

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
Umrichter, ITO, IRO, Skull, Volumenleistungsdichte, Zonensteuerung**
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

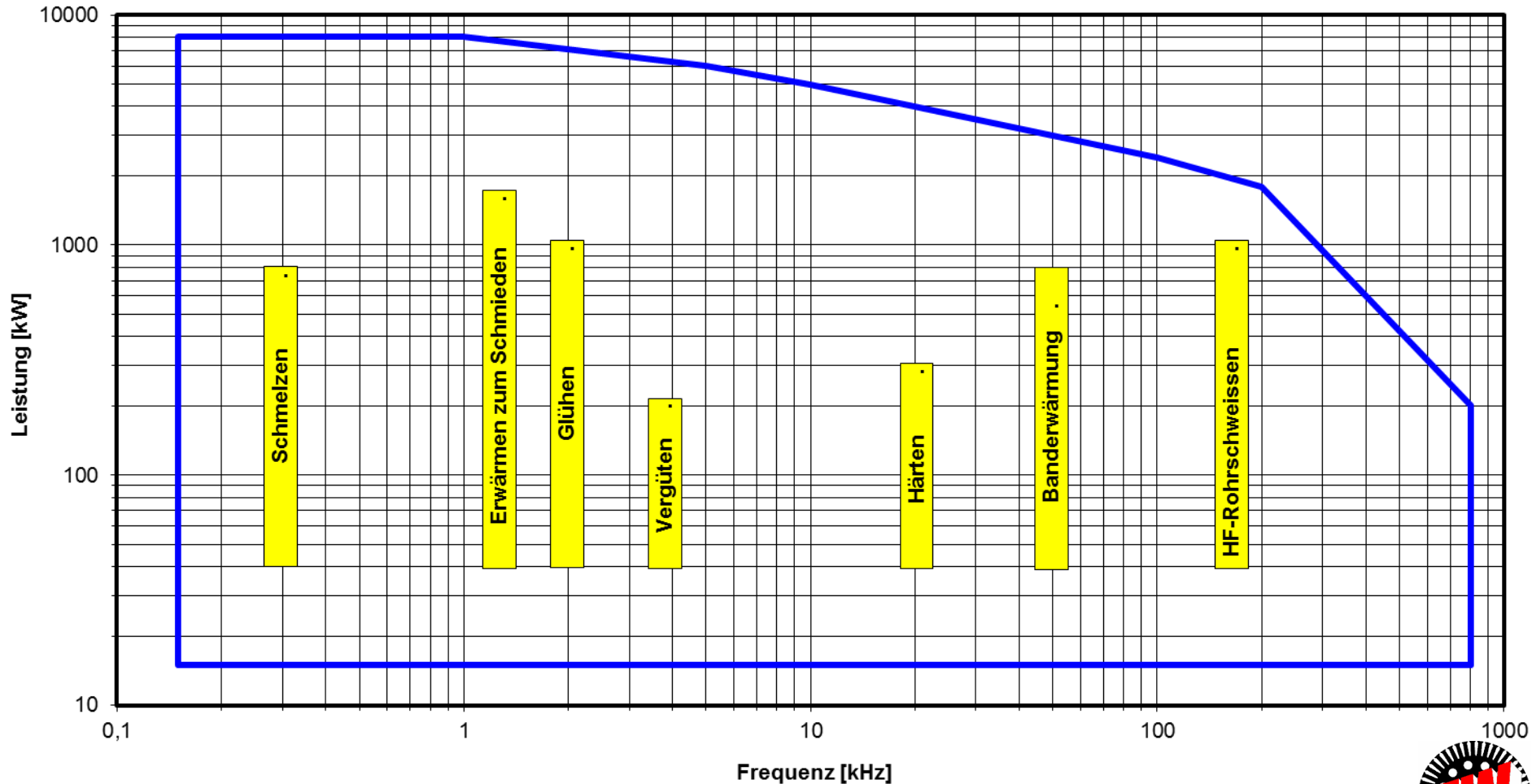


Energieversorgung für die induktive Erwärmung

- **Anwendungen der induktiven Erwärmung - Überblick**
- **Vorteile einer Schwingkreislast**
- **Schwingkreisumrichter**

Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Induktive Erwärmung : Leistungs- und Frequenzspektrum



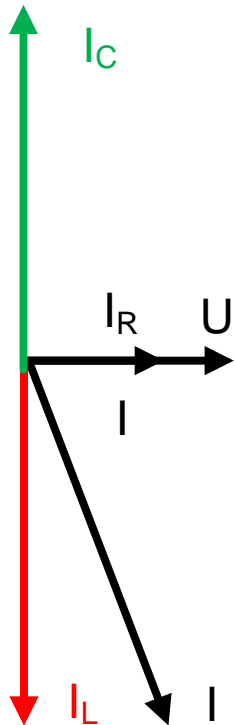
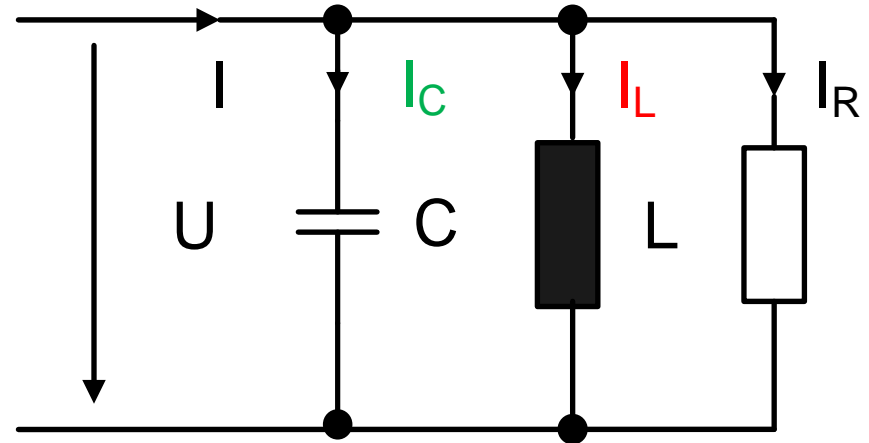
Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Vorteile einer Schwingkreislast

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$d = \frac{R}{2L \cdot \omega_0}$$

$$\omega_e = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - d^2}$$

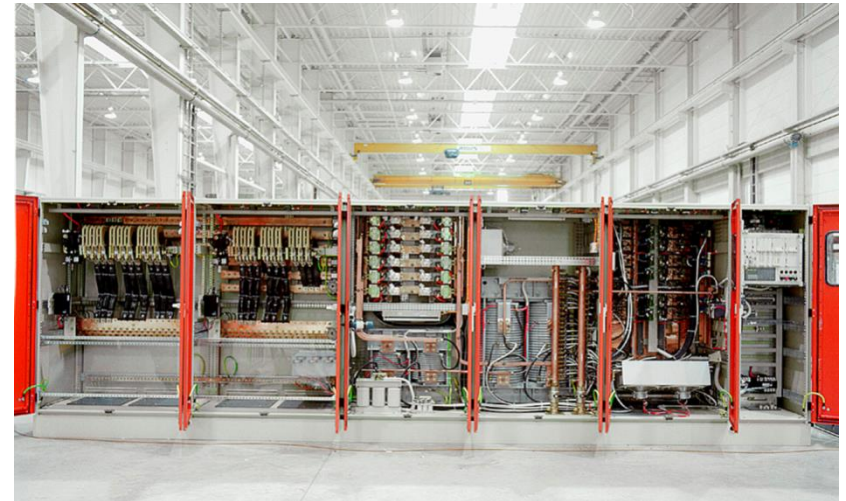


- Wenn der Schwingkreis von einer Wechselstromquelle gespeist wird, deren Frequenz der Resonanzfrequenz des Schwingkreises gleich, wird der Induktorblindstrom vollständig vom Kondensatorstrom kompensiert.
- In diesem Fall muss die Stromquelle nur die im Werkstück verbrauchte Energie nachliefern. Sie wird nicht mit Blindleistung belastet.

Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Schwingkreisumrichter

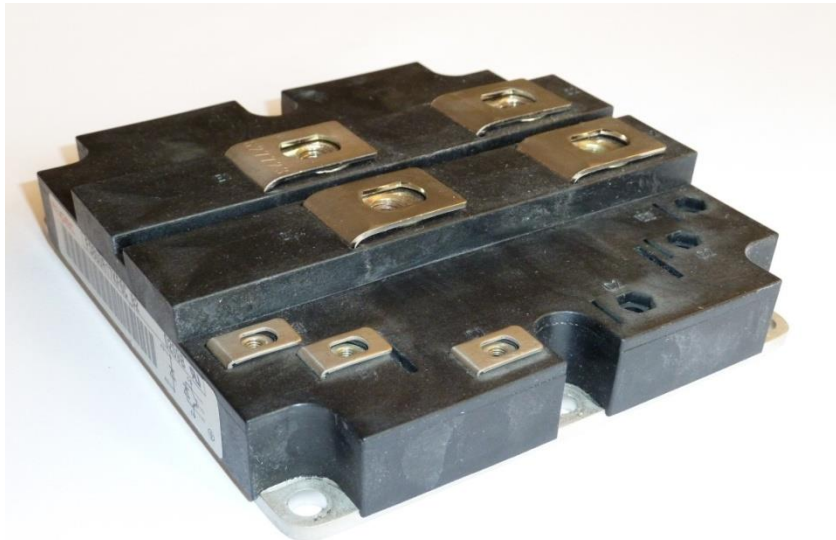
- Parallelschwingkreisumrichter
- Serienschwingkreisumrichter
- Umrichter mit L-LC-Lastschaltung
- Leistungshalbleiter für Schwingkreisumrichter



Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Leistungshalbleiter für Schwingkreisumrichter

- Thyristor
- IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor
- MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Leistungshalbleiter für die Schwingkreisumrichter

▪ IGBT :

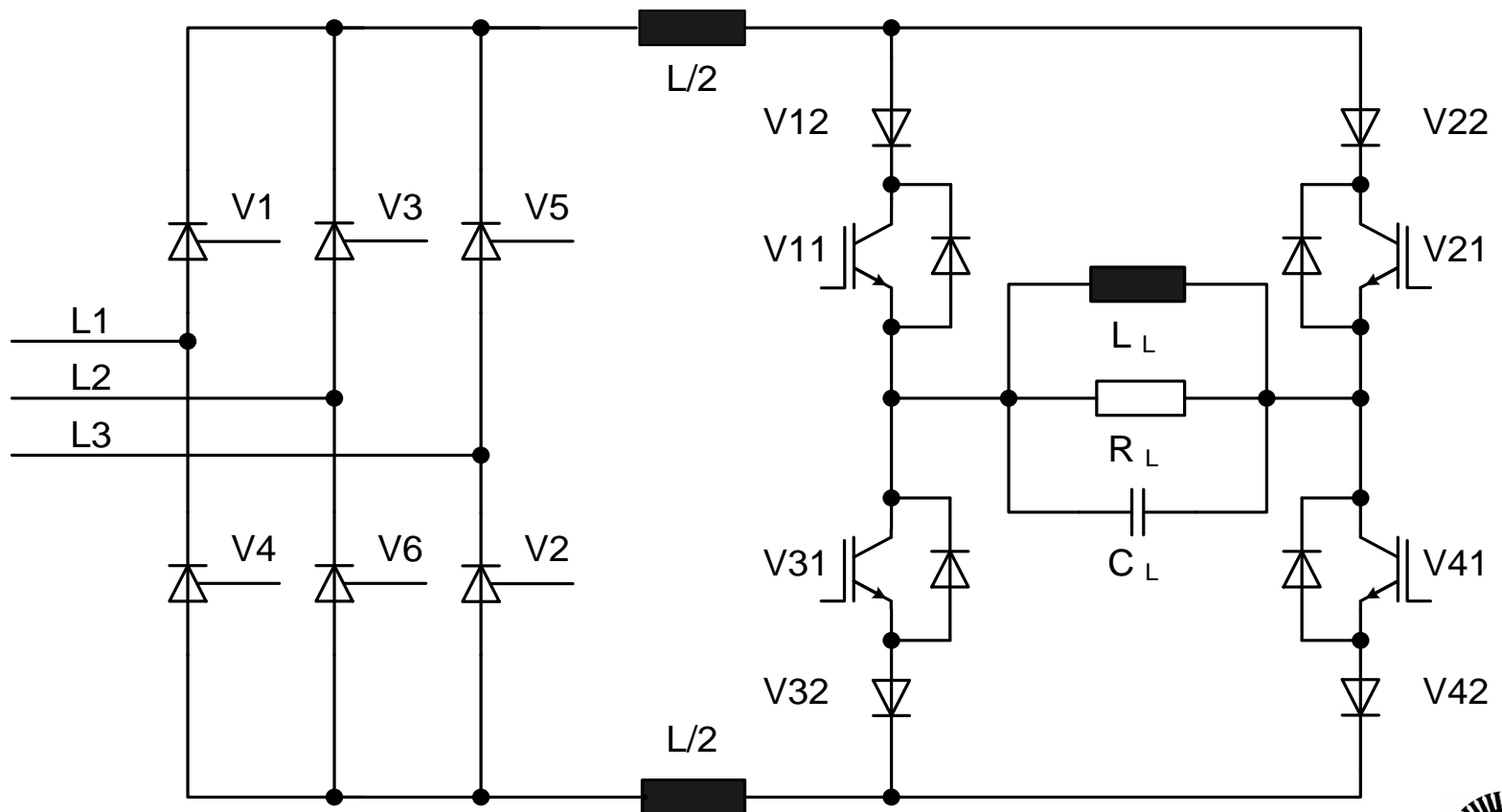
- Abschaltbar
- Frequenzbereich $\geq 200\text{kHz}$
- IGBT im Entwicklungsfokus
- Langfristige Lieferbarkeit gesichert

▪ Frequenzthyristor :

- Nicht abschaltbar
- Frequenzbereich $\leq 10\text{kHz}$
- Frequenzthyristoren werden nicht mehr weiter entwickelt
- Mittelfristig Lieferprobleme zu erwarten

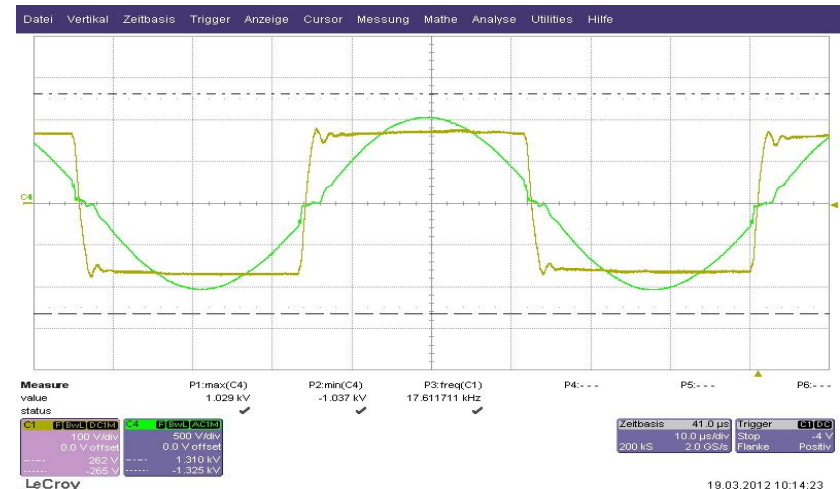
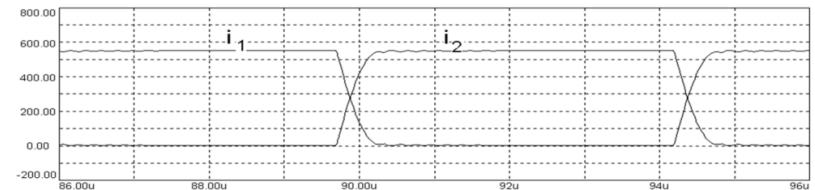
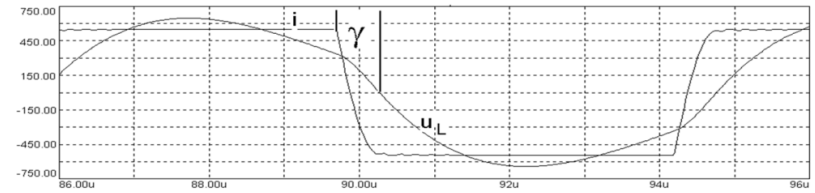
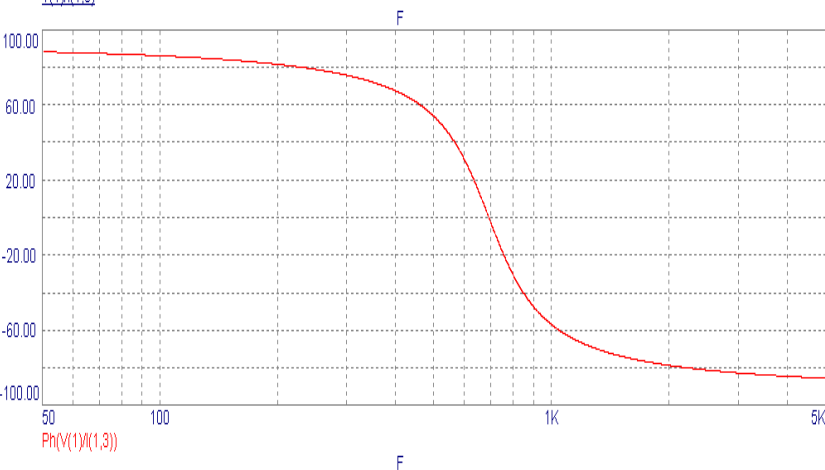
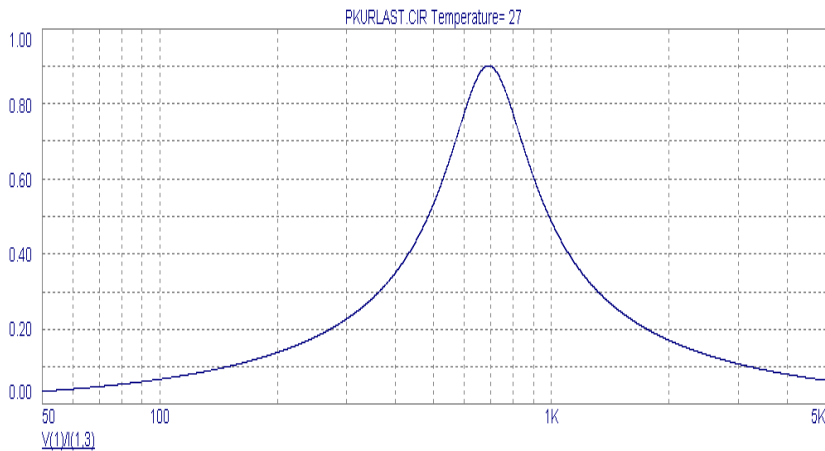
Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Parallelschwingkreisumrichter : Prinzipschaltbild



Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Parallelschwingkreisumrichter : Funktionsprinzip



Parallelschwingkreisumrichter : Eigenschaften

- + Geeignet für alle Anwendungen der induktiven Erwärmung
 - + Einsetzbar in sehr großem Frequenzbereich
- + Guter Wirkungsgrad
 - Reduktion der Schaltverluste durch optimierte Kommutierung und „weiches“ Schalten der Transistoren („Soft Switching“)
- + In der Regel kein Ausgangstransformator erforderlich
 - Direkter Anschluss der Schwingkreislast an den Wechselrichterausgang möglich
- - Leistungssteuerung über den Gleichrichter
- - Verschlechterung des Leistungsfaktors bei kleinen Ausgangsspannungen

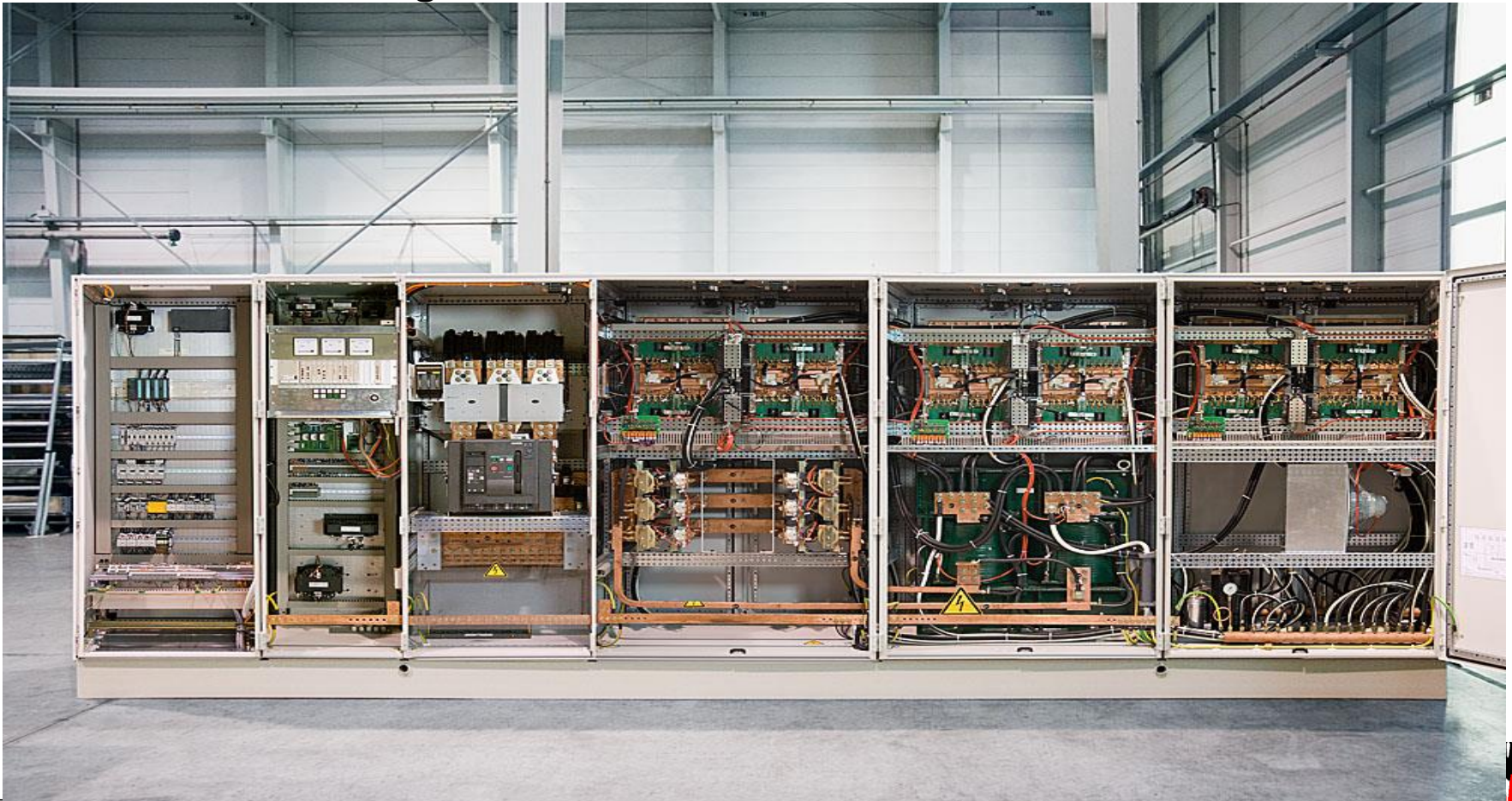
Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Parallelschwingkreisumrichter : IGBT – Technologie, 3600kW, 1000V, 2kHz



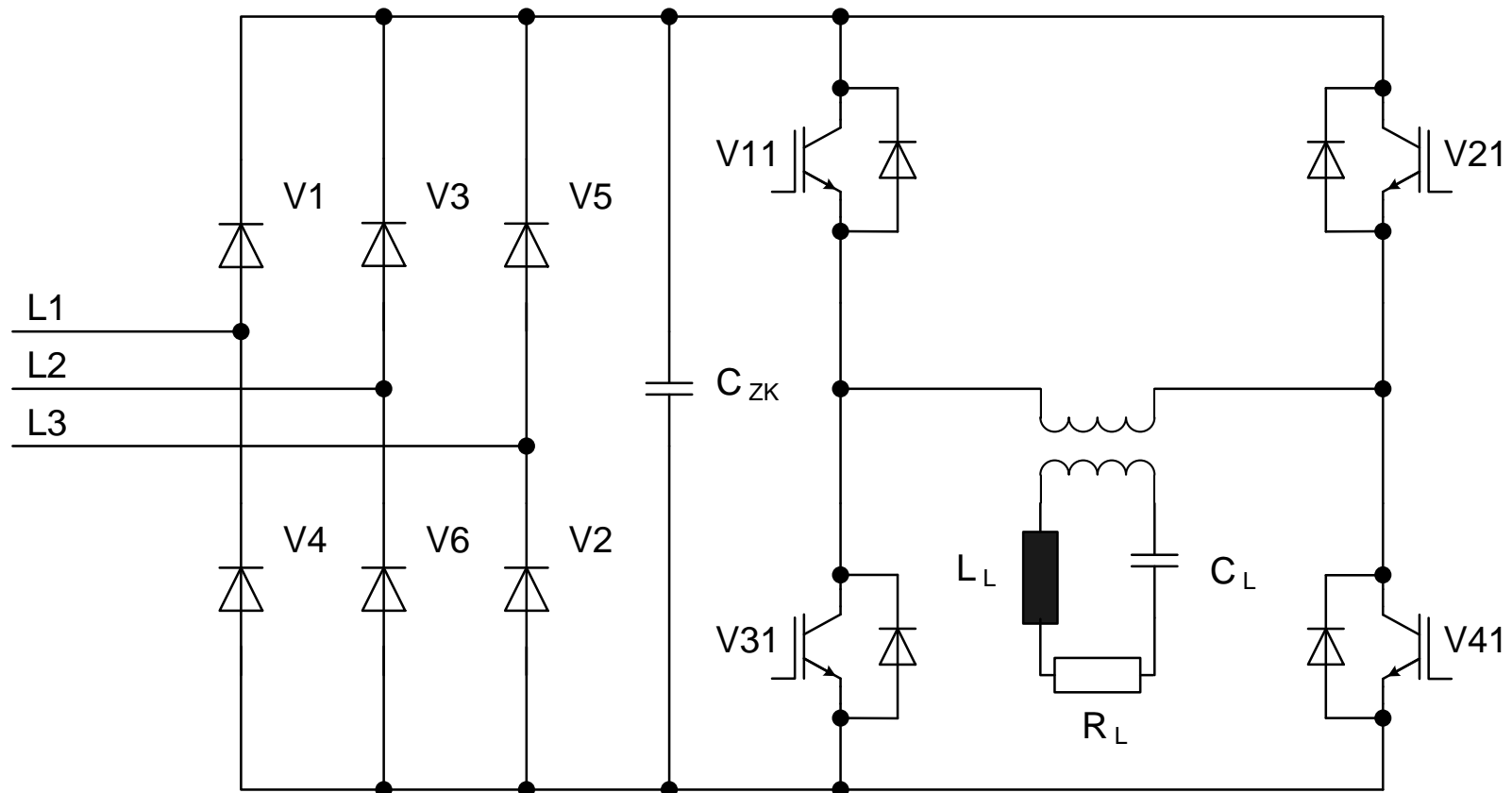
Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Parallelschwingkreisumrichter : MOSFET – Technologie, 800kW, 450V, 400kHz



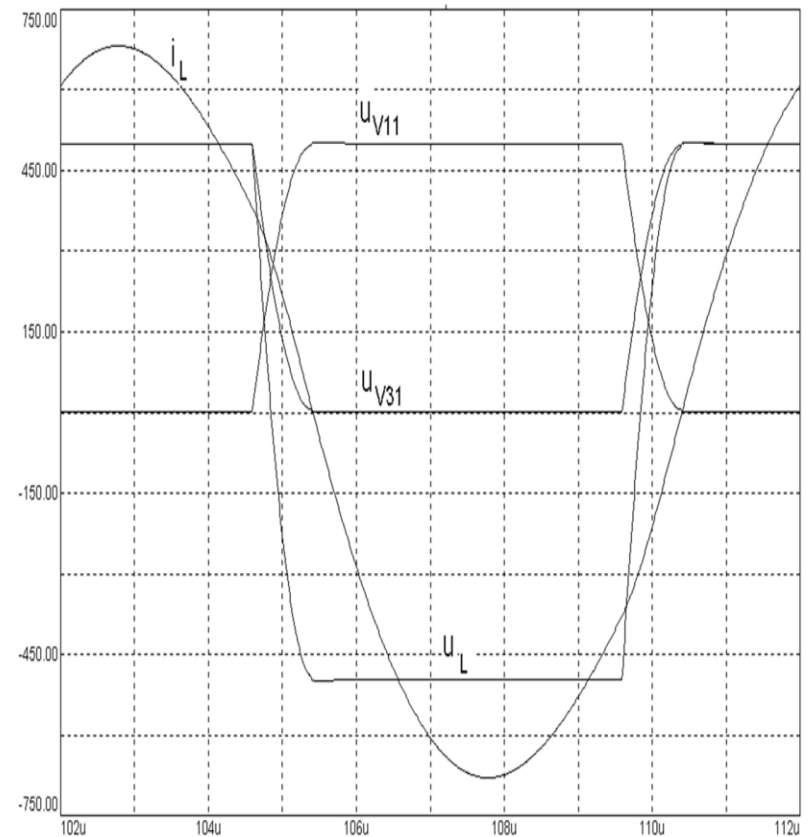
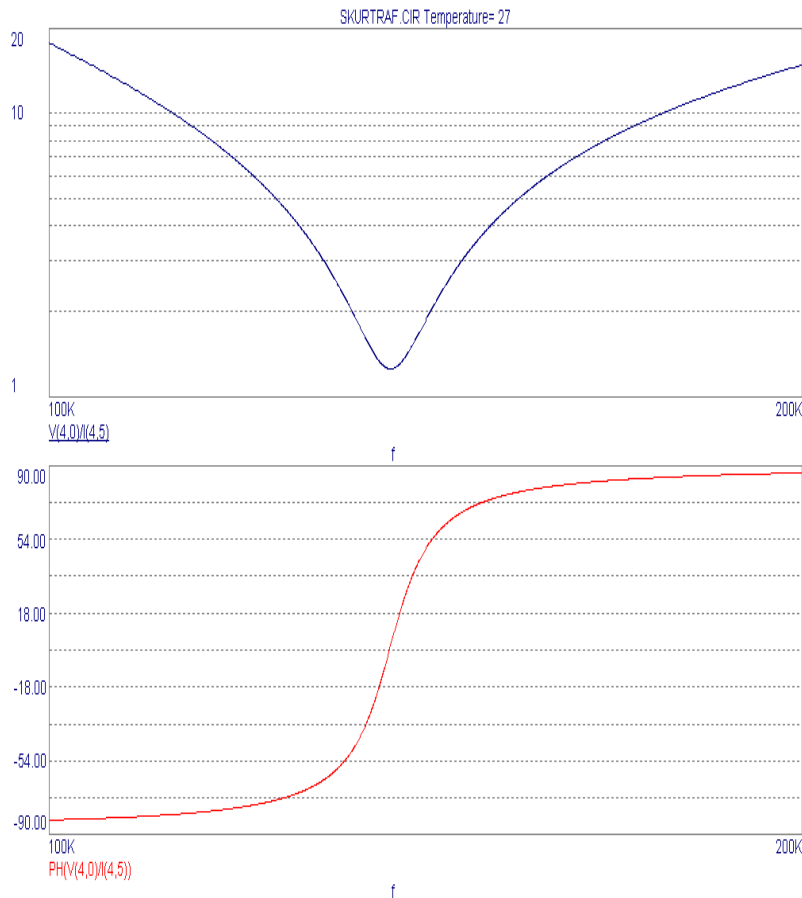
Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Serienschwingkreisumrichter : Prinzipschaltbild



Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Serienschwingkreisumrichter : Funktionsprinzip



Serienschwingkreisumrichter : Eigenschaften

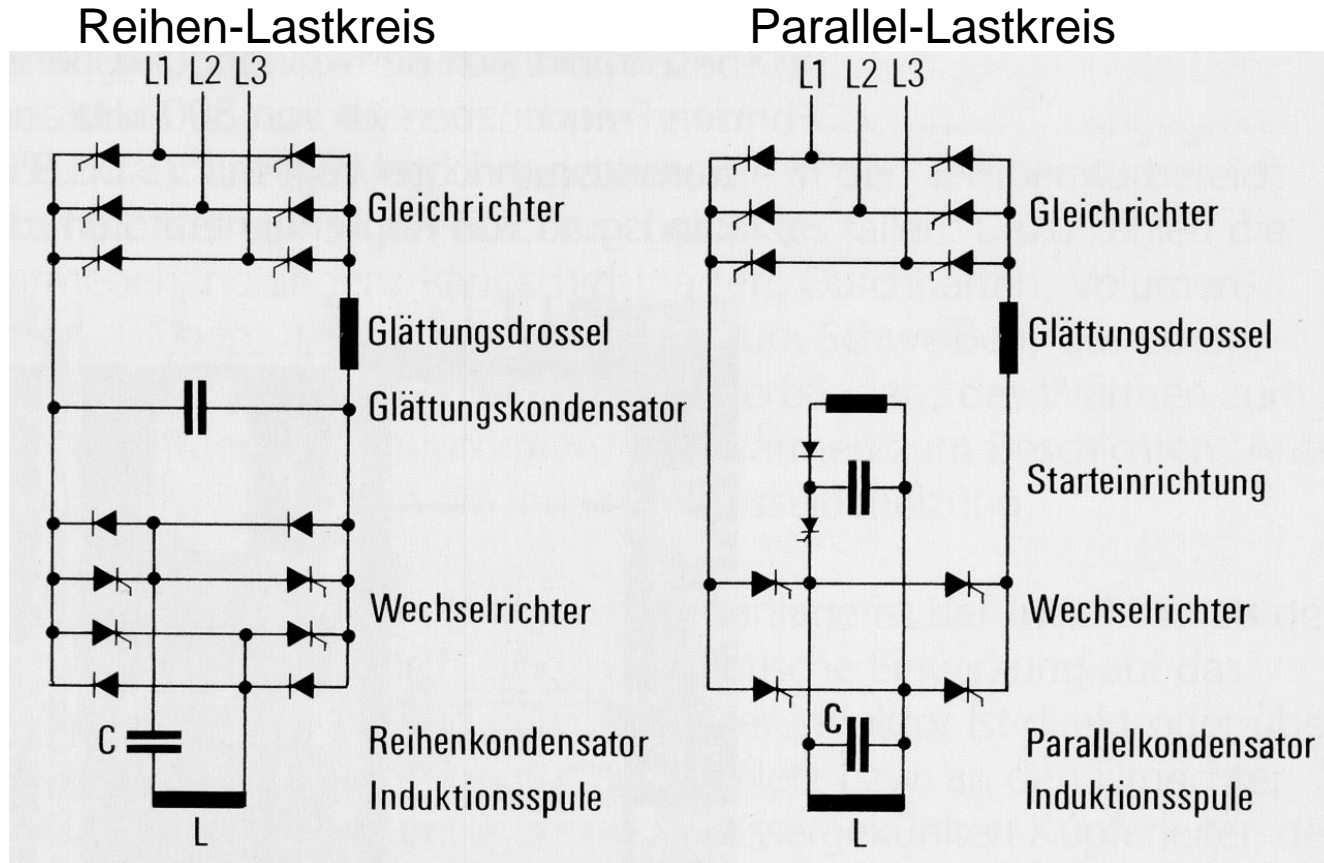
- + Geeignet für alle Anwendungen der induktiven Erwärmung
- + Einsetzbar in sehr großem Frequenzbereich
- + Guter Wirkungsgrad
 - Reduktion der Schaltverluste durch lastgeführten Wechselrichter und „weiches“ Schalten der Transistoren („Soft Switching“)
- + Leistungssteuerung über den Wechselrichter möglich
- + Ungesteuerter Gleichrichter
- + Guter netzseitiger Leistungsfaktor in allen Betriebszuständen
- - Ein Transformator ist für die Anpassung der Lastimpedanz an die Ausgangsimpedanz des Wechselrichters meist unvermeidbar

Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Serienschwingkreisumrichter : IGBT – Technologie, 2200kW, 800V, 150kHz



Schwingkreis-Umrichter



Glättungsdrossel: klein
 Glättungskondensator: klein
 Freilaufdioden: erforderlichlich

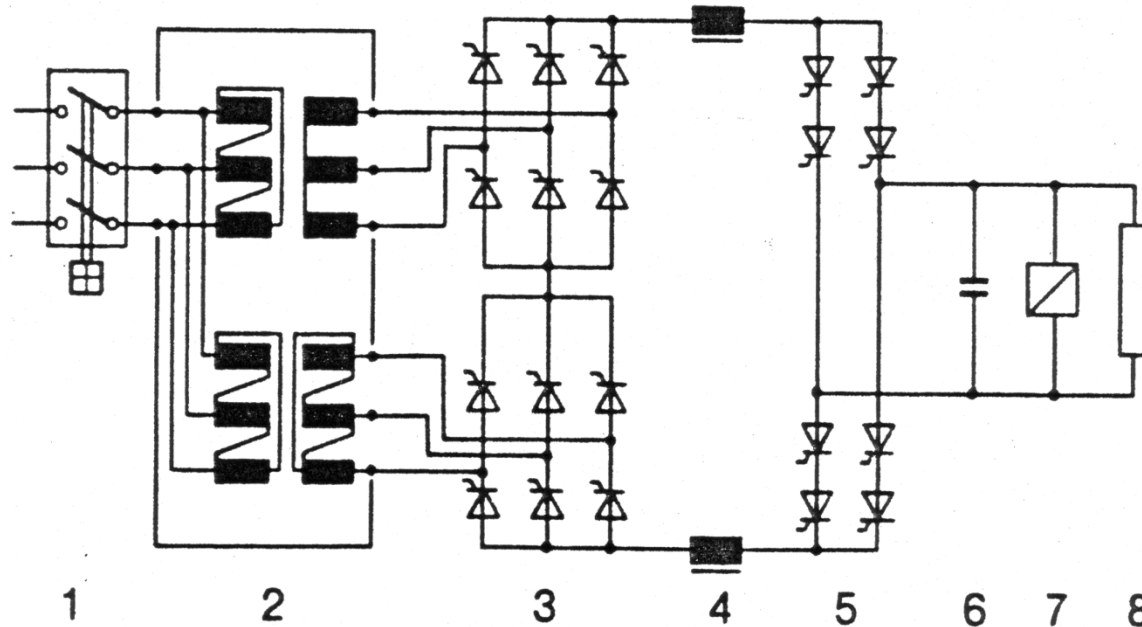
groß
 /
 /

Quelle:
 Verfahrensinformation
 Induktive Erwärmung,
 RWE Energie



Reduzierung von Oberschwingungen - I

12-pulsiger Thyristorumrichter



- 1 Leistungsschalter
- 2 Stromrichter-Transformator
- 3 Gleichrichter
- 4 Gleichstrom-Zwischenkreis mit
symmetrisch aufgeteilter
Glättungsdrossel

- 5 Wechselrichter
- 6 Parallelkondensatorbatterie
- 7 Starteinrichtung
- 8 Induktionsspule

Reduzierung von Oberschwingungen - II

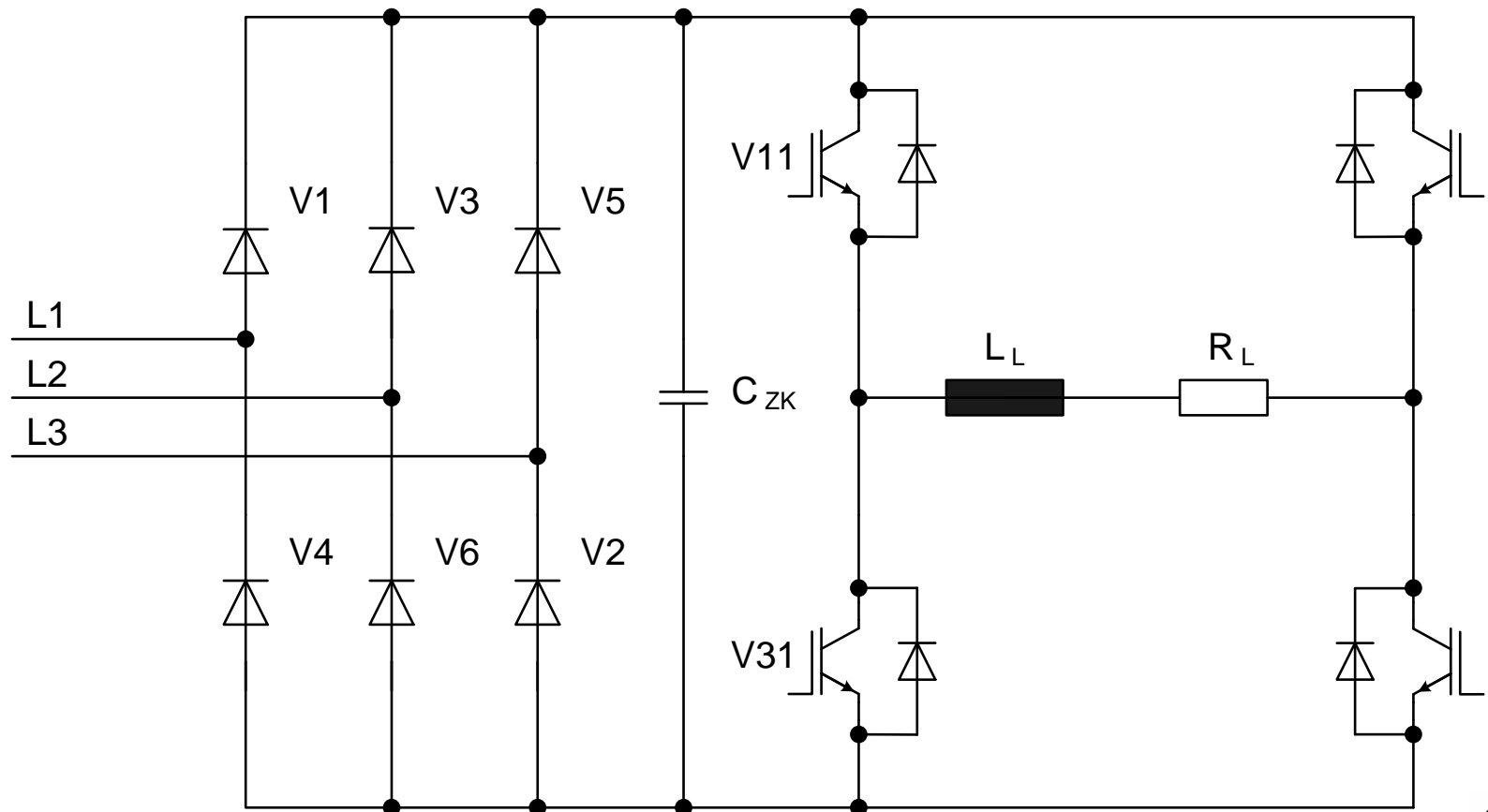


Oberschwingung	6-pulsig < 2 MW	12-pulsig 2 ... 6 MW	24-pulsig > 6 MW
5.	18,6	1,8	1,8
7.	12,4	1,1	1,1
11.	6,4	5,6	0,6
13.	4,6	3,8	0,4
17.	2,2	0,2	0,2
19.	1,5	0,1	0,1
23.	0,6	0,7	0,7
25.	0,6	0,7	0,7



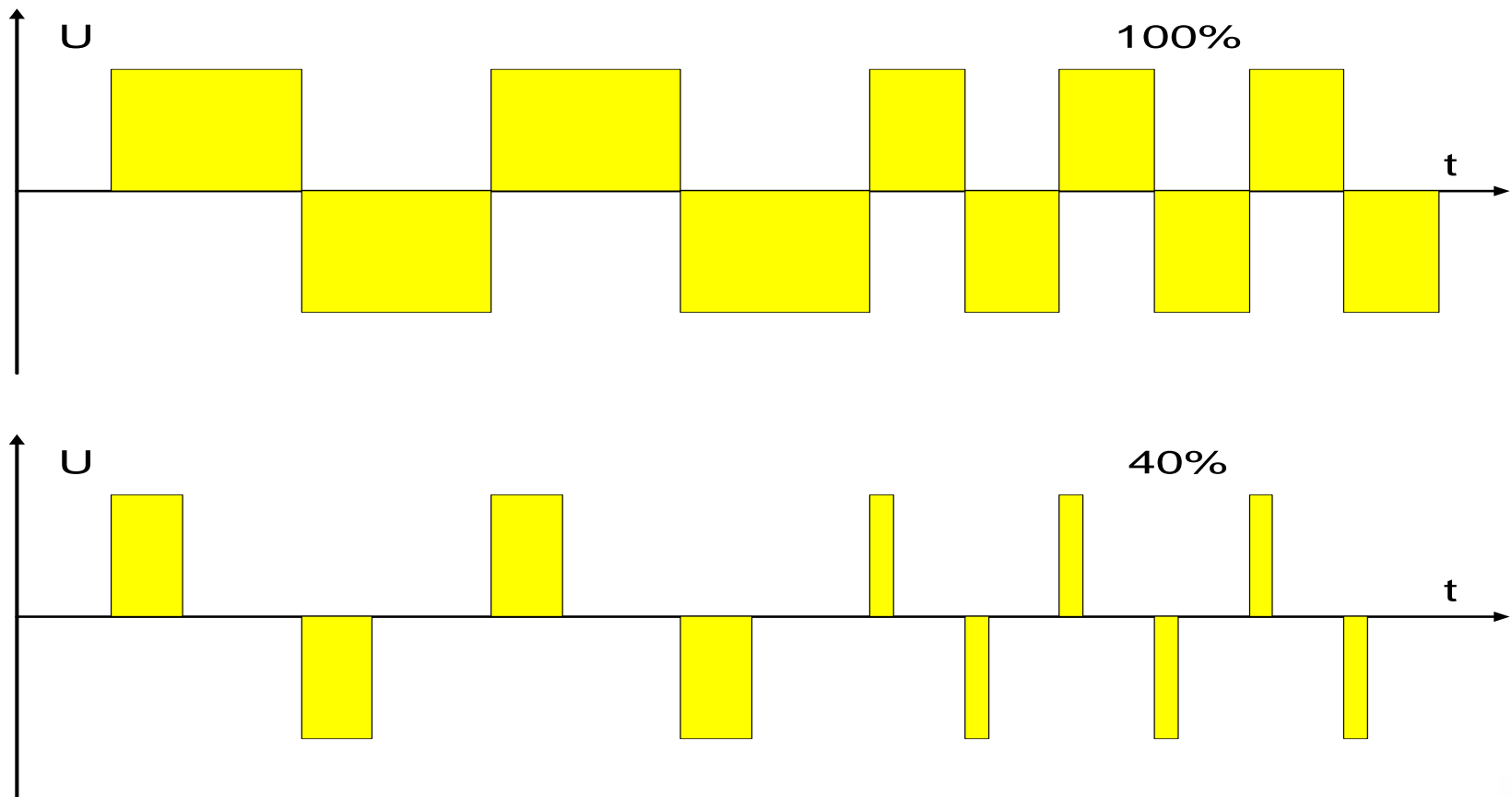
Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Induktorbetrieb am PWM-Umrichter : Prinzipschaltbild



Energieversorgung für die induktive Erwärmung

Induktorbetrieb am PWM-Umrichter : Funktionsprinzip

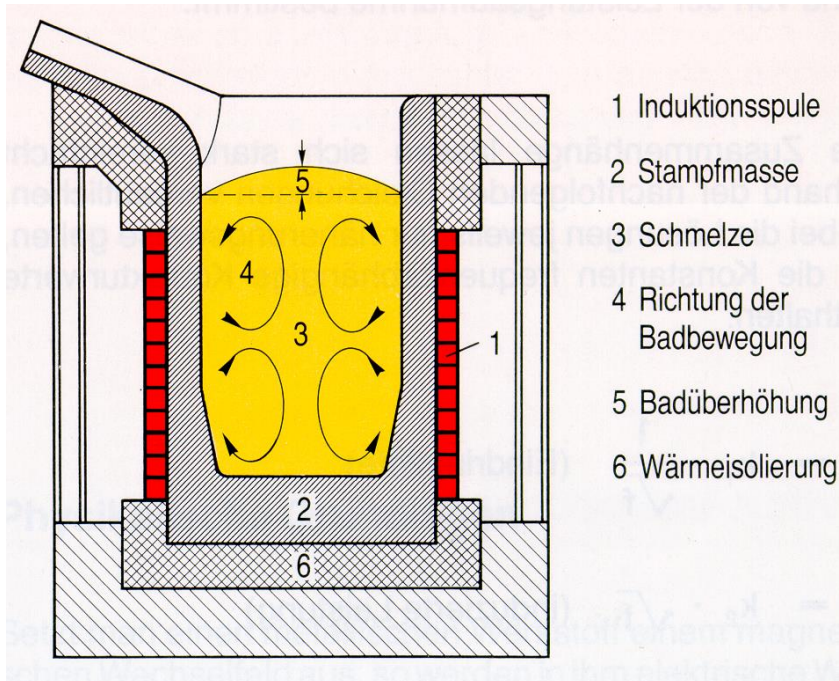


Induktorbetrieb am PWM-Umrichter : Eigenschaften

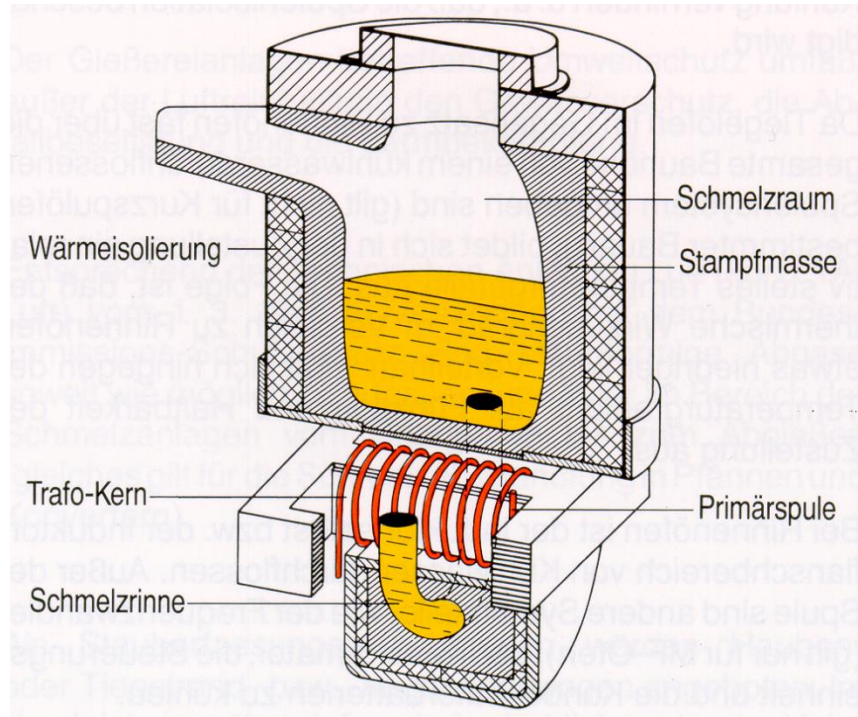
- + Die Frequenz kann während des Betriebs kontinuierlich verändert werden
- + Frequenz und Leistung sind über den Wechselrichter steuerbar
- + Ungesteuerter Gleichrichter
- - Der Wechselrichter muss für den vollen Blindstrom des Induktors bemessen werden
- - Schlechter Wirkungsgrad
- - Hohe Kosten im Vergleich zu Schwingkreisumrichter gleicher Leistung

Induktives Schmelzen - Ofentypen

Induktions-Tiegelofen



Induktions-Rinnenofen



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

- Überwiegend Schmelzaggregat
- Mittlerer Wirkungsgrad
- Frequenzen: 50 ... 1000 Hz

- Überwiegend Warmhalteaggregat
- Hoher Wirkungsgrad
- Frequenzen: 50 Hz, 60 Hz

Betone (Boden,
Spulen-Druckringe)

- druckfest
- Temperaturwechselfest
- elektrisch isolierend
- Bindung bereits bei niedrigen Temperaturen erforderlich
- geringer Wassergehalt

Verschleißfutter (Tiegel):

- resistent gegen chemische Einflüsse
- Temperaturfest, temperaturwechselfest
- abriebfest (starke Schmelzenströmung)
- gute thermische Isolation
- geringe Neigung zur Rissbildung
- Optimal:
 - hohe Festigkeit (Sinterung) an der Oberfläche,
 - geringe Festigkeit (Rieselfestigkeit) vor Spule, realisiert durch trocken gestampfte Tiegel
- Kompromiss bezüglich thermischer Isolierung, elektromagnetischer Kopplung und Verschleißdicke

Zustellungen von Induktionsrinnenöfen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kessel:

- ➔ hohes thermisches Isolationsverhalten (Isoliersteine zum Stahlkessel hin)
- ➔ hohe Temperaturfestigkeit zur Schmelze → Mehrschicht-Aufbau

Induktor:

- ➔ sehr hohe Temperaturfestigkeit
- ➔ geringe Infiltrationsneigung (hohe Dichte)
- ➔ hohe Temperaturwechselfestigkeit
- ➔ gute Kühlung am Kühlmantel und Gehäuse, um Durchsinterung zu vermeiden



Ausführungsarten der Zustellungen



Induktionstiegelofen:

gestampfte Tiegel:

- Gusseisen: SiO_2
- Stahl: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
- Al: Al_2O_3
- Cu: Mullite ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$)/ Al_2O_3
- Betone: Low Cement

Fertigtiegel:

- Al_2O_3 , SiO_2

Induktionsrinnenofen:

Kessel:

- Gusseisen: $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -
spinellbildend
- Cu: Al_2O_3

Induktor:

$\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -spinellbildend
 SiO_2 nicht geeignet
wegen zu geringer
Temperaturfestigkeit

Temperaturbeständigkeit: $\text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$
Kosten (€/t): $\text{MgO} (6000) > \text{Al}_2\text{O}_3 (2500) > \text{SiO}_2 (250)$



Elektrotechnische Grundlagen in Induktionsschmelzöfen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Stromdichte in der Schmelze in A/m²:

$$S_x = S_0 \cdot e^{-x/\delta}$$

Elektromagnetische Eindringtiefe in m:

$$\delta = \sqrt{\rho / (\pi \mu f)}$$

Leistungsumsetzung in der Schmelze in W:

$$P_i = \rho / \delta \cdot A \cdot H^2$$

Elektromagnetischer Druck auf die Schmelze:

$$p = 1/2 \cdot P_i / A \cdot \sqrt{\mu / (\pi \rho f)}$$

Badüberhöhung in m:

$$h_{\ddot{u}} = p / \gamma$$

Abhängigkeit der Badüberhöhung von der Frequenz:

$$1/f^{0,5} = 1/\sqrt{f}$$

Abhängigkeit der Strömung von der Frequenz:

$$1/f^{0,7} \dots 1/f^{0,9}$$

Scheinleistung in kVA:

$$S = U \cdot I$$

Wirkleistung in kW:

$$P_W = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Blindleistung in kVA:

$$P_B = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Leistungsfaktor:

$$\cos \varphi$$

Elektrischer Wirkungsgrad:

$$\eta_e = P_i / (P_i + P_v)$$



Induktives Schmelzen - Anwendung

Induktions-Tiegelöfen mit Randabsaugung



Werkbild ABB

- Schmelzen: Gusseisen, Stahl, Schwermetalle, Leichtmetalle

30 t-Induktions-Rinnenöfen



Werkbild ABB

- Schmelzen: Gusseisen, Aluminium, Kupfer und Kupfer-Legierungen

Schmelzanlage für Gusseisen

Mittelfrequenz-Induktions-Tiegelofen



- Fassungsvermögen:
- je 6t
- Anschlussleistung:
- je 3300 kW / 250 Hz

Quelle: ABB Industrietechnik AG, Dortmund

Vorteile des Mittelfrequenz-Hochleistungs-Schmelzens

- kurze Schmelzzeiten
- hoher Durchsatz
- geringe Wärmeverluste
- hoher Prozesswirkungsgrad
- kurze Reaktionszeit zwischen Schmelze und Tiegelzustellung

GG: Grauguss

Beispiele für erfolgreiches und betriebssicheres Schmelzen mit Hochleistungs-Mittelfrequenz-Tiegelöfen:

- Ofenleistung von 6000 kW bei 6 t GG und 250 Hz seit 1989
- Ofenleistung von 9300 kW bei 12 t GG und 220 Hz seit 1992
- Ofenleistung von 16000 kW bei 20 t GG und 220 Hz seit 1999

ITO – Größen, Schmelzgut, Frequenzen

	Schmelzgut	Größen in t	Leistung in MW	Frequenzen in Hz
NF-Öfen:	Gusseisen, Stahl	1,3 ... 100	0,5 ... 21	50 ... 60
	Leichtmetalle	0,5 ... 15	0,2 ... 4	50 ... 60
	Schwermetalle	1,5 ... 40	0,5 ... 7	50 ... 60
MF-Öfen:	Gusseisen, Stahl	0,25 ... 30	0,3 ... 16	150 ... 1000
	Leichtmetalle	0,1 ... 8	0,2 ... 4	90 ... 1000
	Schwermetalle	0,3 ... 70	0,3 ... 16	65 ... 1000

NF: Niederfrequenz, MF: Mittelfrequenz

Induktionsöfen

Wirkungsgrad, Energieverbrauch, Schmelzleistung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kunde: Gießerei XY			Ofentyp: IT 7 (15 t)	
Einsatzmaterial: GG			Frequenz: 50 Hz	
Abgustemperatur: 1500 °C			Sonstiges: Sumpfbetrieb 40 %	
1	Netzanschlussleistung	4500 kW	-Trafoverluste (1,5 %)	-70 kW
2	Kondensator-Eingangsleistung	4430 kW	-UR-/Kond.-verluste(1 %)	-40 kW
3	Kondensator-Ausgangsleistung	4390 kW	-Kabelverluste -Kabelanschlussverluste	-75 kW -5 kW
4	Spulenleistung	4310 kW	-Nennspulenverluste (19%)	-820 kW
5	Feldleistung	3490 kW	-Blechpaketverluste -Sekundärverluste (%) -Verluste beim Schmelzen (6 %)*	-20 kW -10 kW -210 kW
6	Induzierte Leistung	3250 kW	-Wärmeverluste	-140 kW
7	Nutzleistung	3110 kW	*) Verluste: z.B. durch <u>Unterfüllung</u> des Ofens Gewinne: z.B. durch kaltes Material unter Curietemperatur	
8	Erforderliche Schmelzenergie	385 kWh/t		
9	Gesamtwirkungsgrad (7/1)	0,691		
10	Spezifischer Energieverbrauch (8/9)	557 kWh/t		
11	Schmelzleistung (7/8)*0,85 Konstantleistung	keine 6,9 t/h		

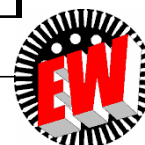


Induktionsöfen

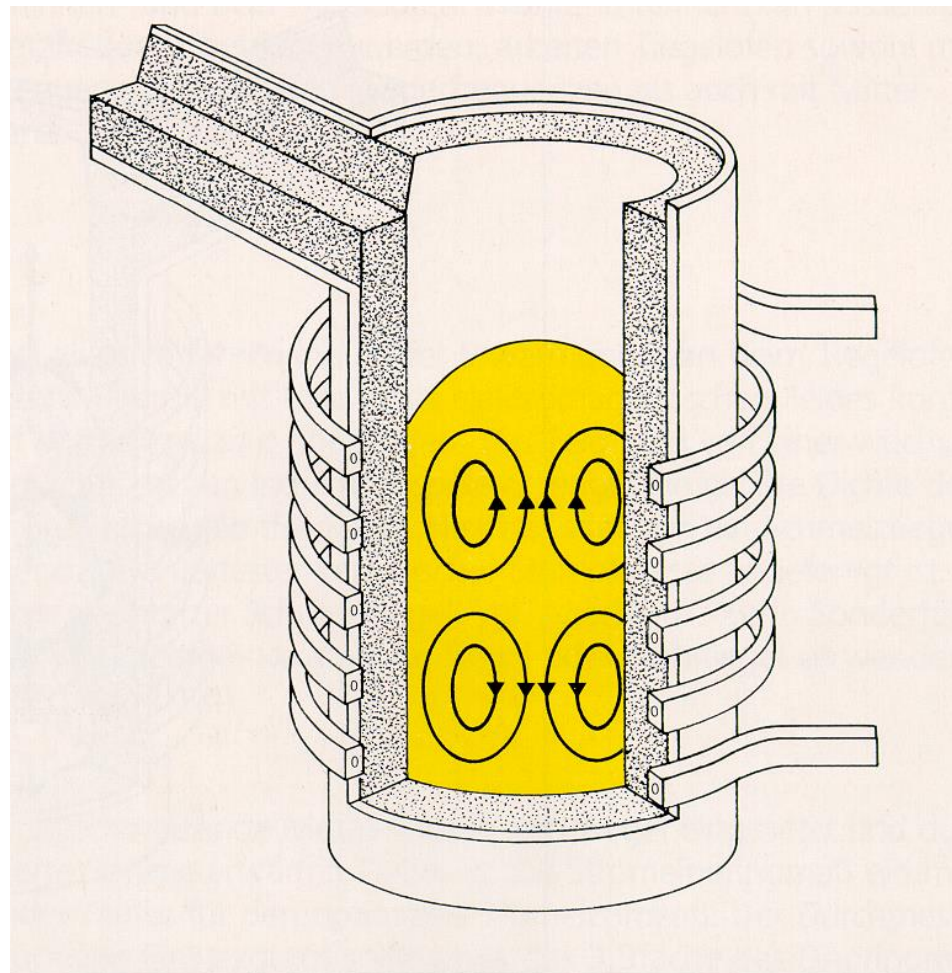
Wirkungsgrad, Energieverbrauch, Schmelzleistung



Kunde: Gießerei XY			Ofentyp: IFM 7 (15 t)	
Einsatzmaterial: GG			Frequenz: 250 Hz	
Abgustemperatur: 1500 °C			Sonstiges: Chargenbetrieb Konstantleistung	
1	Netzanschlussleistung	10000 kW	-Trafoverluste (1,5 %)	-150 kW
2	Umrichter-Eingangsleistung	9850 kW	-UR_/Kond.-verluste (4 %)	-390 kW
3	Umrichter-Ausgangsleistung	9460 kW	-Kabelverluste -Kabelanschlussverluste	-200 kW -10 kW
4	Spulenleistung	9250 kW	-Nennspulenverluste (19 %)	-1760 kW
5	Feldleistung	7490 kW	-Blechpaketverluste -Sekundärverluste (%) -Gewinne beim Schmelzen (5 %) *)	-60 kW -20 kW +370 kW
6	Induzierte Leistung	7780 kW	-Wärmeverluste	-120 kW
7	Nutzleistung	7660 kW	*) Verluste: z. B. durch Unterfüllung des Ofens Gewinne: z. B. durch <u>kalt</u> es Material unter Curietemperatur (Batch-Faktor)	
8	Erforderliche Schmelzenergie	385 kWh/t		
9	Gesamtwirkungsgrad (7/1)	0,766		
10	Spezifischer Energieverbrauch (8/9)	503 kWh/t		
11	Schmelzleistung (7/8)	19,9 t/h		

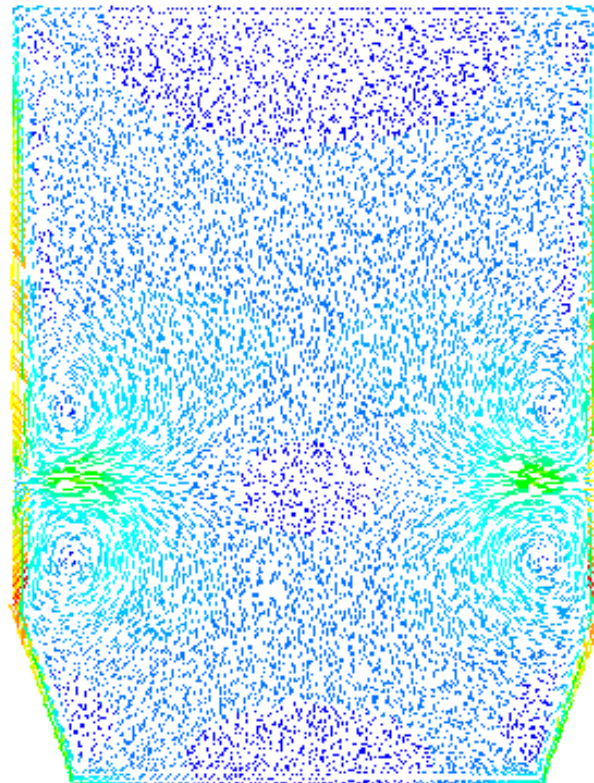
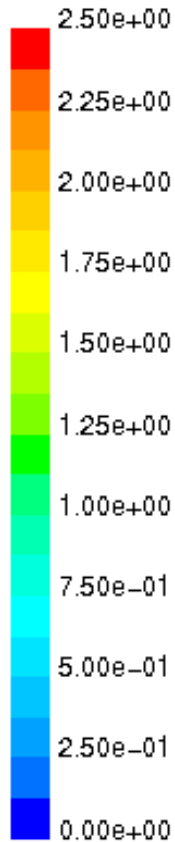


Badbewegung beim ITO



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

Instationäre 3D-LES-Simulation der Strömungsgeschwindigkeit in einem industriellen Induktionstiegelofen



Mittelfrequenz-Induktionstiegelofen:

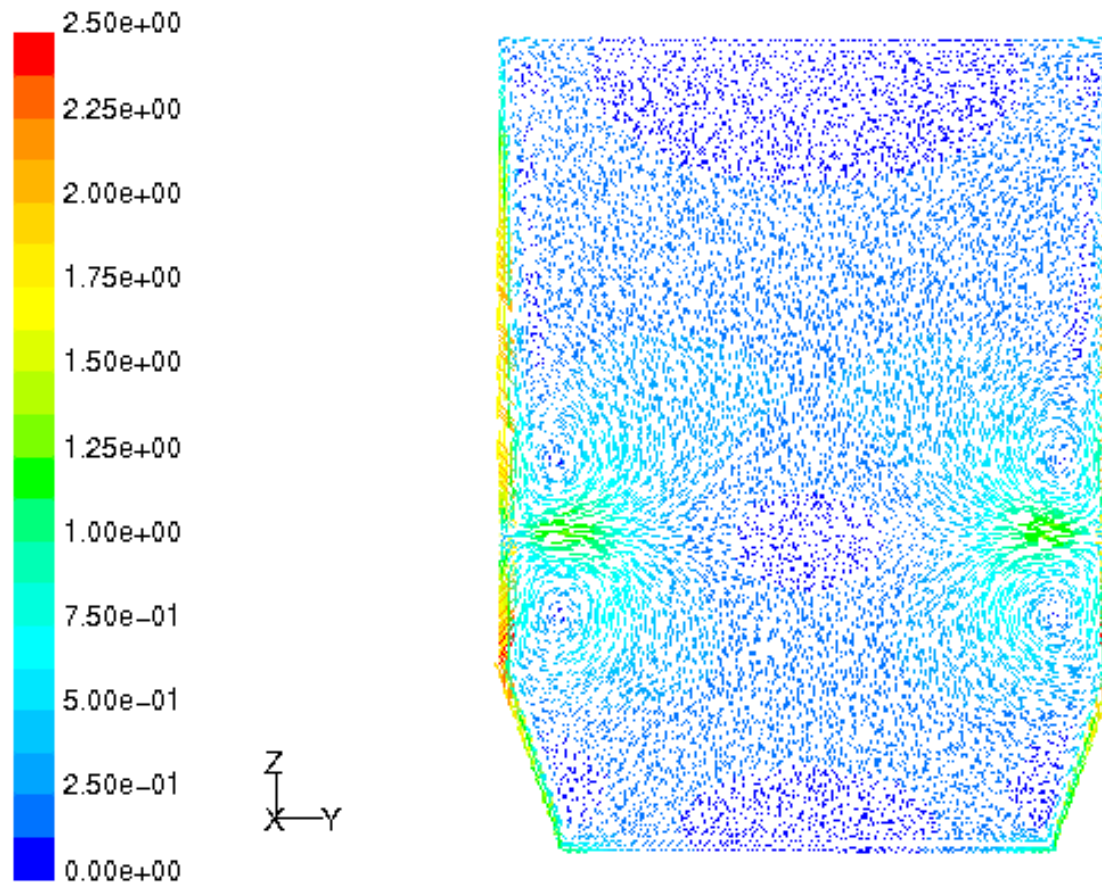
- 12 t Gusseisen
- Leistung 9 MW
- Frequenz 230 Hz

Tiegeldurchmesser: 1,20 m
Tiegelhöhe: 1,30 m

Instationäre 3D-LES-Simulation der Strömungsgeschwindigkeit in einem industriellen Induktionstiegelofen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Velocity Vectors Colored By plane-velocity (Time=1.2600e+00)

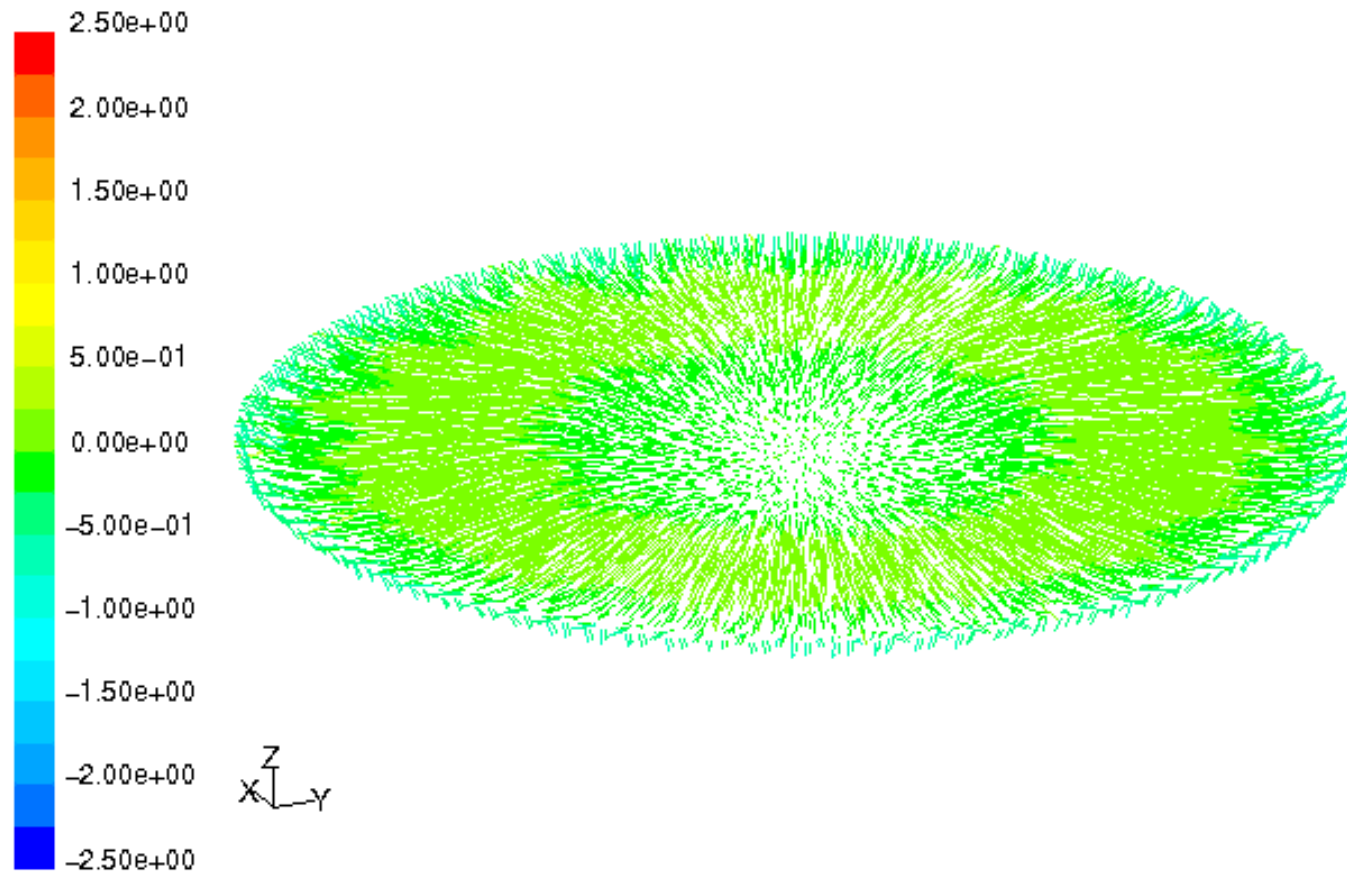
Aug 13, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, LES, unsteady)



Instationäre 3D-LES-Simulation der Strömungsgeschwindigkeit in einem industriellen Induktionstiegelofen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

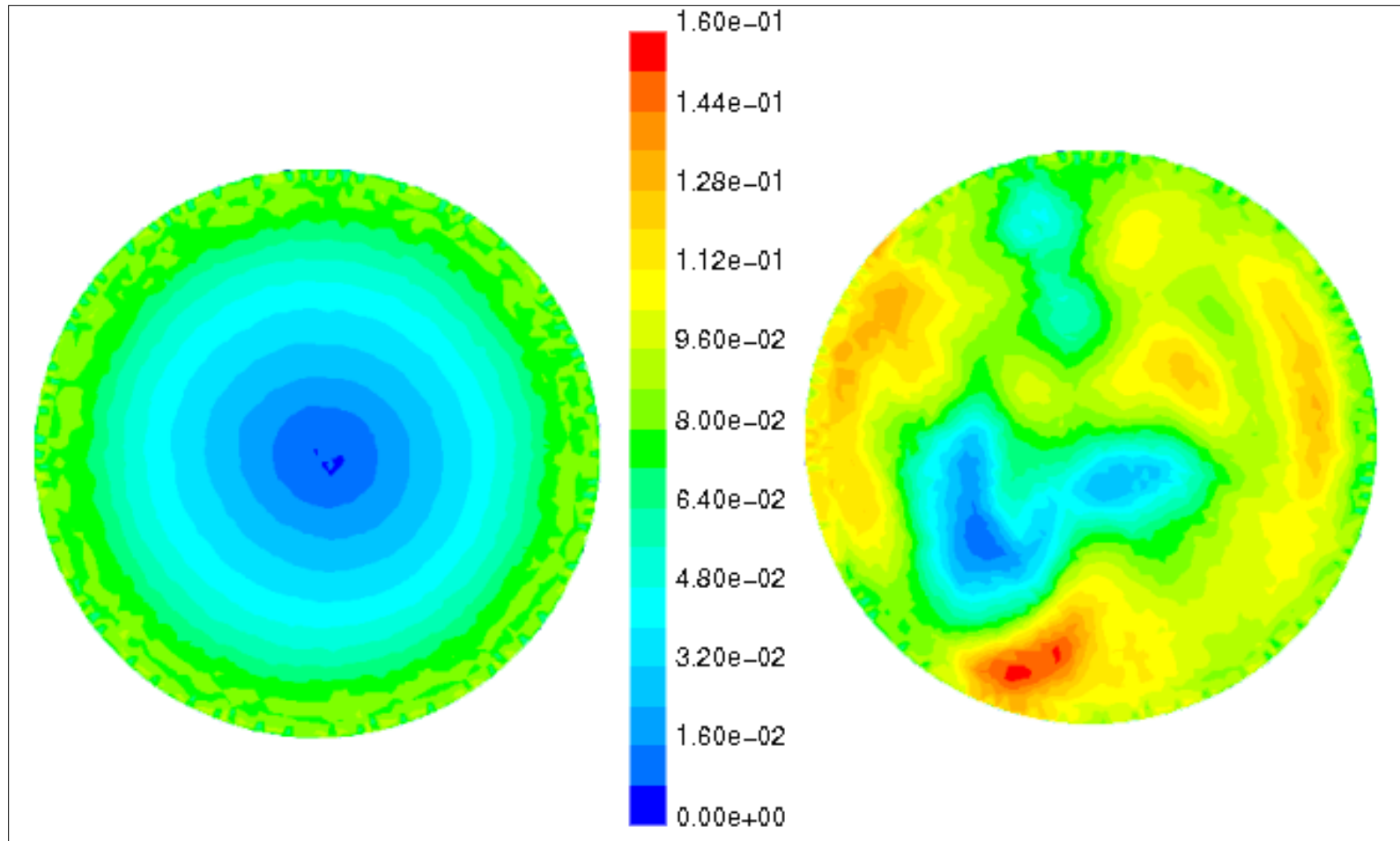


Velocity Vectors Colored By Axial Velocity (m/s) (Time=1.6600e+00)

Aug 13, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, LES, unsteady)



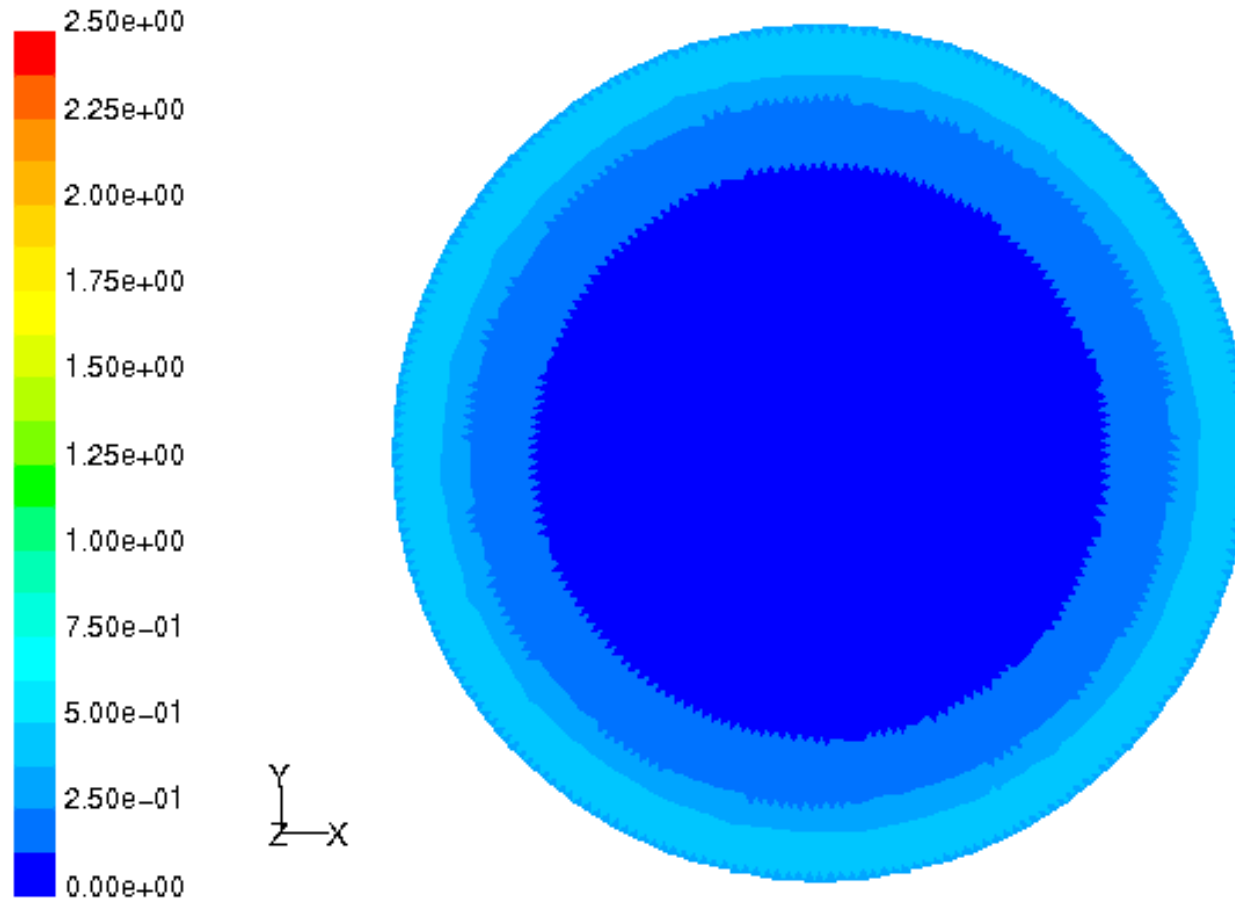
Berechnung der Schmelzenströmung im Induktionstiegelofen: Schmelzenoberfläche (3D transient LES)



Berechnete Zeit: 5 s

Berechnete Zeit: 40 s

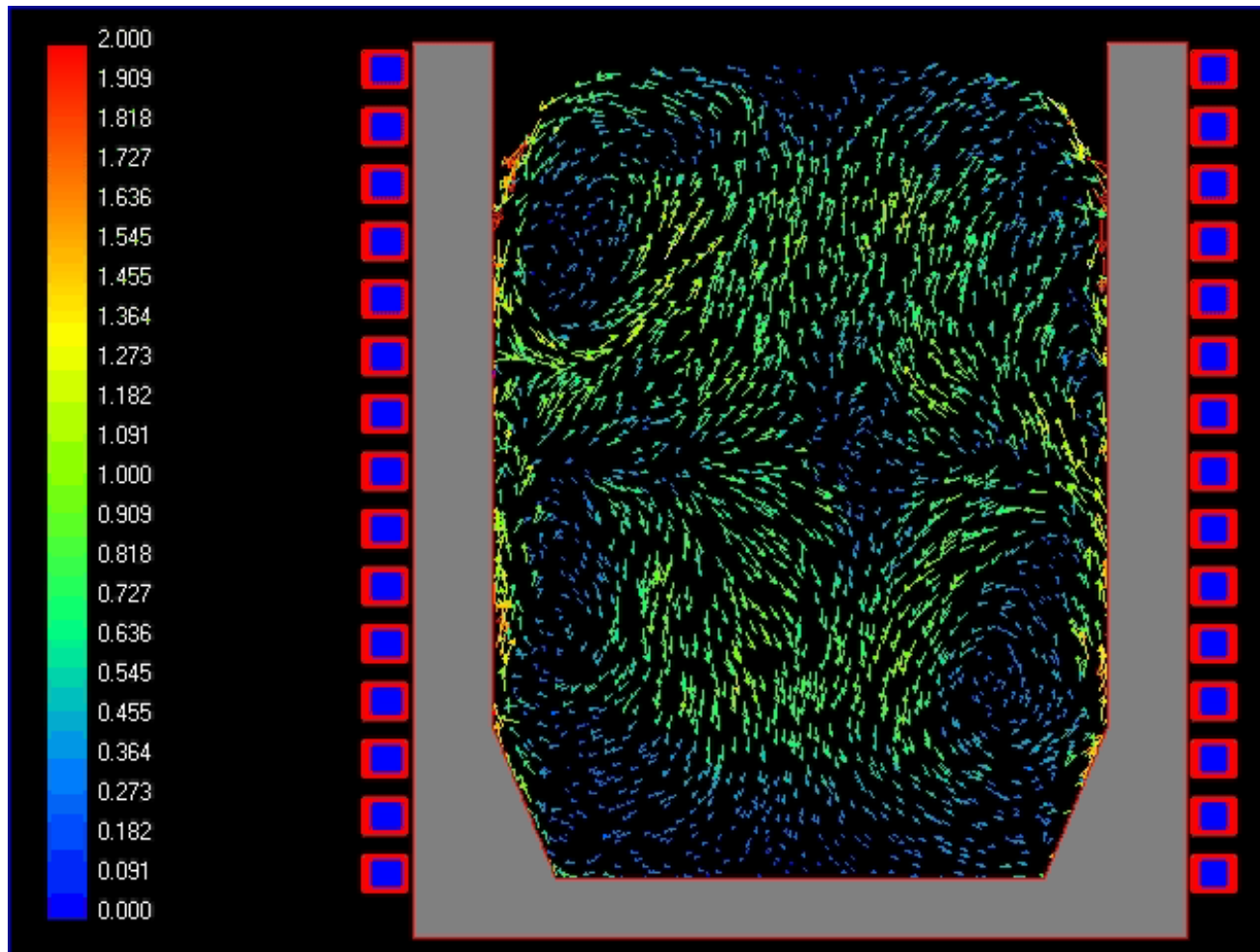
Berechnung der Schmelzenströmung im Induktionstiegelofen: Schmelzenoberfläche (3D transient LES)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=1.2600e+00)

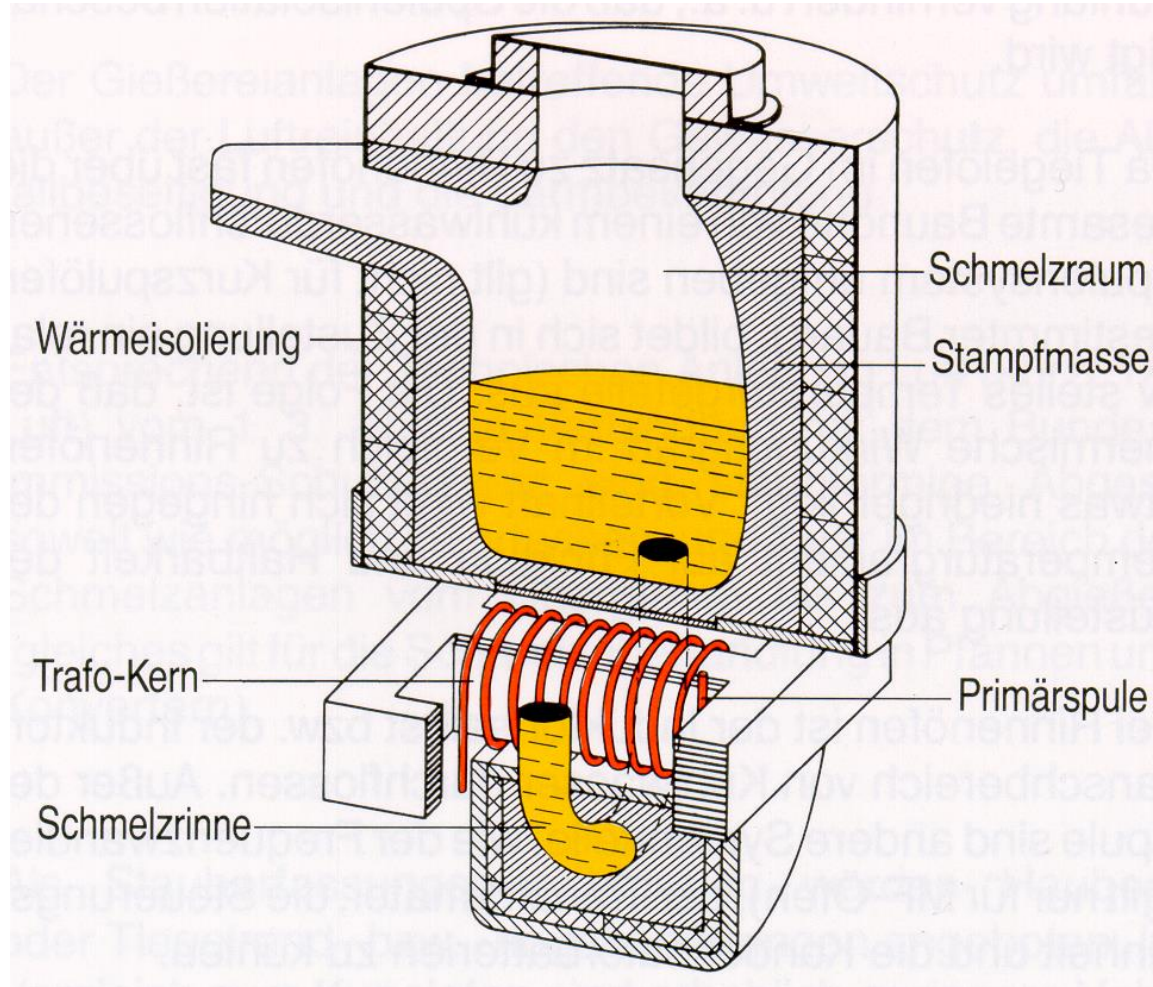
Aug 13, 2001
FLUENT 5.4 (3d, segregated, LES, unsteady)

Instationärer Wärme- und Stofftransport in metallischen Schmelzen



**Schnitt durch
Induktionsofen
mit Schmelze**

Induktions-Rinnenofen



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

Schmelzen und Gießen von Aluminium im Induktions-Rinnenofen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



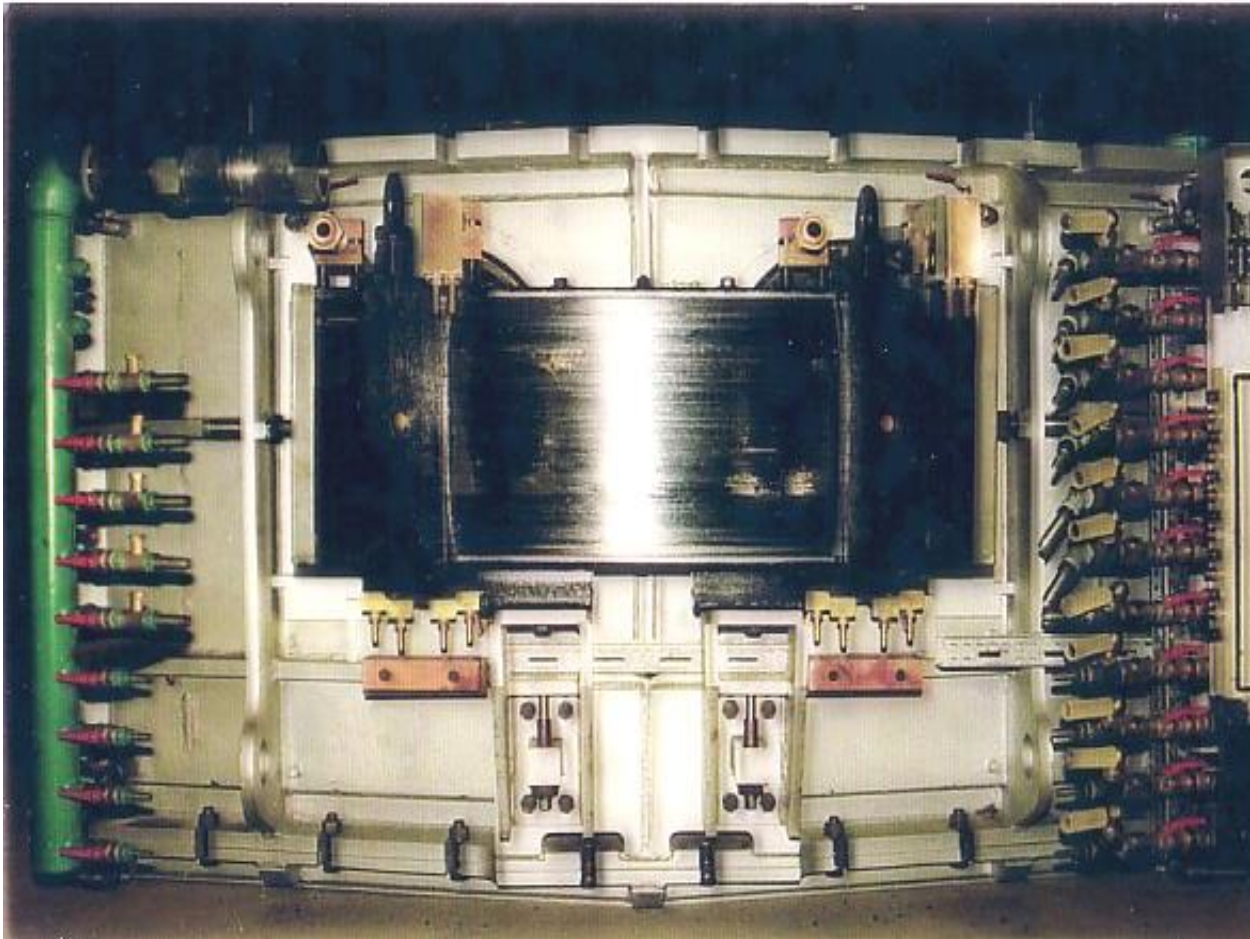
Quelle: ABB Industrietechnik AG, Dortmund



Hochleistungsinduktor zum Schmelzen von Kupfer und Kupferlegierungen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



● Leistung 2400 kW

■ Frequenz
● 50...70 Hz

■ Gewicht 15 t



Quelle: ABB

IRO – Größen, Schmelzgut, Frequenzen

Schmelzgut	Größen in t	Leistung in MW	Frequenzen in Hz
Gusseisen	10 ... 135	0,1 ... 3	50 ... 60
Aluminium, Al.-Leg.	5 ... 70	0,1 ... 6	50 ... 60
Kupfer, Cu-Leg.	5 ... 160	0,5 ... 10	50 ... 60
Zink, Zink-Legierung	10 ... 100	0,2 ... 10	50 ... 60

Induktionsöfen

Wirkungsgrad, Energieverbrauch, Schmelzleistung



Kunde: NE-Schmelzbetrieb			Ofentyp: Rinnenofen	
Einsatzmaterial: MS 58			Frequenz :65 Hz	
Abgasstemperatur: 1050 °C			Sonstiges: Verlustarme Induktoren	
1	Netzanschlussleistung	10150 kW	-Trafoverluste (1,5 %)	150 kW
2	Umrichter -Eingangsleistung	10000 kW	-UR-/Kond.-verluste (5,4 %)	540 kW
3	Umrichter-Ausgangsleistung	9460 kW	-Kabelverluste -Kabelanschlussverluste	140 kW - kW
4	Spulenleistung	9320 kW	-Nennspulenverluste (7,5 %)	700 kW
5	Feldleistung	8620 kW	-Blechpaketverluste -Sekundärverluste (4%) Verluste/Gewinne beim Schmelzen (/%) *)	40 kW 340 kW - kW
6	Induzierte Leistung	8240 kW	-Wärmeverluste	240 kW
7	Nutzleistung	8000 kW	*) Verluste: z. B. durch Unterfüllung des Ofens Gewinne: z. B durch kaltes Material unter Curietemperatur	
8	Erforderliche Schmelzenergie	165 kWh/t		
9	Gesamtwirkungsgrad (7/1)	0,79		
10	Spezifischer Energieverbrauch (8/9)	209 kWh/t		
11	Schmelzleistung (7/8)	48,5 t/h		



Induktionsöfen

Wirkungsgrad, Energieverbrauch, Schmelzleistung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kunde: NE-Schmelzbetrieb			Ofentyp: Tiegelofen	
Einsatzmaterial: MS 58			Frequenz: 100 Hz	
Abgustemperatur: 1050 °C			Sonstiges:	
1	Netzanschlussleistung	10150 kW	-Trafoverluste (1,5 %)	150 kW
2	Umrichter-Eingangsleistung	10000 kW	-UR-/Kond.- verluste (5,4 %)	540 kW
3	Umrichter-Ausgangsleistung	9460 kW	-Kabelverluste -Kabelanschlussverluste	160 kW - kW
4	Spulenleistung	9300 kW	-Nennspulenverluste (28 %)	2600 kW
5	Feldleistung	6700 kW	-Blechpaketverluste -Sekundärverluste -Verluste beim Schmelzen (2 %) *)	60 kW 40 kW 130 kW
6	Induzierte Leistung	6470 kW	-Wärmeverluste	170 kW
7	Nutzleistung	6300 kW	*) Verluste: z.B. durch Unterfüllung des Ofens Gewinne: z.B. durch kaltes Material unter Curietemperatur	
8	Erforderliche Schmelzenergie	165 kWh/t		
9	Gesamtwirkungsgrad (7/1)	0,62		
10	Spezifischer Energieverbrauch (8/9)	265 kWh/t		
11	Schmelzleistung (7/8)	38,2 t/h		



Vorteile

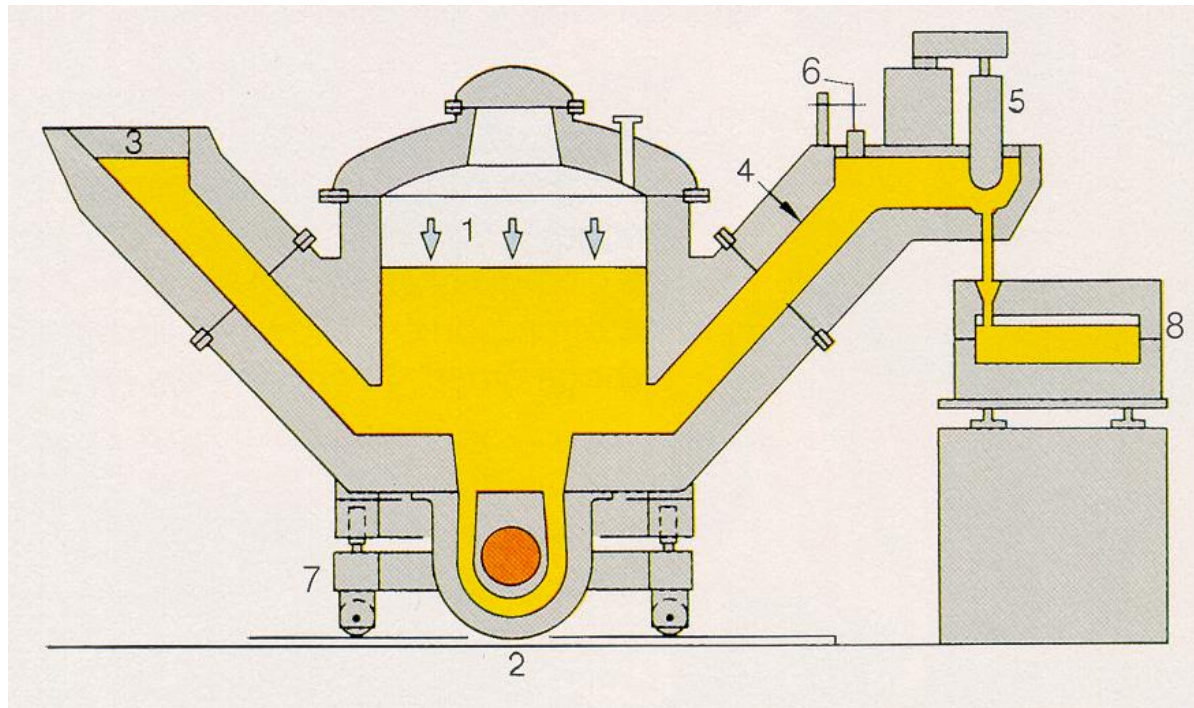
- + Hoher Wirkungsgrad ($\eta_{el} = 95\%$, $\eta_{ges} = 85\%$)
- + Niedriger Blindleistungsbedarf
- + Hohe Abgussgewichte realisierbar
- + Einschmelzen großstückiger Schrotte möglich
- + Leistungszufuhr unabhängig vom Füllstand
- + Schlackefreies Gießen über Siphon



Nachteile

- Restsumpf erfordert ständig Warmhalteenergie
- Aufsichtspersonal in Betriebspausen
- Spülchargen bei Legierungswechsel
- Geringe Badbewegung begrenzt Legierungsarbeit und Einschmelzen von Dünnschrott
- Reinigung des Induktorkanals erforderlich

Schema einer druckgasbetätigten Gießeinrichtung

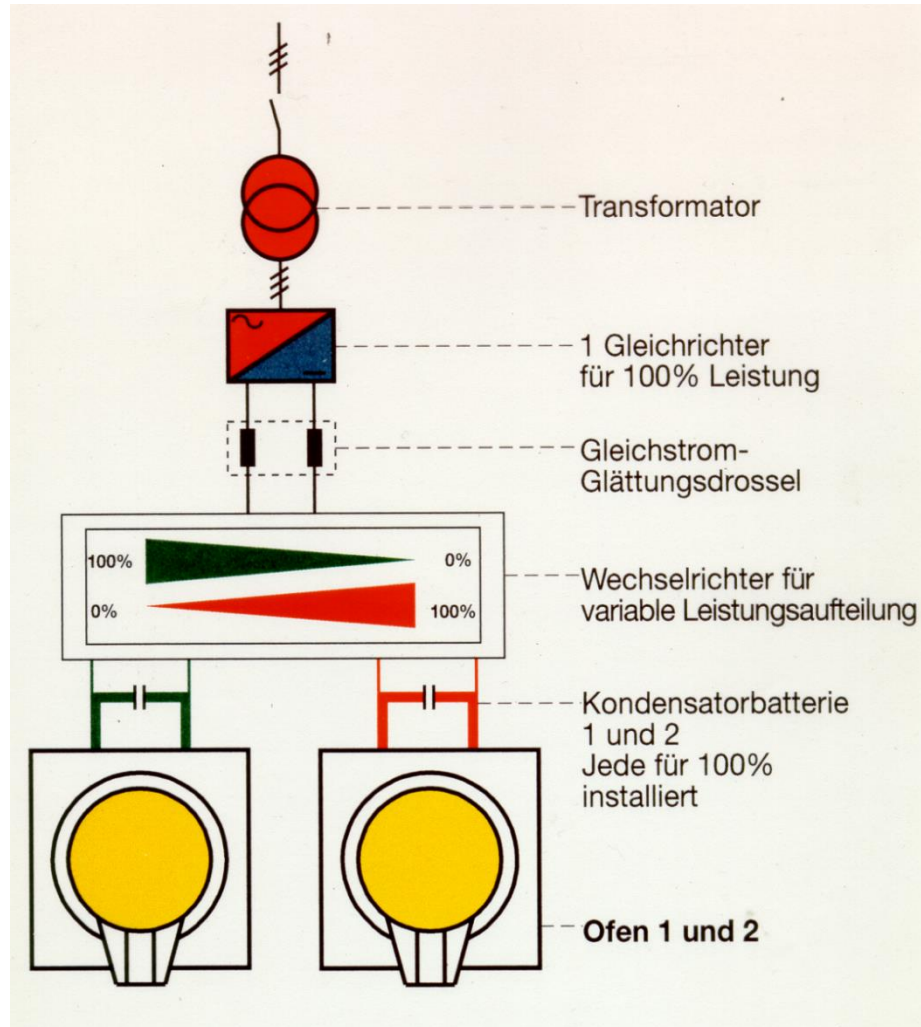


1 Druckkessel mit Schmelze
2 Rinneninduktor
3 Eingussstutzen
4 Ausgussstutzen

5 Stopfenbetätigung mit Ausgussstein
6 Niveaumessung in der Ausgussrinne
7 Grundrahmen mit Längs- und Querfahrwerk
8 Gießform

Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

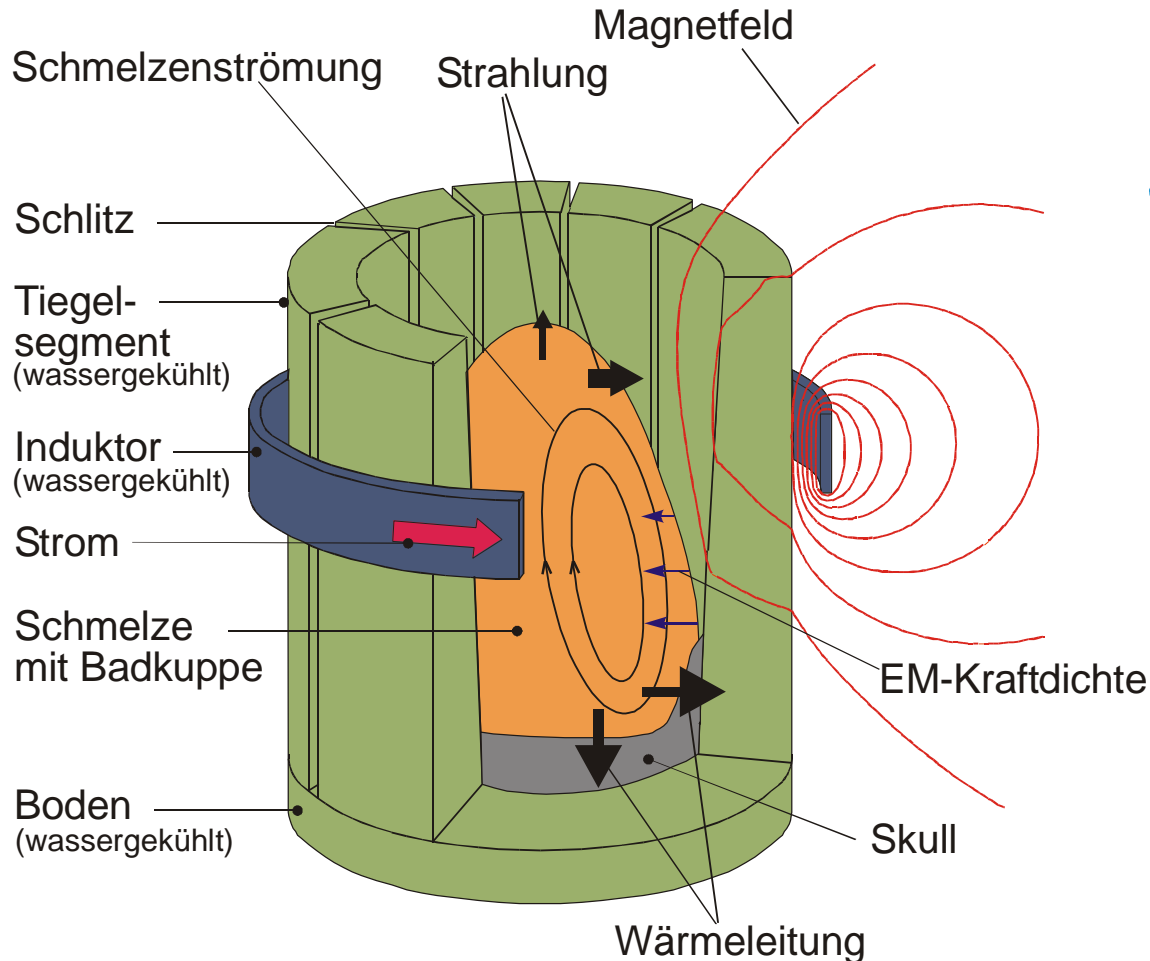
MF-Umrichter-Parallelbetrieb



Schmelzen 2

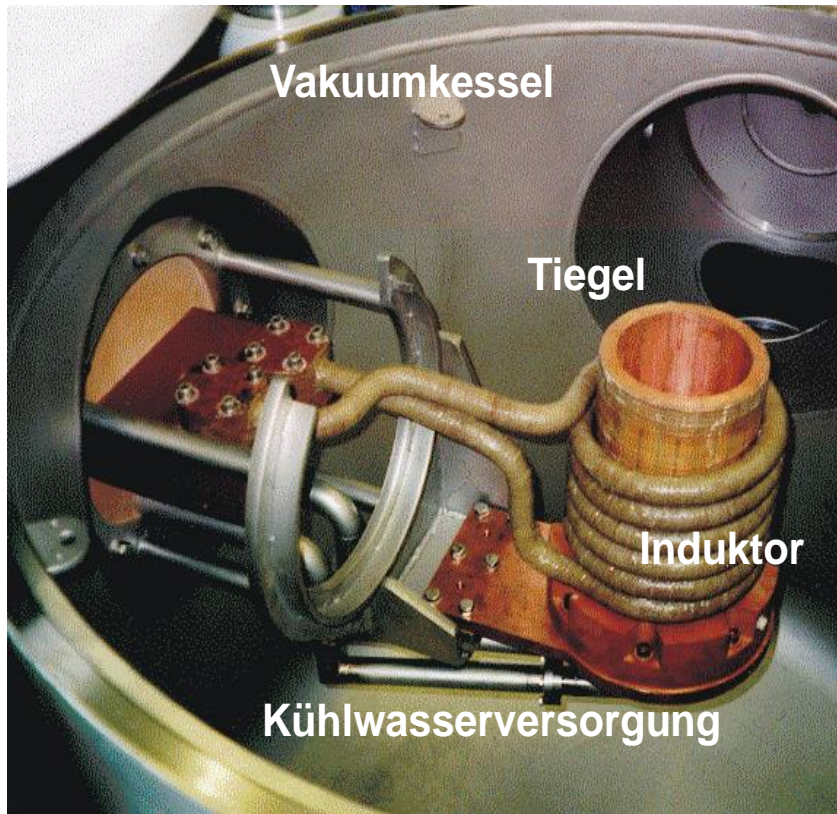
1. Schmelzen hochreiner Metalle im KIT
2. Schmelzen schwachleitfähiger Materialien

Kaltwand-Induktions-Tiegelofen (KIT)



- MF-Wechselstrom im Induktor
Frequenz: 6-12 kHz
- Wirbelstrom im wassergekühlten, geschlitzten Kupfertiegel und im Einsatz
- Joulesche Wärme:
Einsatzmaterial schmilzt
- ausgeprägte freie Oberfläche durch elektromagnetische Kräfte
- Erstarrung der Schmelze an der Tiegelwand und am Boden (Skull)
- hohe Verlustwärmeströme
- starke Schmelzenströmung durch elektromagnetische Kräfte

Kaltwand-Induktions-Tiegelofen - Untersuchungsgegenstände



- Überhitzung der Schmelze entscheidend für Gußqualität
- Verständnis der physikalischen Vorgänge
- Optimierung mittels mathematischer Modelle

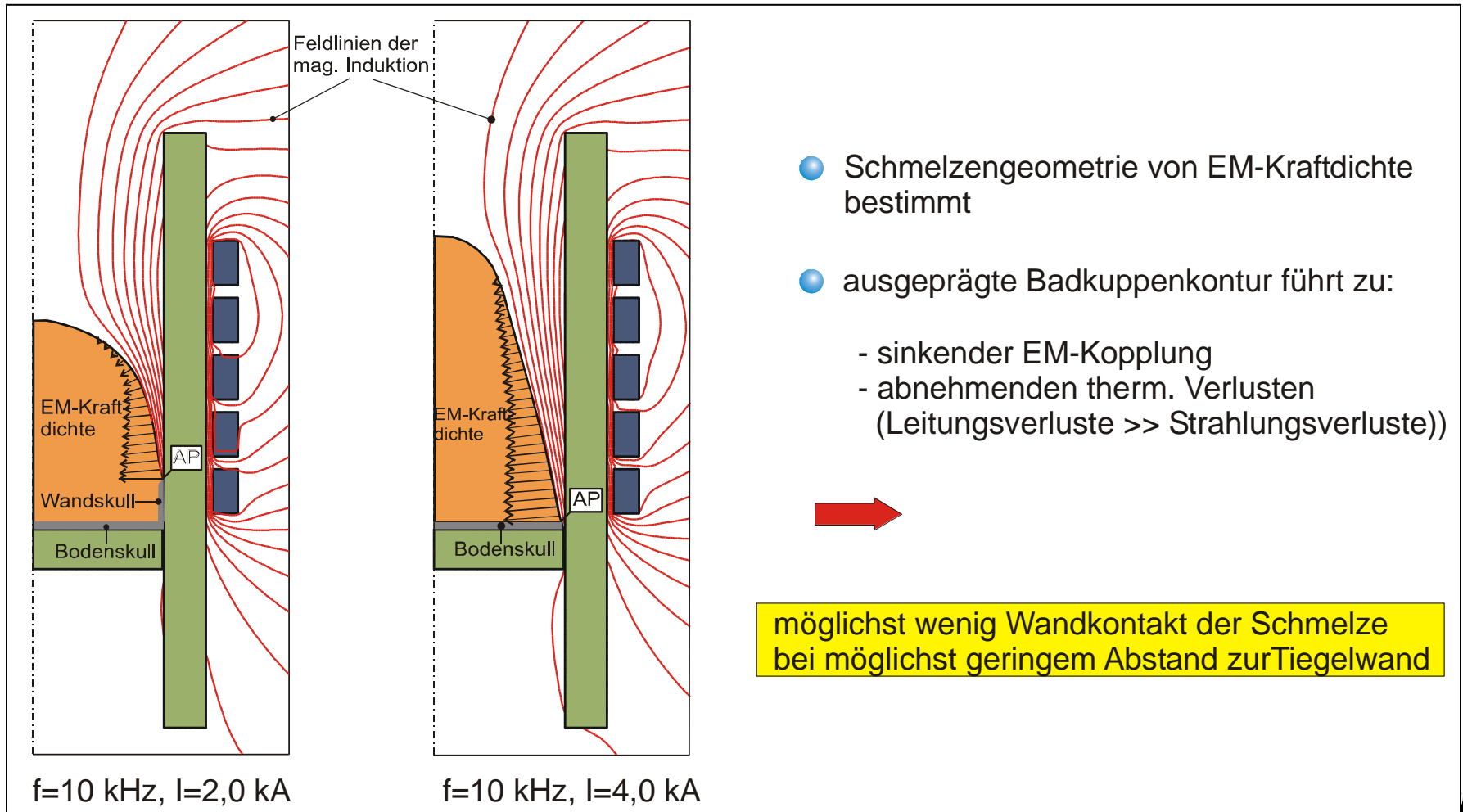


Experimentelle Untersuchungen

- elektrischer Wirkungsgrad
- TiAl-Badkuppengeometrie
- Strömungsgeschwindigkeit
- Schmelzentemperatur
- instationäre Vorgänge
- Energiebedarf

Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

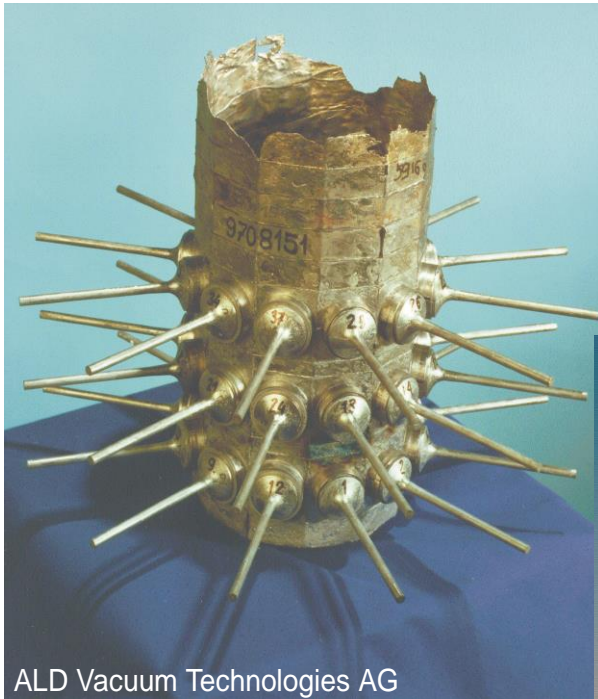
KIT-Anordnung & Badkuppen



Gießbaum und TiAl-Ventile – Motorischer Test



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



ALD Vacuum Technologies AG



ALD Vacuum Technologies AG

bearbeitet

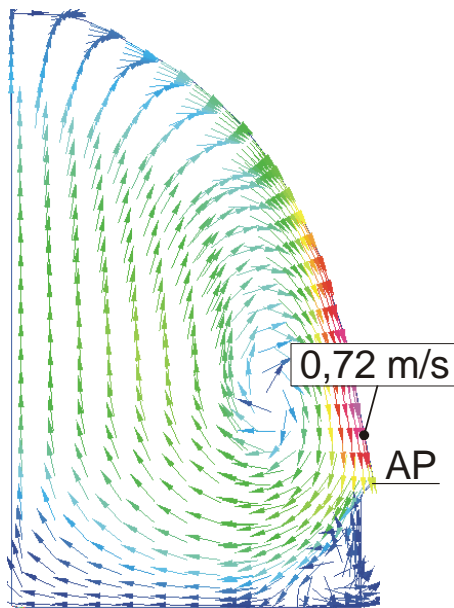


ALD Vacuum Technologies AG
TRW Deutschland GmbH

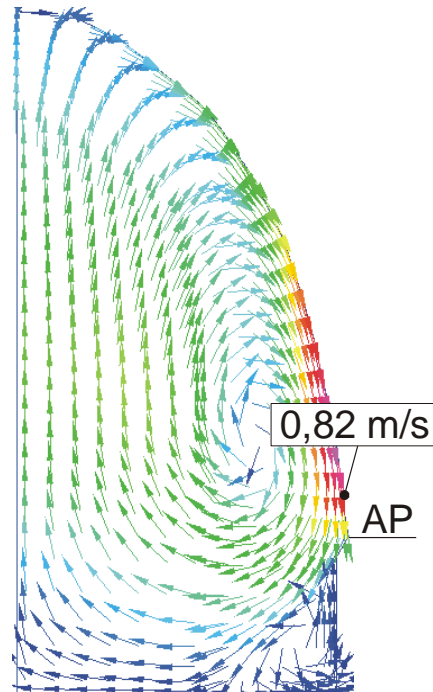


Geschwindigkeitsverteilungen

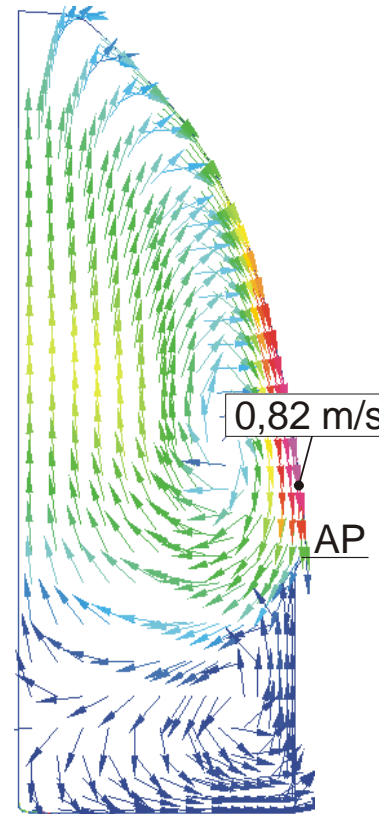
zunehmend ausgedehnter Sekundärwirbel mit
geringer werdender Geschwindigkeit



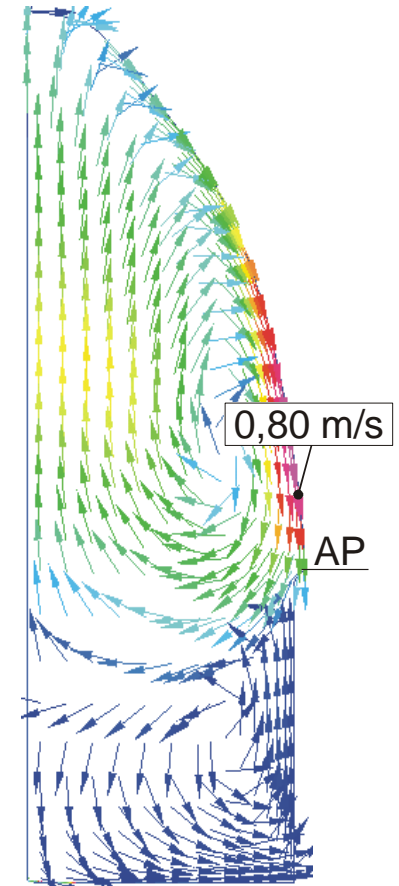
$H/D=1,2$ $P_E=48$ kW



$H/D=1,43$ $P_E=55$ kW



$H/D=1,93$ $P_E=63$ kW



$H/D=2,2$ $P_E=66$ kW

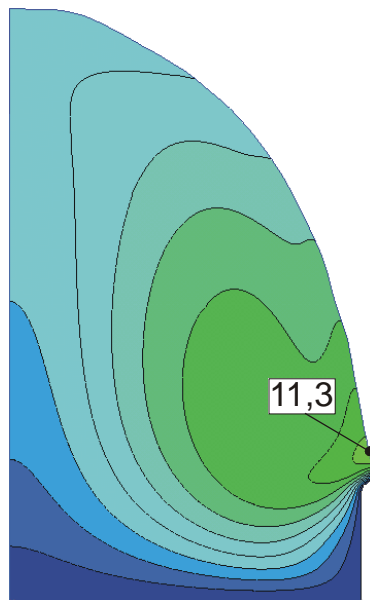
7,8 kg Titanaluminium, Gesamtleistung: 220 kW konstant, $f=10$ kHz

Überhitzungsverteilungen

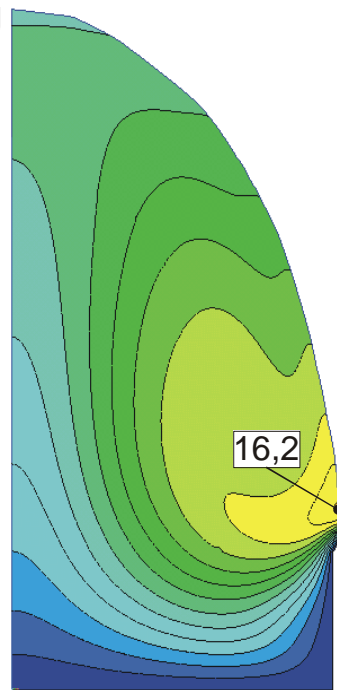
- prozentuale Steigerung der Einsatzleistg. höher als die der Wärmeleitungsverluste
- Einfluß des Sekundärwirbels:
 - thermische Abschirmung
 - Erhöhung des konvektiven Wärmewiderstandes

Konstruktion schlanker Tiegel

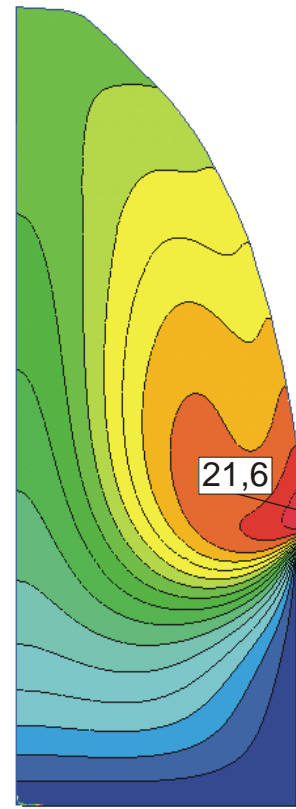
Überhitzungssteigerung



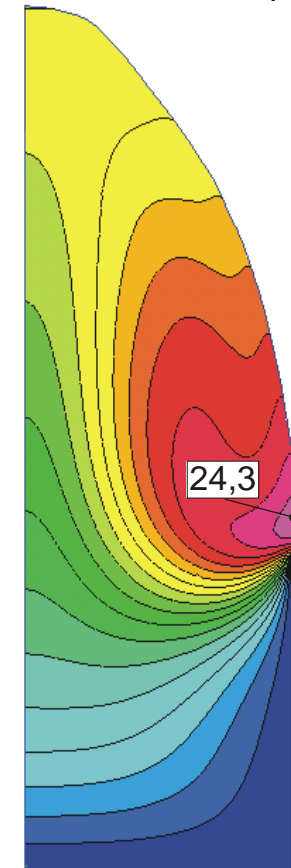
$H/D=1,2$ $P_E=48$ kW



$H/D=1,43$ $P_E=55$ kW

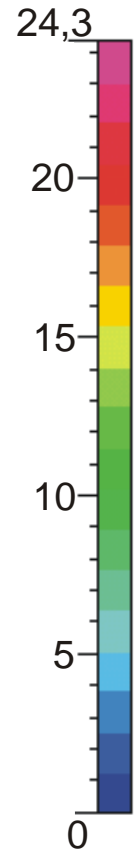


$H/D=1,93$ $P_E=63$ kW

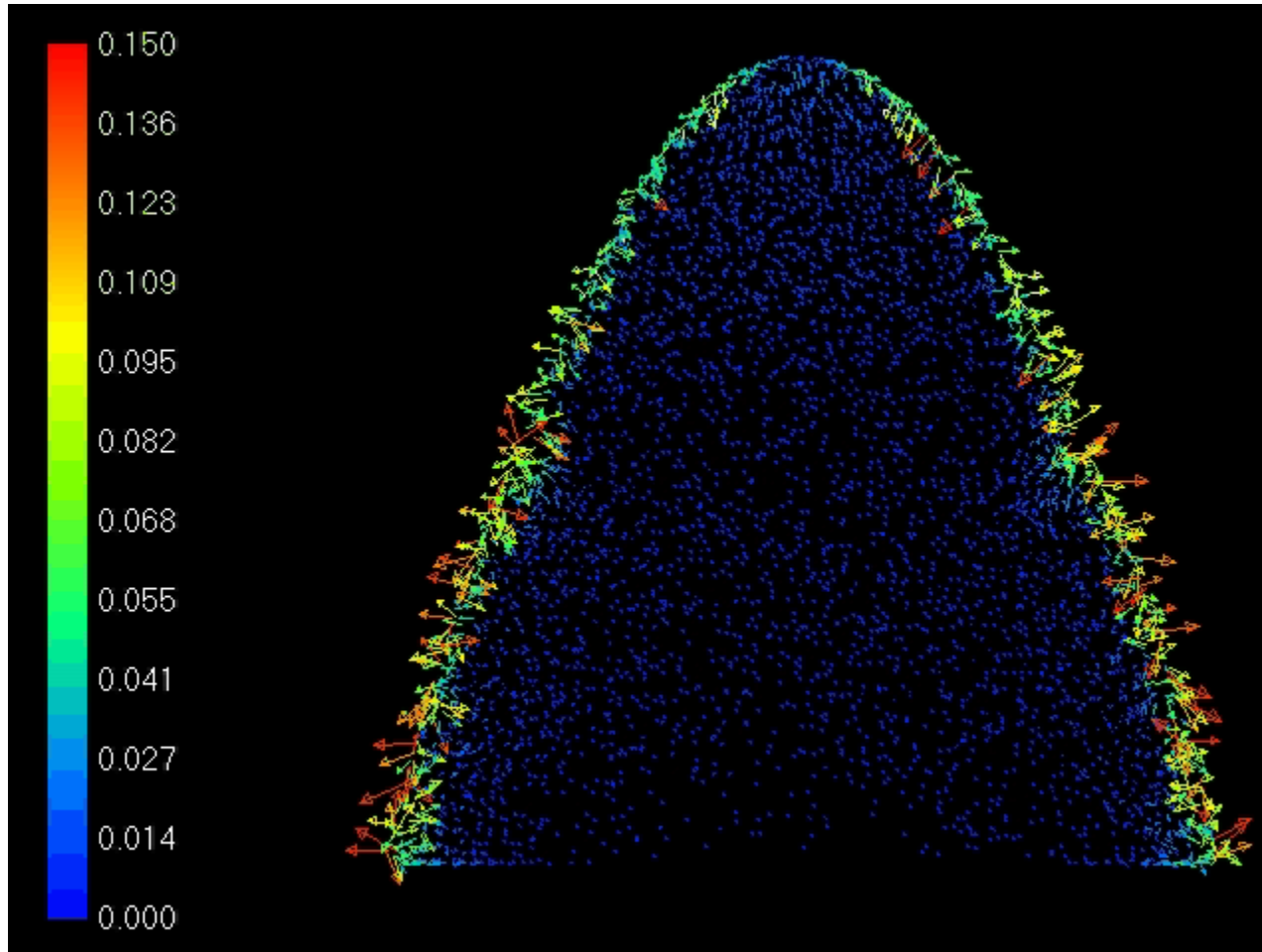


$H/D=2,2$ $P_E=66$ kW

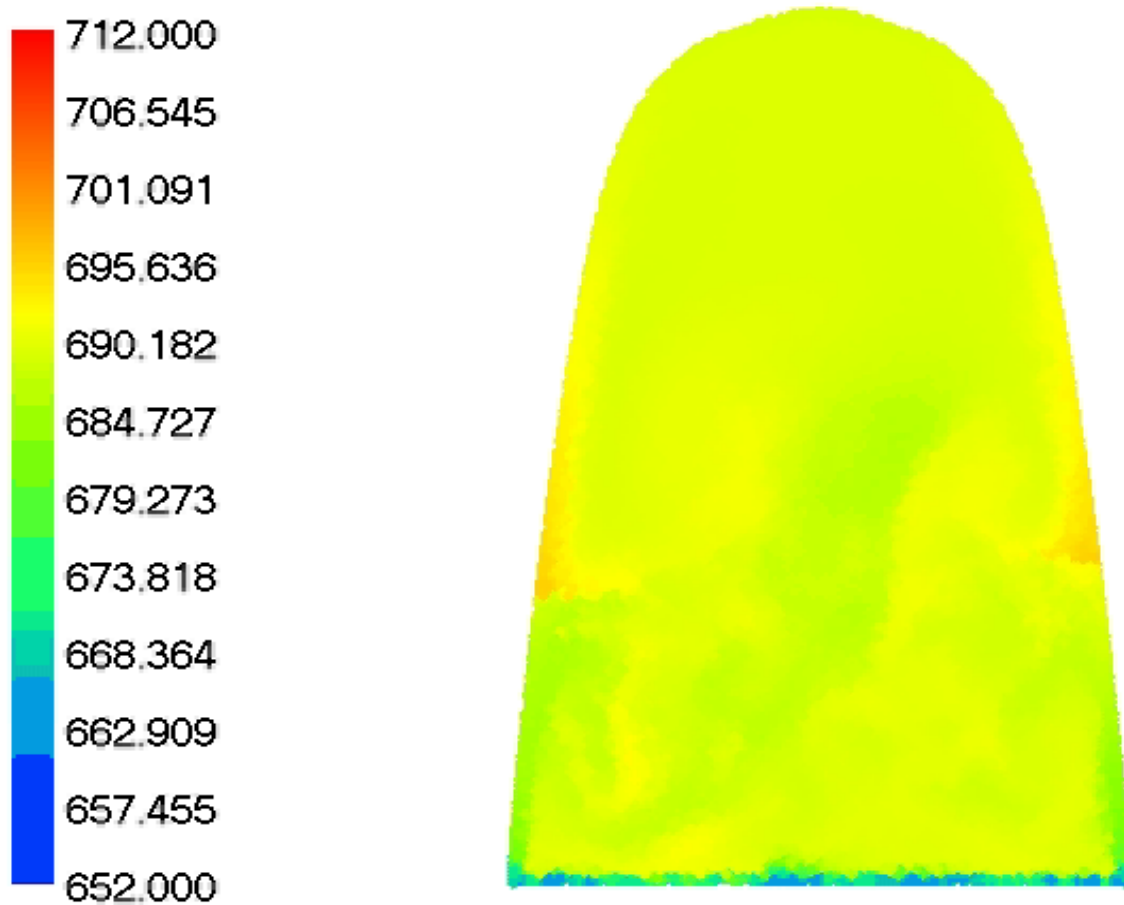
Temperaturen in K



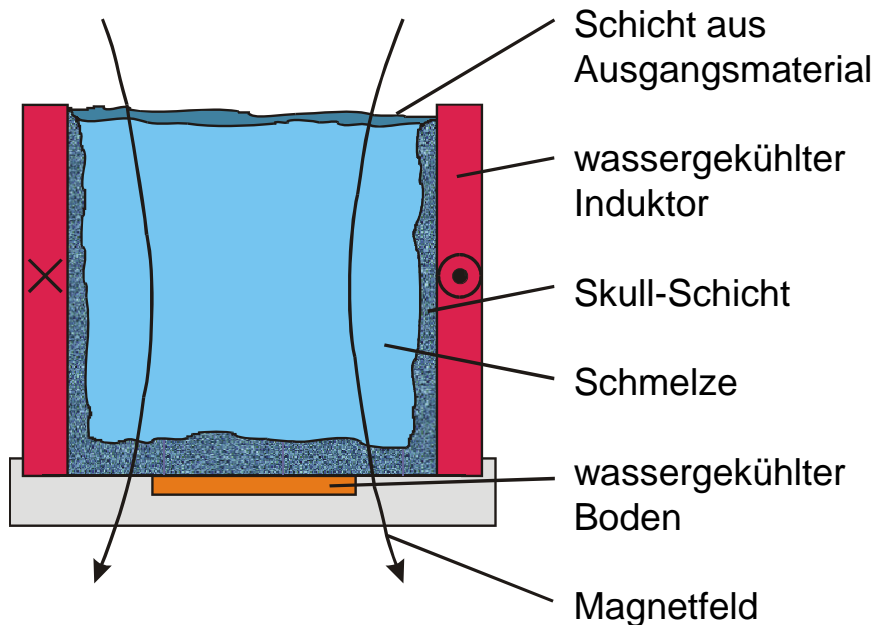
Resultat eines transienten 3D LES-Modells



Resultat eines transienten 3D LES-Modells



Induktive Skull Melting Technology (ISMT)

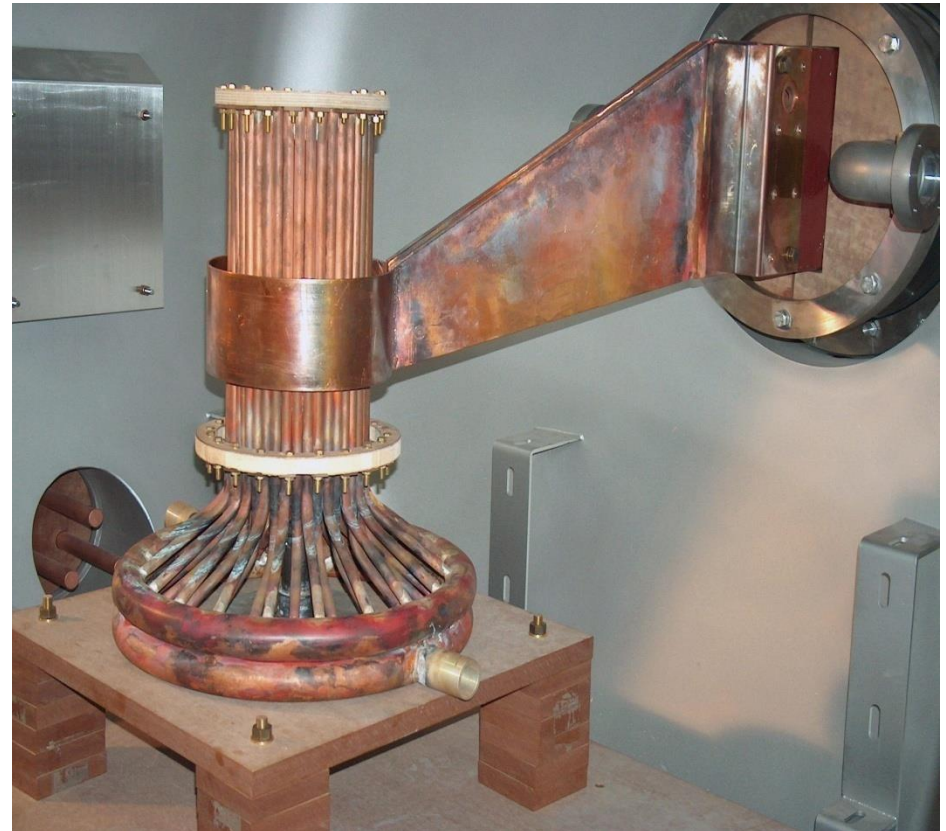


- Schmelzen bei hohen Temperaturen ($>3000\text{ °C}$) in einem Induktortiegel oder Kalten Tiegel
- Oxide, Glas und Keramik
 - sind bei Raumtemperatur Isolatoren
 - starker Anstieg der Leitfähigkeit mit steigender Temperatur
 - Kopplung nahe des Schmelzbereichs
 - Vorerwärmung nötig
- Vorwärmmethoden
 - z.B. induktive Erwärmung von eingebetteten, leitfähigen Materialien im Ausgangsmaterial
 - z.B. durch einen Gasbrenner
- Starke Kühlung von Induktor und Boden
 - Ausbildung eines “Skulls”
 - Skull schützt gegen Verunreinigungen

Induktortiegel und Kalter Tiegel



Inductor crucible (Model)



Cold crucible

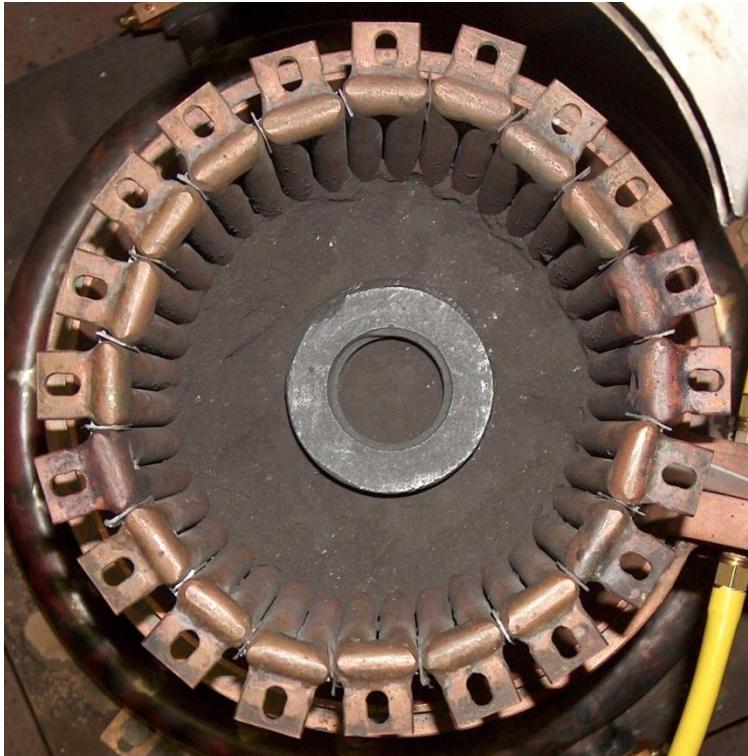
Installation am Institut für Elektroprozessstechnik (Uni Hannover)



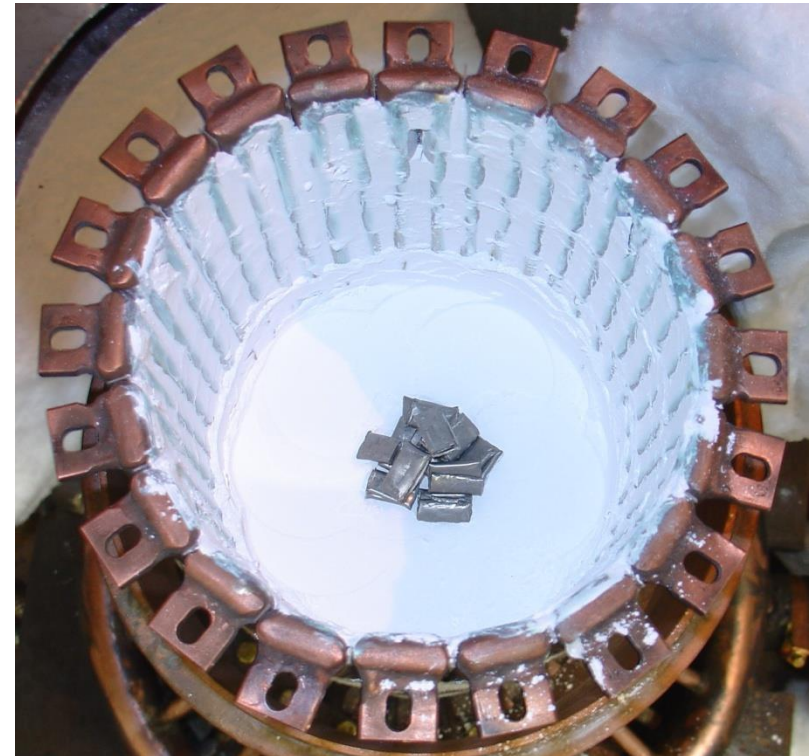
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Startprozess



- ➔ Graphitring auf der Oberfläche
- ➔ Muss möglichst schnell wieder entnommen werden
- ➔ Reagiert mit CuO

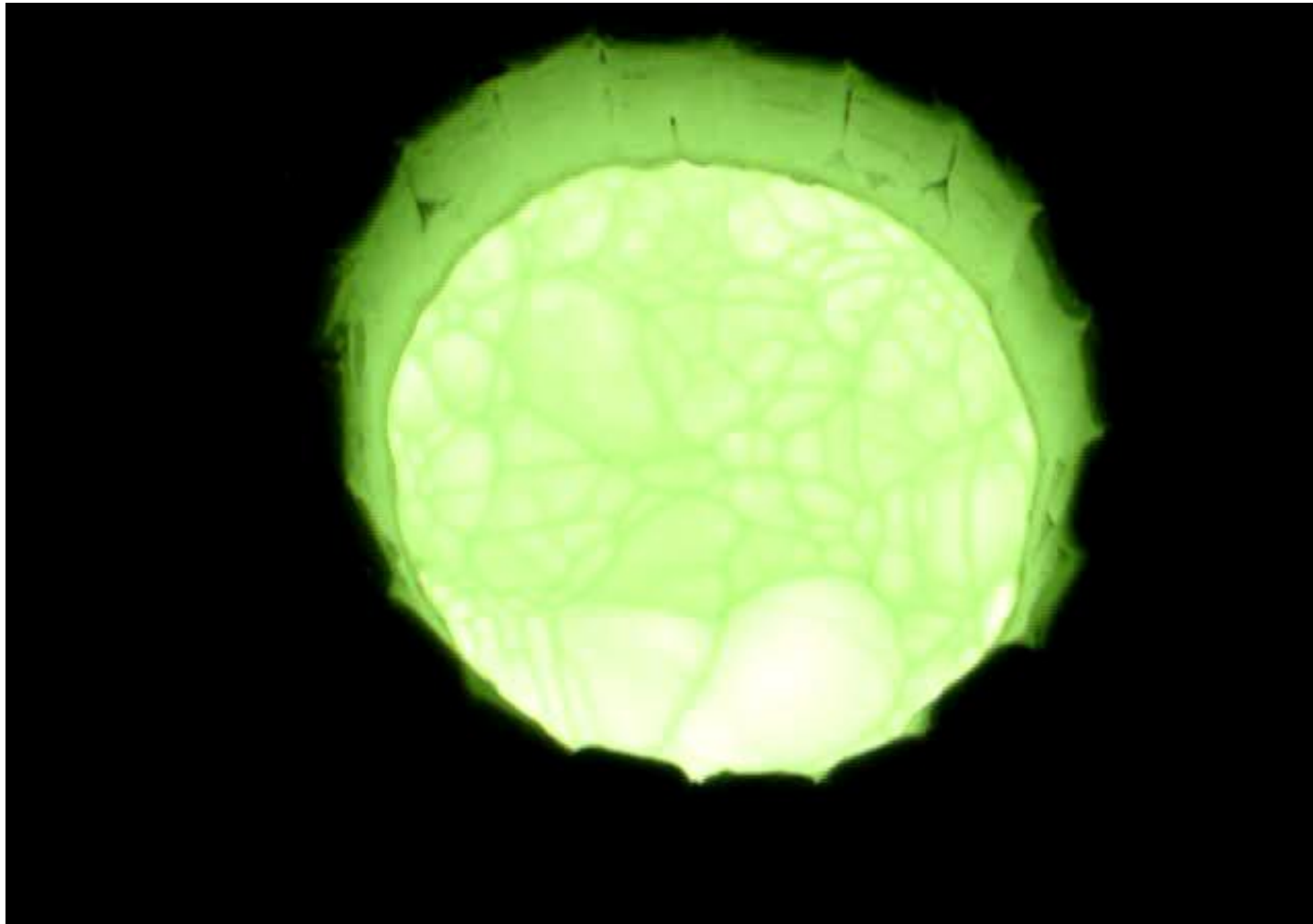


- ➔ Zr-Metallstücke eingebettet in das Material
- ➔ Reagiert mit Sauerstoff zu ZrO_2
- ➔ Sehr schneller Startprozess

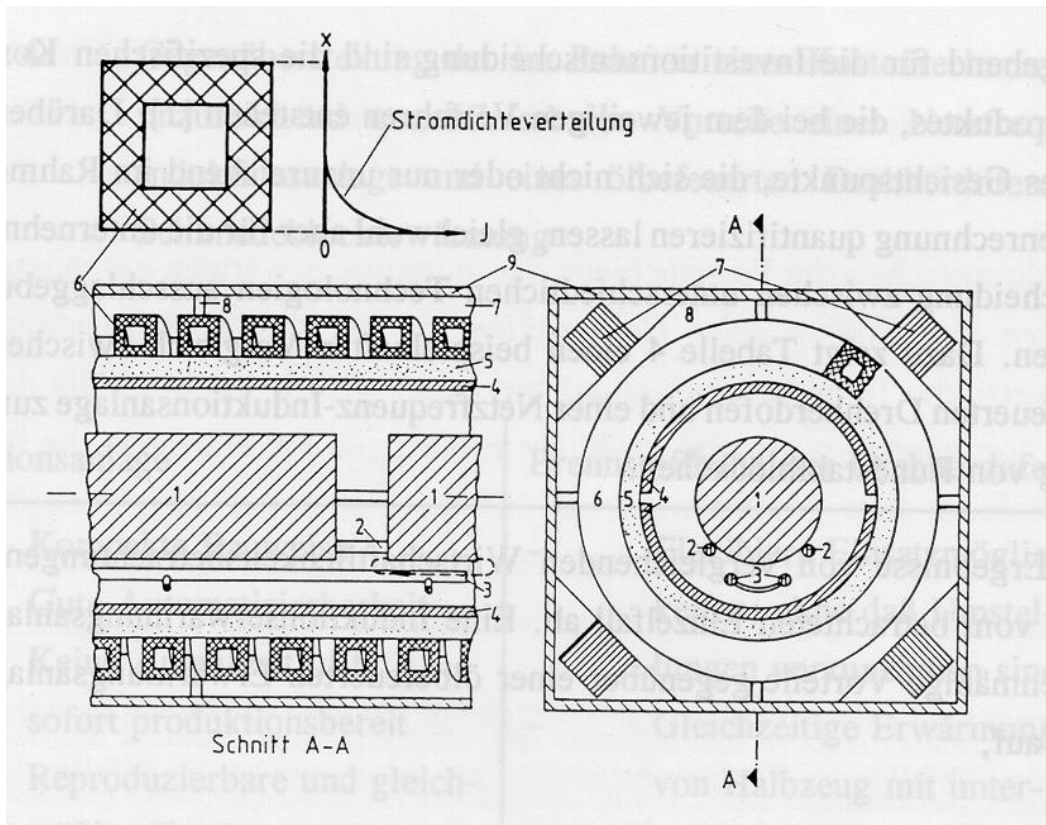
Schmelzen von ZrO_2



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

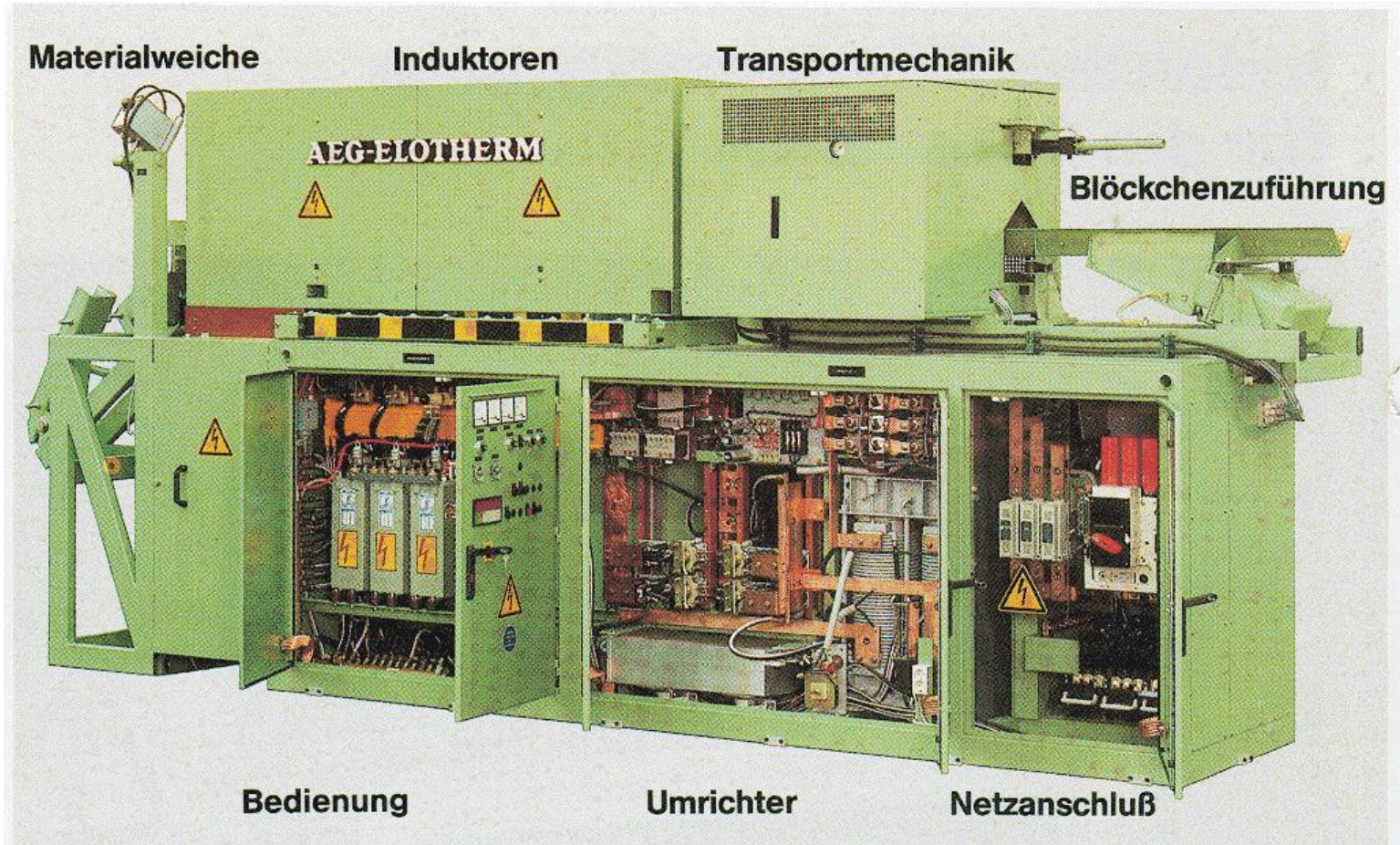


Aufbau einer Induktionsspule zur Blöckchenerwärmung



- 1 Werkstücke
- 2 Tragrohrschiene (wassergekühlt)
- 3 Hubrohrschiene (wassergekühlt) mit Bewegungsverlauf
- 4 Schutzblech (längsgeschlitzt)
- 5 keramisches Wärmedämmmaterial
- 6 Spulenleiter (Kupferhohlprofil, wassergekühlt)
- 7 Rückschlussjoch (Trafoblech)
- 8 Halterungselemente
- 9 Blechmantel

Induktive Schmiedeblock-Erwärmungsanlage



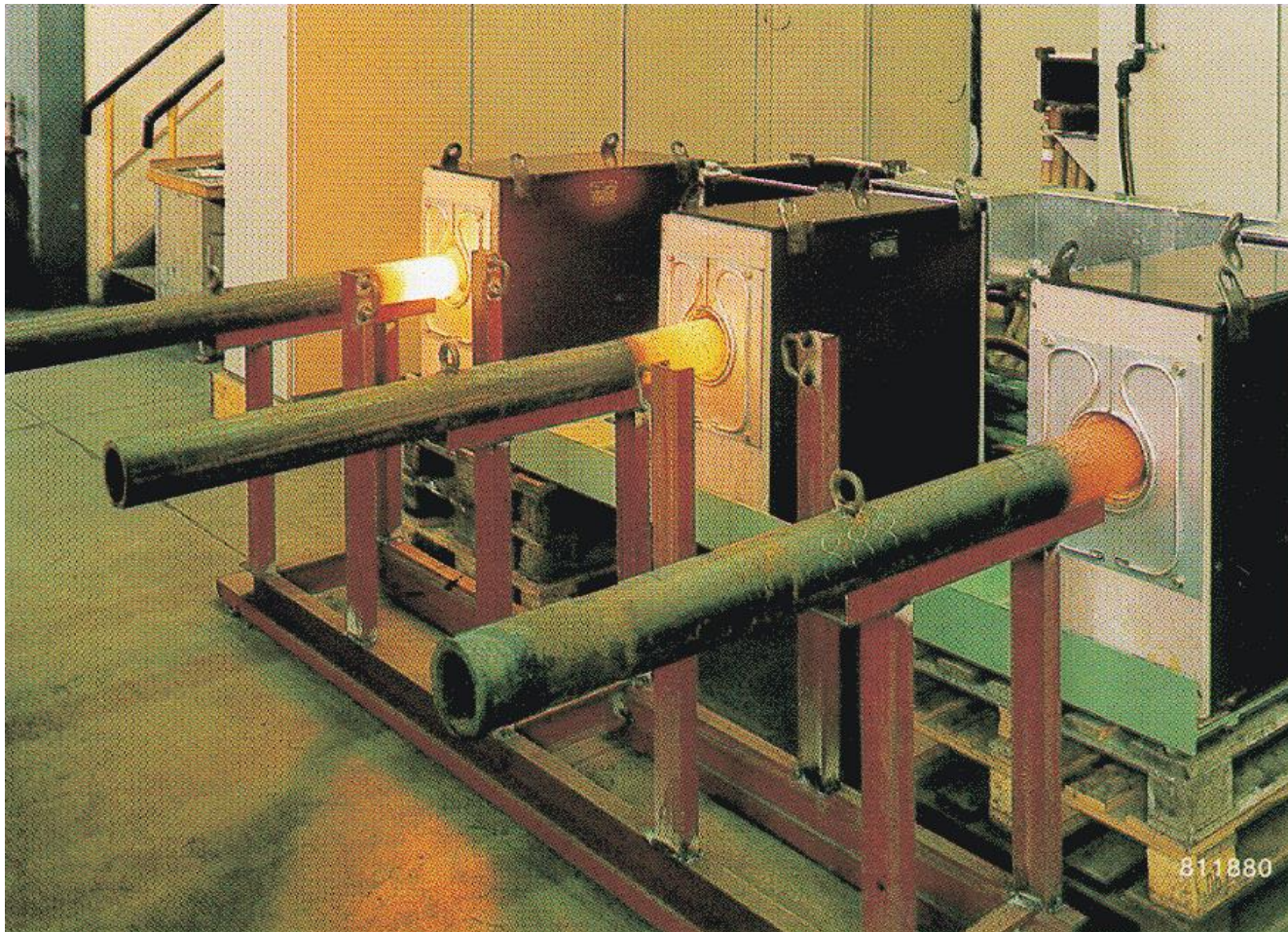
Quelle:
AEG-Elotherm

Kompakt-ELOMAT-BTH für die induktive Blöckchenerwärmung
Treibrollenvorschub, 60 – 2400 kW, 0,5 – 10 kHz

Rohrendenerwärmung im Rohrwerk



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



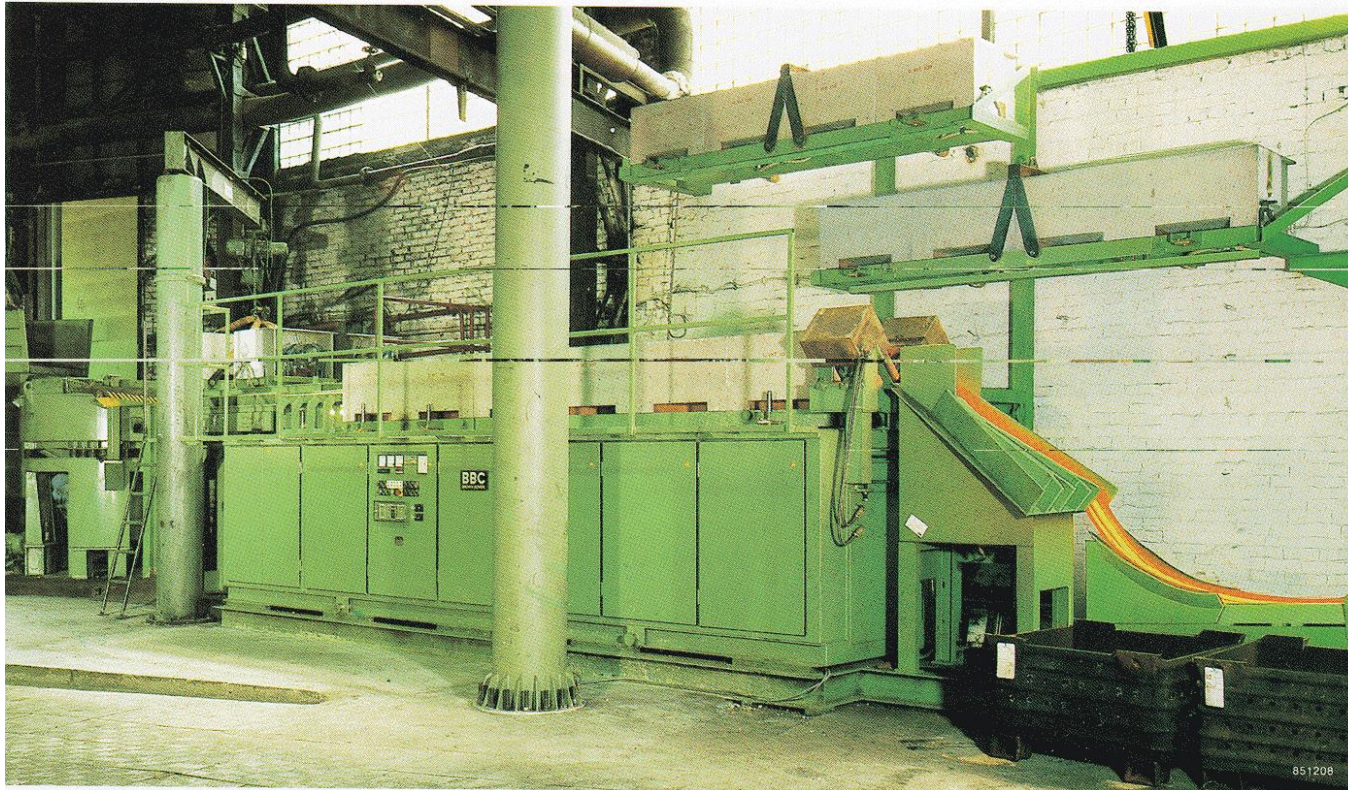
Quelle: ABB



Kompakt-Hubbalken-Erwärmer



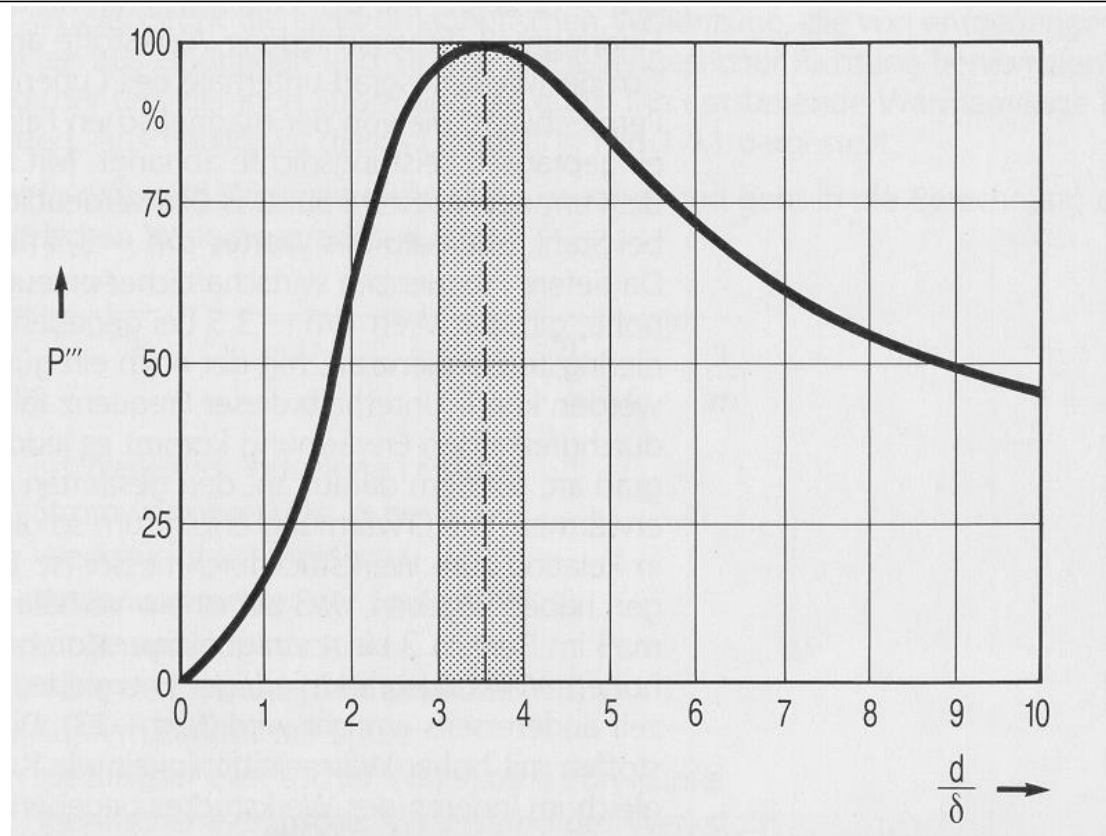
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Kompakt-Hubbalken-Erwärmer
1800 kW, 4000 kg/h, 60-130 mm Vierkant

Quelle: ABB

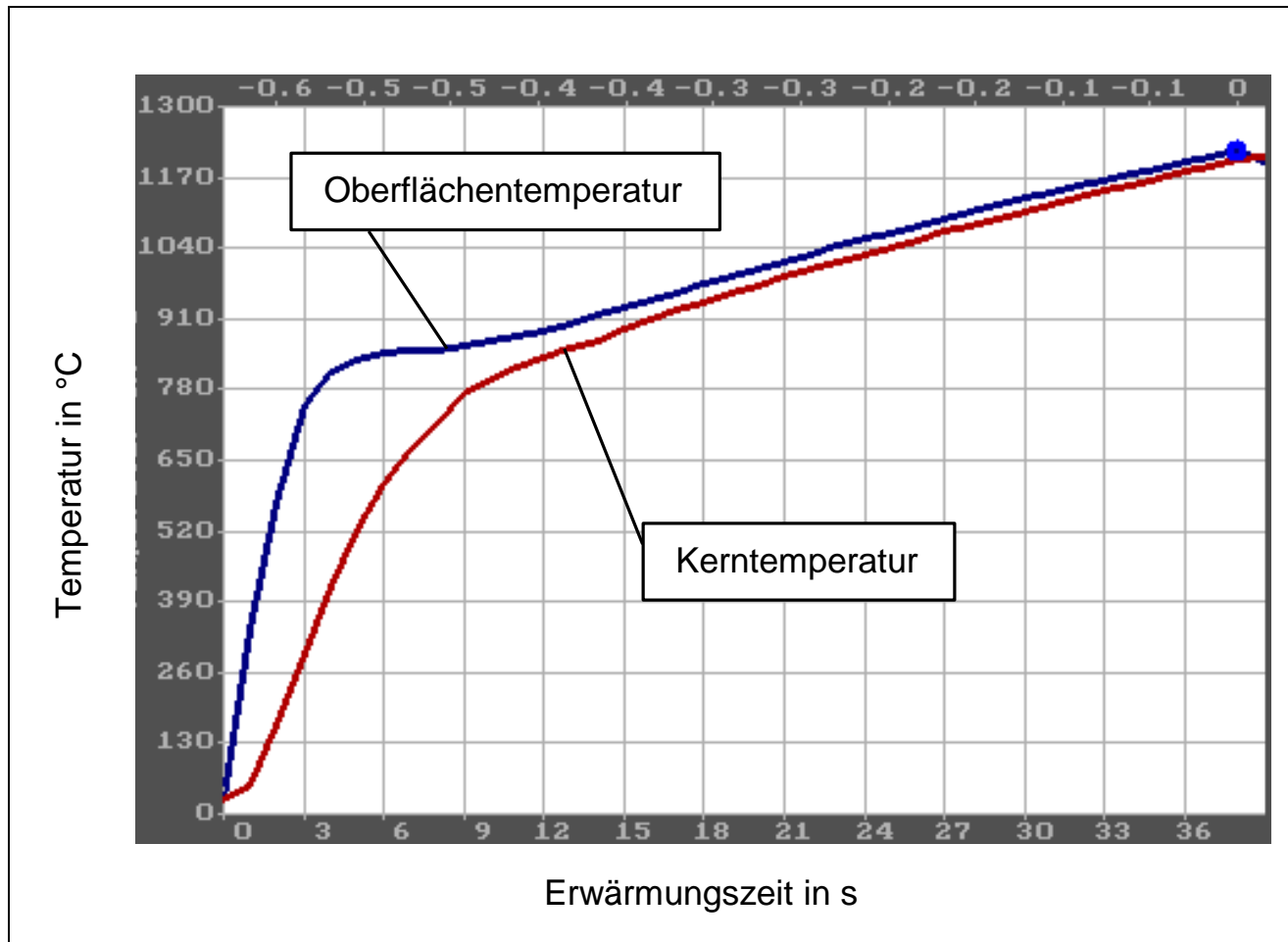




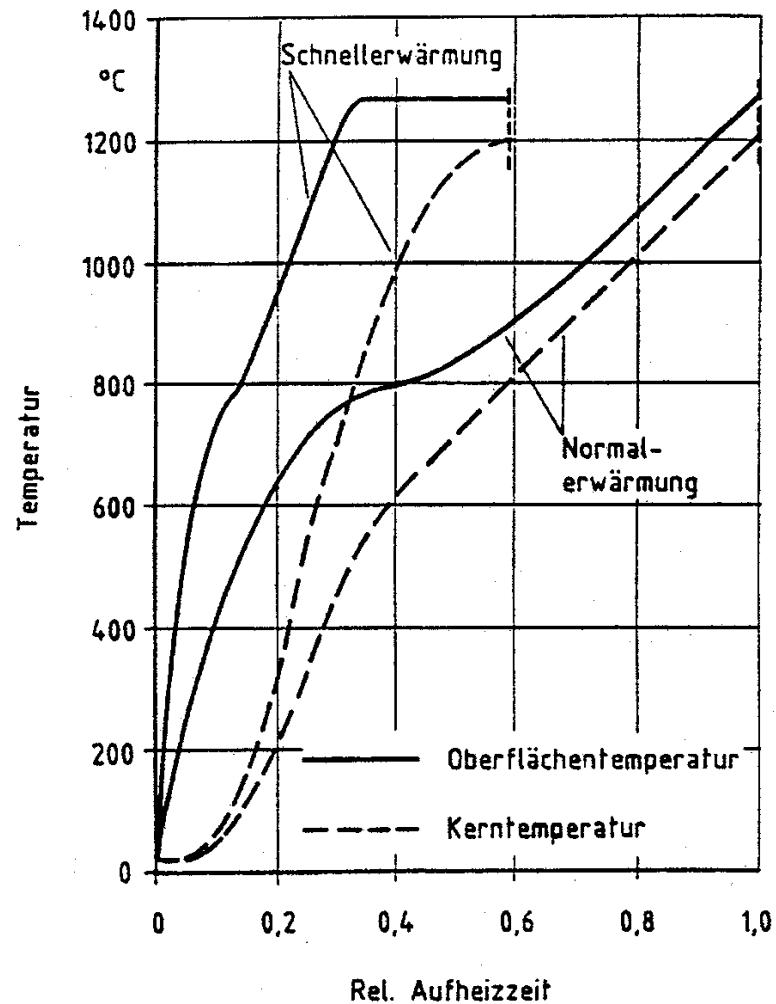
Induzierte Volumenleistungsdichte in Abhängigkeit vom Verhältnis d/δ bei konstanter Frequenz und Variation des Werkstückdurchmessers

Quelle: RWE-Information Prozesstechnik

Typischer Temperaturverlauf bei der induktiven Schmiedeblock-Erwärmung



Einfluss der Schnellerwärmung



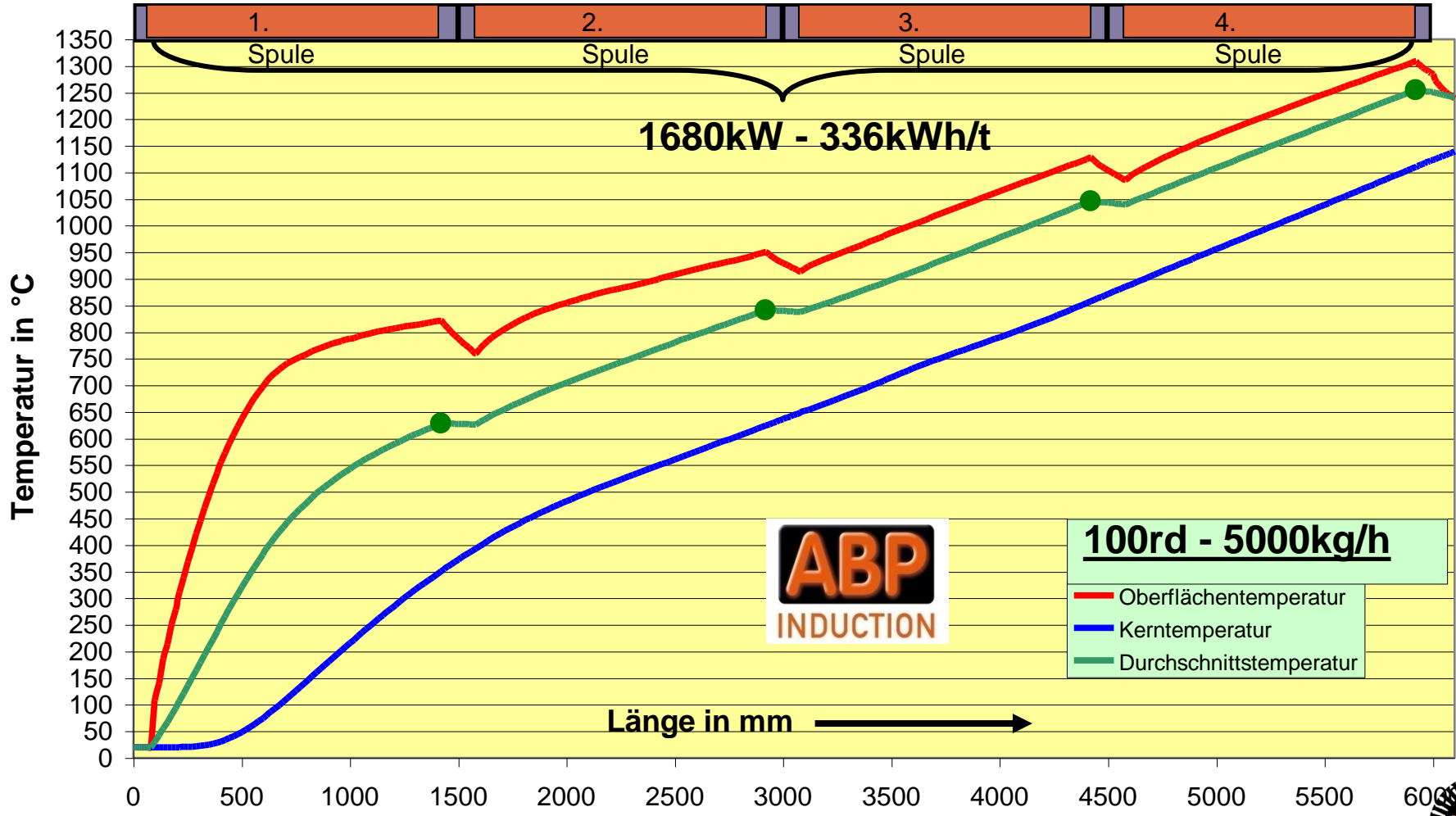
Anwendungsbeispiele: Lineare Erwärmung – Nenndurchsatz

640kW; 1000Hz;
600V; 44 Wdg

380kW; 1000Hz;
600V; 44 Wdg

330kW; 1000Hz;
600V; 44 Wdg

330kW; 1000Hz;
600V; 44 Wdg



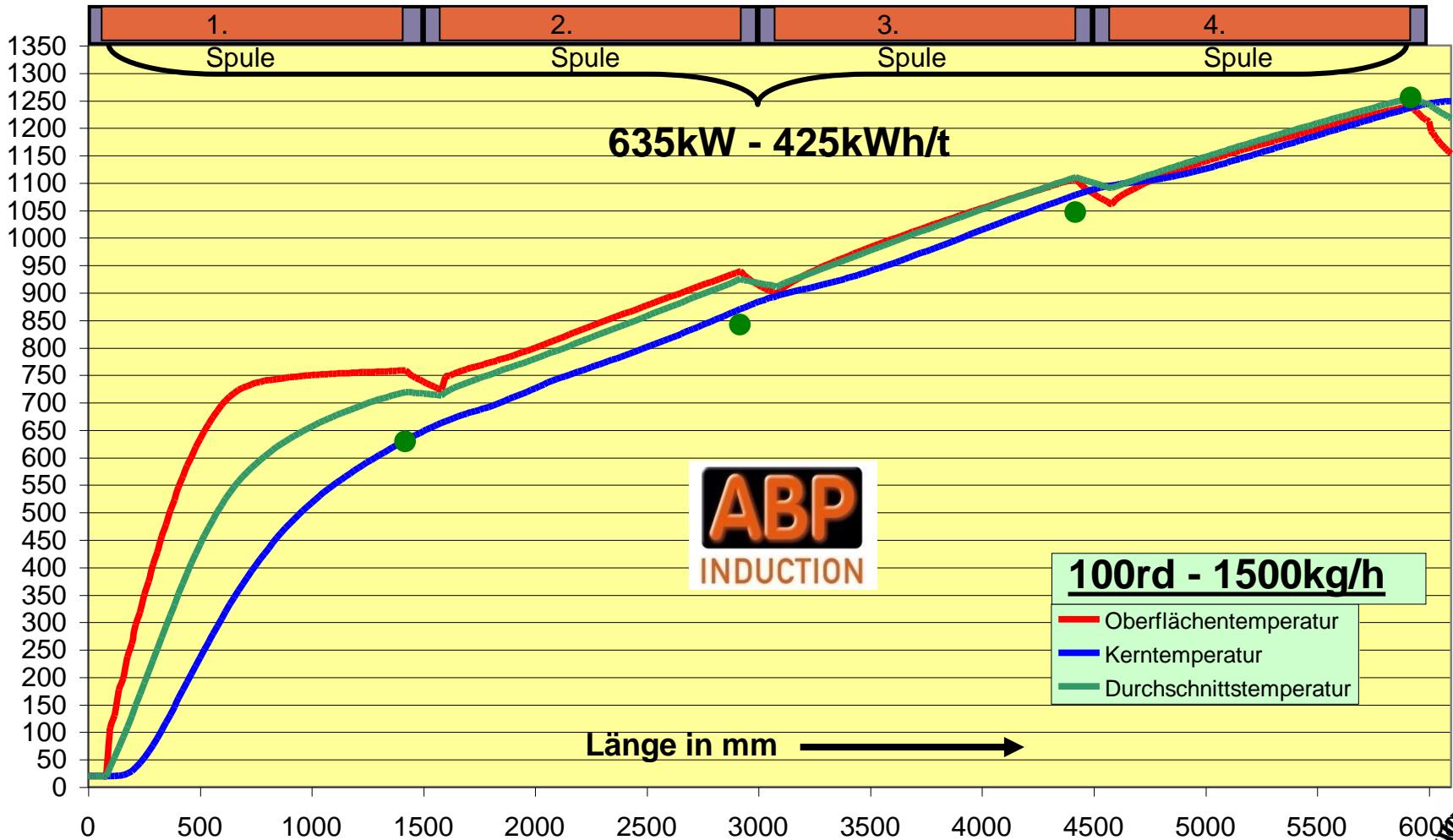
Anwendungsbeispiele: Lineare Erwärmung – Reduzierter Durchsatz

245kW; 1000Hz;
370V; 44 Wdg

130kW; 1000Hz;
370V; 44 Wdg

130kW; 1000Hz;
370V; 44 Wdg

130kW; 1000Hz;
370V; 44 Wdg



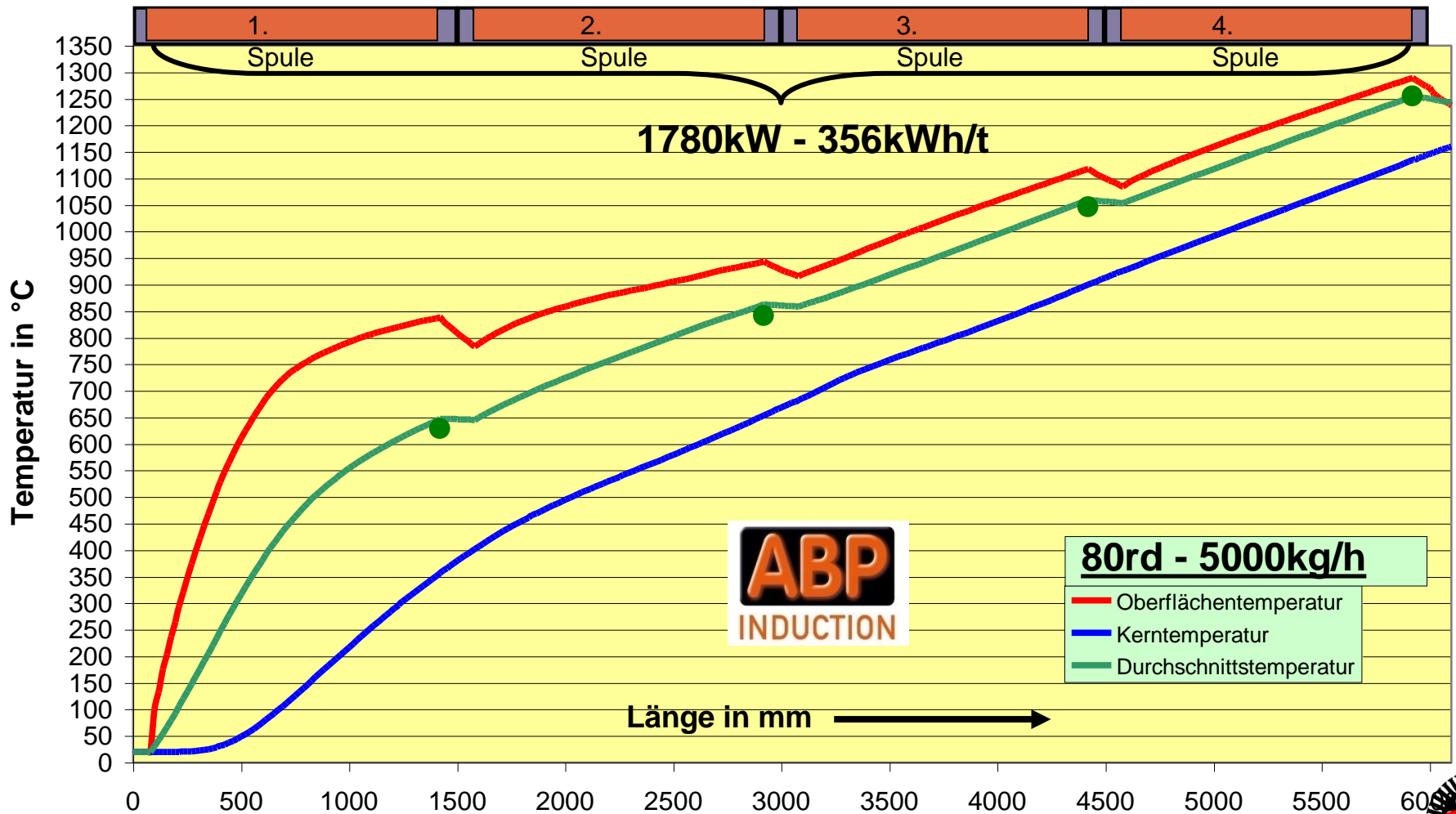
Anwendungsbeispiele: Lineare Erwärmung – Reduzierter Einsatzquerschnitt

695kW; 950Hz;
730V; 44 Wdg

405kW; 950Hz;
730V; 44 Wdg

340kW; 950Hz;
730V; 44 Wdg

340kW; 950Hz;
730V; 44 Wdg



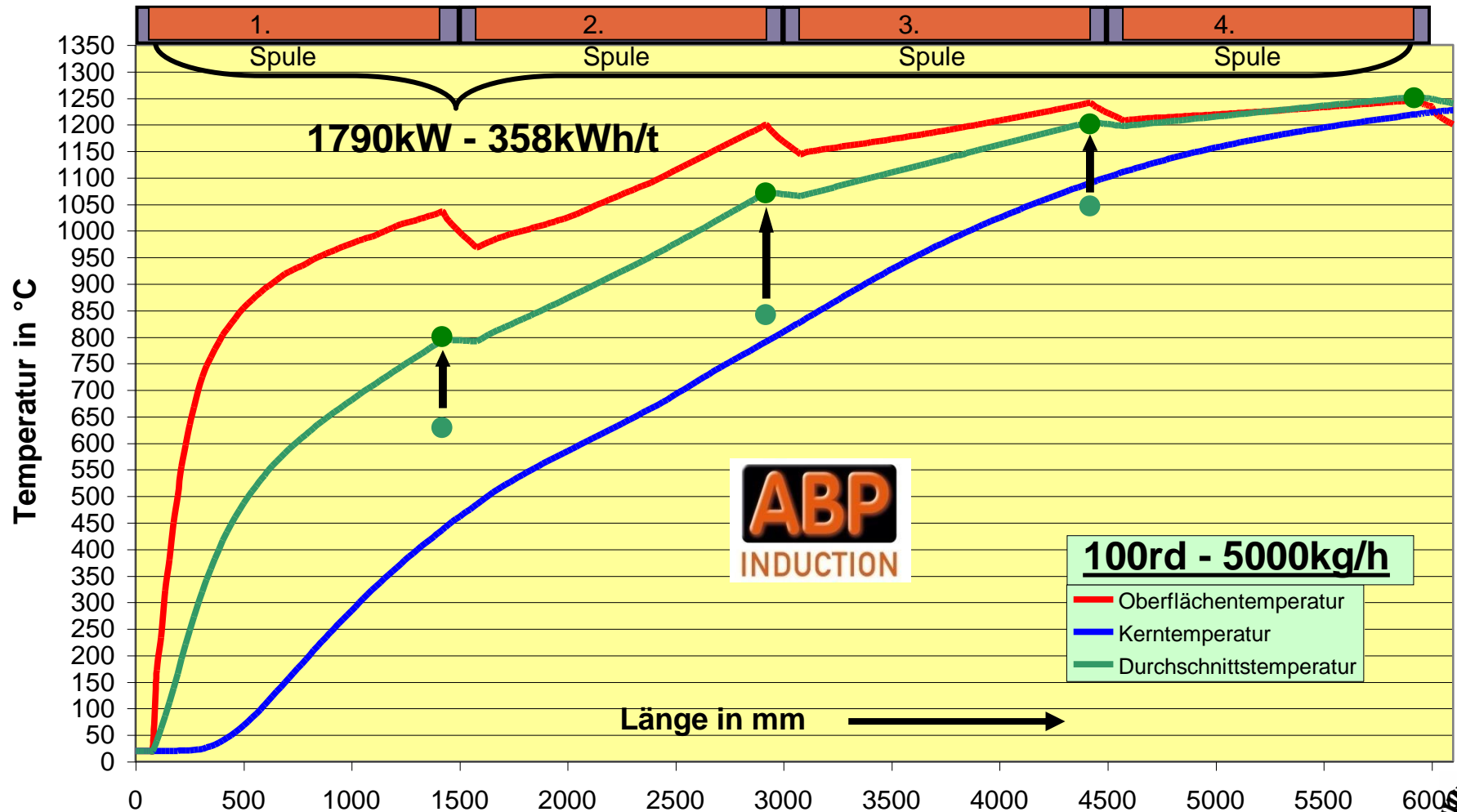
Anwendungsbeispiele: Nichtlineare Erwärmung - Nenndurchsatz

960kW; 1000Hz;
620V; 32 Wdg

440kW; 1000Hz;
620V; 38 Wdg

245kW; 1000Hz;
620V; 53 Wdg

145kW; 1000Hz;
620V; 70 Wdg



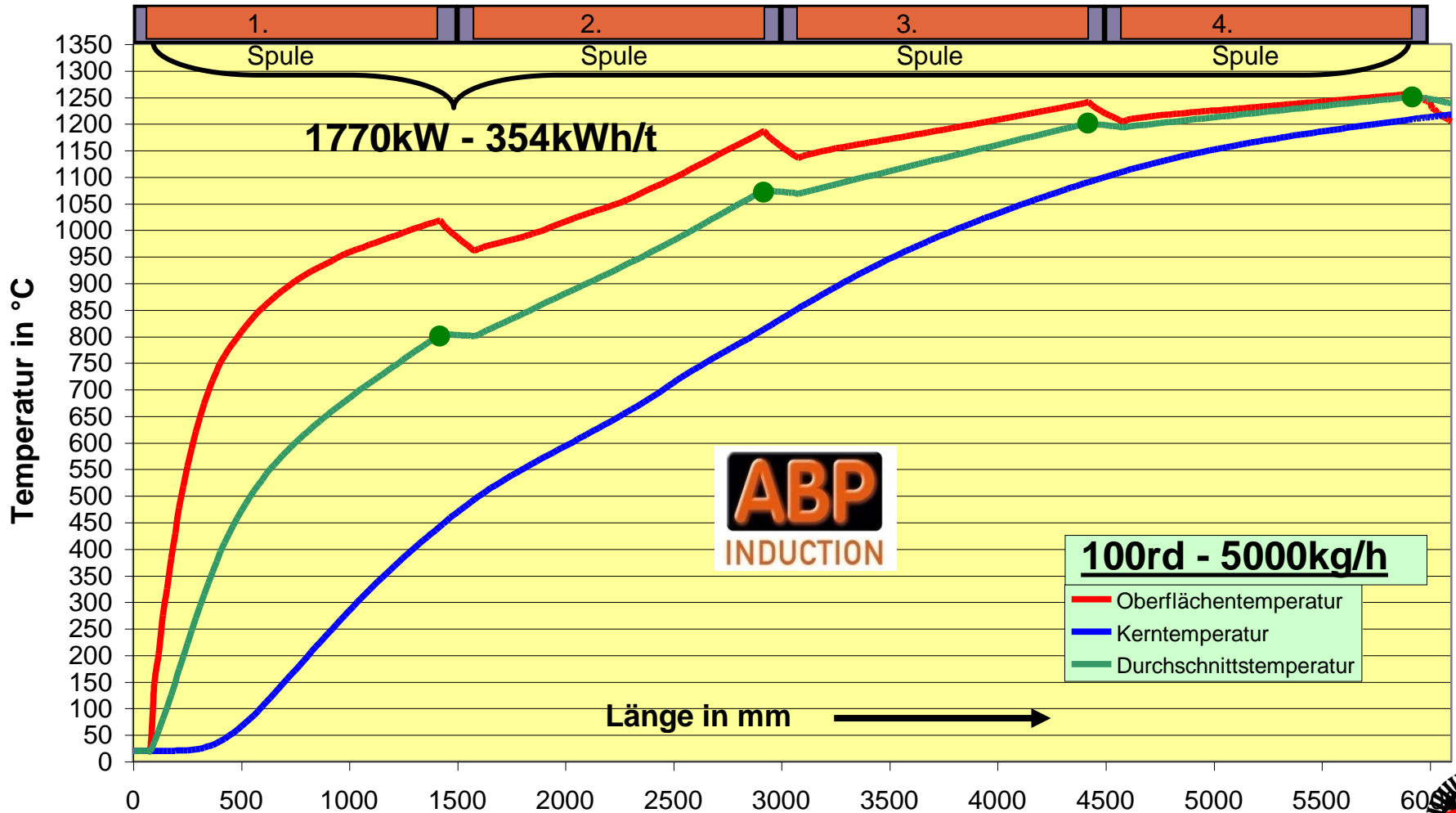
Anwendungsbeispiele: Enthalpiegesteuerte Zonenheizung - Nenndurchsatz

955kW; 630Hz;
600V; 44 Wdg

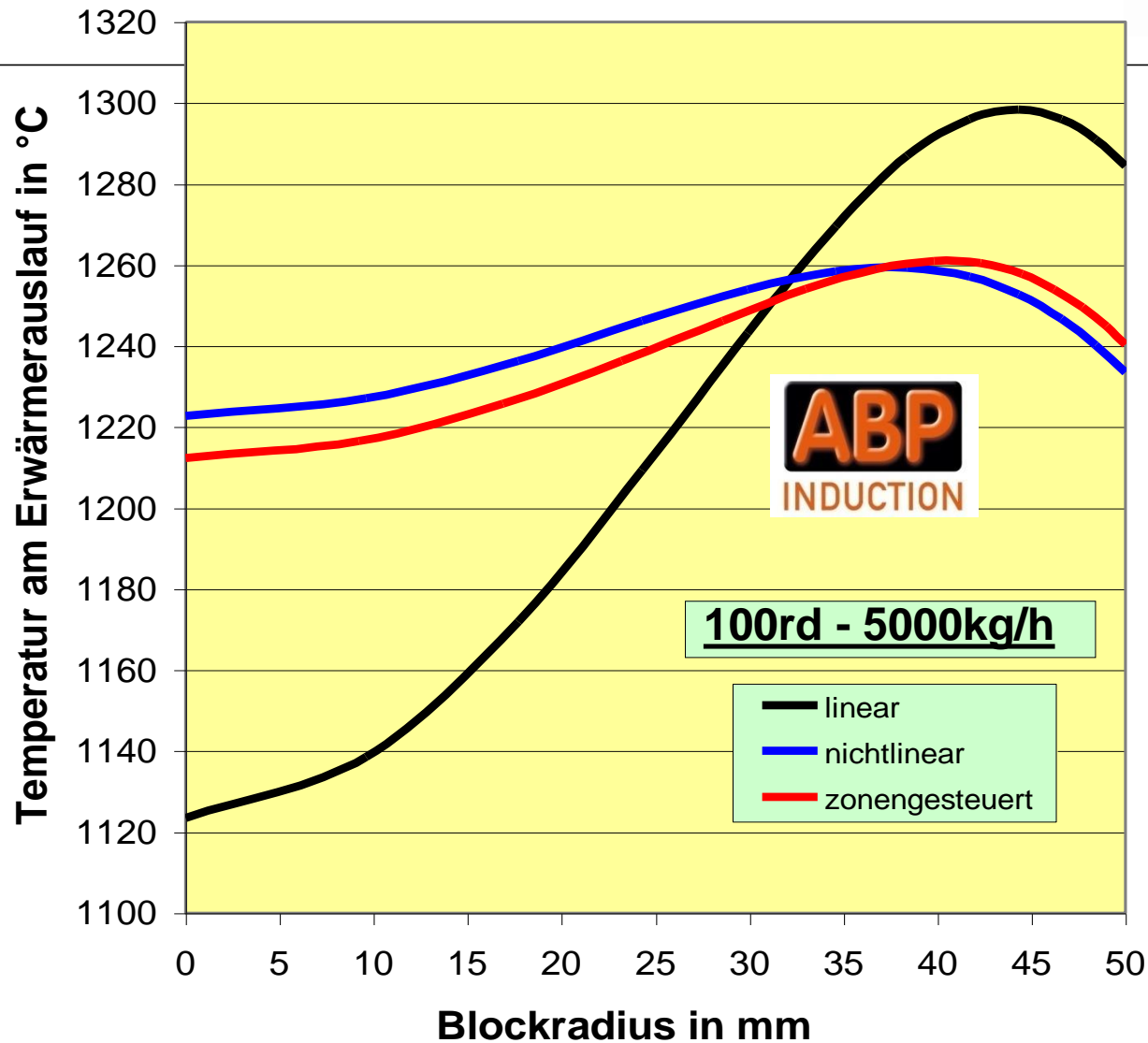
430kW; 815Hz;
600V; 44 Wdg

235kW; 1370Hz;
600V; 44 Wdg

150kW; 2000Hz;
600V; 44 Wdg



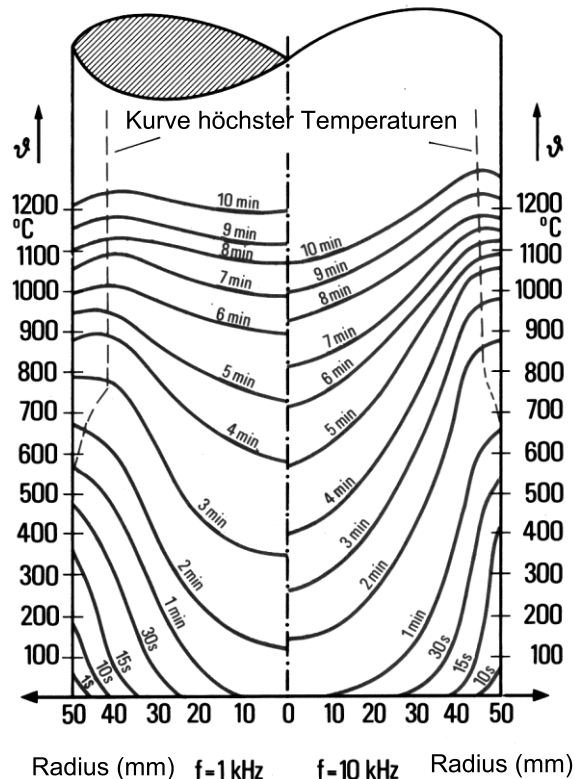
Anwendungsbeispiele: Radiale Temperaturverteilung - Nenndurchsatz



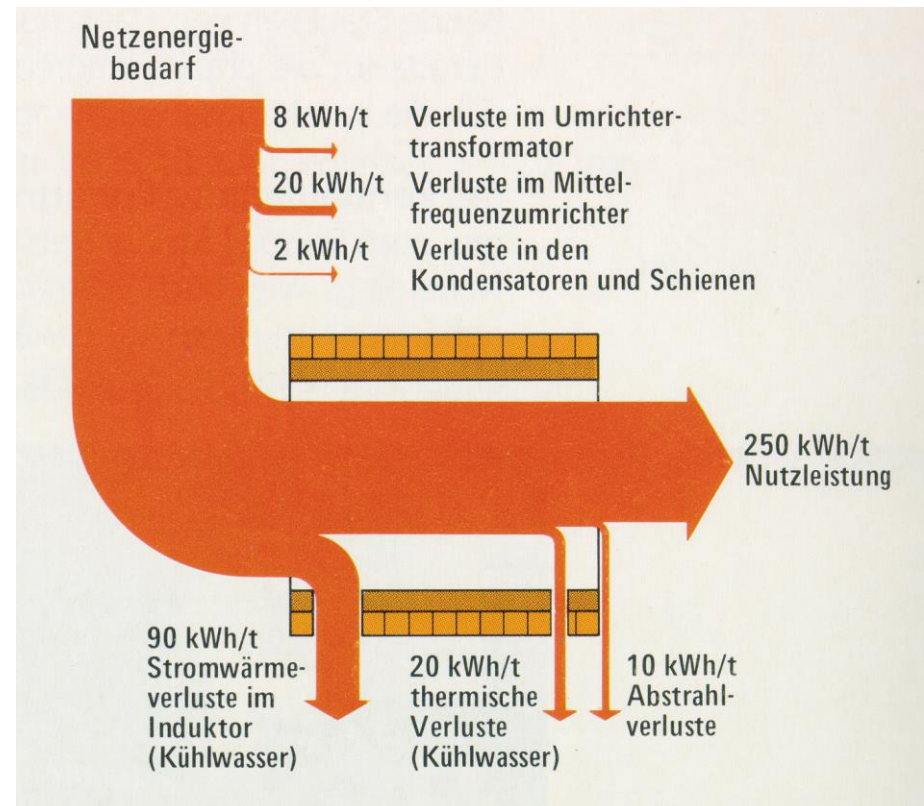
Induktives Erwärmen - Warmformen



Temperaturverteilung beim Aufheizen zylindrischer Körper



Energiefluss bei einem induktiven Schmiedeblock-Erwärmer



Quelle: RWE-Information Prozesstechnik



Induktives Erwärmen – Temperatur für Umformen

Der klassische Temperaturbereich für Schmiedeprozesse liegt bei ca. 1250°C (abhängig von Material und Umformgrad)
Neben des typischen Temperaturbereichs können auch andere Temperaturen für Umformprozesse eingesetzt werden:

	Halbwarmumformung	Thixoforming
Temperatur	200°C – 850°C	Solid-Liquid-Übergang
Material	Edelstahl, Legierungsstähle, Titan, Inconel (NiCr-Legierung)	Magnesium, Aluminium, teilweise Stahl
Vorteile	<ul style="list-style-type: none">- Geringer Energiebedarf- Keine Gefügeveränderung	<ul style="list-style-type: none">- ein einziger Umformschritt- geringe mechanische Belastung auf Umformwerkzeuge
Nachteile	<ul style="list-style-type: none">- Temperaturführung nötig- Höhere Beanspruchung der Werkzeuge, ggf. mehrere Umformschritte	<ul style="list-style-type: none">- Hoher Energiebedarf- Sehr genaue Temperaturführung nötig