

Inhalt der Vorlesung

Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse



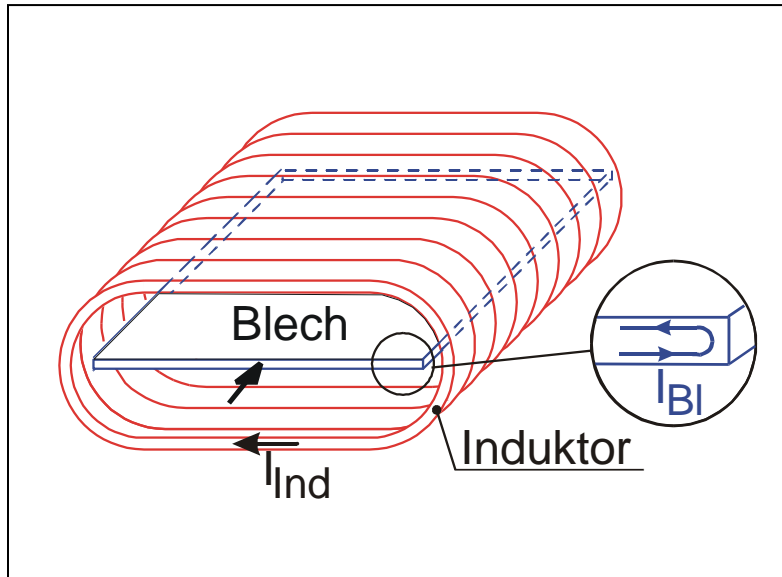
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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
Querfeld, Randschichthärten, Zweifrequenz, HFI
7. Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



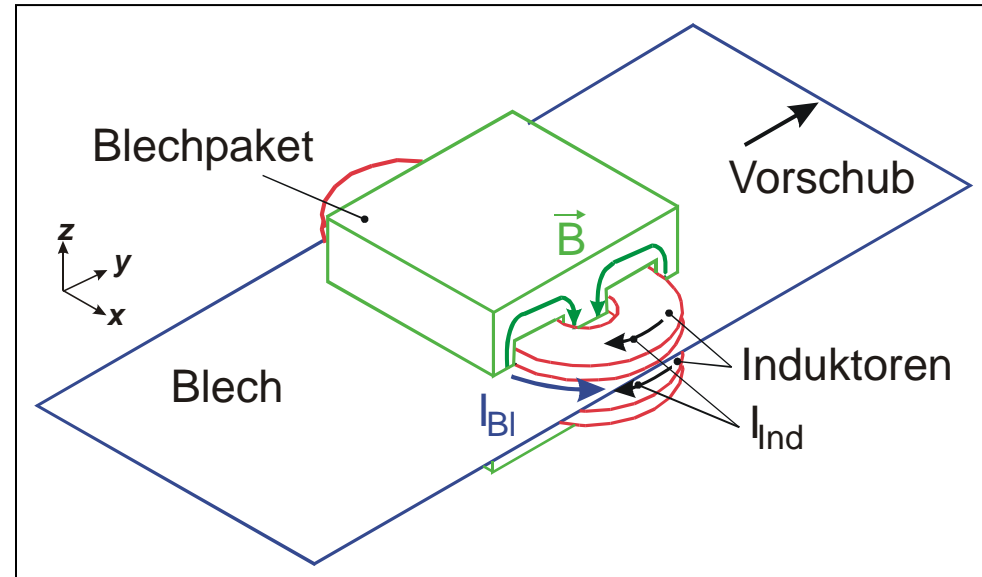
Induktives Erwärmen - Flachgut

Induktive Längsfelderwärmung



- Magn. Fluss parallel zum Vorschub
- Sehr hohe Frequenzen
- Variable Temperaturgestaltung nicht möglich

Induktive Querfelderwärmung



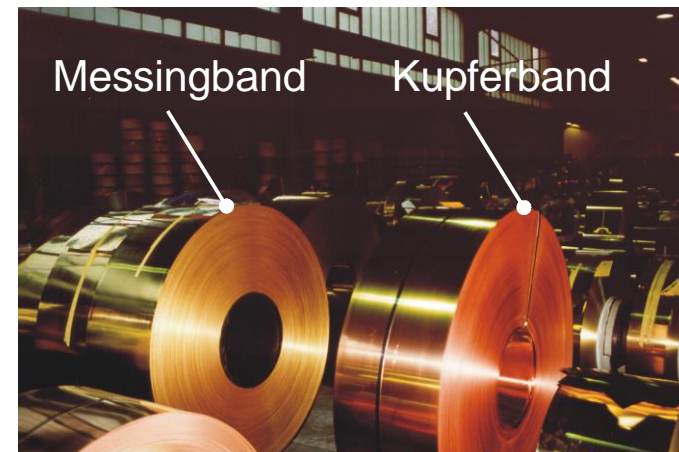
- Magn. Fluss senkrecht zum Vorschub
- Geringe Betriebsfrequenz
- Temperaturgestaltung über Induktorgeometrie und Frequenz möglich

Einsatzgebiete

- **Wärmebehandlung**
z. B. Härten, Glühen
- **Erwärmen zum Umformen**
z. B. Warmformen, Walzen
- **Erwärmen zum Beschichten**
z. B. Galvanisieren, Lackieren, Färben
- **Sonstige**
z. B. Trocknen, Säubern, Schneiden

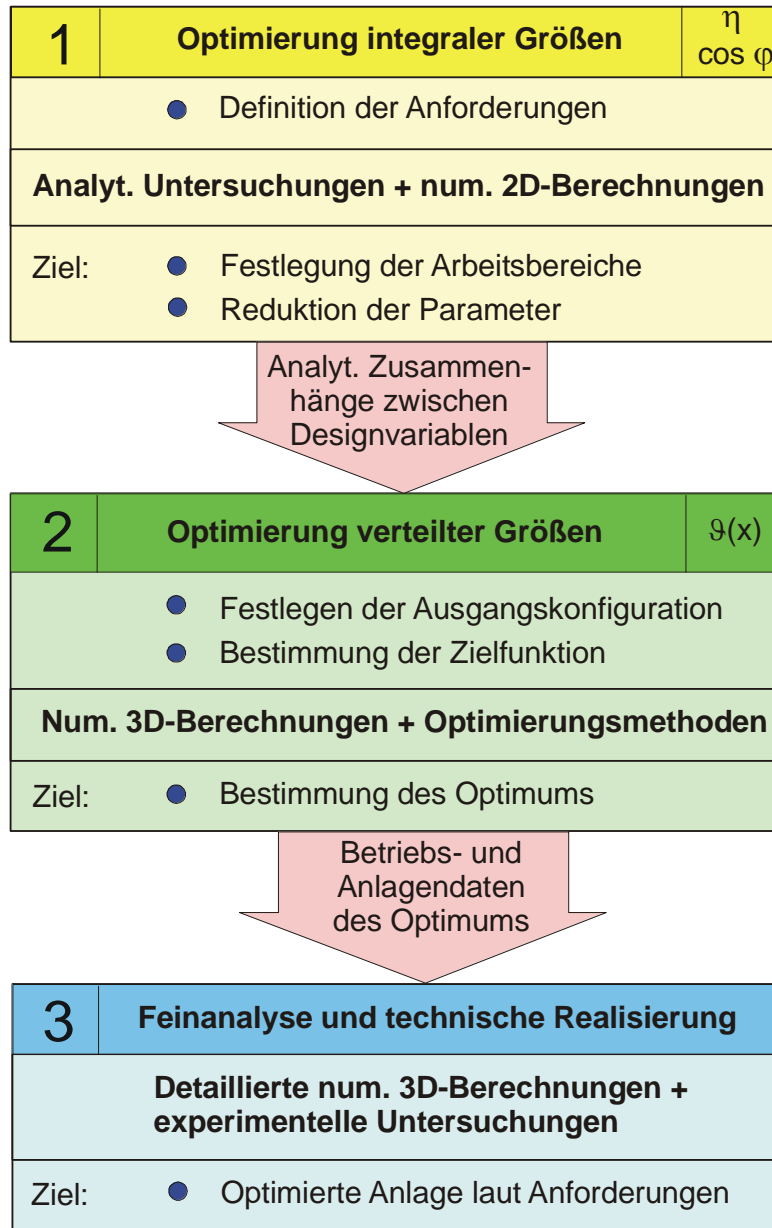
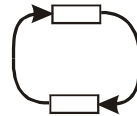
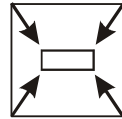
Materialien

- NE-Metalle



- Stahl

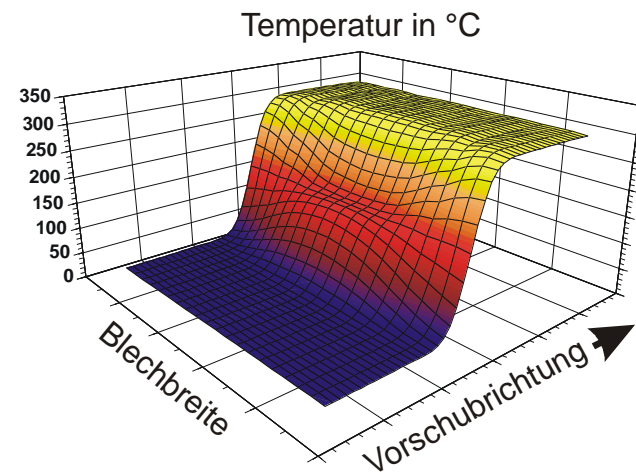
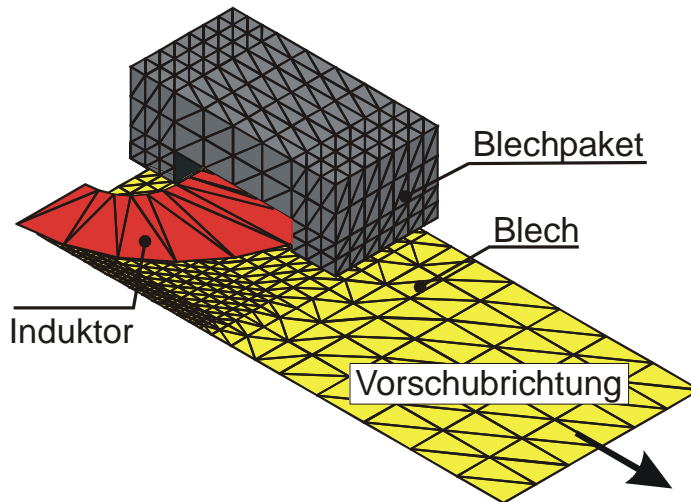
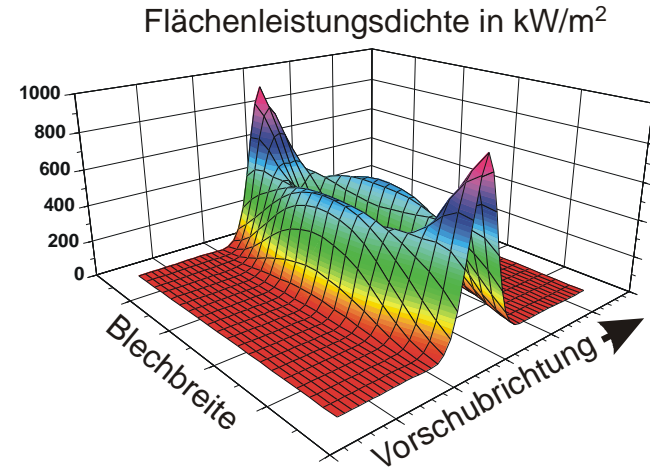
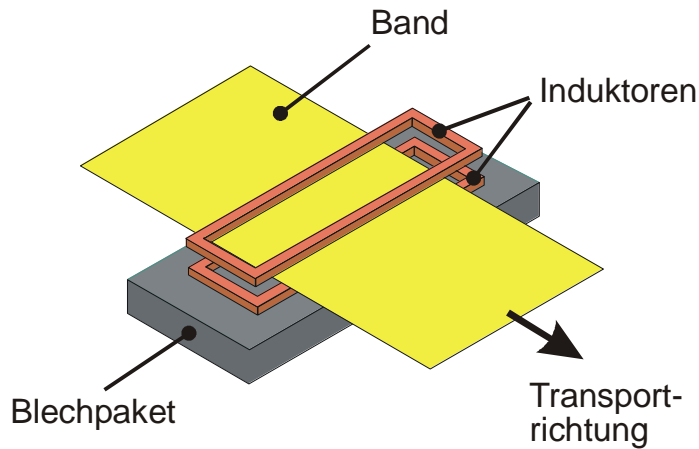
Konzept der Auslegung



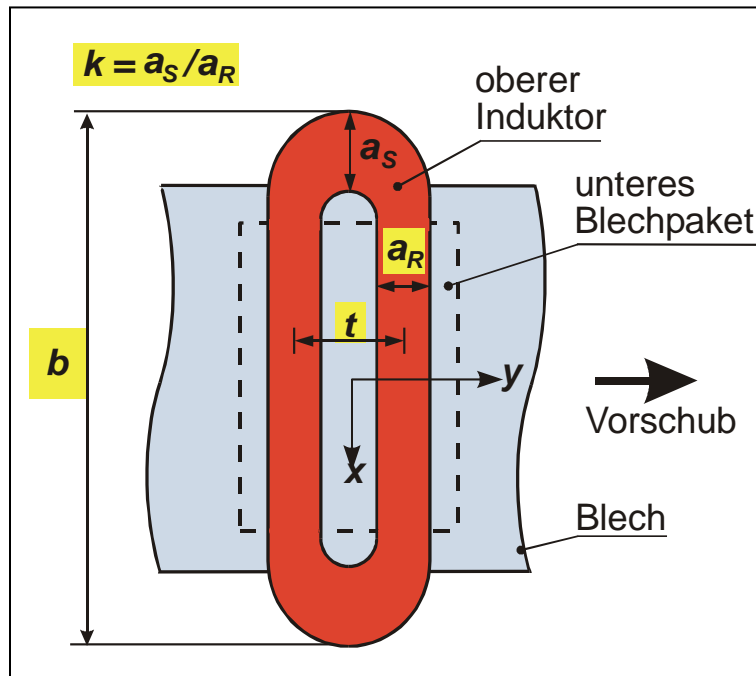
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Induktive Querfeld-Banderwärmung



Optimierung verteilter Größen



Designvariablen	Grenzen	Ergebnis
Induktorlänge b	350 mm - 600 mm	462 mm
Leiterbreite a_R	32 mm - 160 mm	122 mm
Spulenkopffaktor k	0,3 - 1,5	0,6
Polbreite t	80 mm - 300 mm	220 mm
(Frequenz $f = f_{opt}$)	190 Hz - 700 Hz	255 Hz)

Minimum der Zielfunktion:



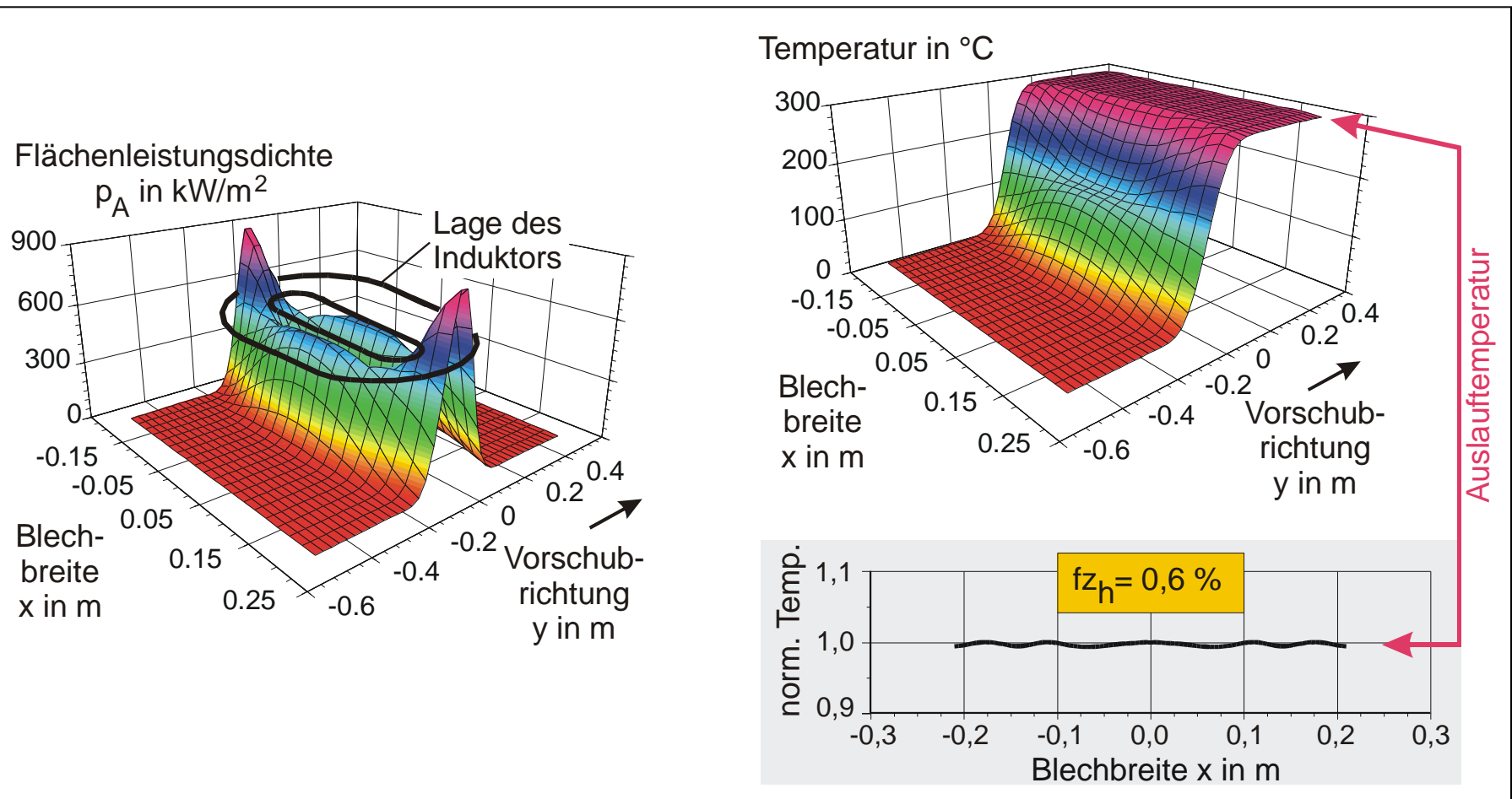
$$fz_h = 0,6 \%$$

mit

$$\eta_{el} = 94,4 \%$$

$$\cos \varphi = 0,79$$

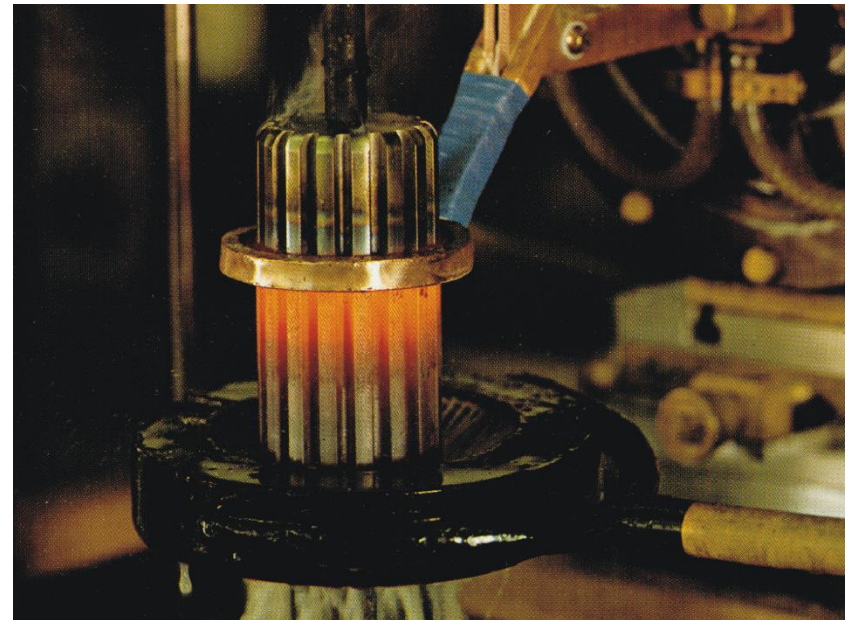
Ergebnis der Temperaturoptimierung



Induktive Randschichthärtung

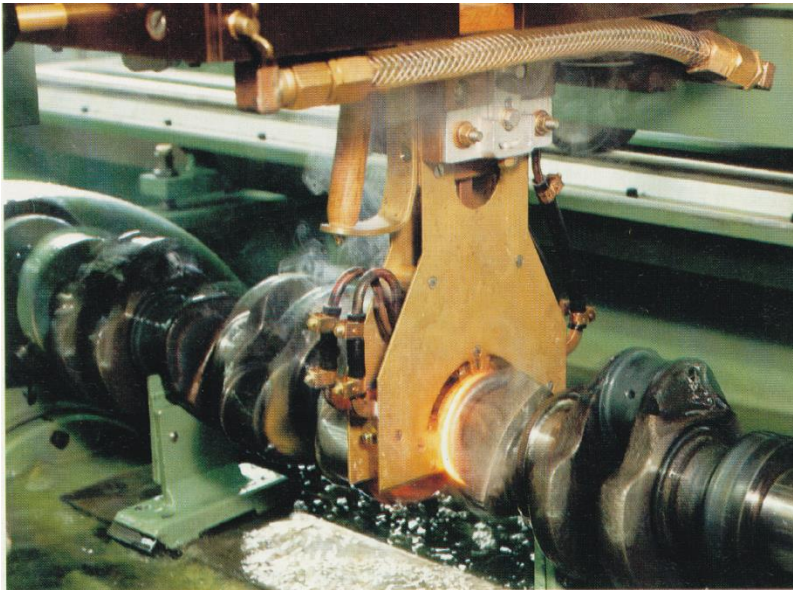
- Qualitätssteigerung von Bau- und Konstruktionsteilen
- Sehr schnelles Erwärmen und sofortiges Abschrecken
- Erwärmungstiefe gezielt beeinflussbar über:
 - Frequenz
 - elektrische Leistung
 - Einwirkzeit

Induktionshärteanlage mit Induktor, Brause und Werkstück

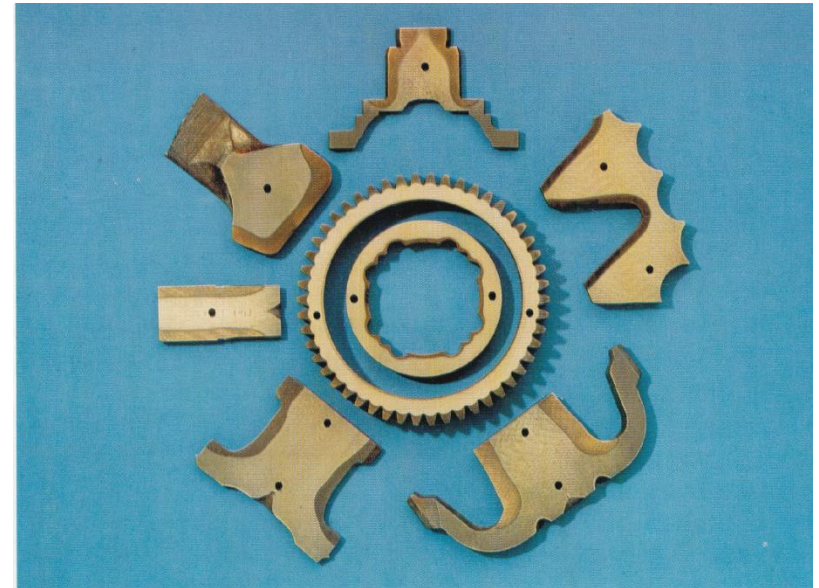


Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

Induktives Härten einer Kurbelwelle



Schliffbilder verschiedener induktiv gehärteter Teile

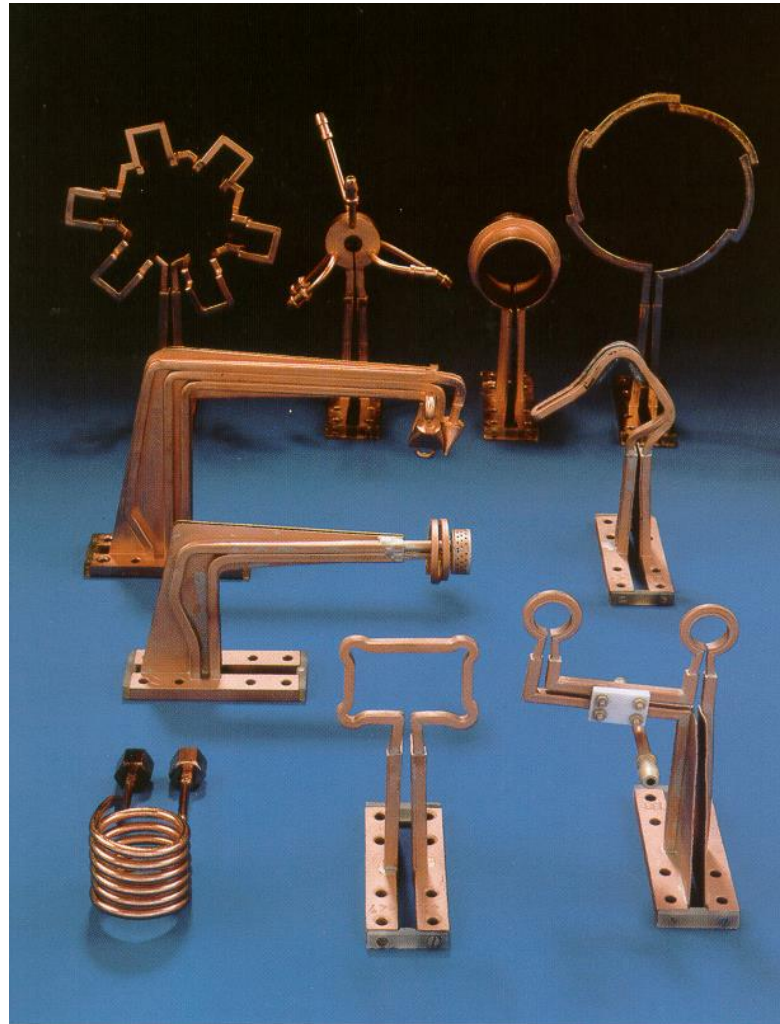


Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

Induktoren für induktives Härten



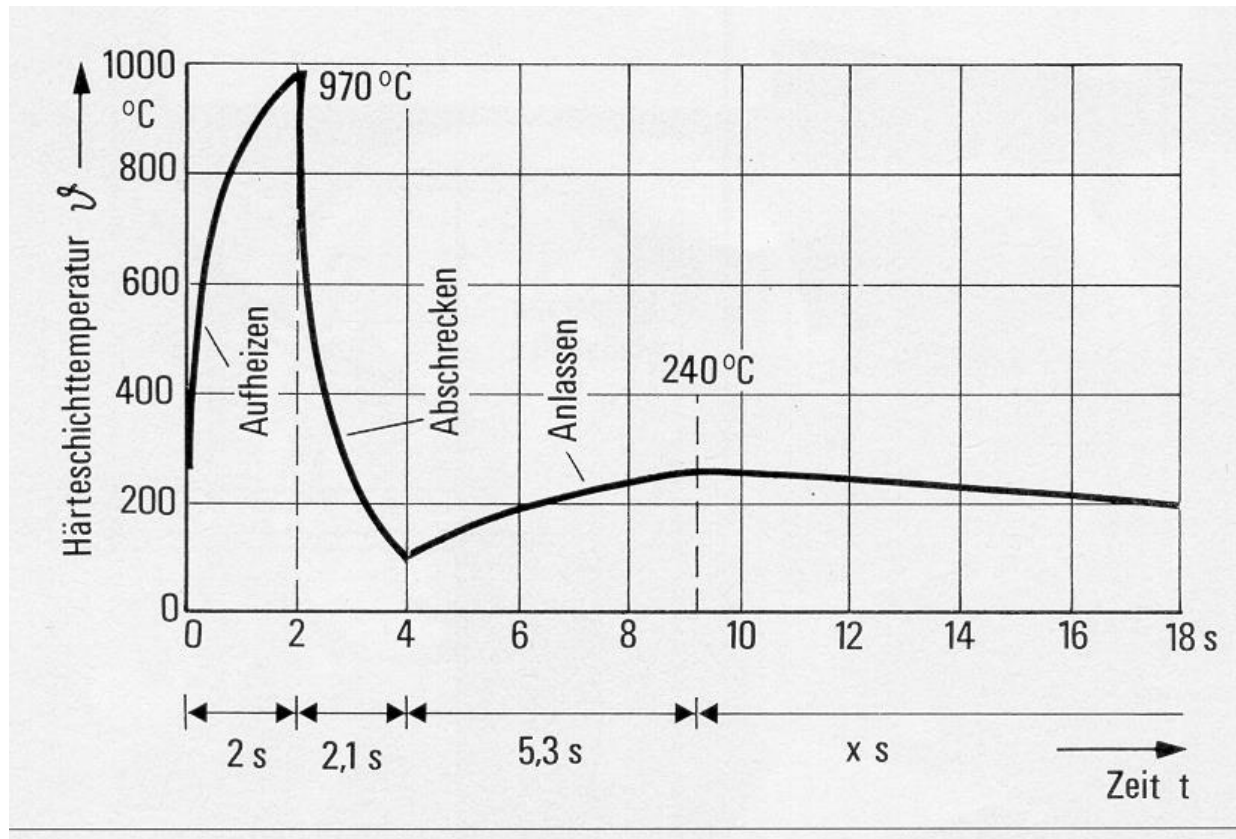
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: STEREMAT Elektrowärme GmbH



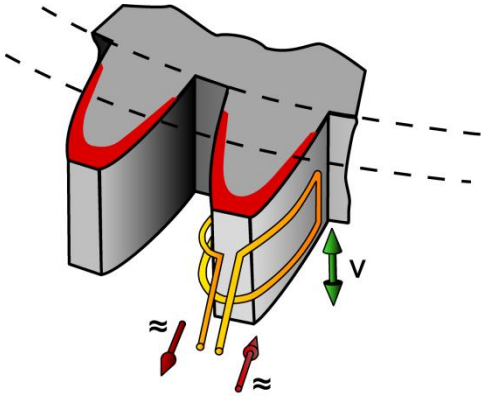
Temperatur-Zeit-Diagramm eines Induktionshärteprozesses



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

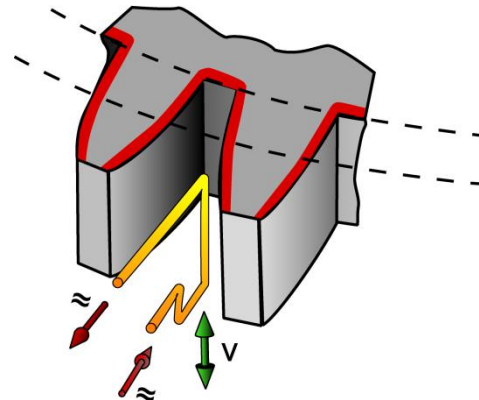
Induktive Zahnradhärteverfahren

Einzelzahnflankenhärtung



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

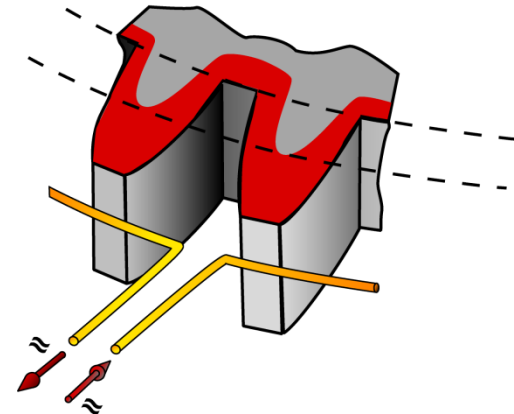
Einzelzahnlückenhärtung



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

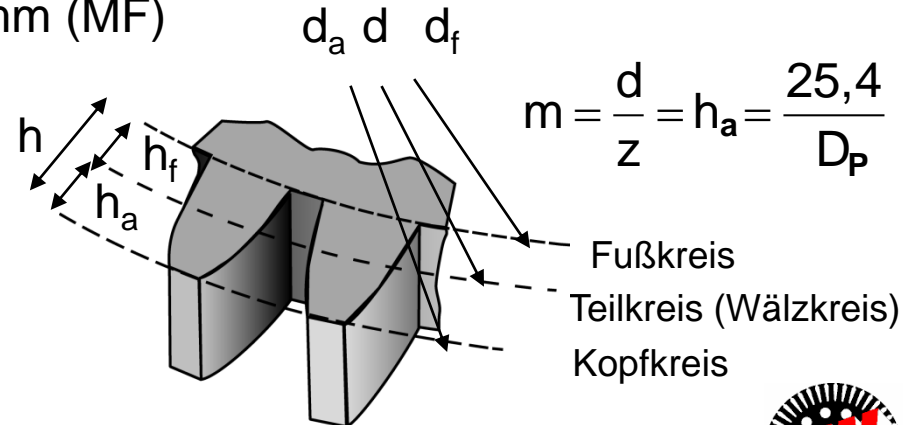
$m \geq 6,0 \text{ mm (MF)}$

Allzahnhardtung



$m \geq 2,0 \text{ mm}$

- m Modul (mm)
- p Teilung
- d Teilkreisdurchmesser (mm)
- d_a Kopfkreisdurchmesser (mm)
- d_f Fußkreisdurchmesser (mm)
- z Zähnezahl
- h_a Zahnkopfhöhe (mm)
- h_f Zahnfußhöhe (mm)
- h Zahnhöhe (mm)
- m_n Normalmodul (Schrägverzahnung) (mm)
- m_t Stirnmodul (Schrägverzahnung) (mm)
- D_p Diametral Pitch (Zoll)

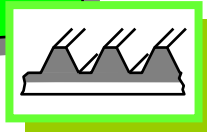


$$m = \frac{d}{z} = h_a = \frac{25,4}{D_p}$$

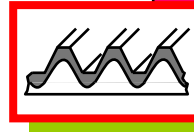
Allzahnhärteverfahren

Induktionsverfahren für Allzahnhärtung

Durchhärtung
der Verzahnung



konturähnliche bzw.
konturtreue Härtung
der Verzahnung



Einfrequenzverfahren

mit Vorwärmen

mit „Vergüten“

Mehrfrequenzverfahren

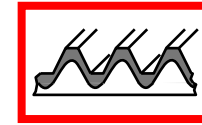
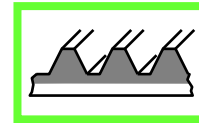
separat

mit Vorwärmen

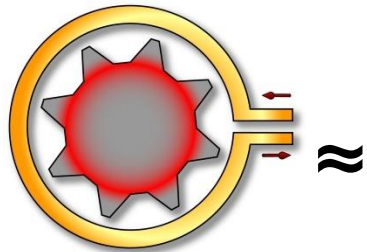
mit „Vergüten“

simultane
Frequenzen

Frequenzeinfluss



niedrige Frequenz
⇒ Erwärmung im Fußkreis



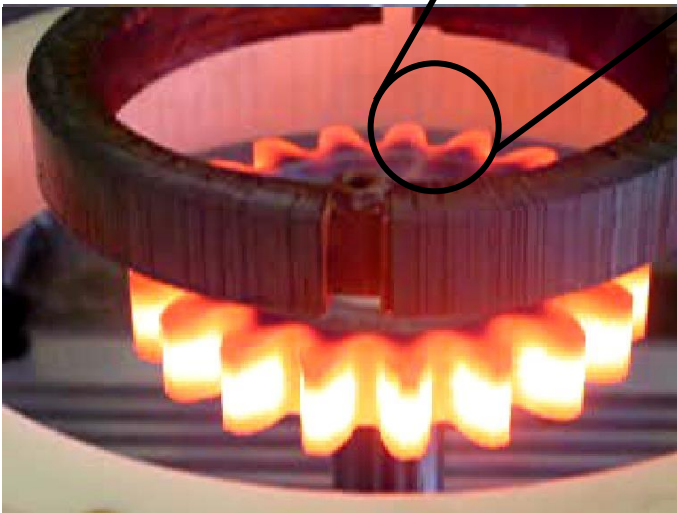
8 kHz

$$\delta \approx 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

hohe Frequenz
⇒ Erwärmung der Zahnsitzen



17 kHz



Stirrad geradeverzahnt

Kopfkreis: 170 mm

Breite: 30 mm

Modul: 9,0 mm

Werkstoff: Cf53

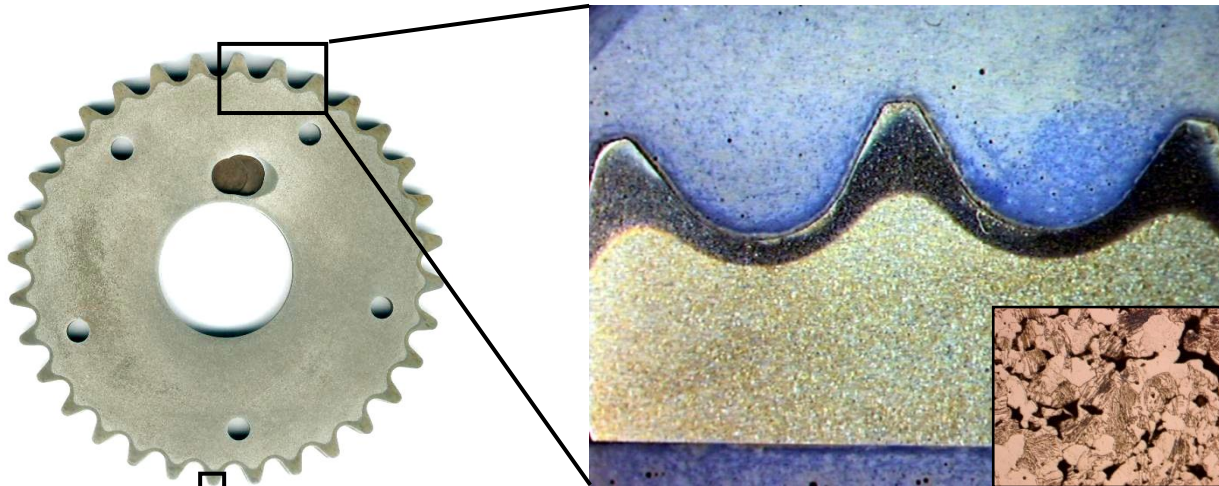
Leistung: ca. 200 kW



Kettenrad aus Sinterstahl



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Kettenrad

Kopfkreis: 99 mm
Modul: 3,0
Werkstoff: Sinter D11

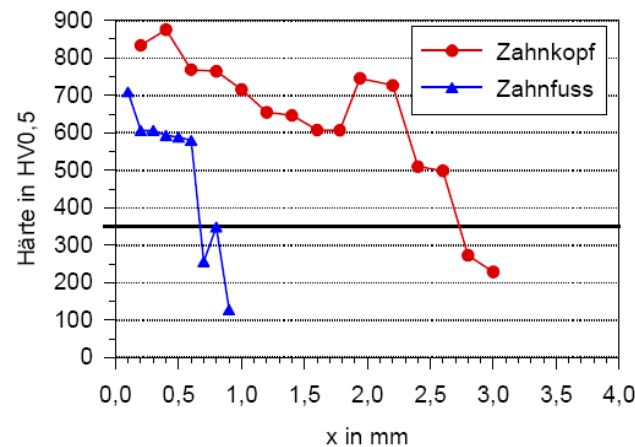
Vorwärmen

Leistung: 34 kW
Frequenz: 132 kHz
Dauer: 0,8 s

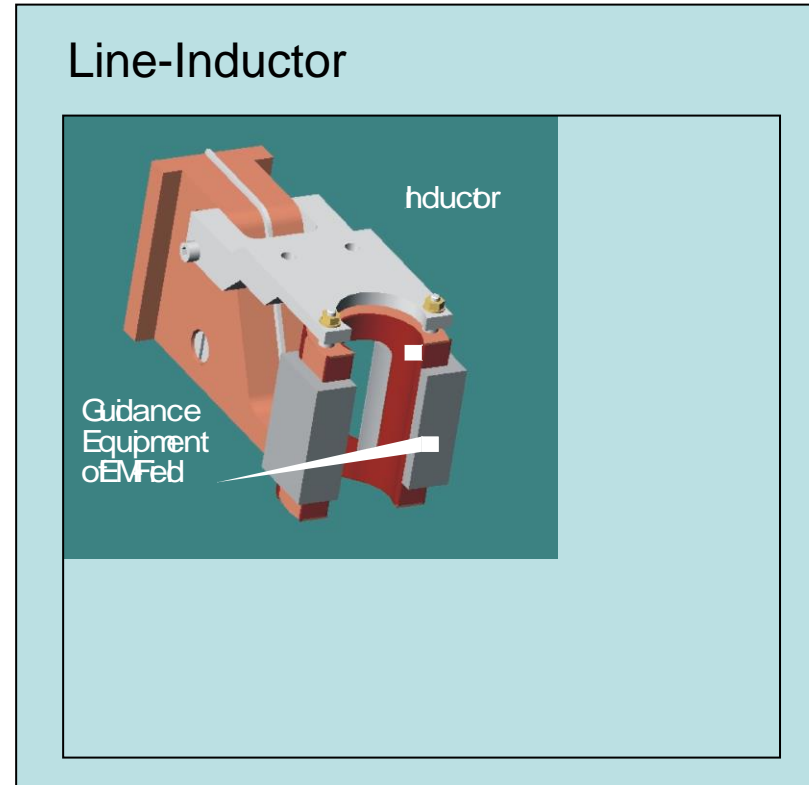
Pause

Härten

Leistung: 145 kW
Frequenz: 132 kHz
Dauer: 0,25 s

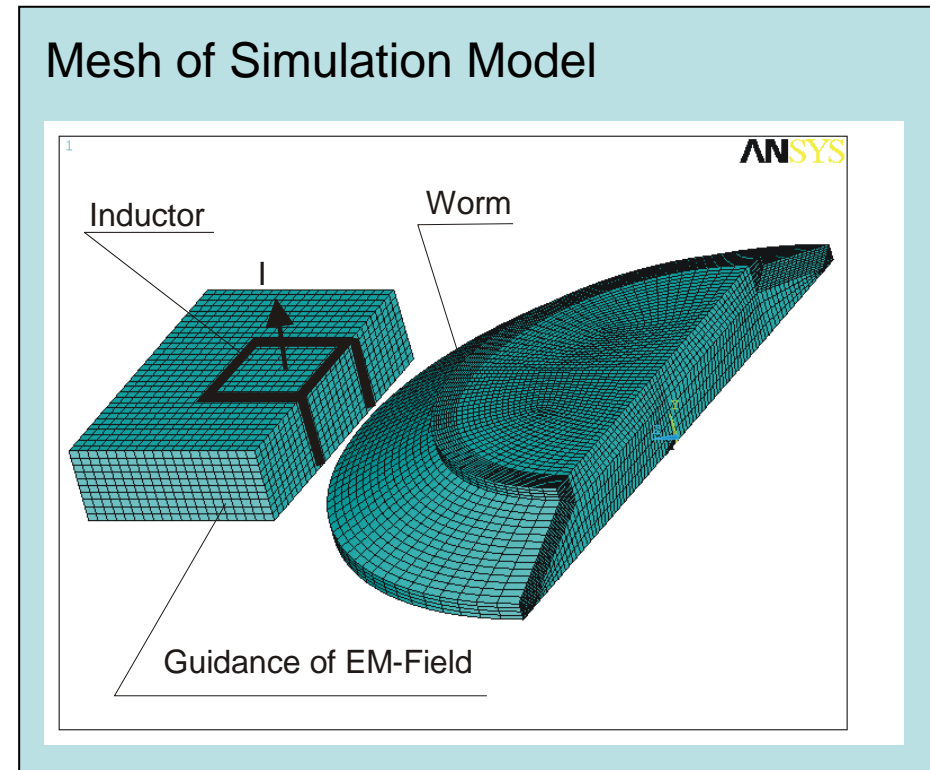


Induktives Randschichthärten von Getriebeschnecken



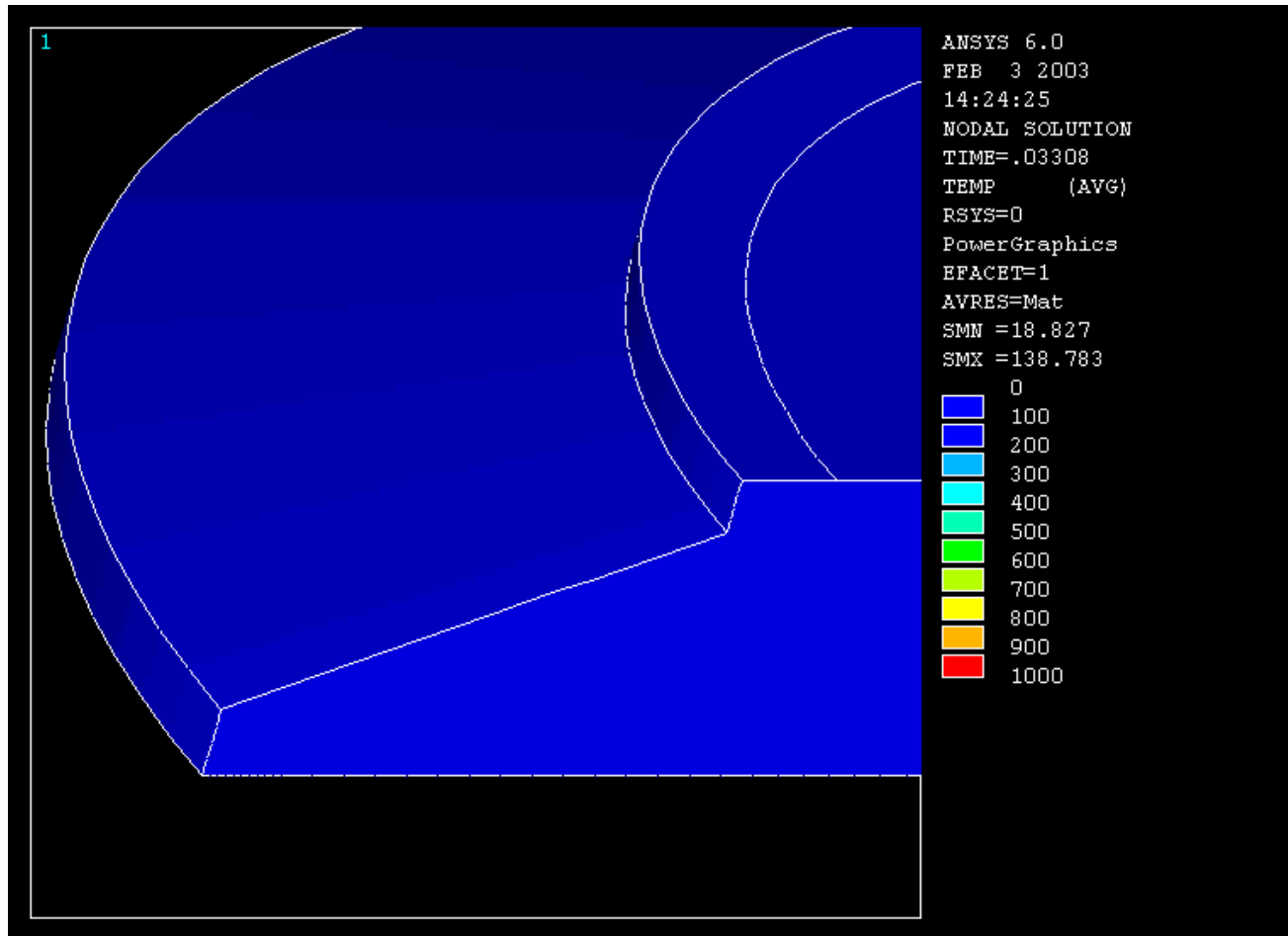
- Ziel: konturnahes gleichmäßiges Erwärmen
 - ➔ zum Erreichen eines gleichmäßigen Härteprofils an der Oberfläche

- Symmetriebedingungen:
 - ➔ langer Induktor
 - ➔ 180° in Umfangsrichtung
 - ➔ Steigungswinkel der Schnecke nicht berücksichtigt
- Gitternetz:
 - ➔ im Oberflächenbereich: feines Netz erforderlich
- Vorgegebene Randbedingungen:
 - ➔ Heizzeit
 - ➔ Maximale Temperatur: 950 °C
 - ➔ Rotation der Schnecke



} Angepasst über die Stromdichte

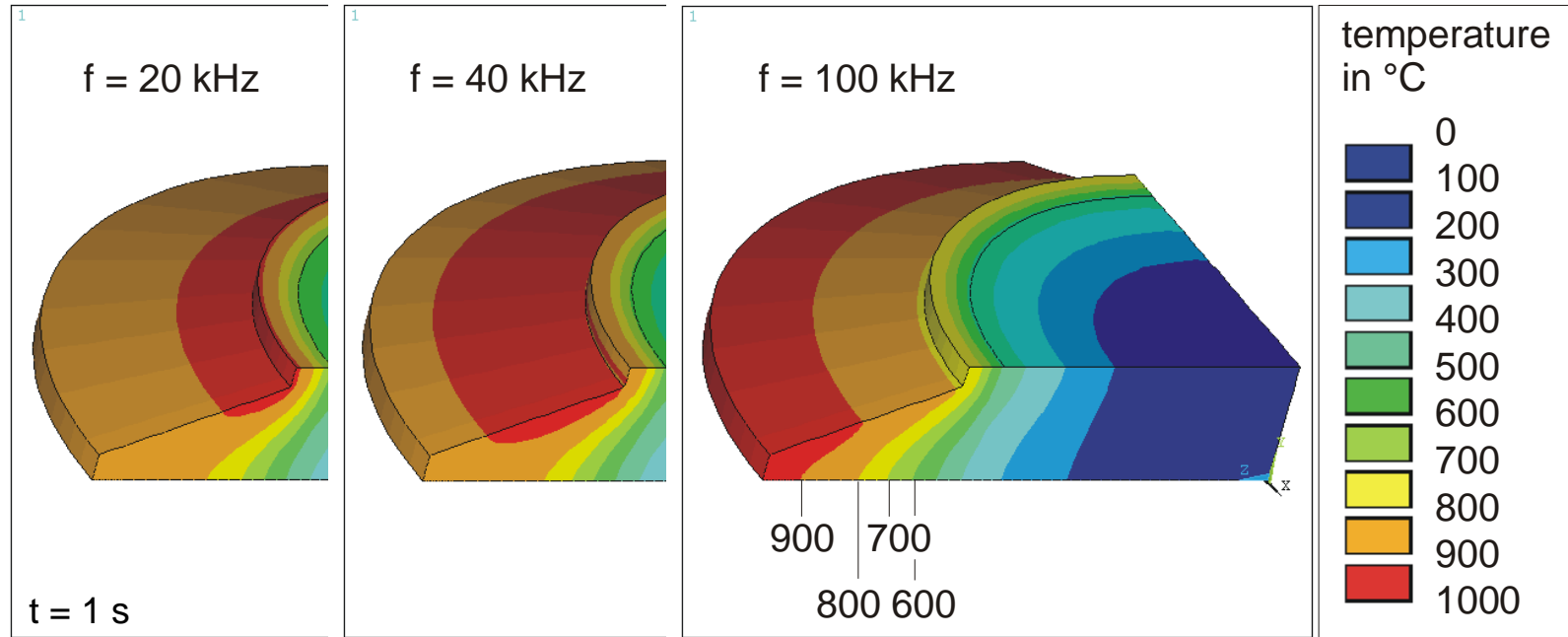
Erwärmung mittels Einfrequenzverfahren



$f = 100 \text{ kHz}$, $t = 1 \text{ s}$

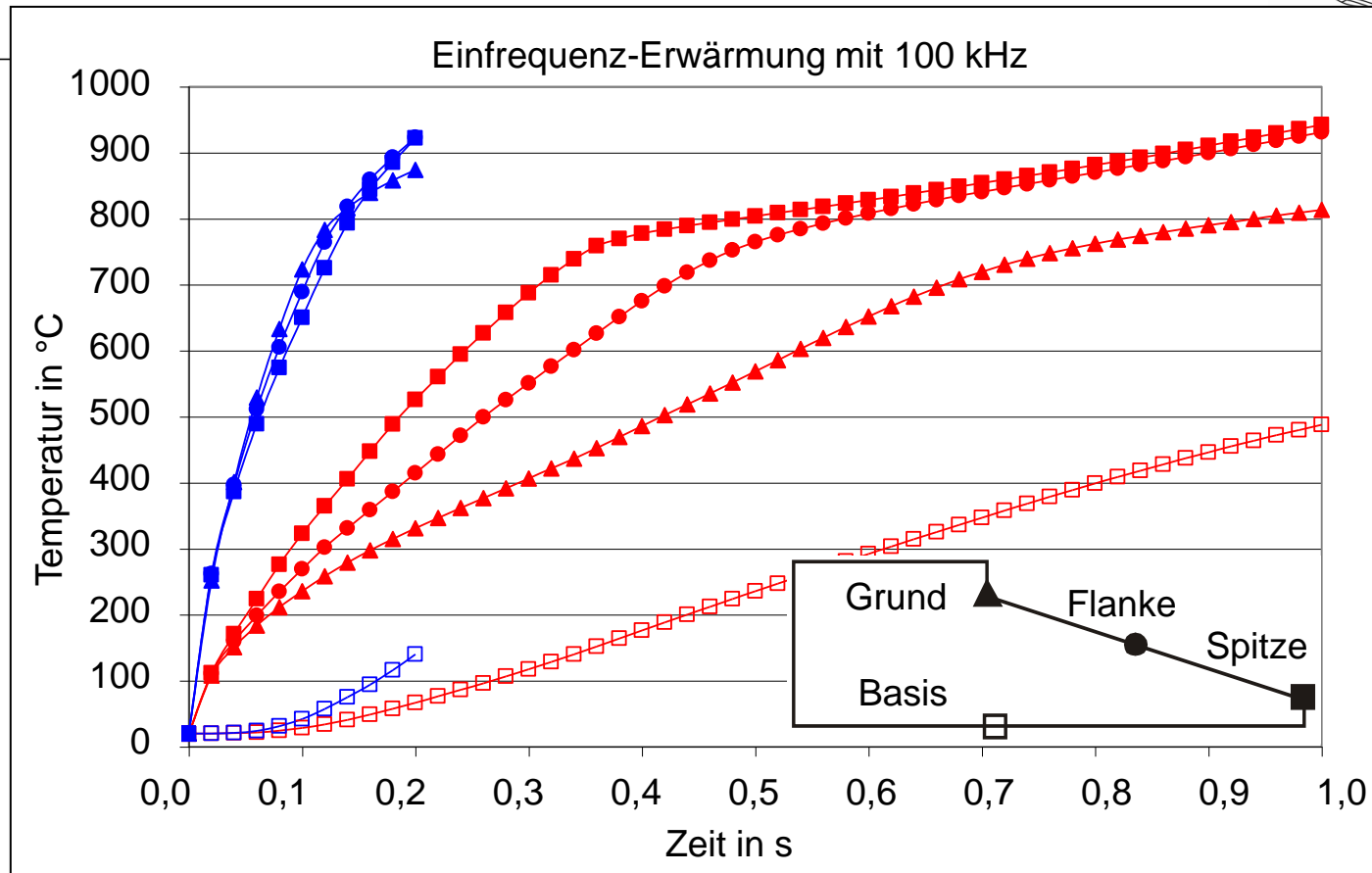


Einfrequenzverfahren - Zusammenfassung



- Arbeitsfrequenz beeinflusst die Erwärmungszone
- Beim Randschichthärten von Getriebeschnecken erlaubt das Einfrequenzverfahren keine optimale Lösung

Einfluss der Erwärmungszeit



Schlussfolgerungen

- je kürzer die Erwärmung, desto kontur- und oberflächennaher erfolgt die Erwärmung
- **Kompromiss** häufig aufgrund der Generatorleistung erforderlich



Zweifrequenzverfahren

➤ Grundidee:

- ➔ HF erwärmt bevorzugt die Zahnspitze
- ➔ MF erwärmt dagegen bevorzugt den Zahnzwischenraum
- ➔ die Überlagerung der beiden Effekte kann zu einer optimierten konturnahen Erwärmung führen

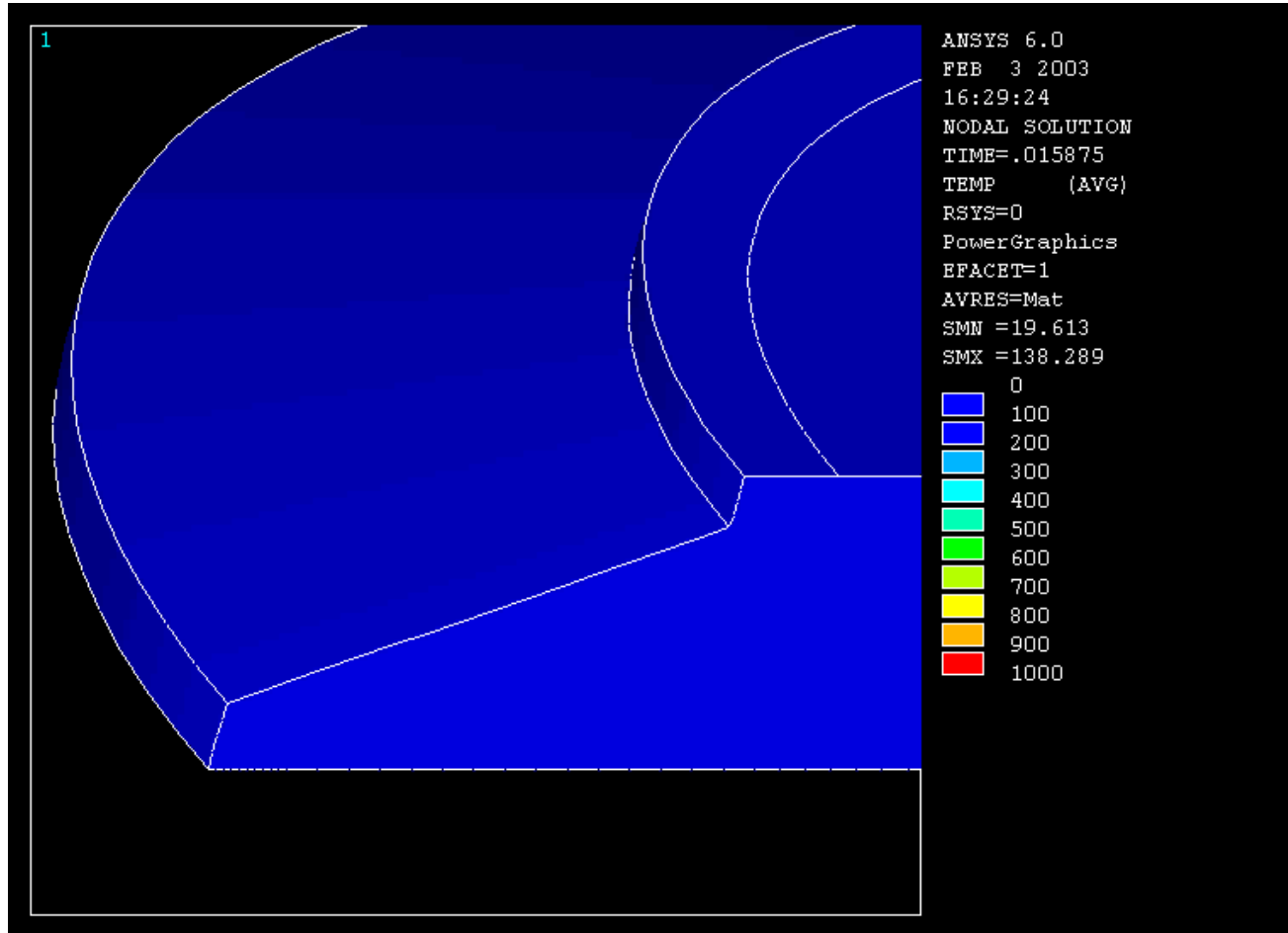
➤ Verfügbare Techniken:

- ➔ zeitversetzte Speisung des Induktors mit MF- und HF-Leistung oder
- ➔ simultane Speisung mit MF- and HF-Leistung
- ➔ Gesamtleistung und Verhältnis von MF- zu HF-Leistung ist variabel

➤ Erforderliche Erweiterungen des numerischen Modells:

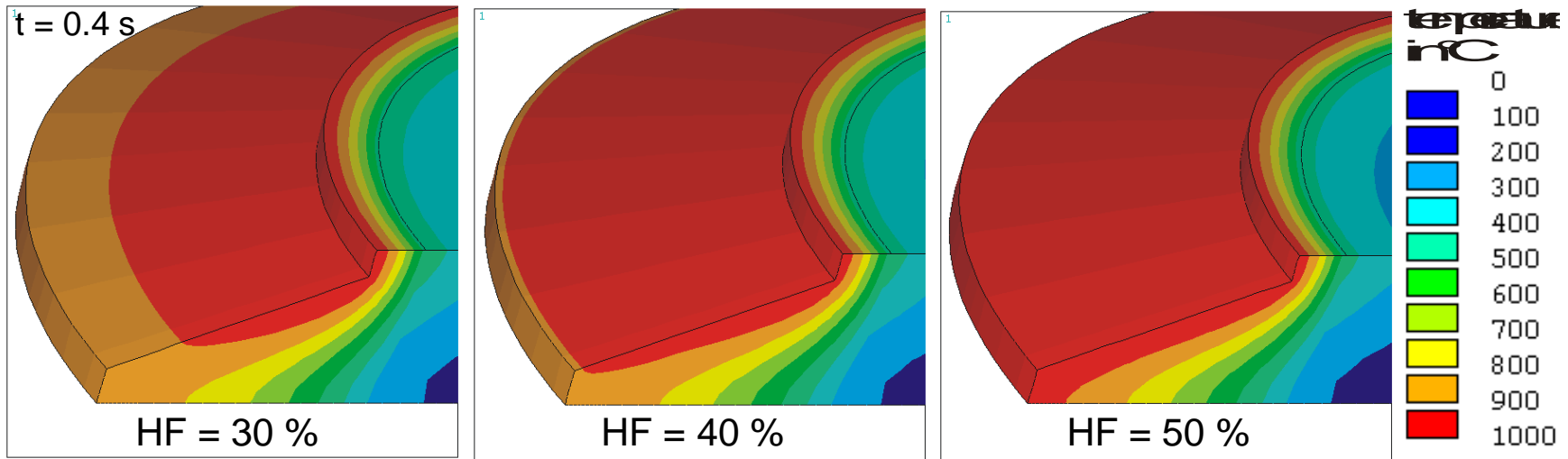
- ➔ Anpassung des Simulationsprogramms für Zweifrequenzverfahren
- ➔ Typische Frequenzbereiche: MF 10 .. 30 kHz, HF 100 .. 500 kHz
- ➔ Leistungsverhältnis HF/MF ist variabel
- ➔ Gesamtleistung MF + HF ist konstant

Zweifrequenzverfahren



HF-/MF-Leistung 35 %, $t = 1$ s

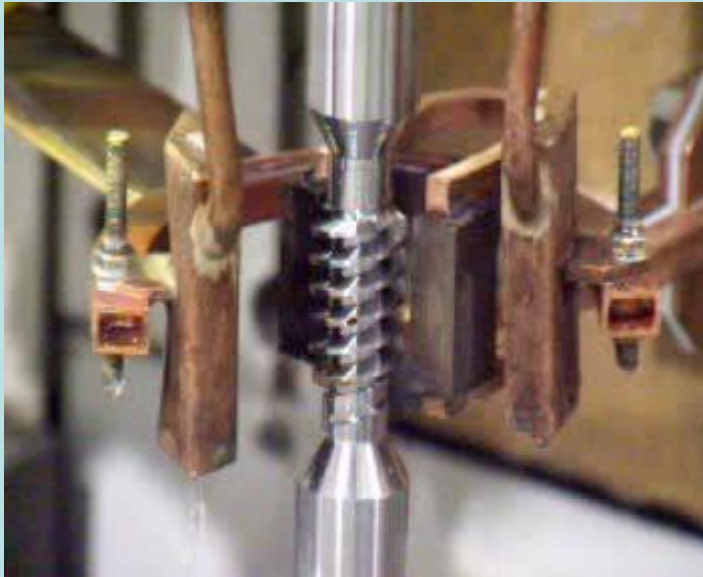




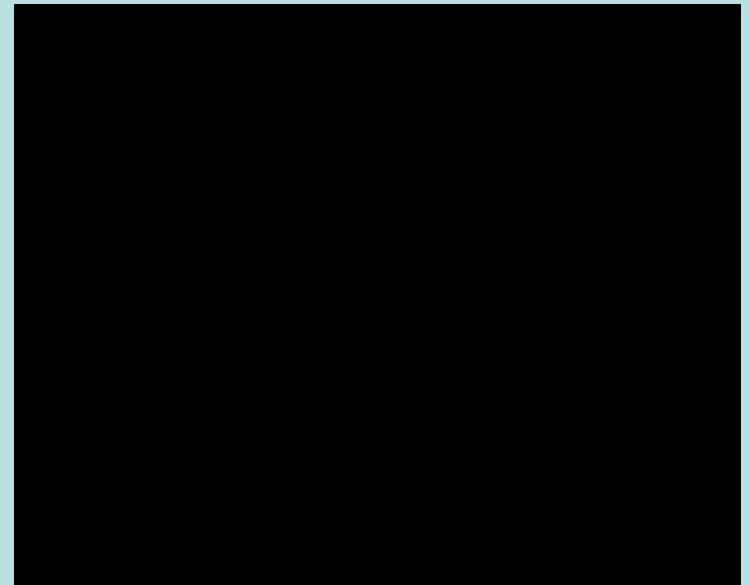
- Die Erwärmungszone ist über das Leistungsverhältnis MF/HF anpassbar
- Eine konturnahes Erwärmungsprofil kann bei der Schnecke erreicht werden
- Das Erwärmungsprofil erlaubt, das gewünschte Härteprofil zu erreichen
- Effekte werden nur bei sehr kurzer Heizzeit wirksam

Experimentelle Härteuntersuchungen

- 75 kW Generator
(75 kW MF, 75 kW HF)
- Heizzeit 1,3 s



- 600 kW Generator
(400 kW MF, 200 kW HF)
- Heizzeit 0,35 s



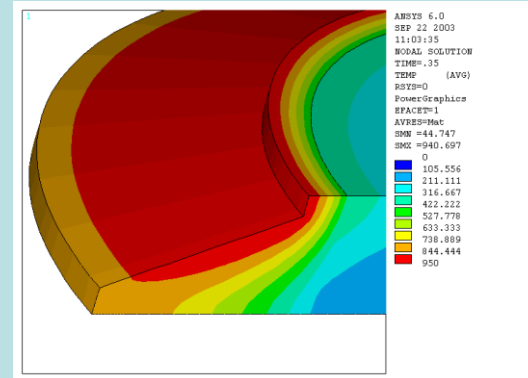
➤ Härteparameter

- ➔ Heizzeit: 0,35 s
- ➔ Gesamtleistung: 600 kW
- ➔ HF-Anteil: 30 %
- ➔ Frequenzen:
 - MF = 12 kHz
 - HF = 300 kHz

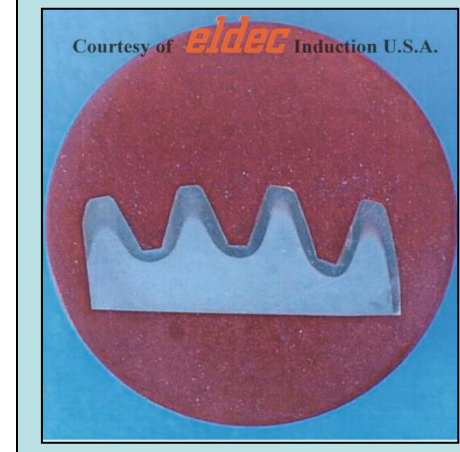
➤ Ergebnisse

- ➔ Berechnete Temperaturverteilung und Härteverlauf sehr ähnlich
- ➔ Härtewerte:
 - Zahnspitze: 62.5 HRC
 - Zahnzwischenraum: 66.0 HRC

Berechnete Temperaturverteilung

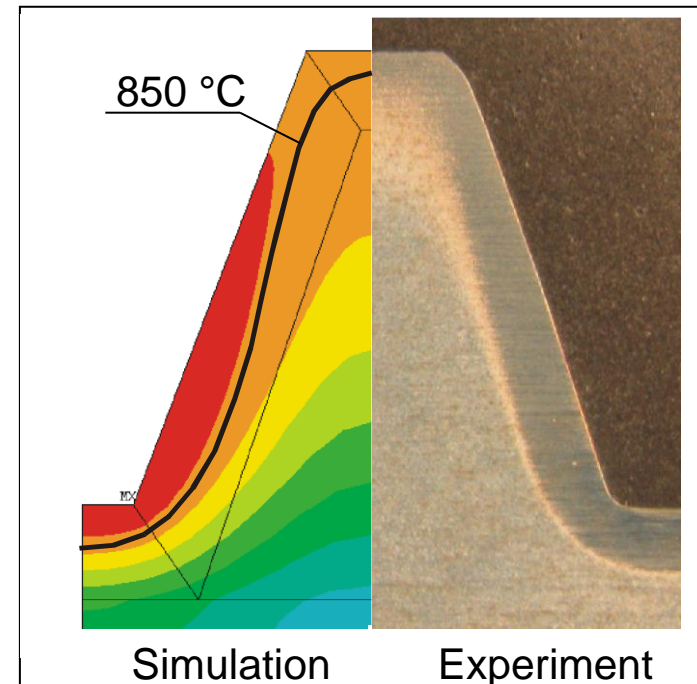


Experimentelles Ergebnis



Simulations- und Härte Daten

- ➔ Zweifrequenz-Erwärmung
- ➔ Gesamtleistung 600 kW
- ➔ Vorheizen:
 - Heizzeit: 0,5 s
 - HF-Anteil: 10 %
 - MF-Anteil: 0 %
- ➔ Hauptheizen:
 - Heizzeit: 0,3 s
 - HF-Anteil: 30 %
 - MF-Anteil: 70 %



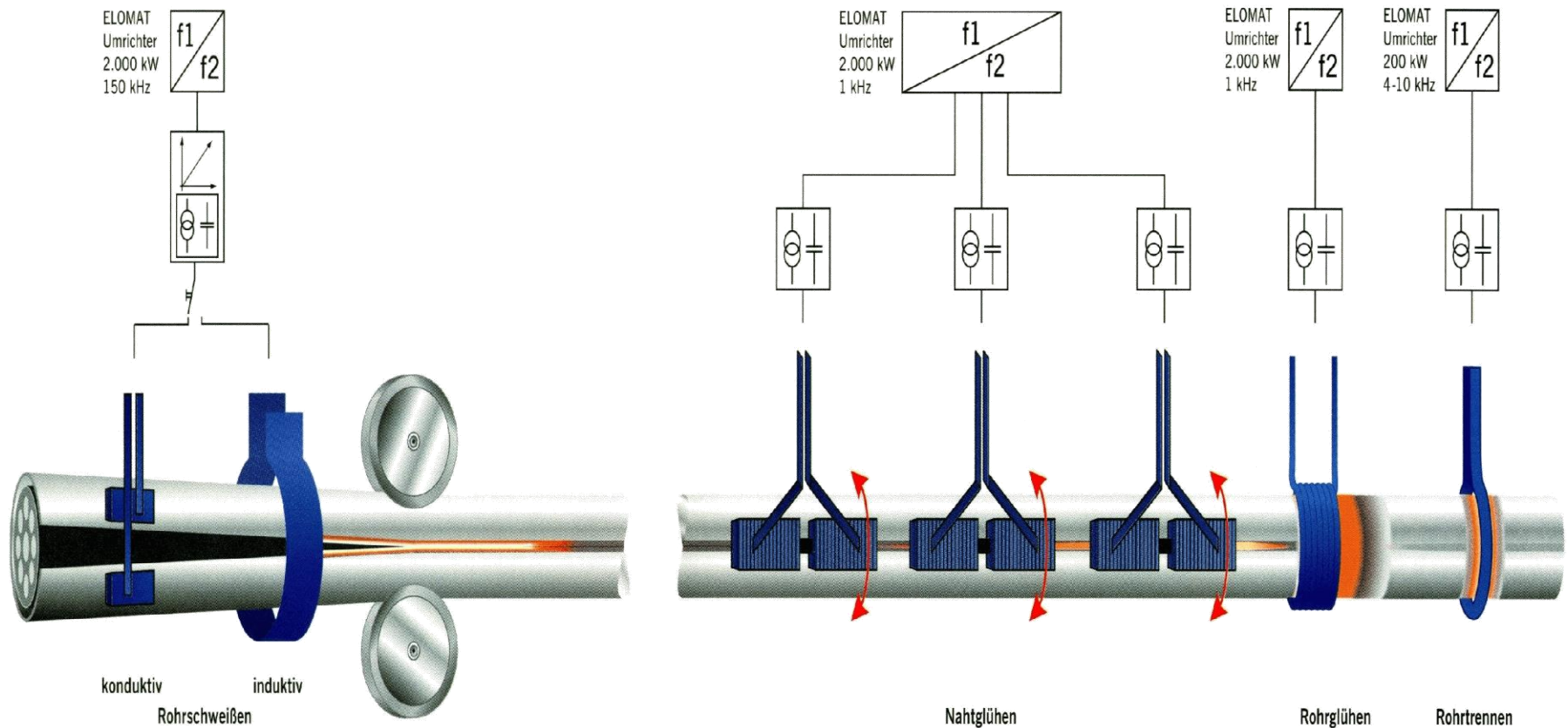
Zusammenfassung

- ➔ Gute Übereinstimmung von berechnetem Temperatur- und Härteverlauf
- ➔ Der endgültige Härteverlauf kann durch die Simulation der Temperaturverteilung allein bereits sehr gut vorausbestimmt werden

Verfahren der induktiven Erwärmung am Rohr



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



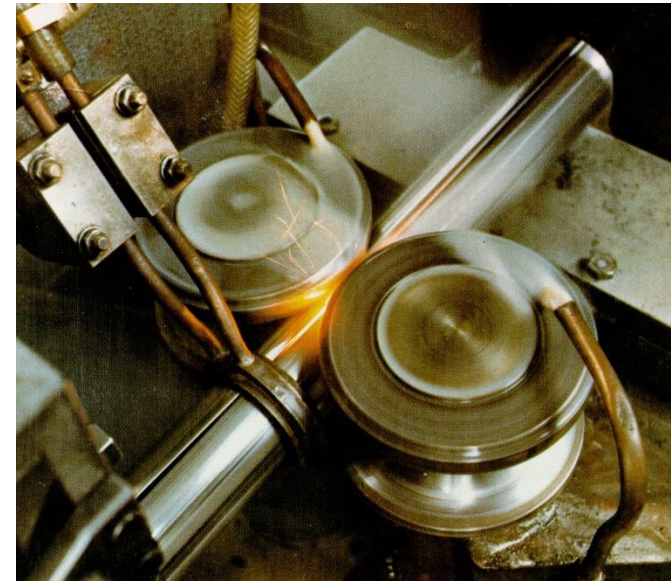
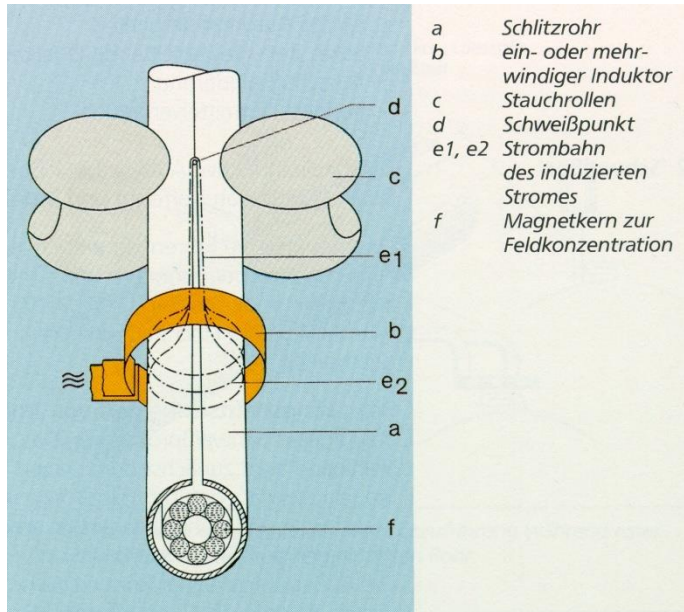
Quelle: SMS Elotherm



Induktives Erwärmen - Fügen

Längsnahtschweißen von Rohren

- Kontinuierlicher Schweißprozess mit gewalztem Stahlband
- Vorschubgeschwindigkeit: > 150 m/min
- Außendurchmesser: 9 – 500 mm

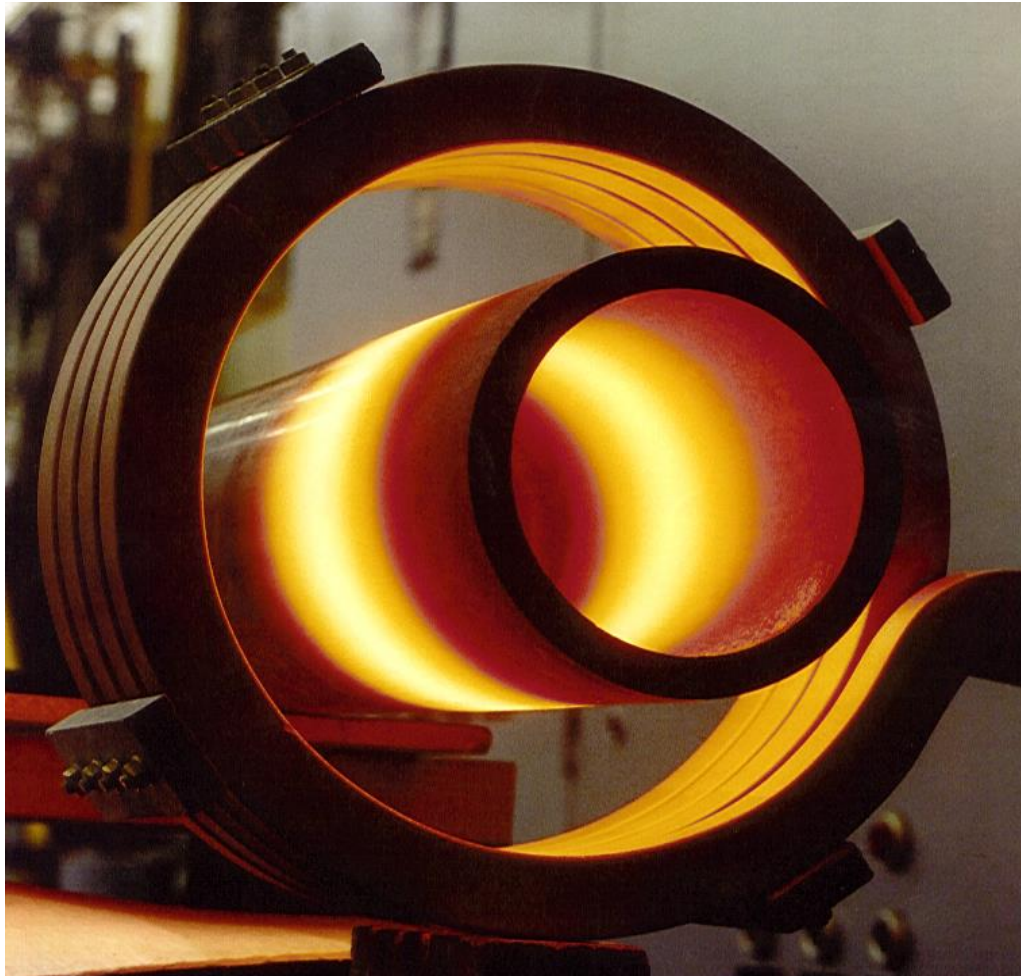


- hohe Schweißgeschwindigkeit
- Erwärmung genau auf die Schweißstelle beschränkt
- saubere Schweißnähte

Induktives Erwärmen und Glühen von Rohren



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



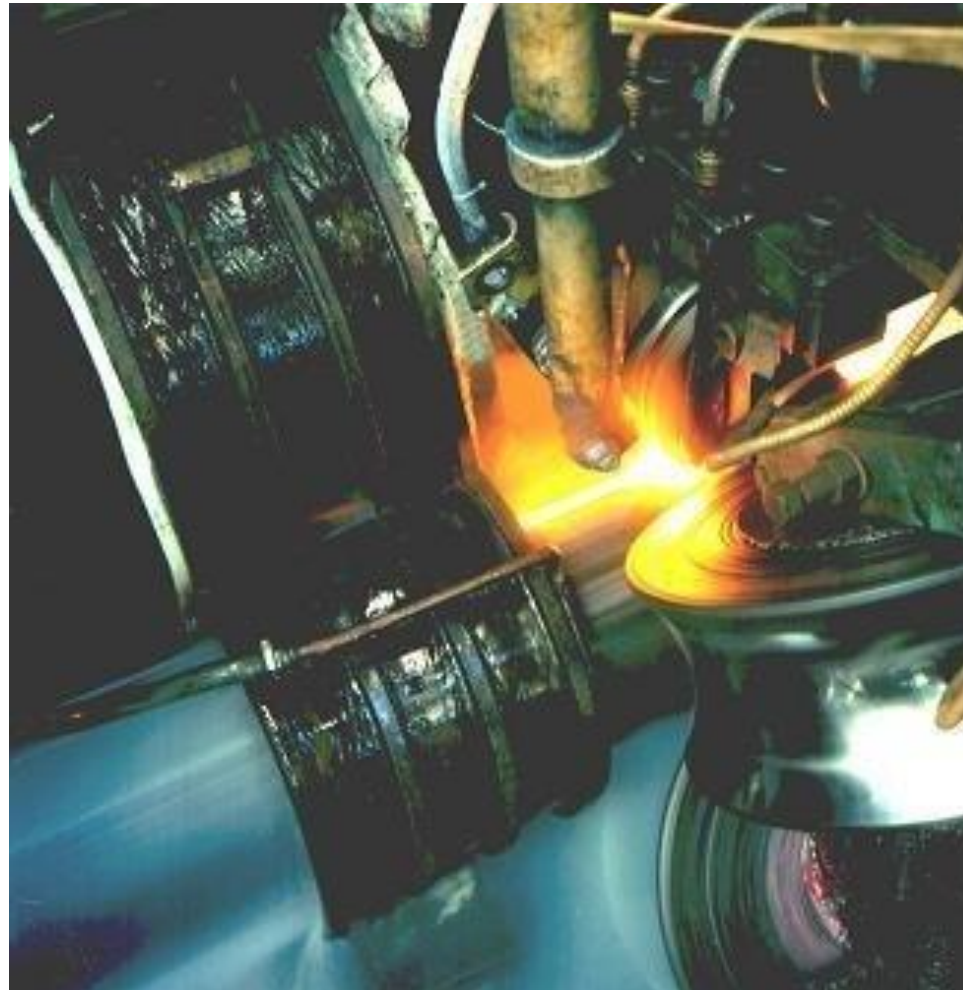
*Quelle: RWE-Information
Induktive Erwärmung*



HF-Induktionsschweißen von Rohren



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: SMS Elotherm



Induktives Längsnahtglühen von Rohren



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



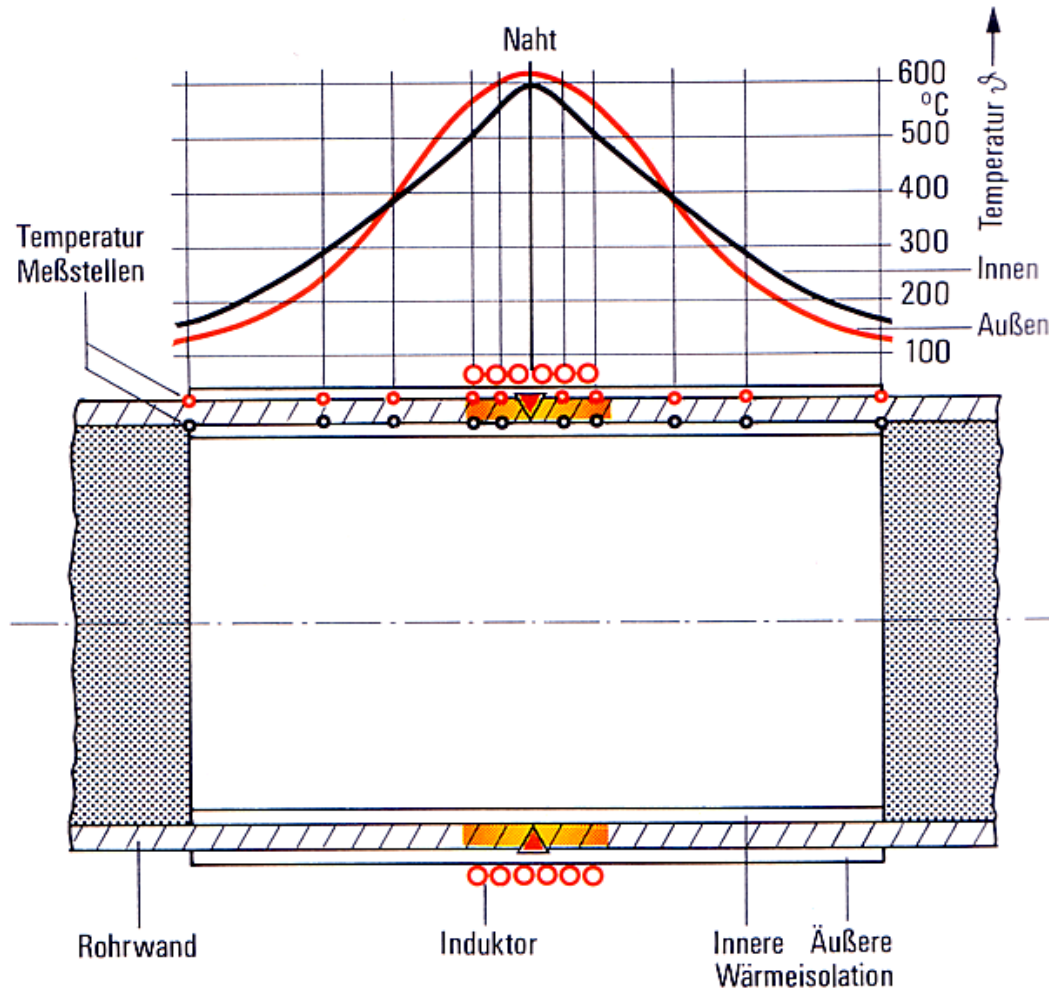
Quelle: SMS Elotherm



Induktives Glühen einer Rohrschweißnaht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: RWE-Information
Induktive Erwärmung

