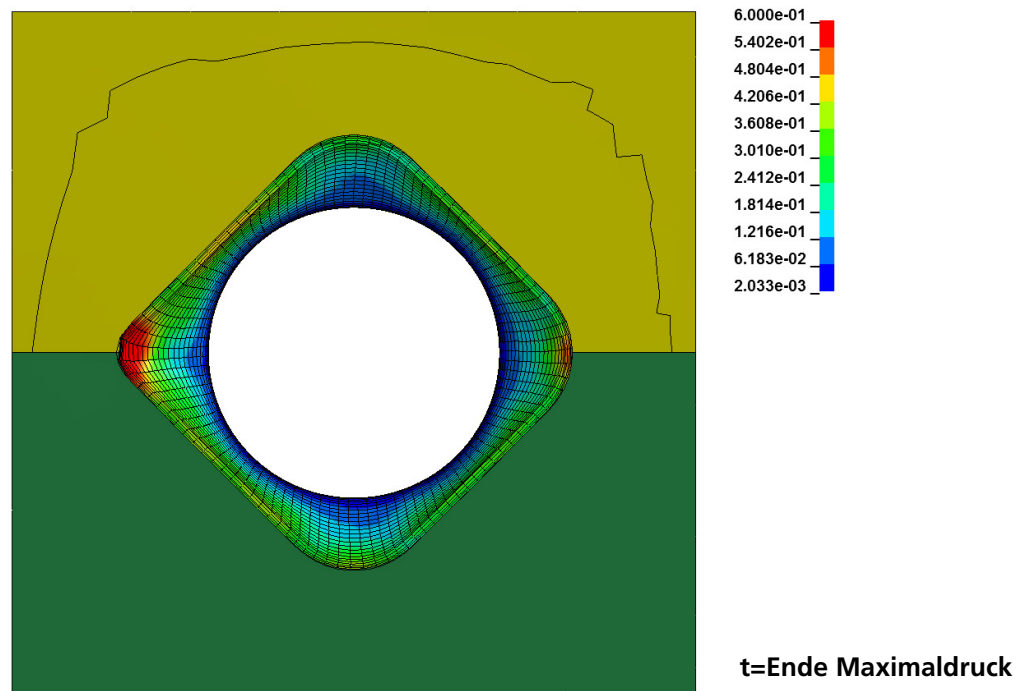
J-Feld [A/m²]



t=15.0s

Ergebnisse

Equivalent Plastic strain [-]



Radienausformbarkeit bei vorhandenem Temperaturfeld und Innendruck okay.

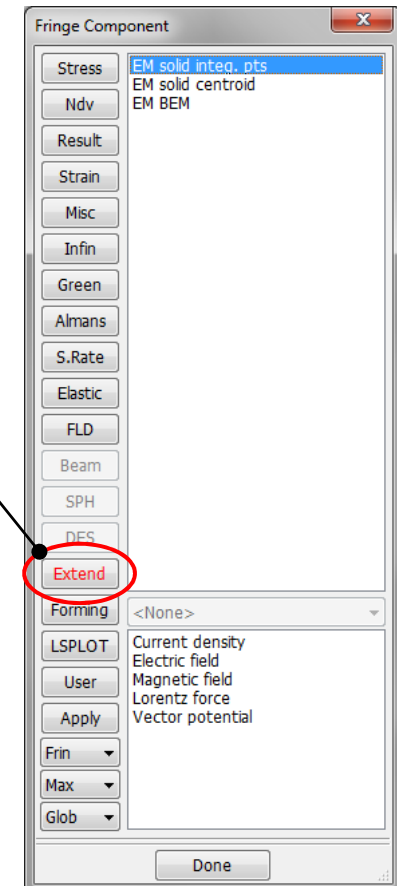
Ergebnisse – Darstellung LS-Prepost

- 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
- 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

EM-Feld Feld-, und skalare Größen

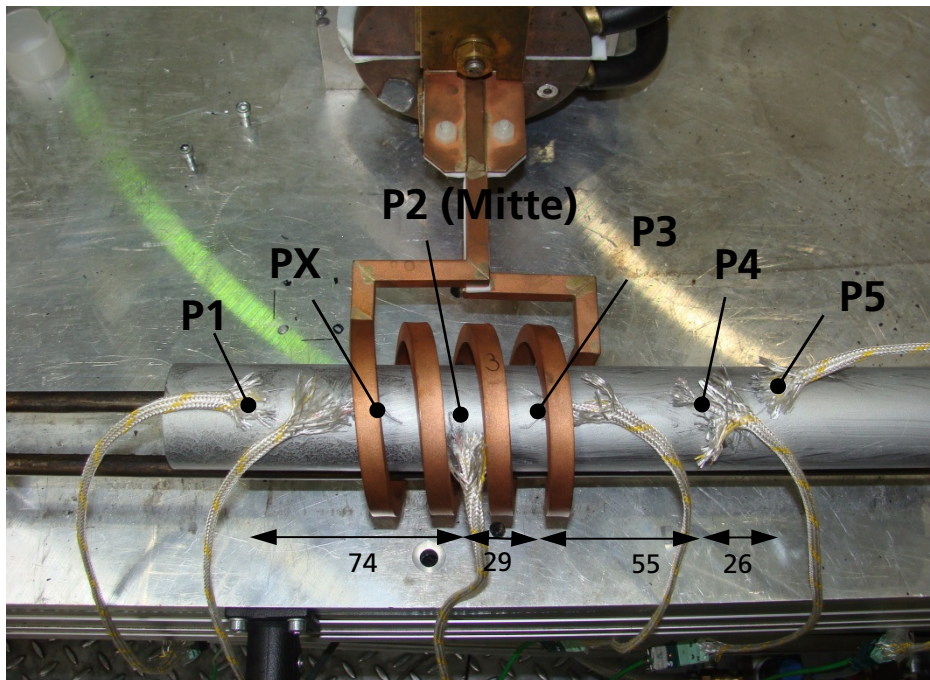


Ergebnisse – Messung Temperatur-Zeit-Verlauf

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

Erwärmungsmessung mit Thermoelement kontinuierlich

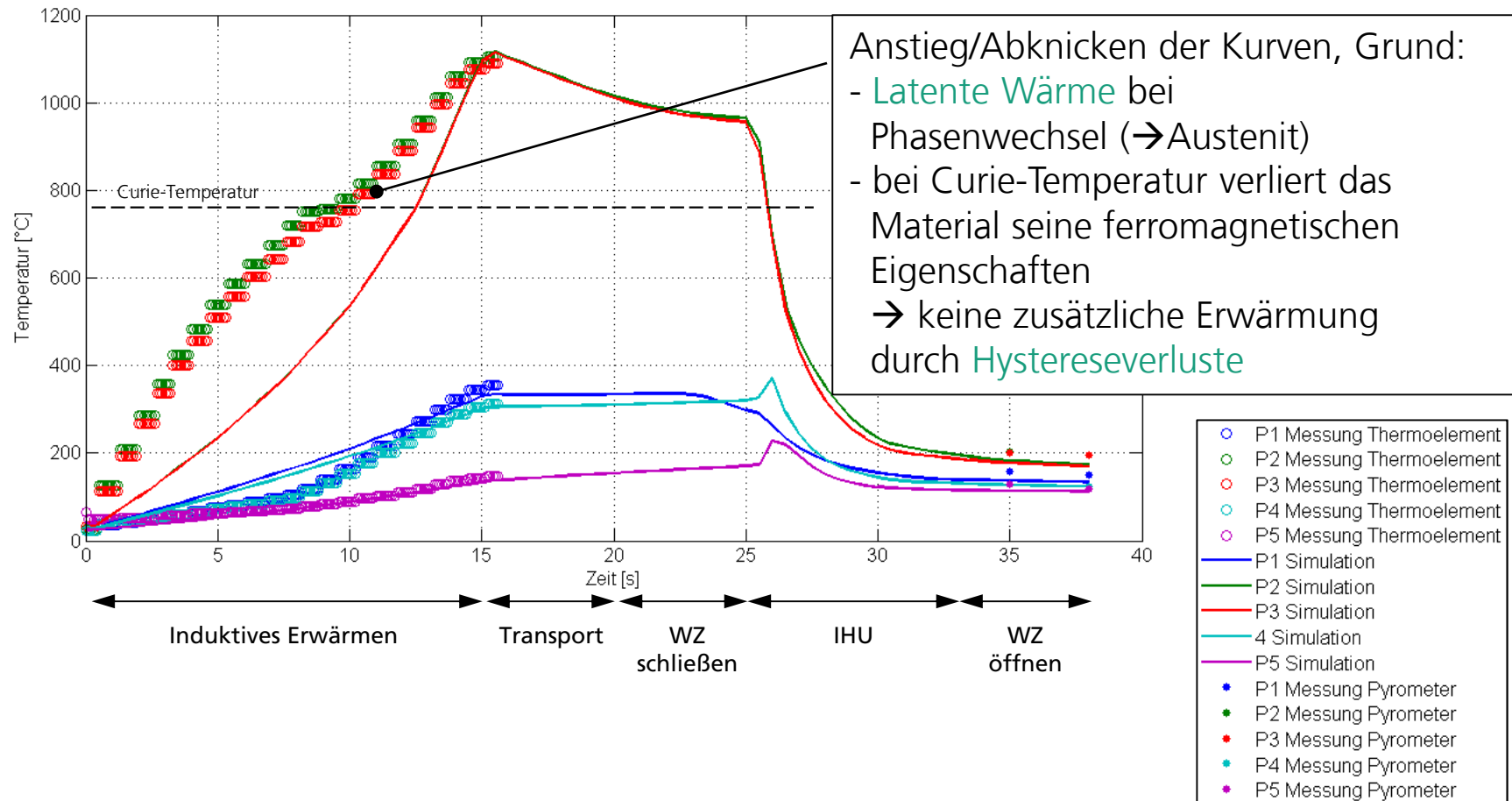
Abkühlungsmessung durch Handpyrometer zu wenigen Zeitpunkten



C. Scheffler

Ergebnisse – Temperatur-Zeit-Verlauf

■ Temperatur-Zeitverlauf an ausgewählten Punkten



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
0.2000E-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
0.4000E-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
...								

Ergebnis:

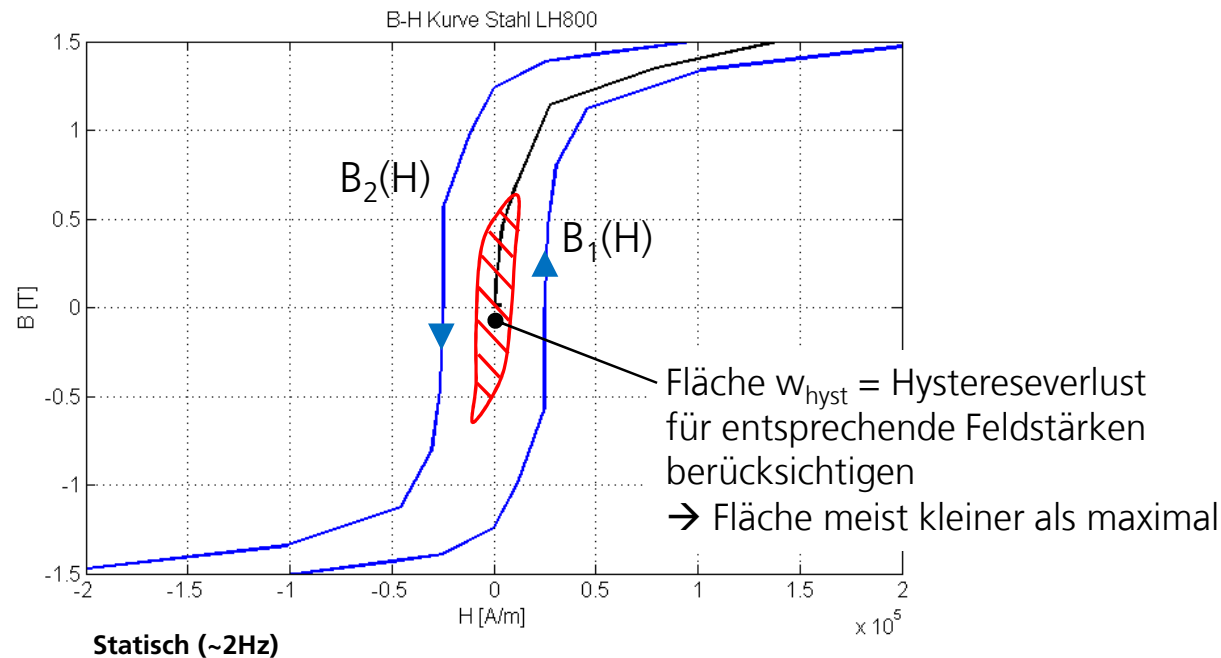
Induktivität 458nH

→ 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 Wärmequellldichte

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

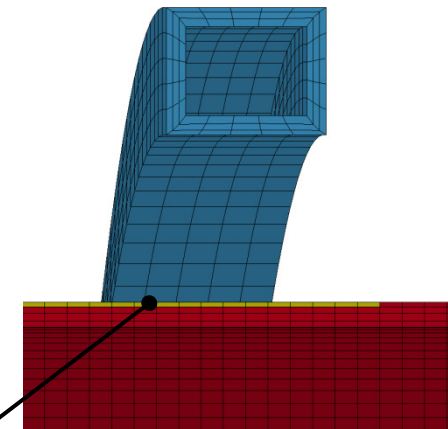
- Erfassbar in LS-DYNA durch Wärmequellterm mit Keyword

*LOAD_HEAT_GENERATION_SET

\$#	sid	lcid	cmult	wblcid	cblcid	tblcid
	2	-101	1.000000	0	0	0

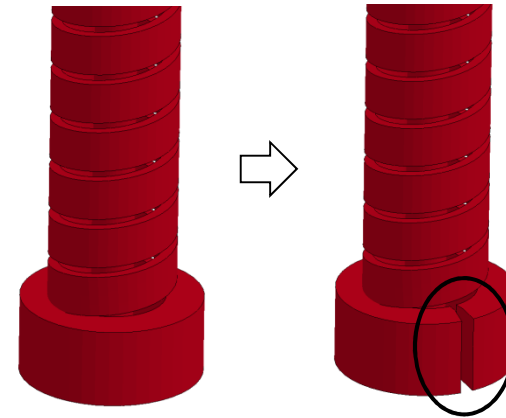
Negative curve id, Wärmequellldichte abhängig von Temperatur definierbar (sinkt auf null oberhalb Curie-Temperatur)

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)

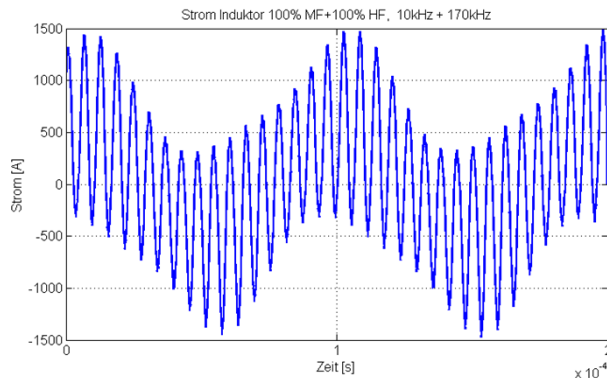


Einschränkungen EM-Solver LS-DYNA

- 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/m3	1	-3	0	1.e6 kg/m3	1.e6 kg/m3
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	$\Omega^{-1}m^{-1}$	0	-2	1	1.e6 $\Omega^{-1}m^{-1}$	1.e3 $\Omega^{-1}m^{-1}$

Ende Präsentation

Ende Präsentation