

# 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)**  
**Ofenwirkungsgrad, Prozesswirkungsgrad, Energiefluss, 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)
8. Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



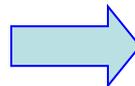
Leitgedanke: Rationeller Energieeinsatz

Erwärmer so bauen, dass eine möglichst rationelle Umwandlung kostbarer elektrischer Energie gewährleistet ist.

Erwärmerwirkungsgrad und Prozesswirkungsgrad

Anforderungen:

Prozesstemperatur bei  
hohem Wirkungsgrad  
sicher erreichen



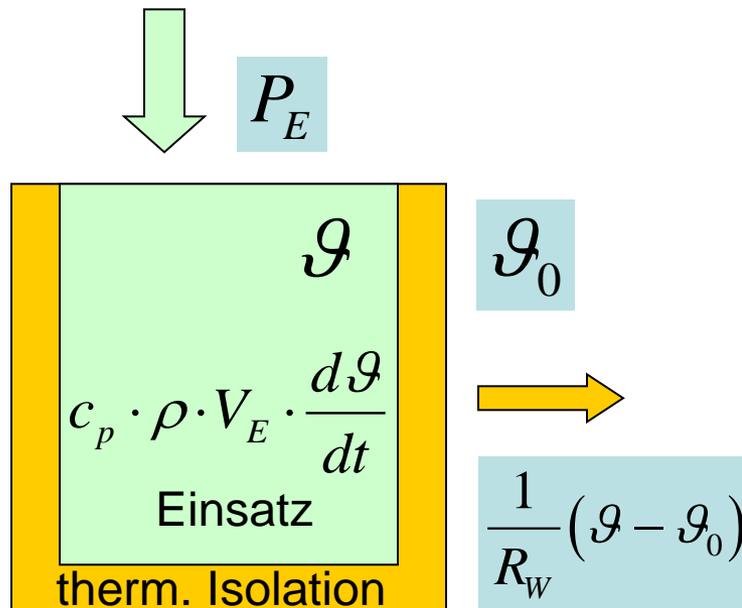
Lösung:

1. Wärmer isolieren
2. Schnelles Aufheizen auf Prozesstemperatur

- keramische Auskleidung bei Schmelzöfen:  
muss temperaturbeständig und chemisch resistent sein  
( $R_W$  der Zustellung aufgrund der verfügbaren Feuerfestmaterialien  
relativ klein)
- Reduzierung von Wärmeverlusten bei allen Erwärnern
- Schutz der Umgebung vor hoher Temperatur

# Aufheizvorgang in einer Erwärmereinheit

- schnelles Aufheizen auf Prozesstemperatur, damit weniger Zeit für Wärmeverluste bleibt  $\longrightarrow$  hohe Einsatzleistung



Wärmestrombilanz:

$$P_E = c_p \cdot \rho \cdot V_E \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{1}{R_W} (\vartheta - \vartheta_0)$$

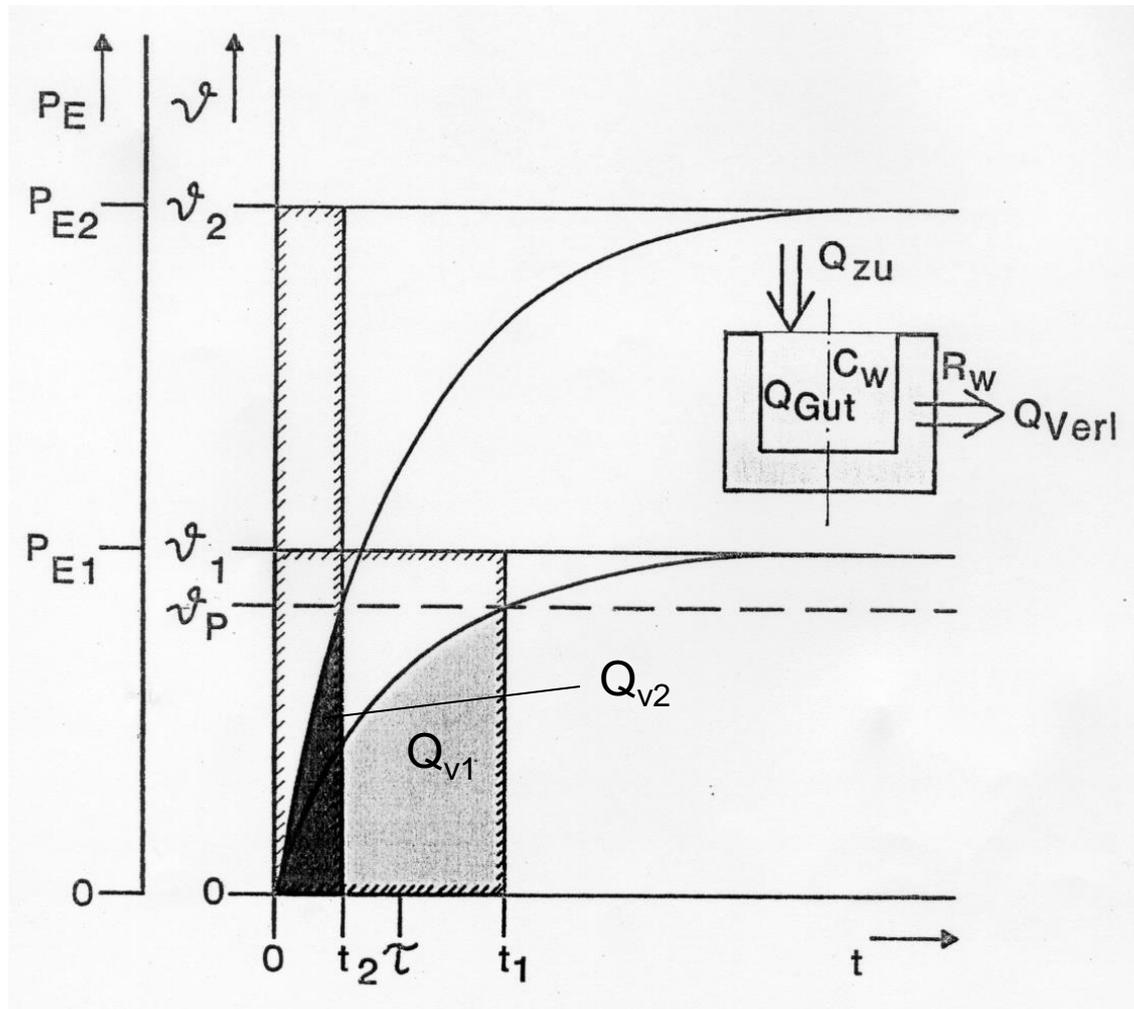
zu lösende Differentialgleichung:

$$\frac{d\vartheta}{dt} + \frac{1}{R_W C_W} \vartheta - \frac{P_E}{C_W} = 0$$

Lösung:

$$\vartheta(t) = P_E R_W \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_W C_W}} \right)$$

# Einfluss der Einsatzleistung auf den Energiebedarf



# Simulation von Temperaturfeldern

Mit transienten Simulationen kann das Aufheizverhalten analysiert werden. Wiederum wird hierzu der Würfel aus der stationären Simulation herangezogen. Betrachtet werden soll das zeitliche Verhalten der Temperatur im Würfel und der Wärmeabgabe an der Strahlungsfläche.

Wegen des linearen Zusammenhangs soll für den analytischen Abgleich eine Konvektionsrandbedingung (statt Strahlung) an einer Würfelfläche anliegen:  $200\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . Weiterhin soll eine homogene Temperatur im Würfel gegeben sein – das lässt sich durch eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit erreichen:

Properties of Outline Row 5: Transient_Material					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	$\text{kg m}^{-3}$		
4	Isotropic Thermal Conductivity	1E+06	$\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$		
5	Specific Heat, $C_p$	434	$\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$		

# Simulation von Temperaturfeldern



Es gilt die Lösung der zeitabhängigen DGL:

$$\vartheta(t) = P_E R_W \left(1 - e^{\frac{-t}{R_W C_W}}\right) + \vartheta_U$$

$$\text{Eingebrachte Leistung: } P_E = p \cdot V = 5e6 \frac{W}{m^3} \cdot 8e-6 m^3 = 40W$$

$$\text{Konv. Wärmewiderstand: } R_W = \frac{1}{\alpha A} = \frac{1}{200 \frac{W}{m^2 K} \cdot 4e-4 m^2} = 12,5 \frac{K}{W}$$

$$\text{Wärmekapazität: } C_W = c_p \cdot \rho \cdot V = 434 \frac{J}{kg K} \cdot 7850 \frac{kg}{m^3} \cdot 8e-6 m^3 = 27,25 \frac{J}{K}$$

Die Erwärmungszeit beträgt 15 Minuten. Während dieser Zeit soll die Temperatur im Würfel und die Leistungsabgabe an die Umgebung bestimmt werden.



# Simulation von Temperaturfeldern



Es gilt die Lösung der zeitabhängigen DGL:

$$\vartheta(t) = P_E R_W \left(1 - e^{\frac{-t}{R_W C_W}}\right) + \vartheta_U$$

Plausibilitätsprüfung durch Prüfung der Extrempunkte für  $t=0$  und  $t \rightarrow \infty$ :

$t=0$ :

Current Step Number	1,
Step End Time	1,e-009 s

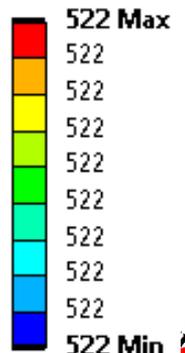
$$\begin{aligned}\vartheta(t) &= P_E R_W \left(1 - e^{\frac{-0}{R_W C_W}}\right) + \vartheta_U = \\ 0 + \vartheta_U &= 0 + 22^\circ\text{C} = 22^\circ\text{C}\end{aligned}$$



$t \rightarrow \infty$

Step End Time	1,e+009 s
---------------	-----------

$$\begin{aligned}\vartheta(t) &= P_E R_W \left(1 - e^{\frac{-\infty}{R_W C_W}}\right) + \vartheta_U = \\ P_E R_W + \vartheta_U &= 40\text{W} \cdot 12,5 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 22^\circ\text{C} = 522^\circ\text{C}\end{aligned}$$



# Simulation von Temperaturfeldern

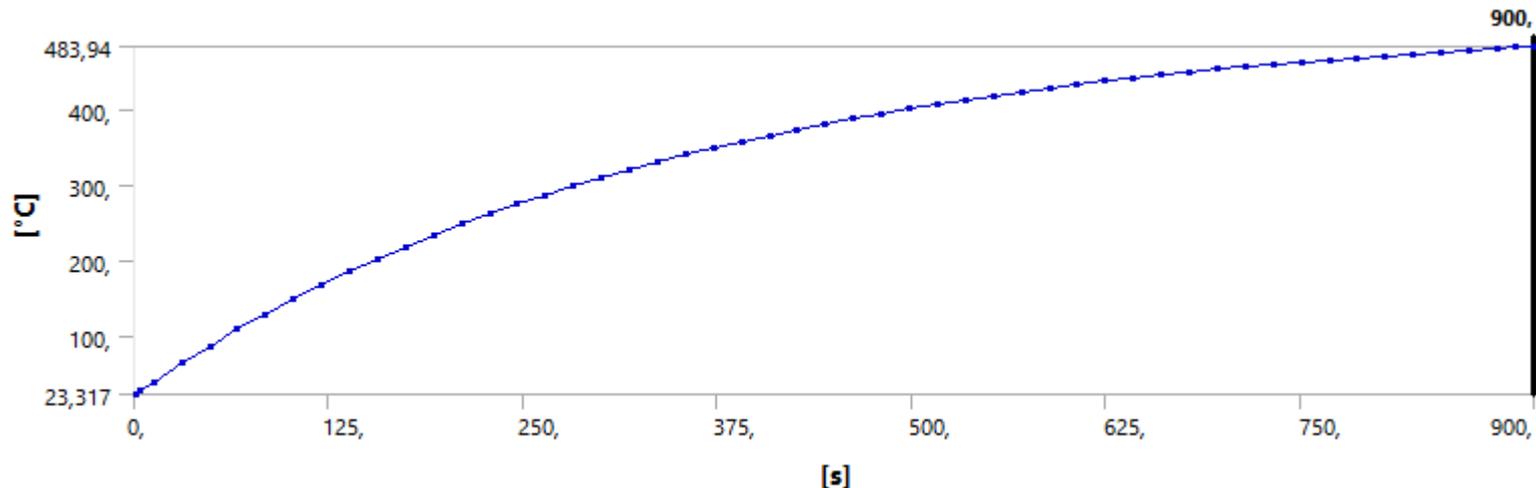
Es gilt die Lösung der zeitabhängigen DGL:

$$\vartheta(t) = P_E R_W \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_W C_W}} \right) + \vartheta_U$$

Aufheizverhalten über 15 Minuten (=900 Sekunden)

Step End Time	900, s
---------------	--------

Temperatur im Würfel



Analytisch: 486,38 °C

# Simulation von Temperaturfeldern

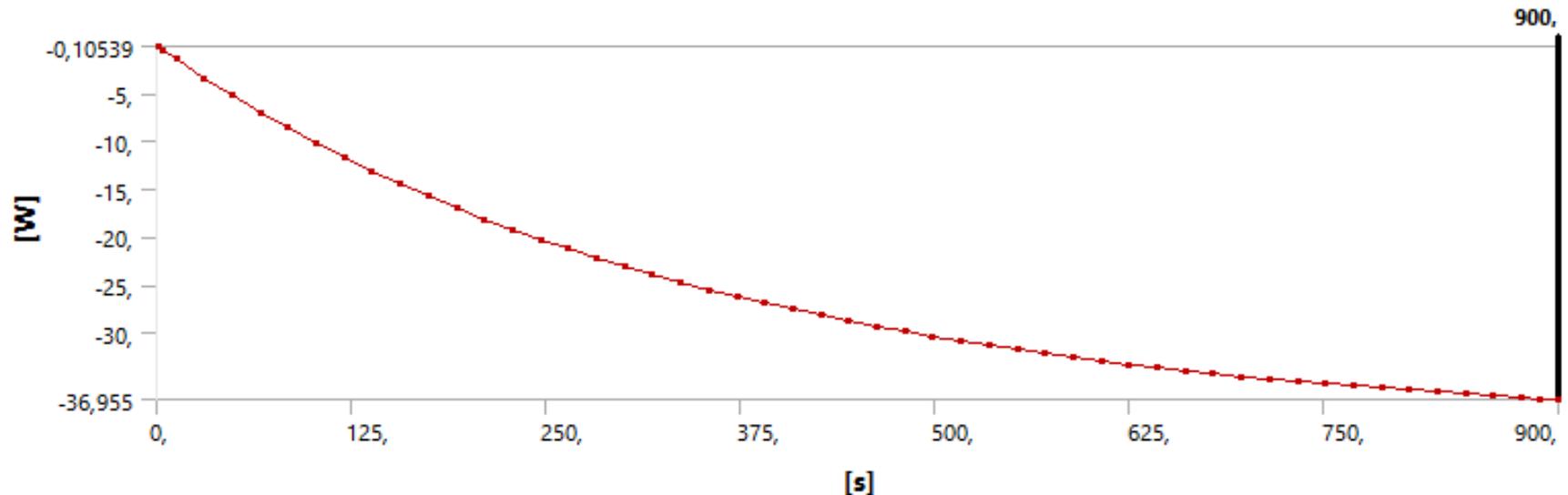
Es gilt die Lösung der zeitabhängigen DGL:

$$\vartheta(t) = P_E R_W \left( 1 - e^{\frac{-t}{R_W C_W}} \right) + \vartheta_U$$

Aufheizverhalten über 15 Minuten (=900 Sekunden)

Step End Time	900, s
---------------	--------

Wärmeleistung an Konvektionsfläche



- bei Erwärmungsprozessen ist der Energiewirkungsgrad anzusetzen

Ansatz:

$$\eta_P = \frac{\int_0^{t_1} P_E \cdot dt - \int_0^{t_1} P_V \cdot dt}{\int_0^{t_1} P_E \cdot dt}$$

Ergebnis:

$$\eta_P = \frac{R_W C_W}{t_1} \left( 1 - e^{\frac{-t_1}{R_W C_W}} \right)$$

- Dieser Zusammenhang drückt aus, dass bei kleinerer Aufheizzeit  $t_1$  ein besserer Prozesswirkungsgrad erzielt werden kann.

Gesamtwirkungsgrad einer Erwärmungsanlage

$$\eta_{Ofen} = \eta_{Generator} \times \eta_{Spule} \times \eta_P$$

$$\eta_{Ofen} = \eta_{el} \times \eta_P$$

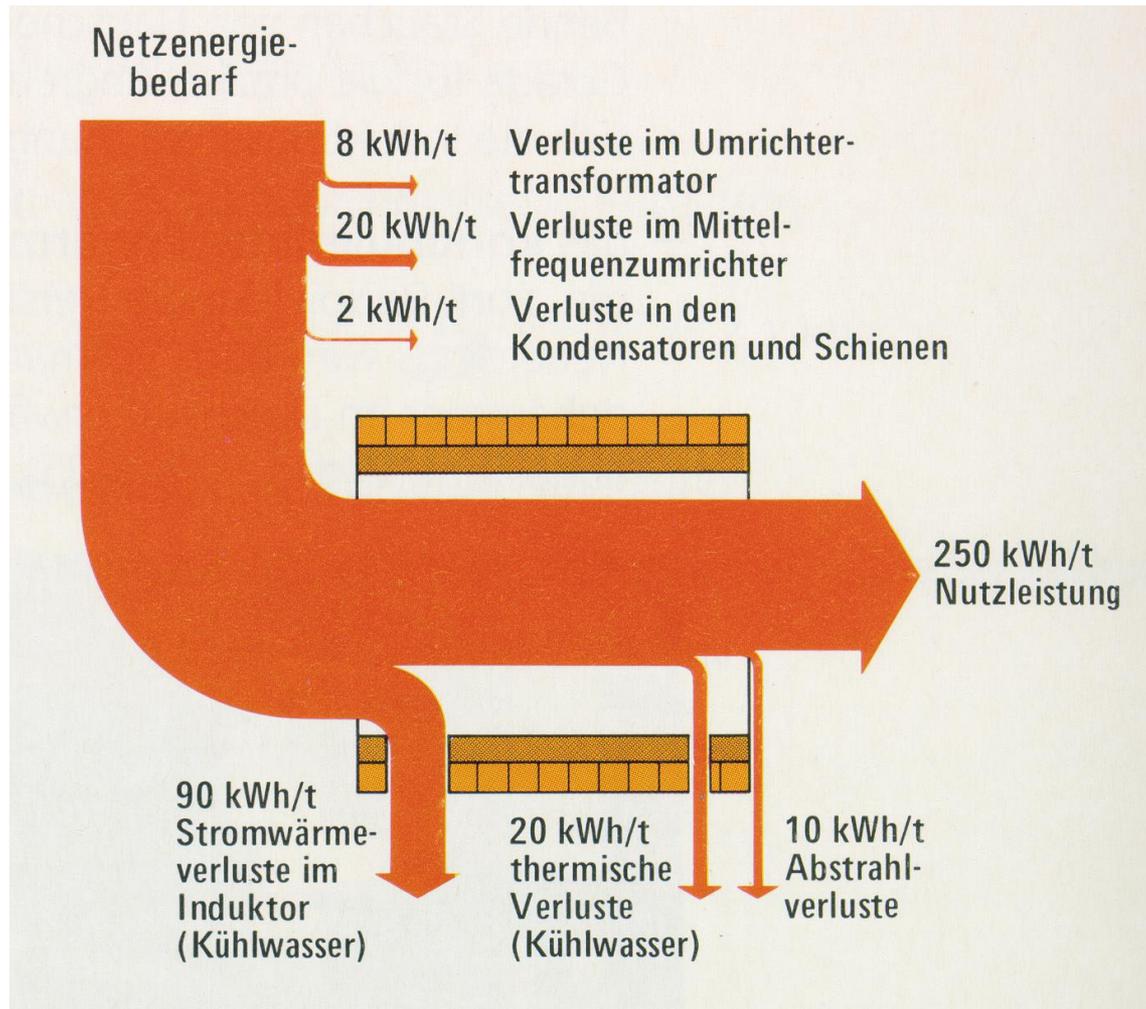
Je nach Anlage ist der Erwärmerwirkungsgrad verschieden

● Widerstandsofen:  $\eta_{Ofen} \approx 90\% - 70\%$

● Induktionserwärmer:  $\eta_{Ofen} \approx 80\% - 40\%$

● Lichtbogenofen:  $\eta_{Ofen} \approx 80\% - 60\%$

# Energiefluss bei der induktiven Schmiedeblock-Erwärmung

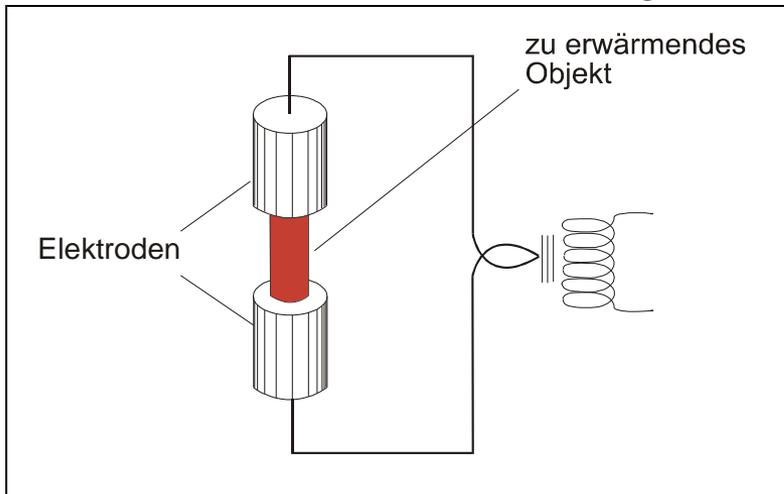


Quelle: RWE-  
Information  
Prozesstechnik



# Konduktive Erwärmung - Prinzip

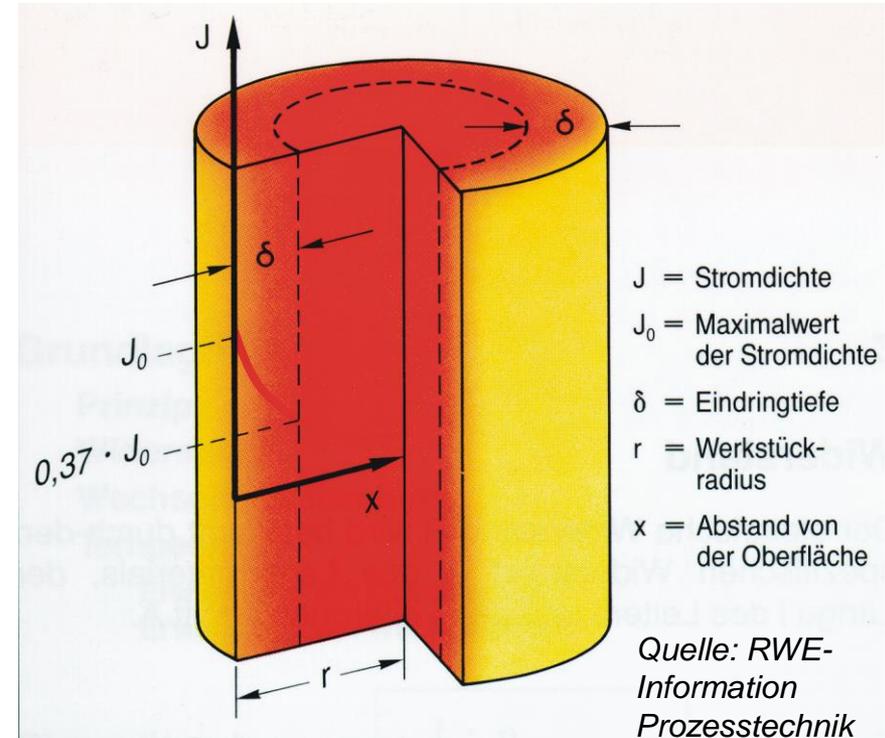
## Prinzip der Erwärmung



- Werkstück ist Teil des Stromkreises
- Entstehung Joulescher Wärme im Gut
- Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften
- Stromverdrängung bei Wechselstrom

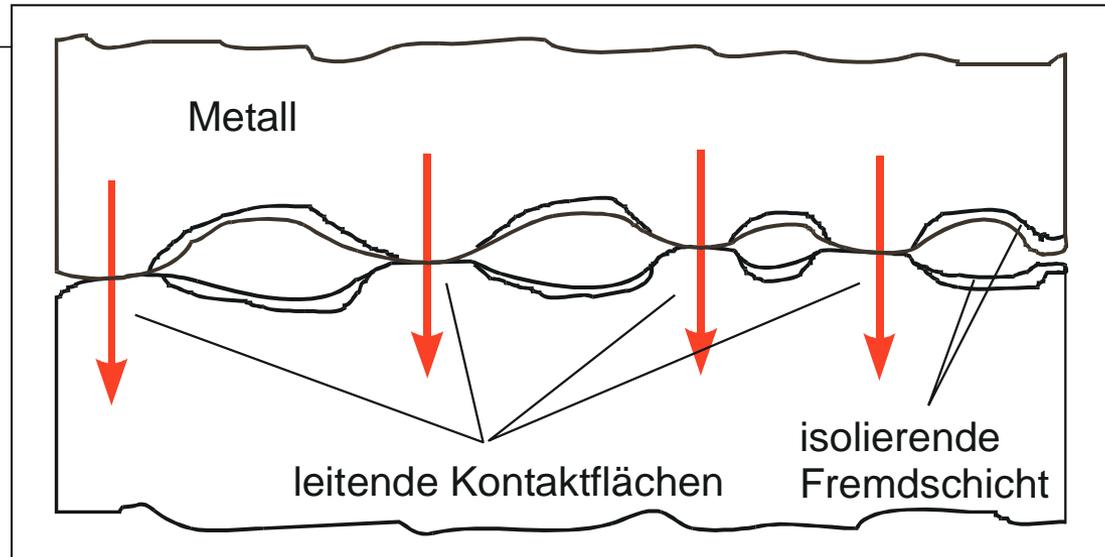
Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

## Stromverdrängung



$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}$$

# Stromzuführung über Kontakte



- Einengung des stromführenden Querschnitts durch Oberflächenbeschaffenheit
- Stärkere Erwärmung im Kontaktbereich
- Abhilfe unterschiedlich für **Stand-** und **Durchlauferwärmung**

- Anpressdruck  
- Mehrfachkontakte  
- Kühlung der Kontakte

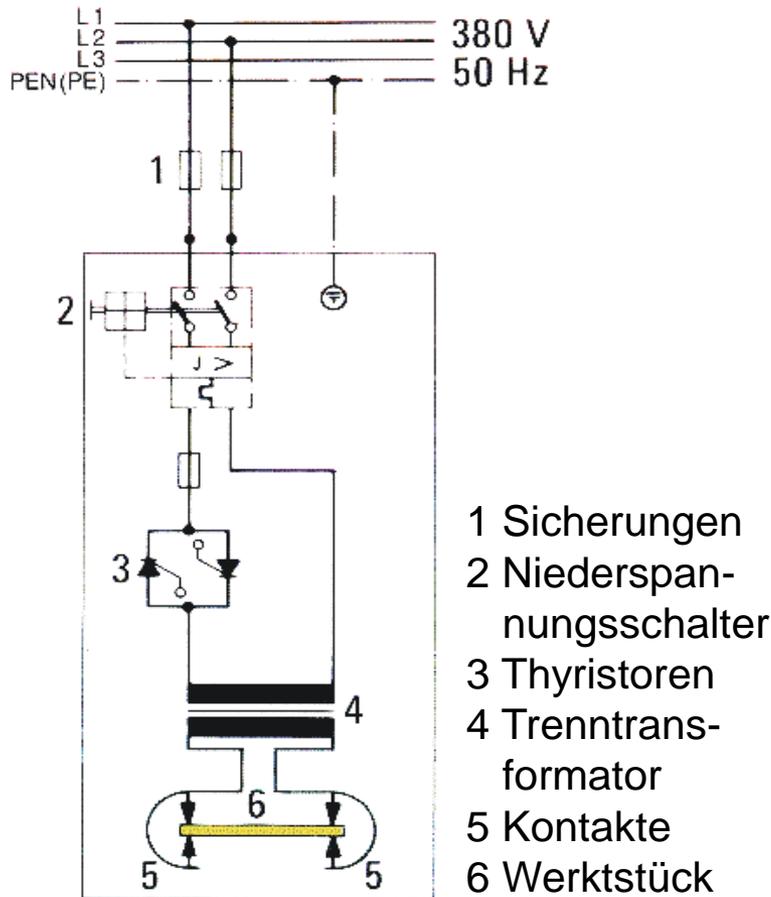
- Flüssigkontakte  
- Wirbelbettkontakte  
- Schleifkontakte  
- Rollenkontakte



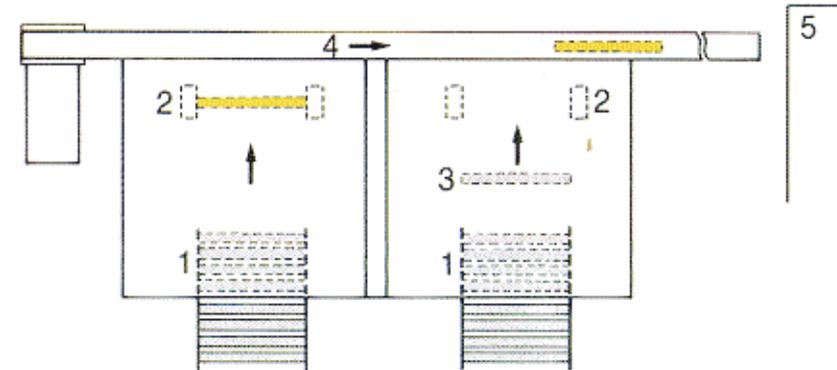
- Erwärmen von Metall zum Umformen und Vergüten
  - Wirkungsgrade: 70 bis 90 %
- Erwärmen von Knüppeln, Stangen und Rohren in Standanlagen
  - Frequenz: meist Netzfrequenz
  - Gleichstrom bei großen Werkstückquerschnitten
- Erwärmen von Drähten und Bändern in Durchlaufanlagen
  - Frequenz: meist Netzfrequenz
  - Gleichstrom bei dünnen Drähten
- Widerstandsschweißen



# Erwärmung von Stangen und Knüppeln



1 Stangenmagazin  
 2 Kontakte  
 3 Werkstück  
 4 Förderband  
 5 Schmiedemaschine



gleichmäßige Temperaturverteilung:

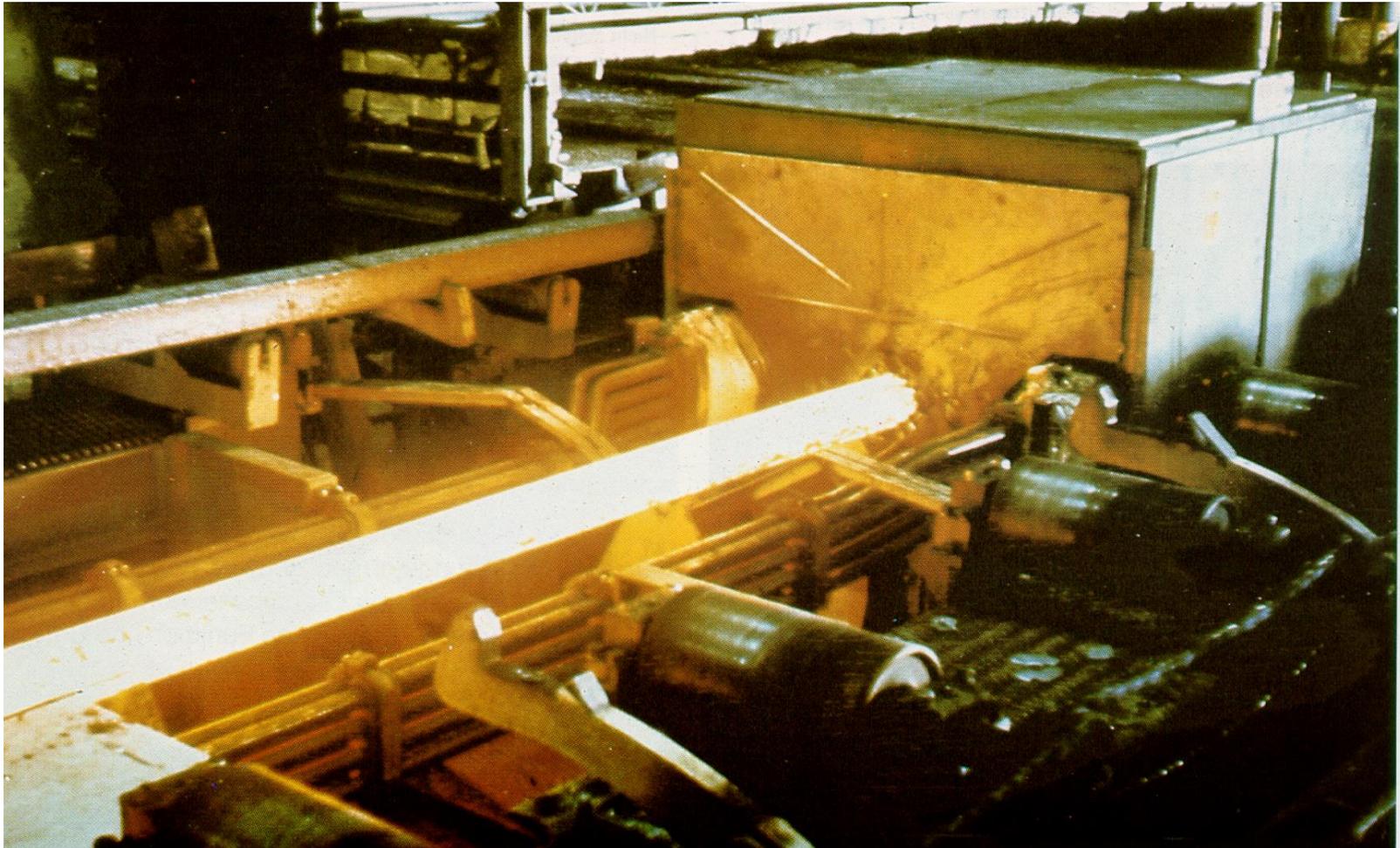
$$l > 5 \cdot d$$

Heizstrom: 10 bis 30 kA

# Konduktive Knüppel-Erwärmungsanlage



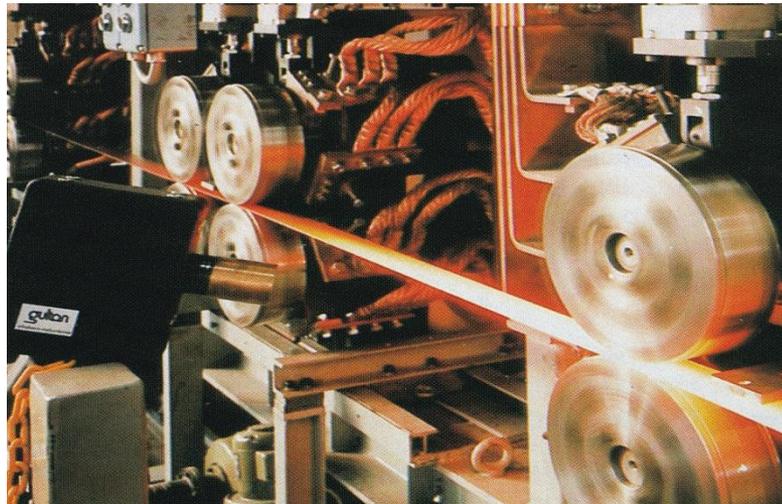
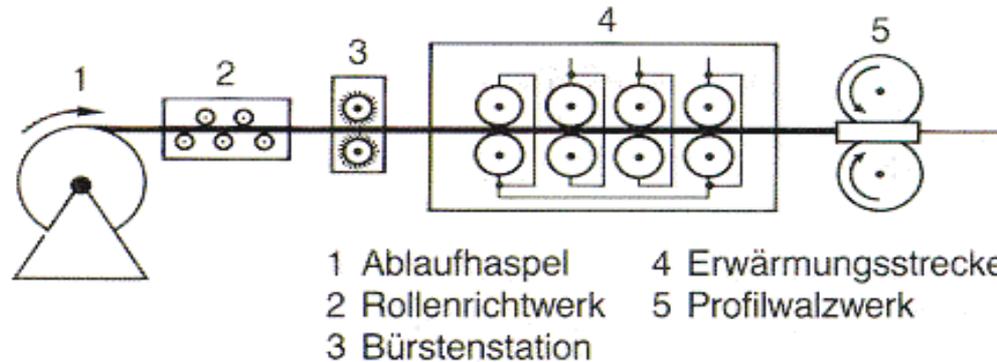
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik



# Konduktive Durchlauf-Erwärmungsanlage

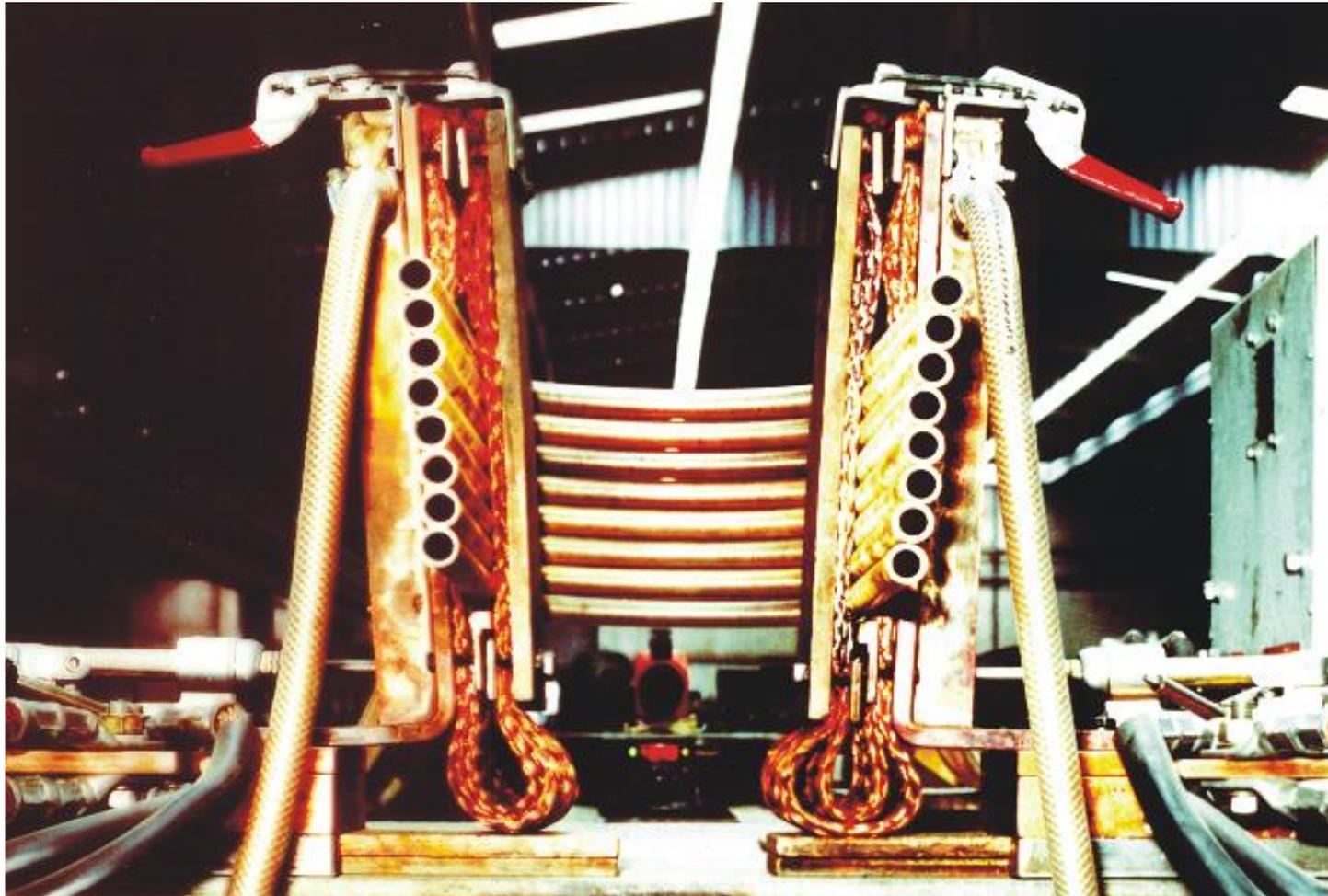


Quelle: RWE Energie AG

# Konduktive Rohrglühanlage



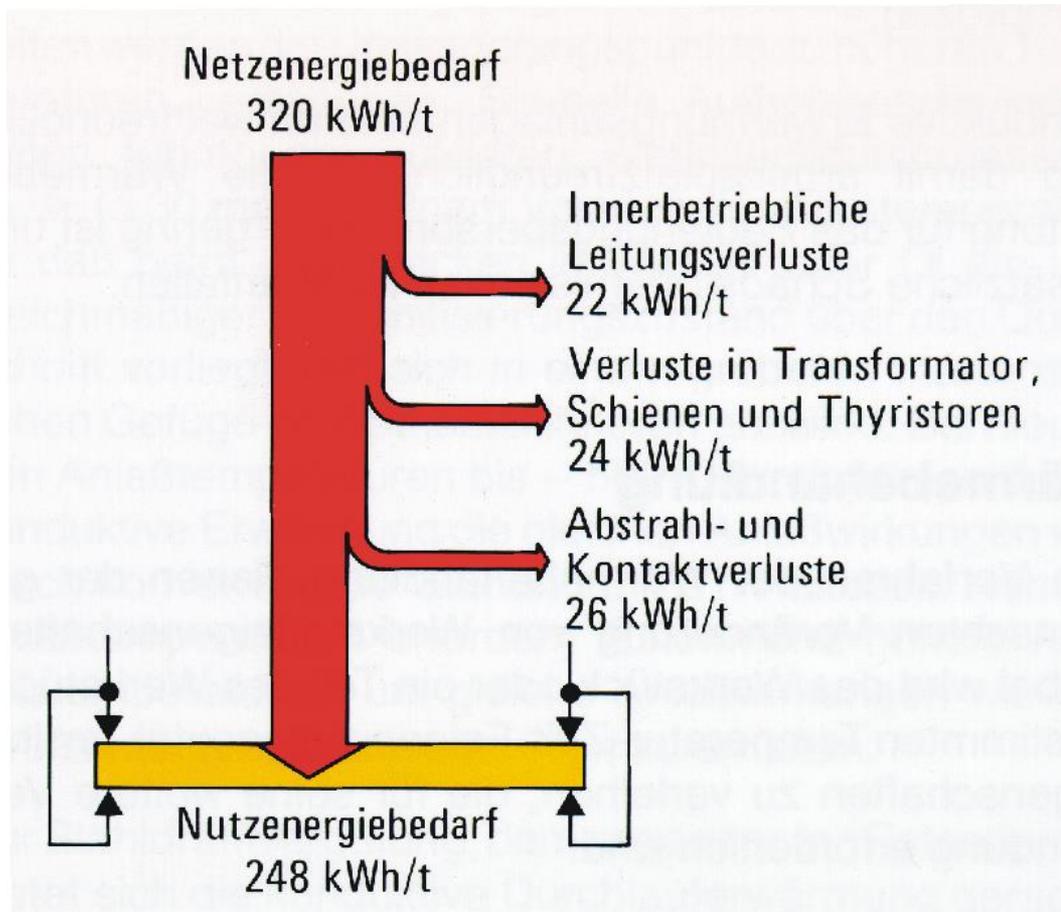
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik



# Konduktive Erwärmung - Energiebilanz



## Erwärmung von Stahlstangen

- Länge: 500 mm
- Durchmesser: 28 mm
- Temperatur: 1250 °C

Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

# Elektromagnetisch-thermische Simulation (Konduktion)



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Leistungsumsetzung per Joulsche Verluste aus elektrischem Strom.  
Abgabe der Leistung (thermisches Gleichgewicht im stationären Zustand)  
über thermische Randbedingungen.

Fall 1: Gleichstromerwärmung eines Kupferleiters:

Radius  $r = 1 \text{ mm}$ , Länge  $a = 10 \text{ mm}$ , Leitfähigkeit  $\sigma = 58 \text{ MS/m}$ ,  
Stromstärke  $I = 20 \text{ A}$ , Reine Konvektion  $\alpha = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Frequenz  $f = 0 \text{ Hz}$

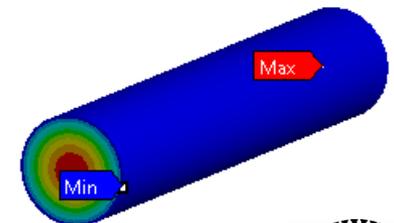
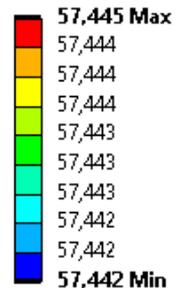
Analytisch:

$$P_{\text{ein}}: \text{Umgesetzte Leistung } P = R \cdot I^2 = \frac{a}{\sigma \cdot \pi \cdot r^2} \cdot I^2 = 21,95 \text{ mW}$$

Wärmeabgabe per Konvektion:  $\phi = P = \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta = \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a \cdot \Delta\vartheta$

$$\text{Umstellung nach } \Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a} = 34,93 \text{ K}$$

Damit Gesamttemperatur:  $\vartheta = 34,93 \text{ K} + 22^\circ\text{C} = 56,93^\circ\text{C}$



# Elektromagnetisch-thermische Simulation (Konduktion)

Leistungsumsetzung per Joulsche Verluste aus elektrischem Strom.  
Abgabe der Leistung (thermisches Gleichgewicht im stationären Zustand)  
über thermische Randbedingungen.

Fall 2: Wechselstromerwärmung eines Kupferleiters:

Radius  $r = 1$  mm, Länge  $a = 10$  mm, Leitfähigkeit  $\sigma = 58$  MS/m,  
Stromstärke  $I = 20$  A, Reine Konvektion  $\alpha = 10$  W/m<sup>2</sup>K, Frequenz  $f = 20$  kHz

Analytisch: **Abweichung gegenüber Gleichstromfall**

P<sub>ein</sub>: Umgesetzte Leistung  $P = R \cdot I^2 = \frac{a}{\sigma \cdot \pi \cdot r^2} \cdot I^2 = ??$  W

Wärmeabgabe per Konvektion:  $\phi = P = \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta = \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a \cdot \Delta\vartheta$

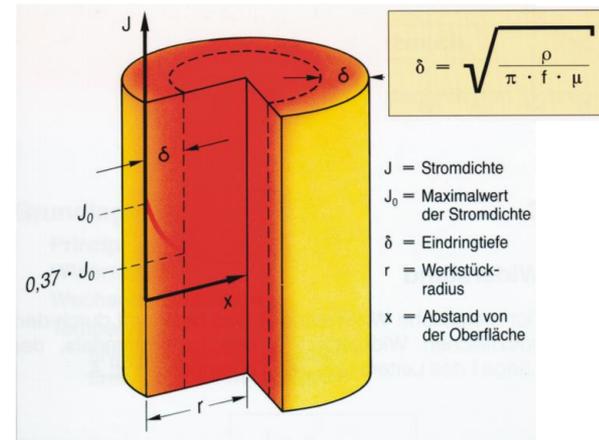
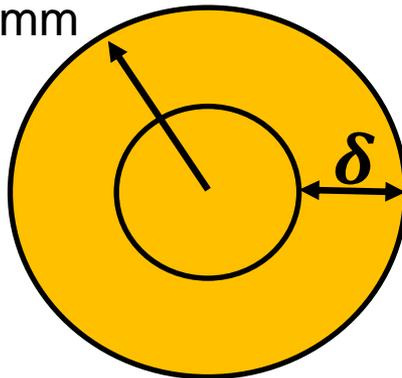
Umstellung nach  $\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a} = ??$  K

# Elektromagnetisch-thermische Simulation (Konduktion)

## Diskussion Fall 2:

Durch den eingesetzten Wechselstrom und die damit zusammenhängende Stromverdrängung ergibt sich eine andere Querschnittsfläche für den Strom. Die Eindringtiefe  $\delta$  wird auch als „äquivalente Leitschichtdicke“ bezeichnet.

$r = 1\text{mm}$



Gesamtquerschnitt:  $A_G = \pi r^2$

Innerer, „nicht bestromter“ Querschnitt:  $A_i = \pi(r - \delta)^2 = \pi r^2 - 2\pi r\delta + \pi\delta^2$

Resultierender Querschnitt:  $A_R = A_G - A_i = 2\pi r\delta - \pi\delta^2$

# Elektromagnetisch-thermische Simulation (Konduktion)

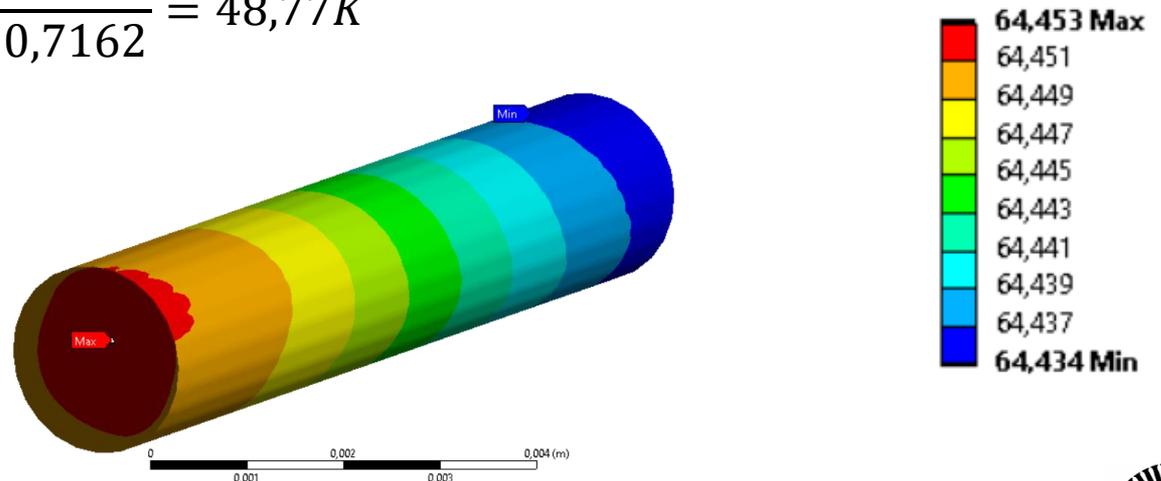
## Diskussion Fall 2:

Die eingesetzte Frequenz von 20 kHz führt zu einer Eindringtiefe von 0,467 mm und damit zu einer Reduktion des „aktiven“ Querschnitts auf ca. 71,62 %.

Umgesetzte Leistung und Querschnittsfläche verhalten sich antiproportional zueinander.

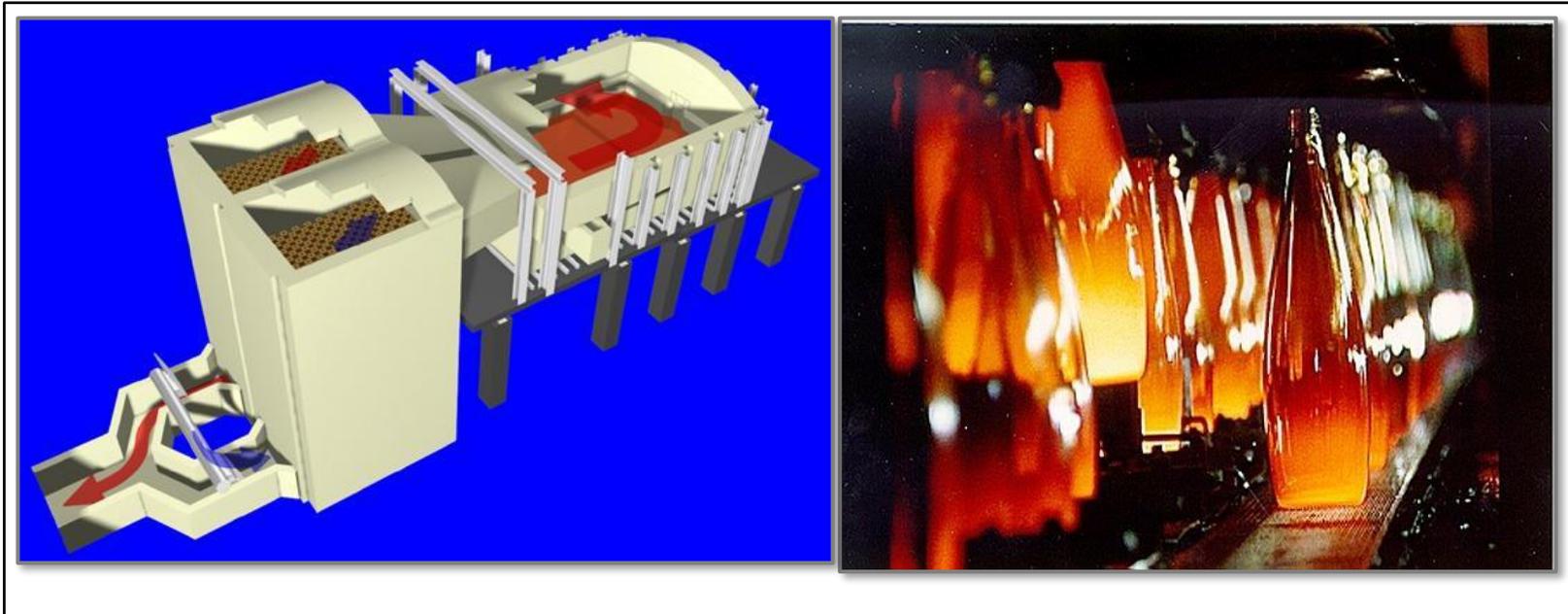
Leistung und Temperaturerhöhung verhalten sich proportional zueinander.

$$\Delta\vartheta_{AC} = \Delta\vartheta_{DC} \cdot \frac{A_{Gesamt}}{A_{effektiv}} = \frac{34,93K}{0,7162} = 48,77K$$



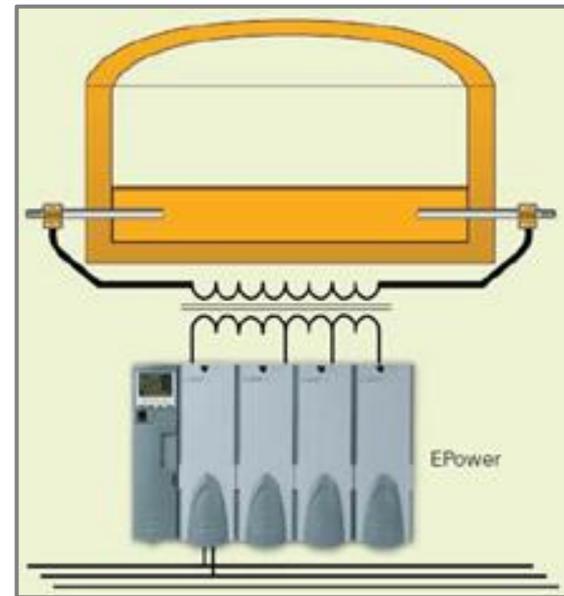
# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

- Gasbrenner zur Erhitzung des Materials auf Schmelztemperatur
- U-Flammwanne bietet hohe Flexibilität bei geringem Energieverbrauch
- Schmelzleistung von 50 bis 400 t/d
- elektrisches Boosting möglich



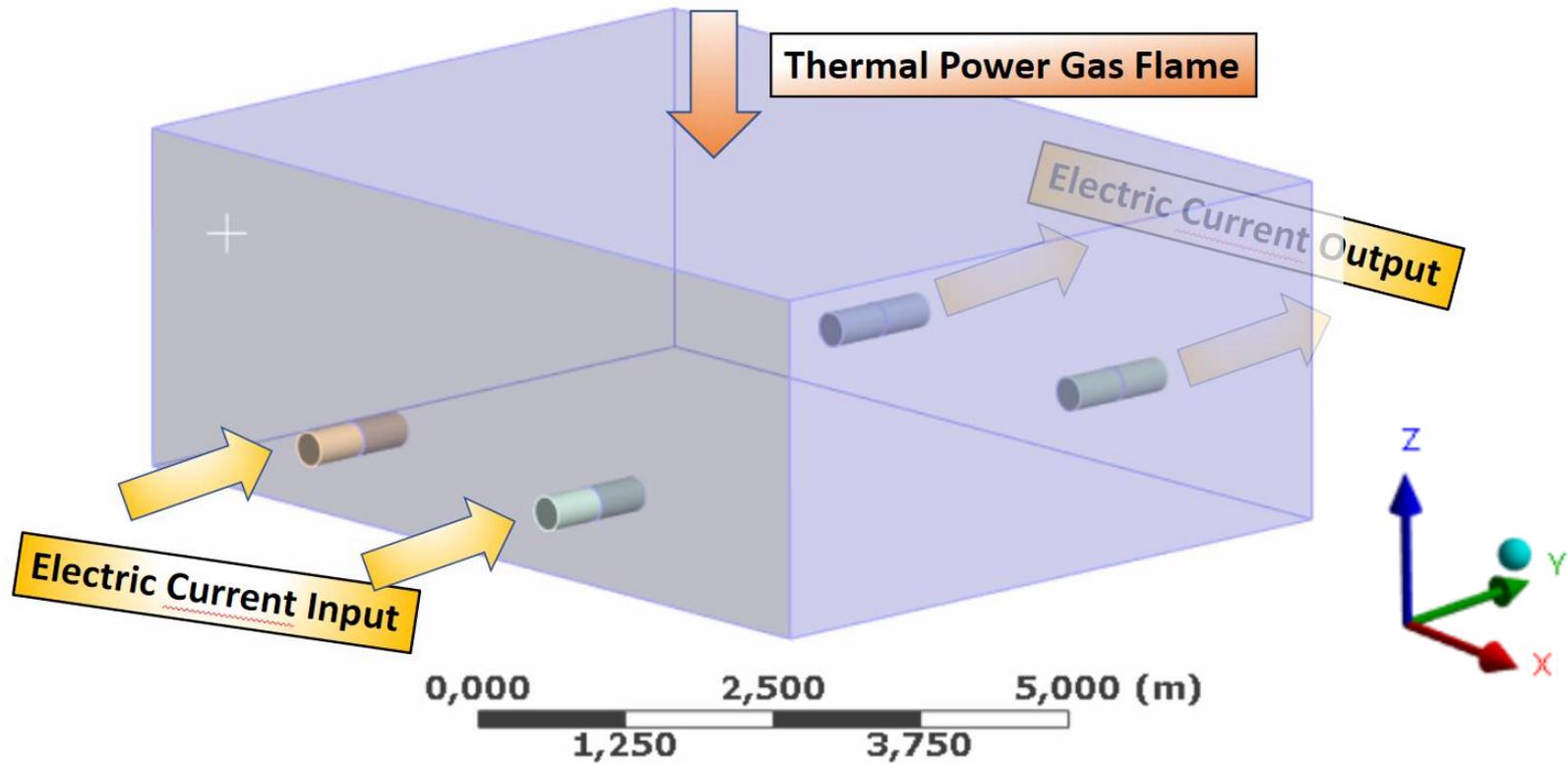
# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

- Schnelle Einbringung weiterer Energie
- Gut für Überhitzung der Schmelze (Läuterungsprozess) geeignet
- Substituierbarkeit beider Energien zur Kostenoptimierung
- Energiewende (Windenergie) bringt starke Preisschwankungen mit sich



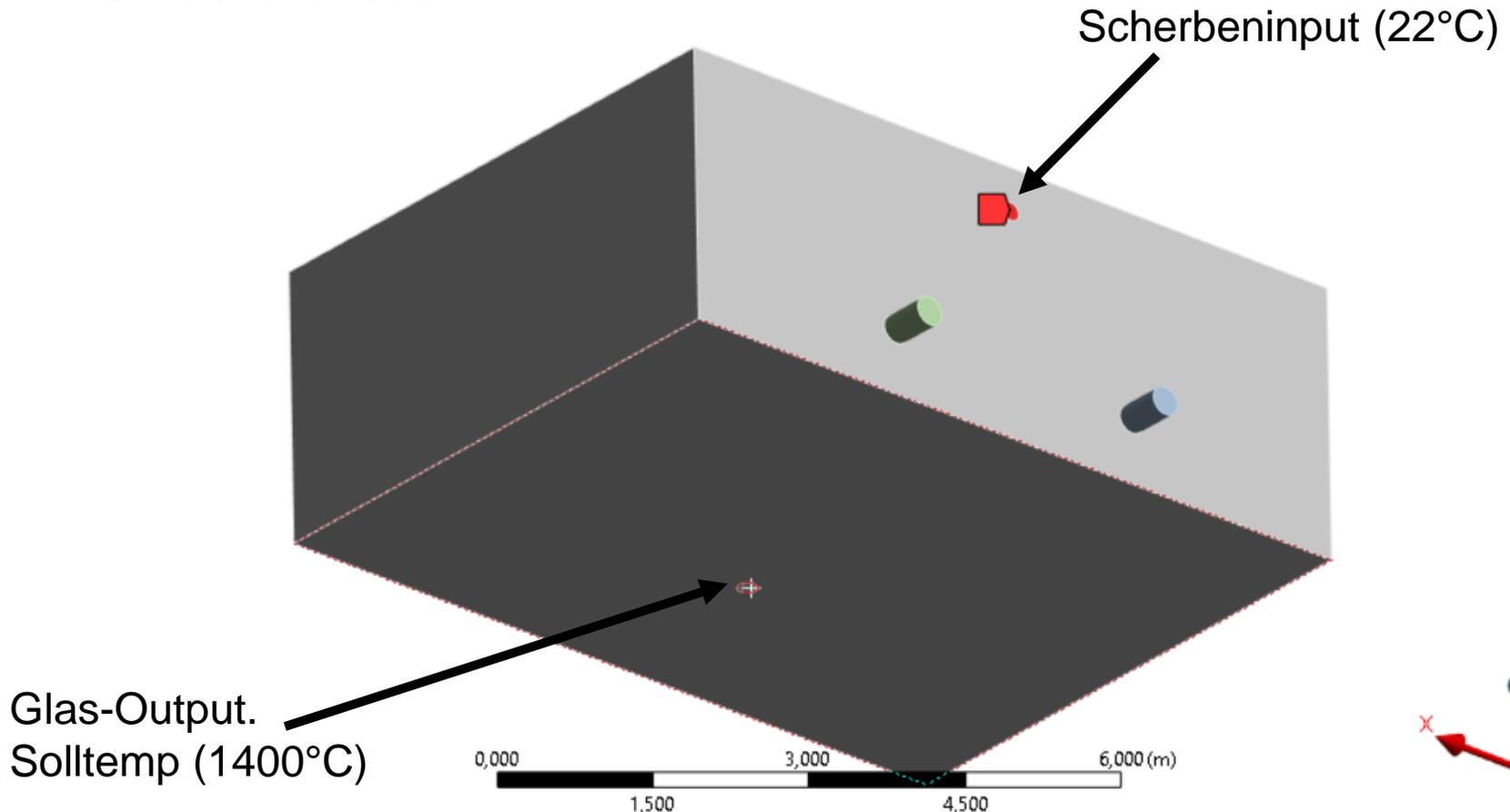
# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

## ➤ Simulationsmodell



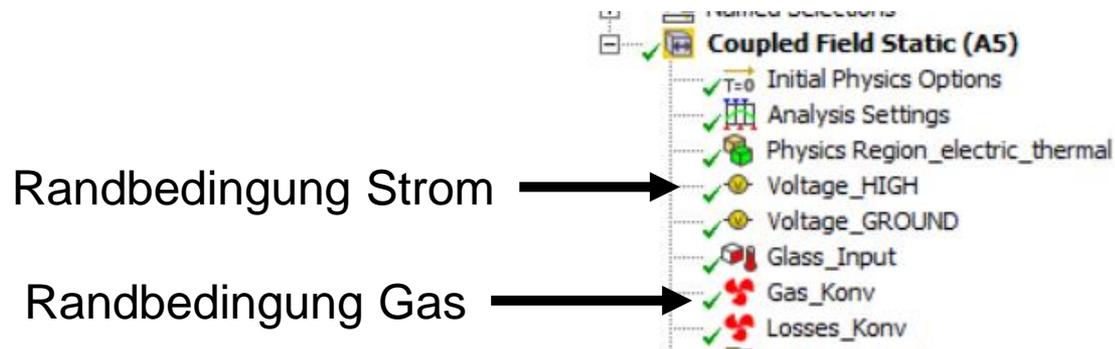
# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

## ➤ Simulationsmodell



# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

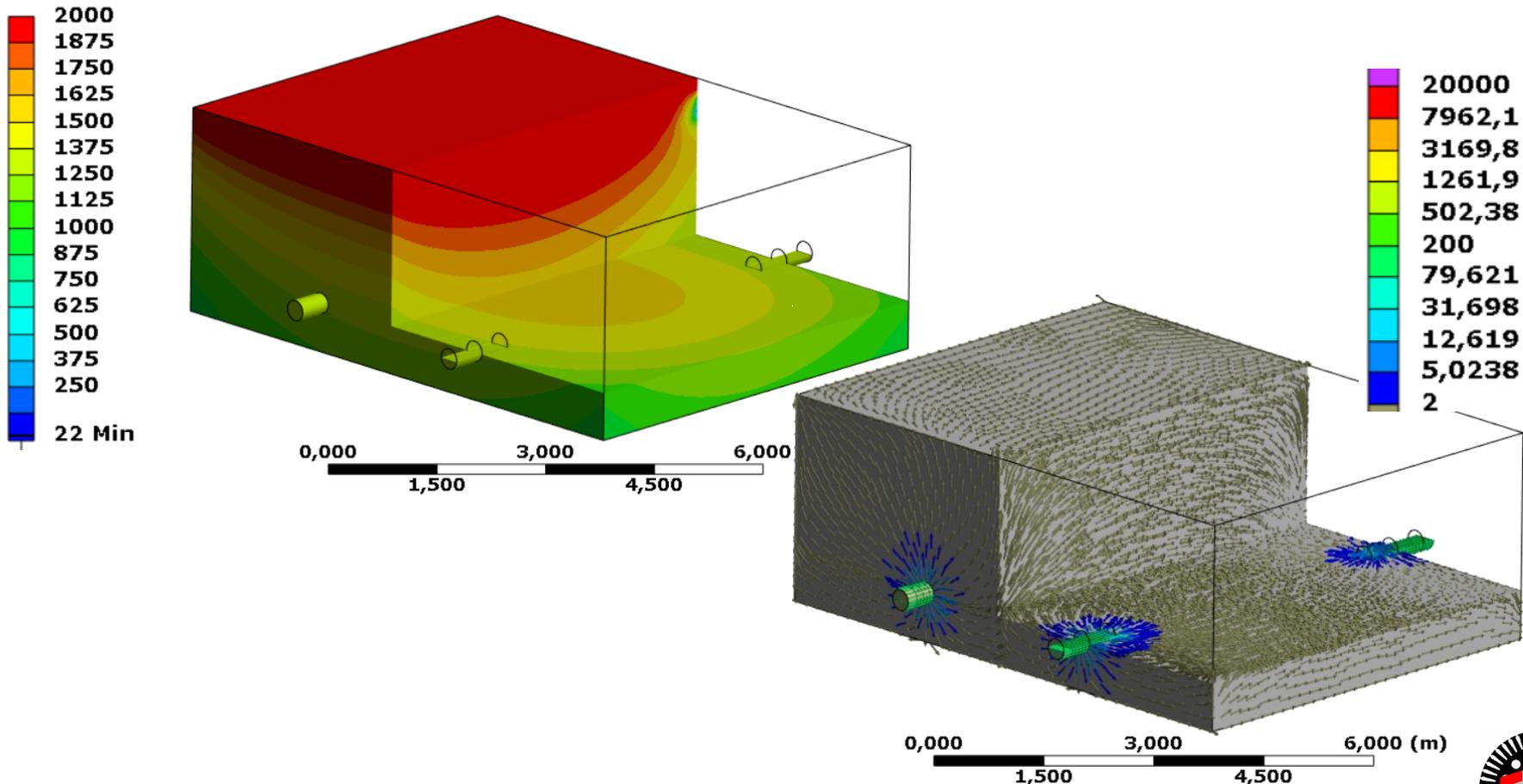
- Energiezufuhr durch Gas und Strom lassen sich frei definieren



- Simulieren Sie die Temperaturfelder für unterschiedliche Belastungszenarien

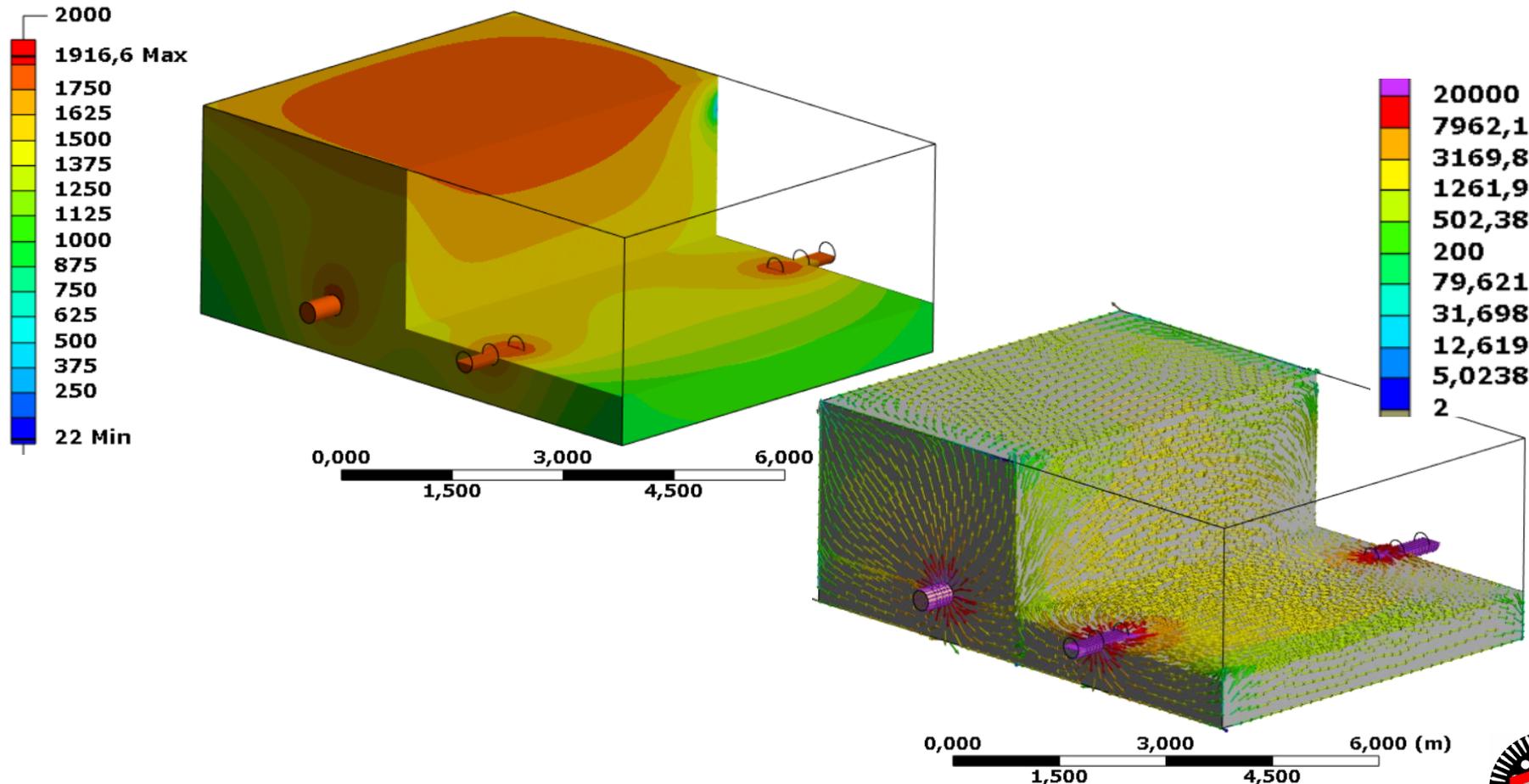
# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

➤ Energiezufuhr: 15,2 MW Gas; 0,0 MW Strom



# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

➤ Energiezufuhr: 7,1 MW Gas; 6,9 MW Strom



# Fossile & Konduktive Erwärmung - Glasschmelzen

➤ Energiezufuhr: 0,0 MW Gas; 12,8 MW Strom

