

Inhalt der Vorlesung

Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse

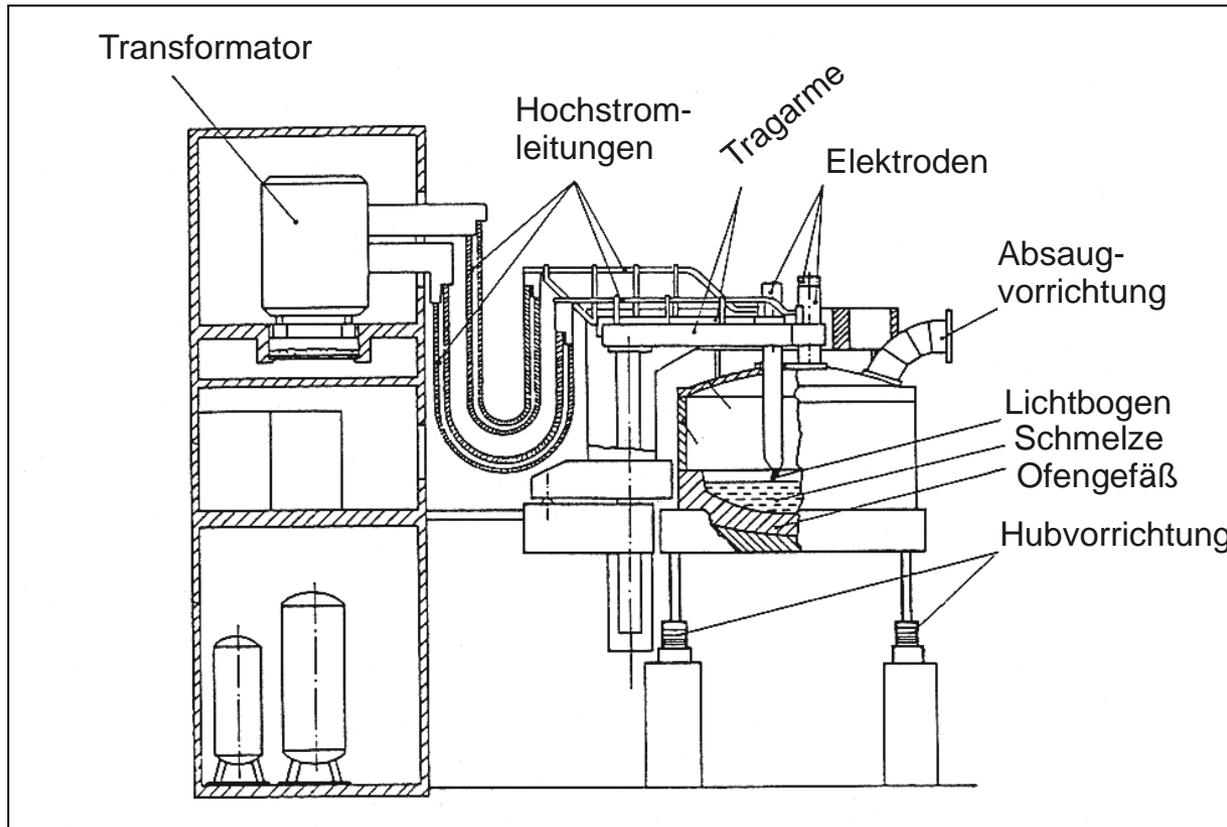


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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
7. Induktionserwärmung 3: Simulation (Praxis und Übung)
8. **Indirekte Erwärmung / Hybrid-Verfahren**
Lichtbogen, indirekte Widerstandserwärmung, Hybrid-Verfahren
9. Dielektrische Erwärmung (Praxis und Simulation)
10. Organisatorisches, Übungen, Fragen & Antworten



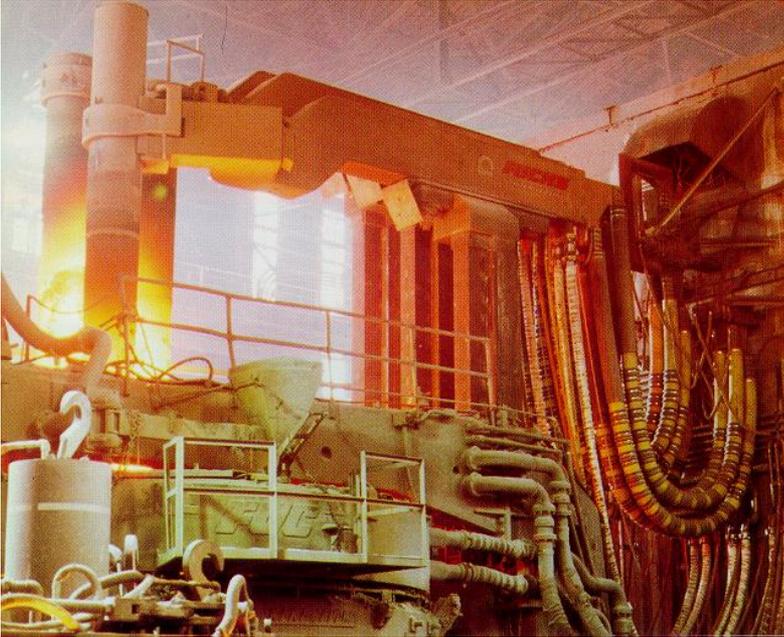
Prinzipieller Aufbau



Ofentypen

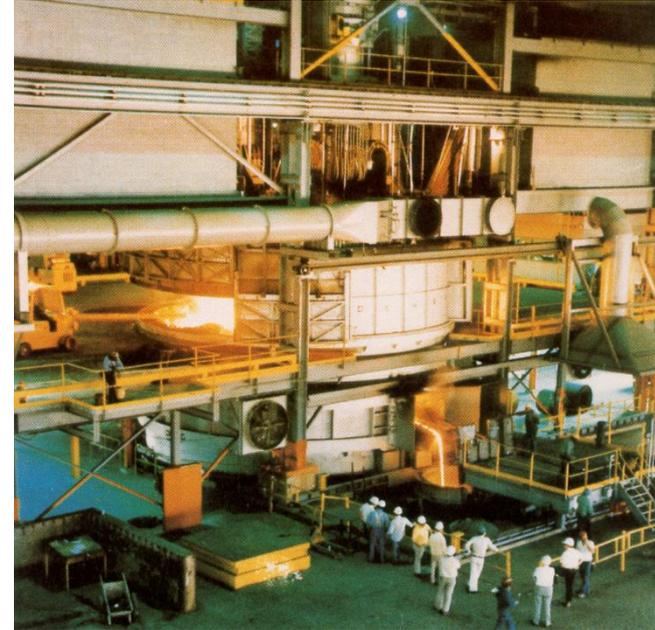
- mit offenem Lichtbogen
➔ Schmelzen von Stahl
- mit verdecktem Lichtbogen (Reduktionsöfen)
➔ Gewinnung von FeSi, CaSi, Si, CaC₂, P

Dreiphasiger Wechselstrom-Lichtbogenofen



- offen brennend, Lichtbogen zwischen Elektrode und Schmelze
- ➔ Wärmeübertragung hauptsächlich durch Wärmestrahlung

Reduktionsofen



- verdeckt brennend, Elektroden stehen im Schmelzgut (Möller)
- ➔ Wärmeübertragung durch
 - Wärmestrahlung (indirekt)
 - Widerstandserwärmung (direkt)

Kenngrößen und Energieverbrauch



- Größen: 10 ... 200 t (maximal 400 t)
- Ofenkapazität: 100 t/h bei modernen UHP-Öfen mit $P > 0,5 \text{ MVA/t}$
- Energieverbrauch: 400 ... 500 kWh/t bei modernen Öfen
(Enthalpie von Stahl ca. 390 kWh/t)
- Prozesswirkungsgrad: sehr hoch bei UHP-Öfen, da hohe Einsatzleistung
- Lichtbogen: Länge 150 ... 300 mm
Durchmesser 25 mm
- Spannung bisher begrenzt auf 1000 V, nach neuer Norm 1150 V
- Leistungsbegrenzung: durch Elektrodenströme

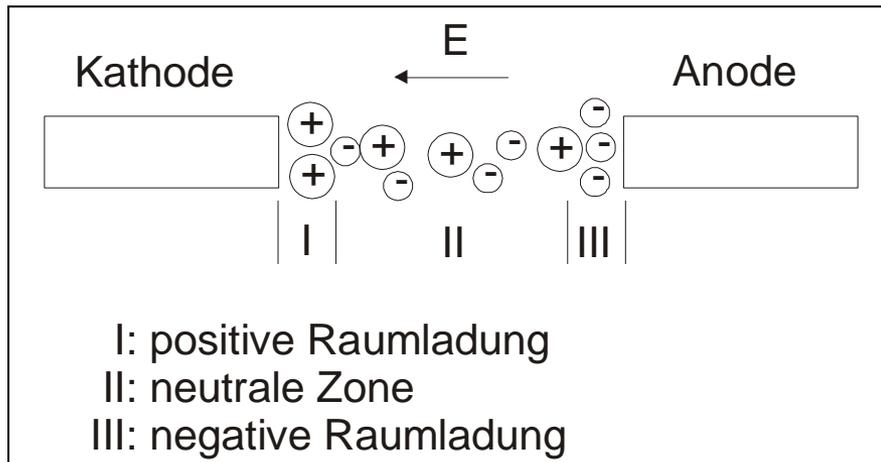




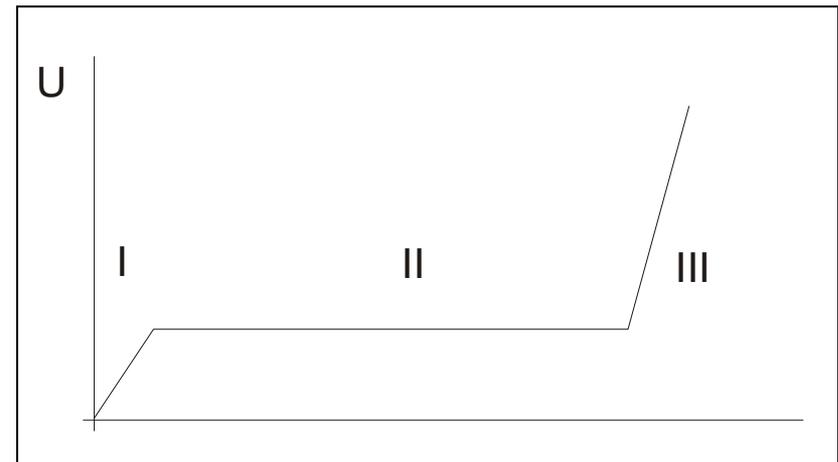
- Gase sind unter normalen Bedingungen elektrisch nicht leitend
- durch Ionisation wird ein Gas leitend
- Ionisation auf verschiedenen Wegen möglich, beim Lichtbogen durch hohe Temperatur des Bogens (thermische Ionisation)
- Bogenentladung durch thermo- und glühelektrische Emission von Elektronen aus den Elektroden
- hochionisiertes Medium (ionisierte Moleküle und Elektronen) = Plasma
- hat hohe elektrische Leitfähigkeit
- im LBO: Normaldruck, Temperaturen 5000 ... 7000 K



Raumladungszonen



Spannungsverlauf

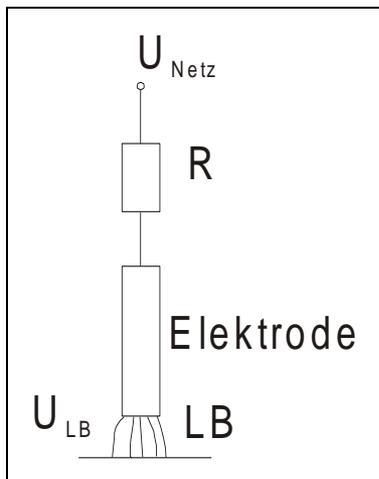


- Entstehung des Lichtbogens durch Kontakt der Elektronen und anschließendem Trennen bei bestimmter Zündspannung
- Anode wird durch Elektronen (schnell, beweglich) stark „bombardiert“, im Gegensatz zur Kathode

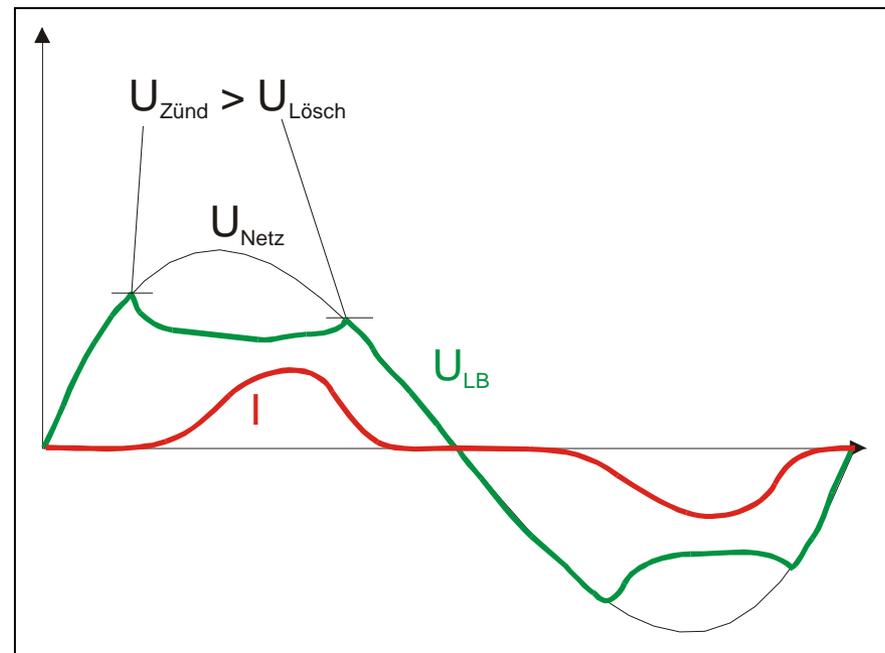
Wechselstrom-Lichtbogen

- beim Wechsel der Polarität der Elektroden erlischt der LB
(Anode ist von Elektronen umhüllt)
- bis zum Wiedertzünden muss Elektrodenschwarm zur anderen Elektrode gelangen
→ Totzeit, Verzug → Zündspannung > Löschspannung

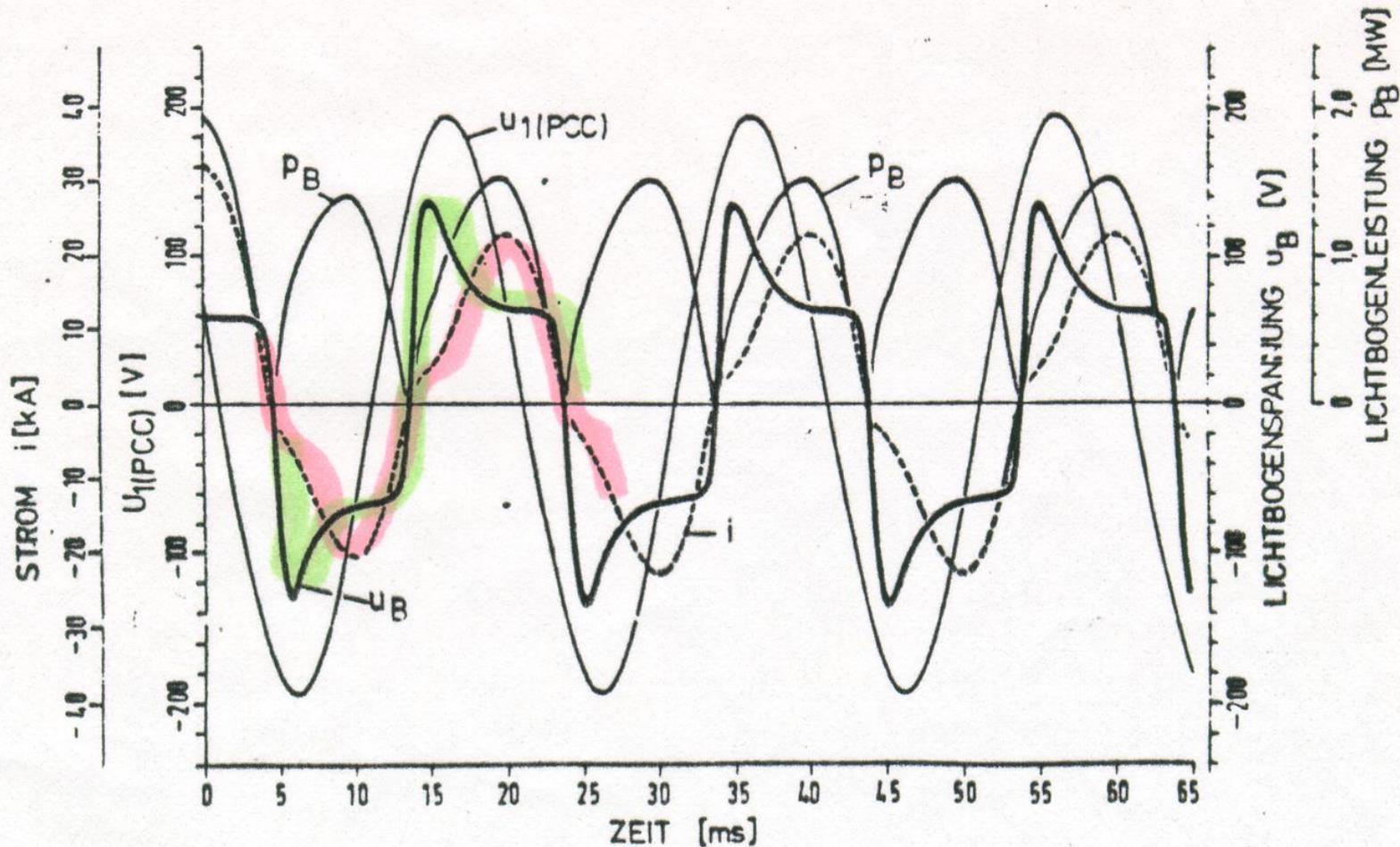
Anordnung



Strom und Spannungsverlauf



Strom- und Spannungsverlauf



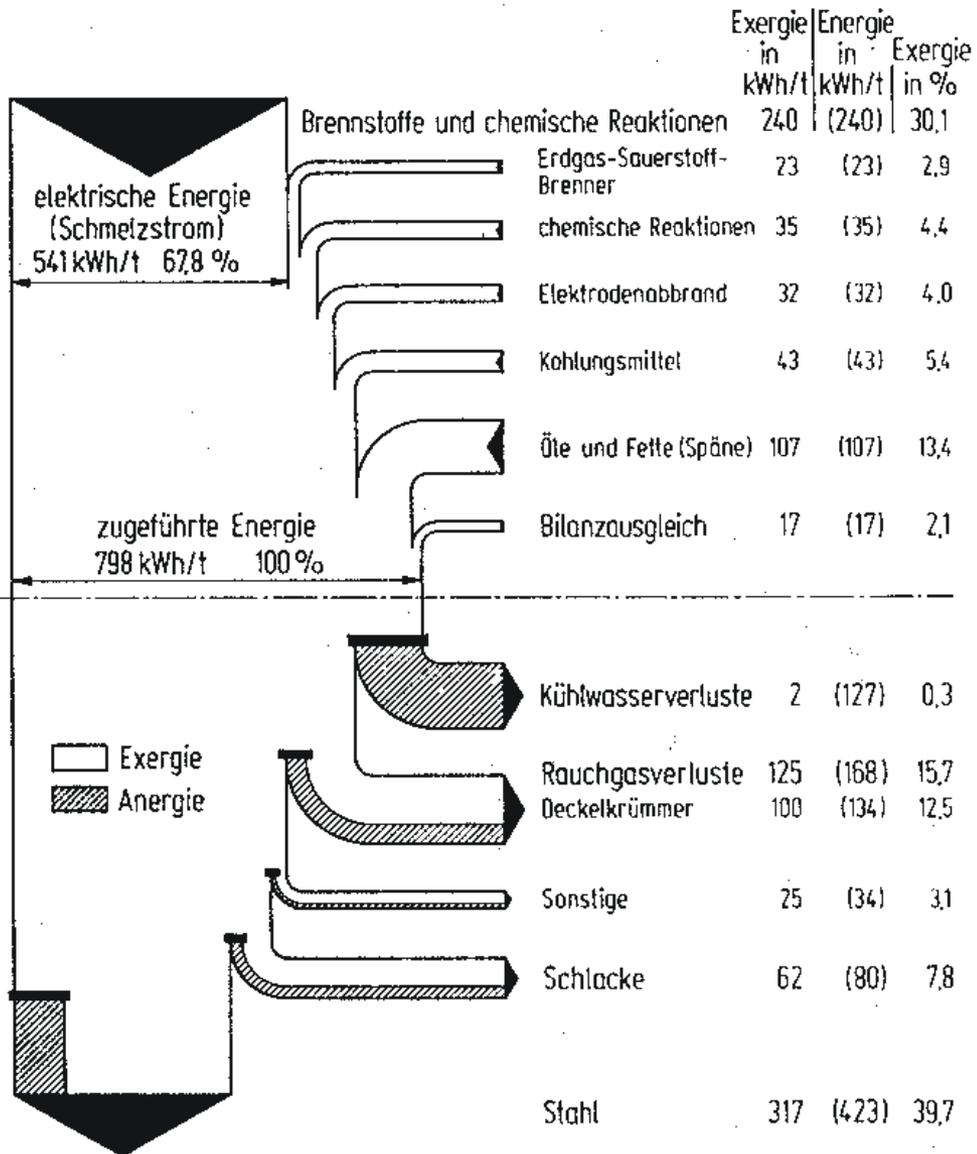
● aus der Kurvenform ergibt sich:

- Oberschwingungen
- Phasenverschiebung von Strom und Spannung, obwohl die Last rein ohmsch ist

● Netzurückwirkungen

- Oberschwingungen
- Flickern: Unterschwingungen infolge Halbschwingungs-Ausfall durch
 - Kurzschlüsse
 - Leerlauf
 - Lichtbogenlängenänderung

Frequenz 3 – 5 Hz, störend für Beleuchtung



Exergie-Anergie- Flussbild eines Lichtbogenofens

Quelle:
*Industrielle Elektrowärmetechnik, Vulkan-
Verlag*



Inhalt der Vorlesung

Elektrothermische Verfahren

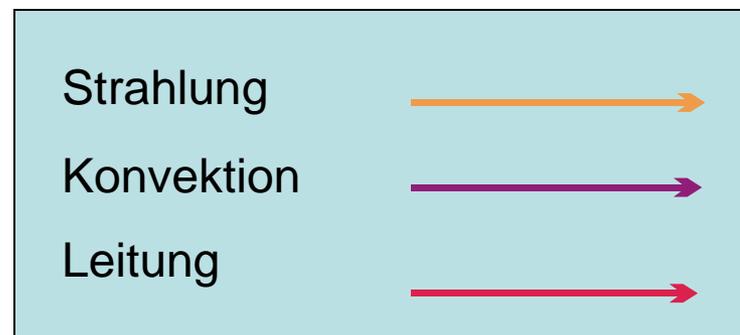
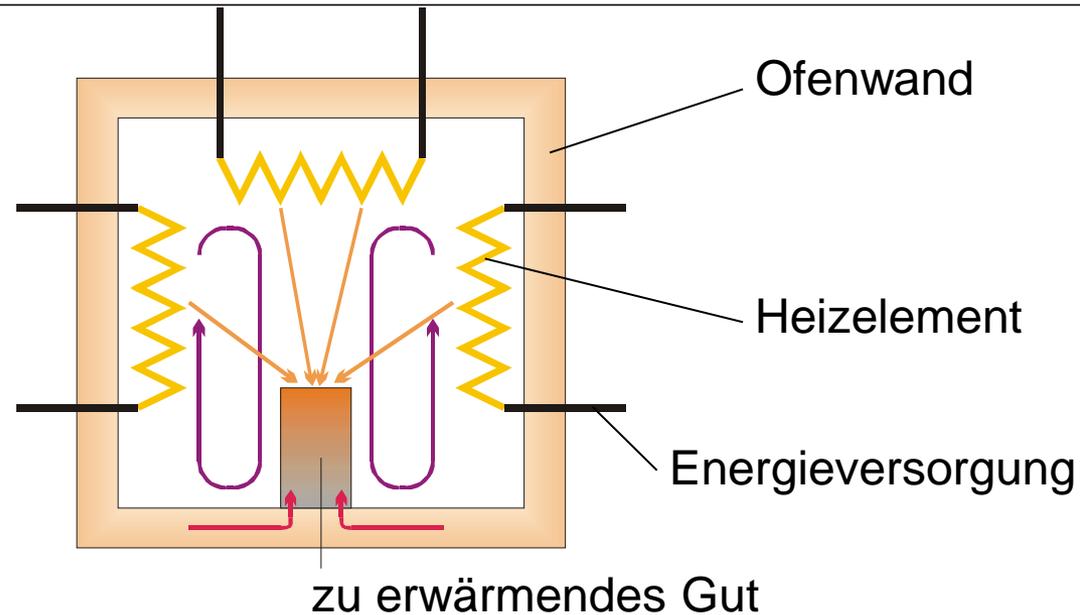


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

1. Einführung
2. Wärmetechnische Grundlagen
3. Energieeffizienz elektrothermischer Verfahren und Anlagen
4. **Umwandlung elektrischer in thermische Energie**
 1. Klassifizierung der elektrothermischen Verfahren: direkte/indirekte Verfahren
 2. Direkte Erwärmungsverfahren
 3. Berechnung direkter Erwärmungsverfahren
 4. **Indirekte Erwärmungsverfahren**
 1. Lichtbogenerwärmung
5. **Indirekte Widerstandserwärmung**



4.4.2 Indirekte Widerstandserwärmung



● Joule'sches Gesetz

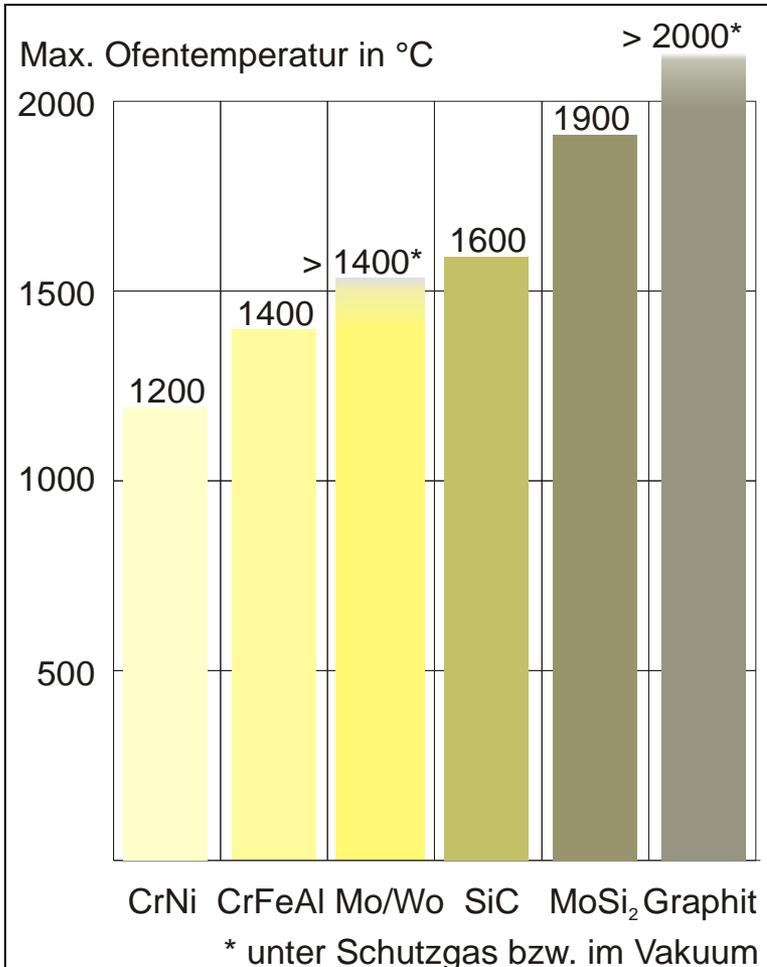
$$W = R \cdot I^2 \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

- R: elektrischer Widerstand des Leiters
I: elektrische Stromstärke im Leiter
U: elektrische Spannung, an der der Leiter liegt
t: Zeit, in der der Strom fließt bzw.
in der die Spannung anliegt

- Neben den steuerbaren Größen Stromstärke bzw. Spannung und der Erwärmdauer hängt die erzeugte Wärmemenge folglich vom **elektrischen Widerstand** des Heizleiters ab.

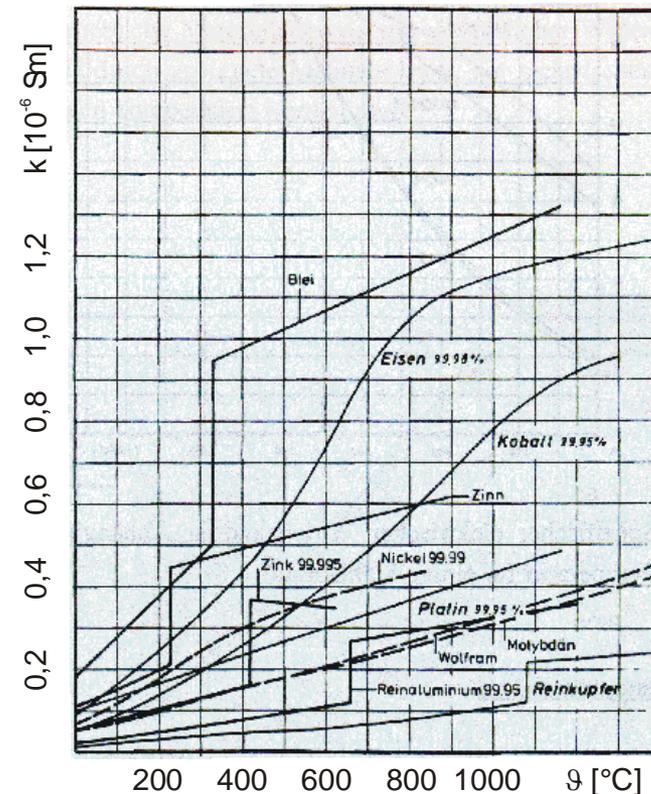
Heizleitermaterialien

Temperaturbereiche



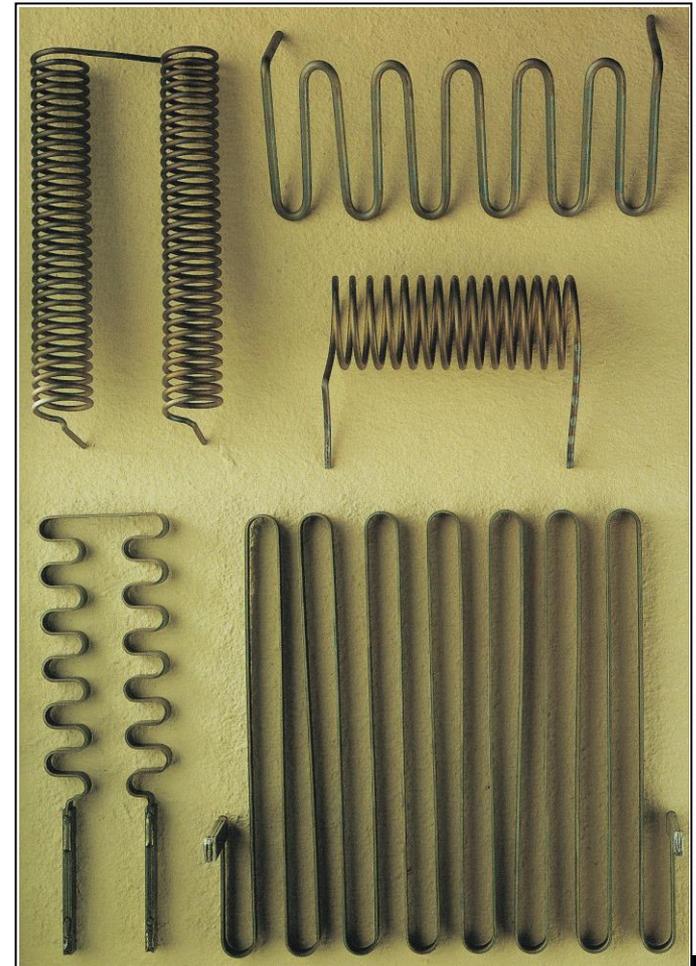
Elektrischer Widerstand

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \text{mit} \quad \rho = f(\vartheta)$$



Heizelemente – Typische Bauformen

- Metallische Elemente sind
 - aus Drähten und Bändern in verschiedenen Durchmessern und Breiten herstellbar
 - in verschiedenen zweckangepassten Formen erhältlich
 - nach Kundenwunsch herstellbar
 - freihängend, unterstützt oder eingebettet
 - einfach zu regeln
 - preiswert
 - mechanisch relativ unempfindlich



© Werkbilder Kanthal

● SiC-Elemente

- sind als Stäbe und Rohre erhältlich
- erfordern zumeist eine Regelung
- sind mit speziellem Anschluss- und Befestigungszubehör lieferbar
- sind mechanisch relativ empfindlich

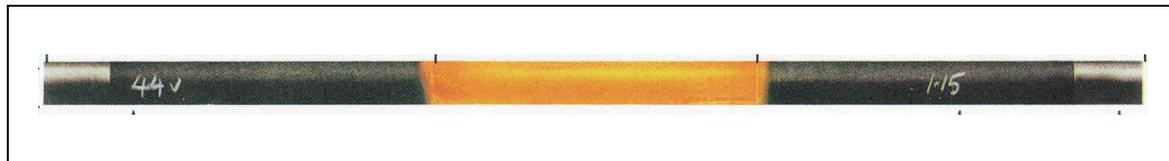


Bild 1: SiC-Stabelement

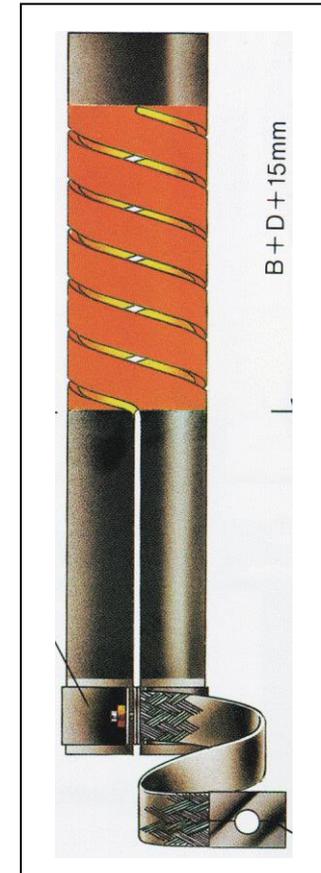


Bild 2: SiC-Rohrelement

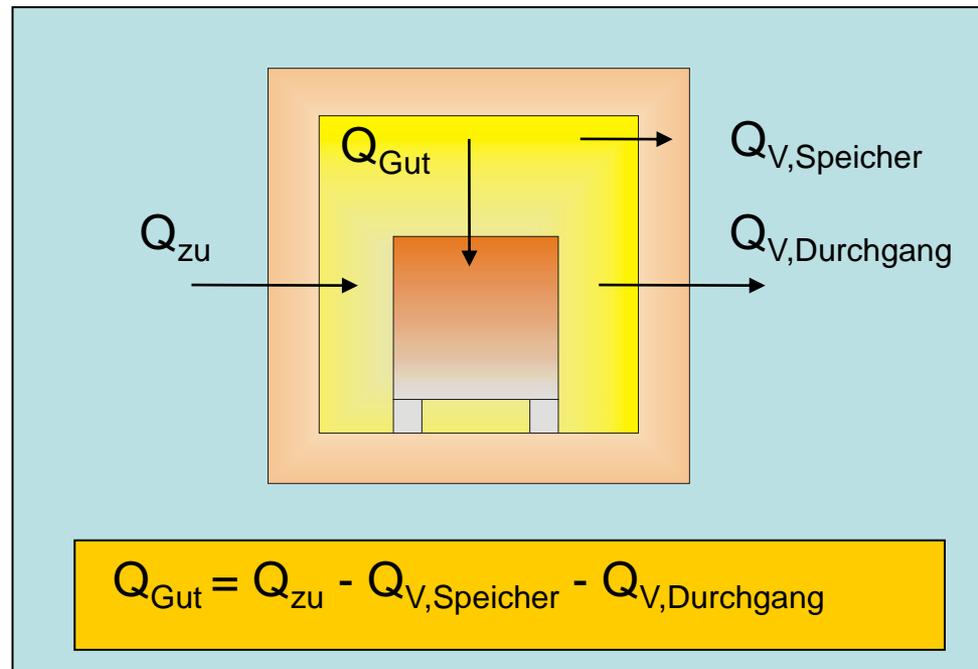
© Werkbilder Kanthal

● MoSi₂-Elemente

- erreichen eine sehr hohe Lebensdauer
- erfordern eine hängende oder unterstützende Lage, da sie im Betrieb weich werden
- erfordern zumeist eine Regelung
- sind mechanisch relativ empfindlich



© Werkbilder Kanthal



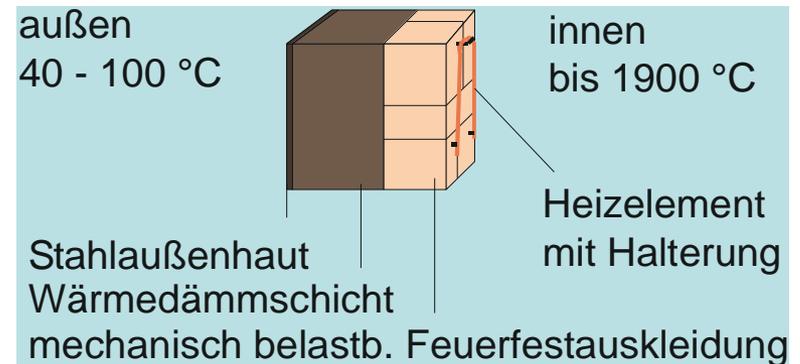
Q_{zu} : gesamte zugeführte Wärme

Q_{Gut} : Nutzwärme

$Q_{\text{V,Speicher}}$: Verluste Wärmespeicherung

$Q_{\text{V,Durchgang}}$: Verluste Wärmedurchgang

- In der Praxis mehrschichtige optimierte Wandaufbauten:
 - spez. Eigenschaften verschiedener Stoffe werden sinnvoll kombiniert

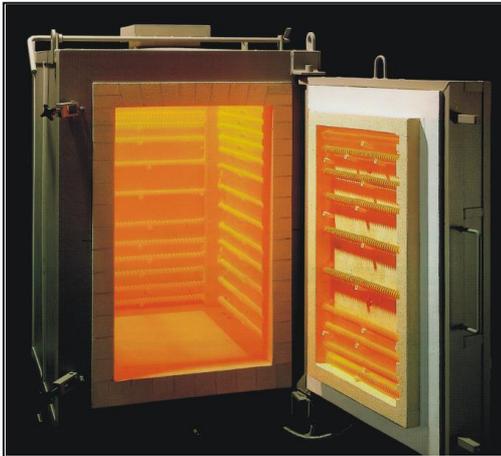


- Gebräuchliche Ofenbauwerkstoffe
 - Feuerfeststoffe (z. B. Schamotte, $\lambda \approx 1,2 \text{ W/mK}$)
 - Al_2O_3 -Faserisolerstoffe ($\lambda \approx 0,2 \text{ W/mK}$)

- Keramische Faserisolerstoffe
 - sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und Dichte
 - oft ausreichende mechanische Festigkeit

} → ermöglicht
Leichtbauweise

Brennofen für Glas,
Keramik, Porzellan



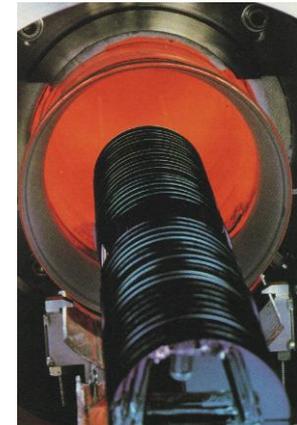
© Werkbild Nabertherm

Schmelzofen für
Al, Cu, u. a.



© Werkbild Nabertherm

Rohrofen für die
Elektroindustrie



- Schmelzen und Warmhalten von Metallen, Glas, Silizium
- Trocknen von Stoffen wie Farben, Lacke, Papier u. a.
- Wärmebehandlung wie Härten, Glühen, Anlassen, Aufkohlen
- Erwärmen von Wasser und anderen Flüssigkeiten, Gasen, Pressen

Keramikindustrie

- Brennen von Sanitärkeramik, Geschirr, Steinzeug, Fliesen
- Emaillieren
- Glasieren

Nahrungs- und Genussmittelindustrie

Glasindustrie

- Härten
- Formen
- spannungsfreies Glühen

Stahlindustrie

- Aufwärmen
- Zwischenerwärmen
- Glühen

Maschinenbau

- Glühen
- Hartlöten
- Aufkohlen
- Karbonieren
- Härten
- Nitrierhärten
- Spannungsfrei-Glühen
- Vergüten

Chemische Industrie

Elektronikindustrie

Gießereien

- Schmelzen und Warmhalten von Al, Zn, Cu und Messing

● Technisch:

- installierbare Leistung begrenzt \Rightarrow Elementbelastung, Wandbelastung
- relativ hohe Energiekosten i. V. zu Gasöfen
- für steuerbare Abkühlung ggf. zusätzliches Gebläse notwendig (bei Gasöfen vorhanden)
- je nach Heizelementwerkstoff sind reduzierende Ofenatmosphären problematisch

● Wirtschaftlich:

- bei Neuaufstellung eventuell Erhöhung der Anschlusskapazität notwendig
- ggf. zusätzliche Trafostation notwendig

Bewertung und Vergleich - Vorteile

- Technisch:
 - für nahezu alle Werkstoffe einsetzbar
 - kaum Einschränkungen bezüglich der Werkstückgeometrie
 - kontrollierte Prozessatmosphären möglich
 - hohe Betriebssicherheit
 - einfache Bedienung
 - präzise regelbar, automatisierbar
 - flexibel einsetzbar
 - einfache De- und Remontage
- Wirtschaftlich:
 - geringe Investitionskosten
 - niedrige Betriebskosten
 - keine Genehmigungspflicht (i. G. zu Gasöfen)
 - keine Fundamentarbeiten
 - kein Schornsteinanschluss
 - lange Lebensdauer
- Umwelt- und Arbeitsschutz:
 - geringe Lärmbelastung
 - geringe Wärmebelastung
 - keine Emissionen von Brennstoffabgasen am Anwendungsort

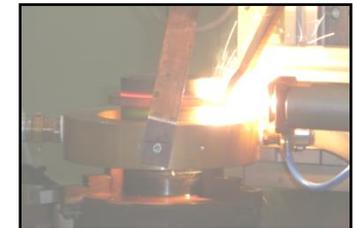
Hybrid-Verfahren



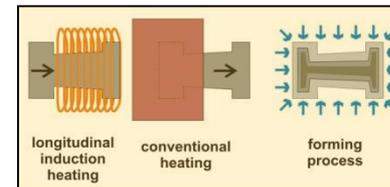
➤ Induktive Unterstützung von Schweißprozessen



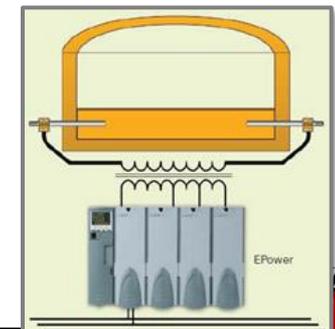
➤ Kombinationsverfahren zum Laserstrahlschweißen während des induktiven Härteprozesses



➤ Hybridverfahren bei der Blechbehandlung



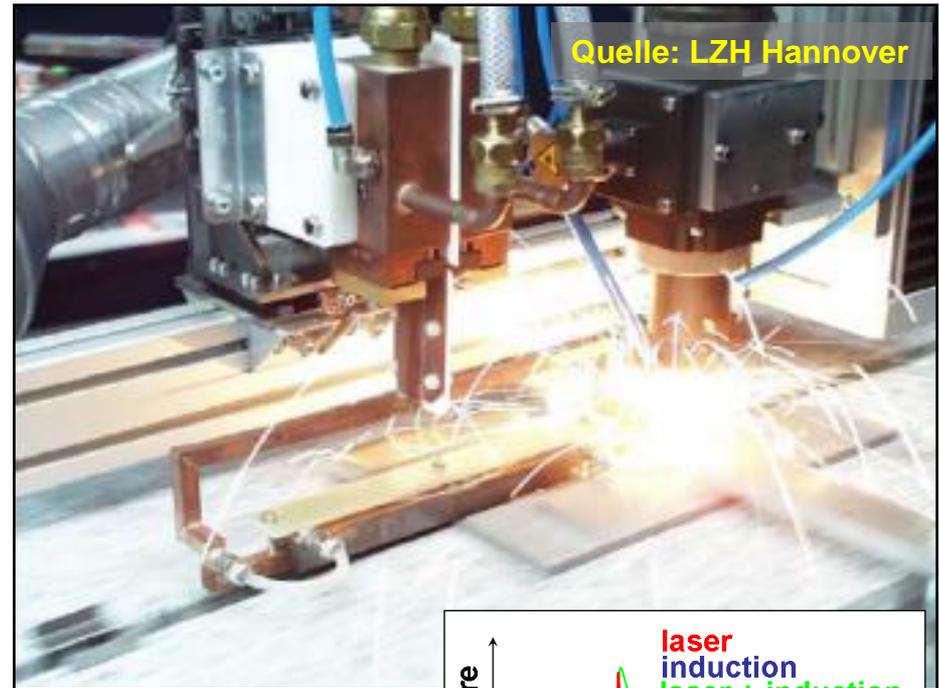
➤ Hybridverfahren beim Glasschmelzen



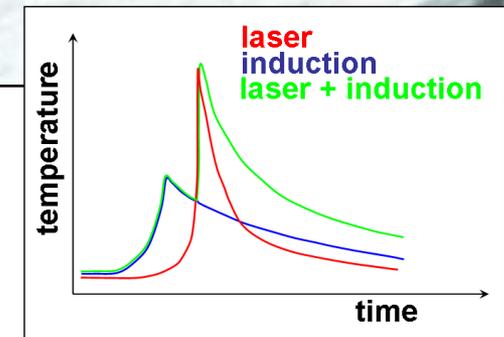
Induktive Unterstützung von Schweißprozessen

Einsatz der induktiven Erwärmung in Schweißprozessen

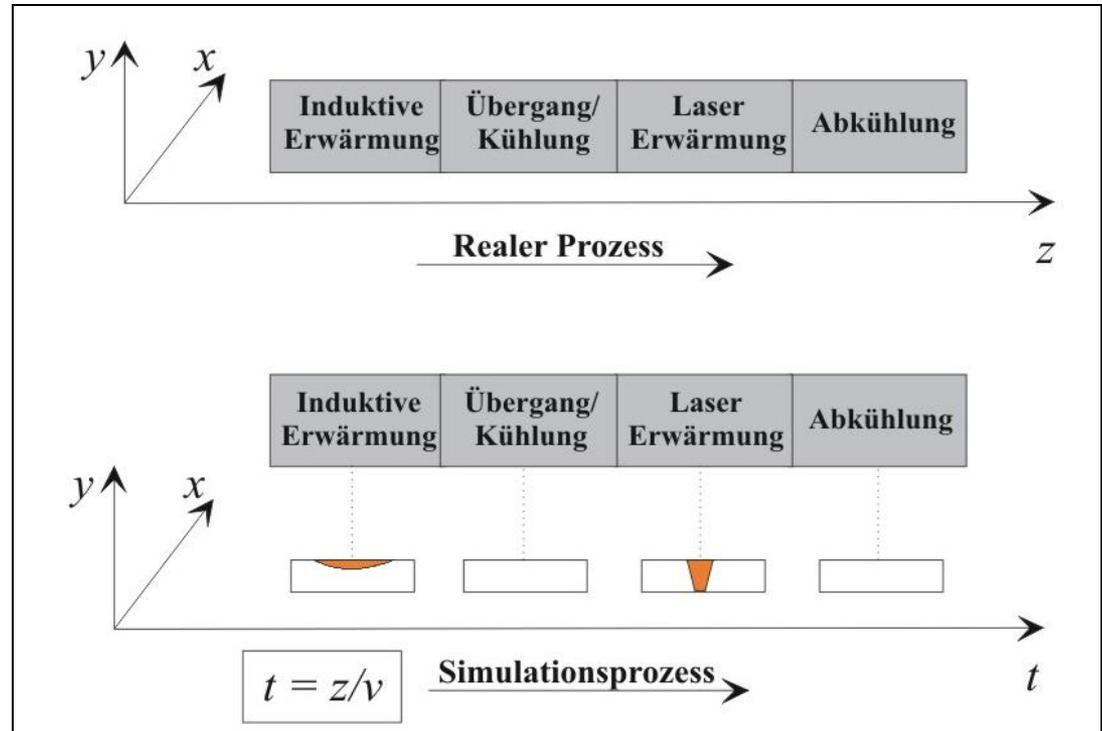
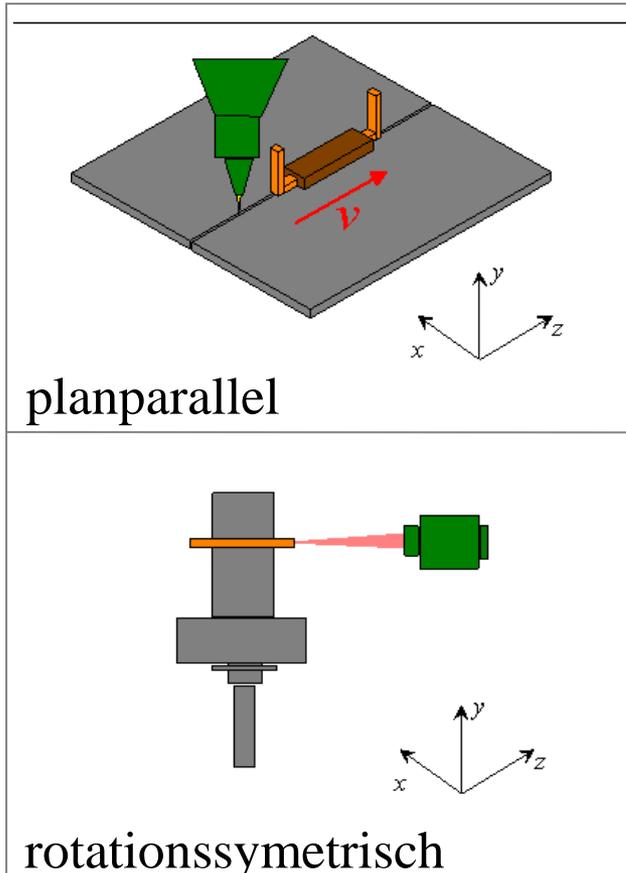
- Reduzierung der unerwünschten Effekte von Schweißquellen mit sehr hohen Leistungsdichten durch eine gezielte Temperaturführung
- Erhöhung des Prozesswirkungsgrades (erhöhte Prozessgeschwindigkeit)
- Verbesserung der Nahteigenschaften (z.B. Reduzierung der Härte)
- Erweiterung des Anwendungsspektrums



Beispiel einer Laserschweißanlage mit induktiver Vorerwärmung



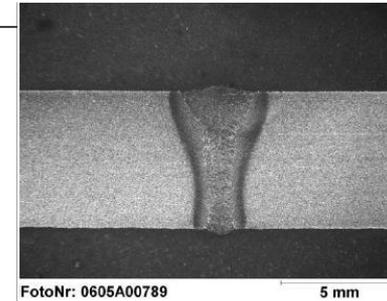
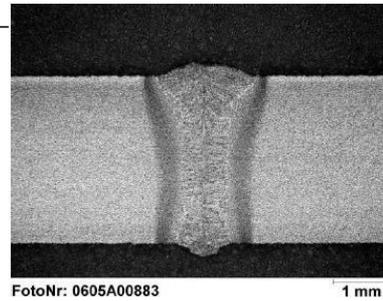
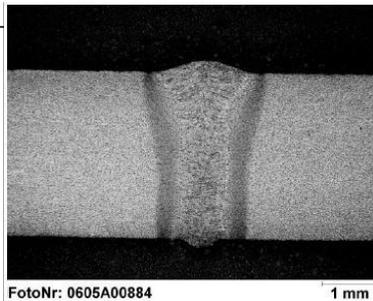
Vorgehensweise bei der Prozesssimulation



3D Effekte der Energiequellen werden durch ihre Änderung mit der Zeit berücksichtigt

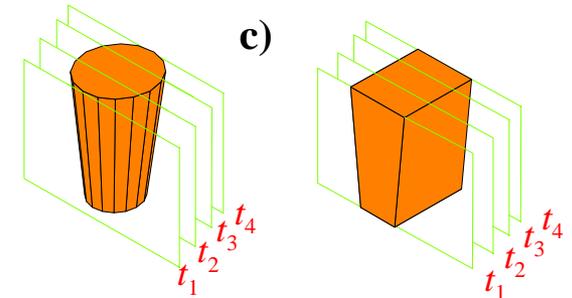
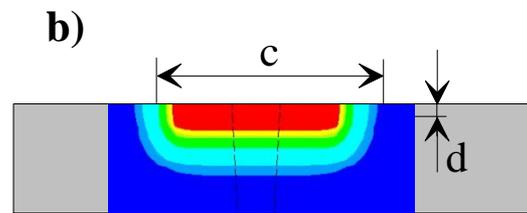
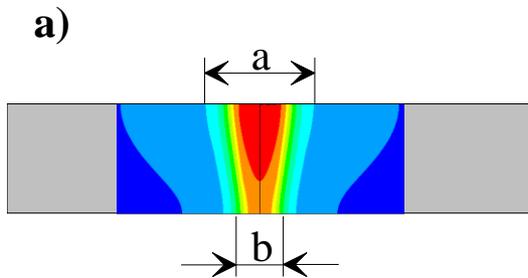
$$w(x,y,z) \xrightarrow{v} w(x,y,t)$$

Vorgehensweise bei der Prozesssimulation



Experimentelle Daten

Quelle: IWS Dresden



Prinzip zur Implementierung der Laser- (a) und GMA-Schweißenergie (b), Vereinfachung des Profils in der Bewegungsrichtung (c)

Einbindung der Laser-, Plasma- und MAG-Strahlquellen durch zweidimensionale, zeitlich veränderliche Wärmequellen

Hochfeste Stähle / Motivation

- Steigender Bedarf an industriellen Anwendungen hochfester Stahlfeinbleche
- Anwendungsgebiete:
 - Automobilindustrie, Schiffbau
 - Kranbau, Eisenbahnindustrie
 - Anlagenbau, Baumaschinen
- Laser- bzw. Laser-Hybrid-Schweißverfahren führen oft zu Schwierigkeiten:
 - Aushärtung der Naht
 - Verlust der Zähigkeit
- Optimale Integration der induktiven Erwärmung kann einen stabilen Prozess gewährleisten



Ziele der Arbeiten

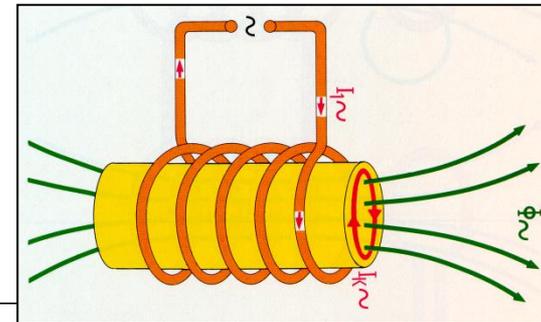
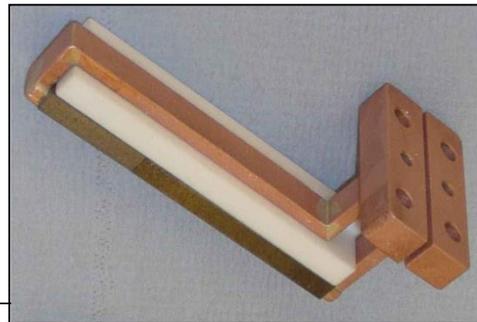
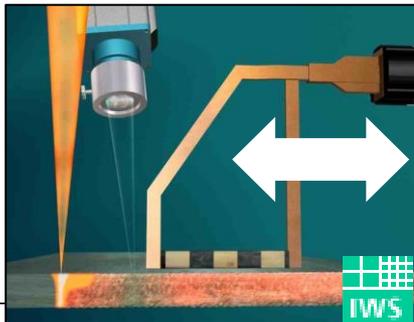
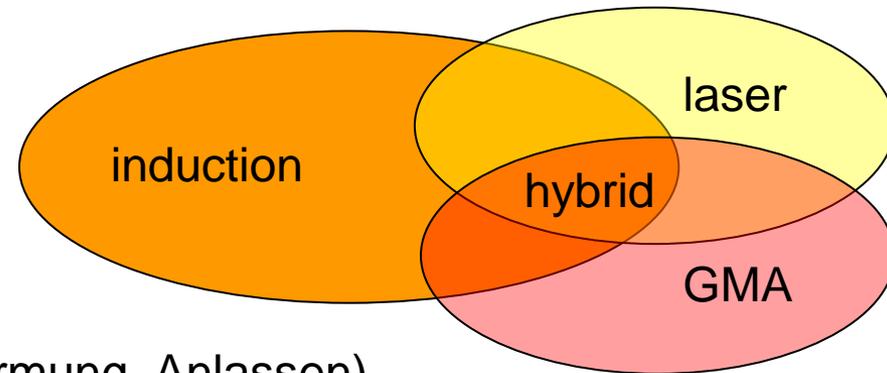
- Design und Optimierung von Induktionsanlagen zur Kombination mit verschiedenen Schweißtechnologien (Laser, MAG, Hybridschweißen)
- Gezielte Temperaturführung während des gesamten Schweißprozesses

Anforderungen

- Reduzierung der Temperaturgradienten
- Angepasste Vorwärmtemperatur
- Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit

Optimierung

- Prozesskonfiguration (Vor- und Nacherwärmung, Anlassen)
- Prozessparameter (Leistung, Frequenz)
- Induktordesign



Quelle:
Fraunhofer
IWS Dresden

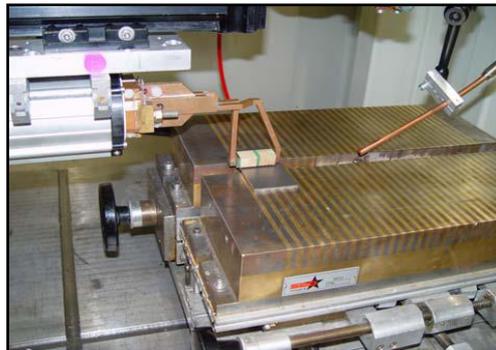
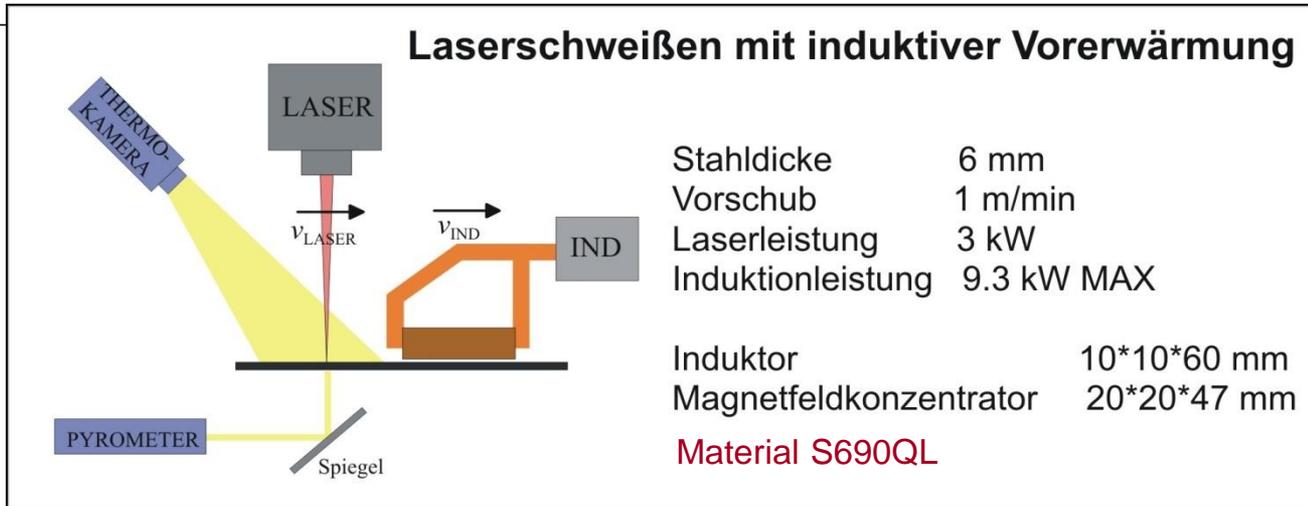
Beispiel der Wärmebehandlung nach dem Laserschweißen



Quelle: Fraunhofer IWS Dresden

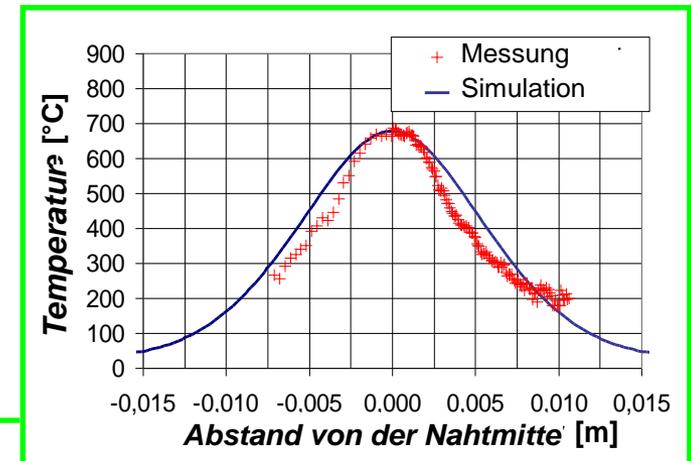
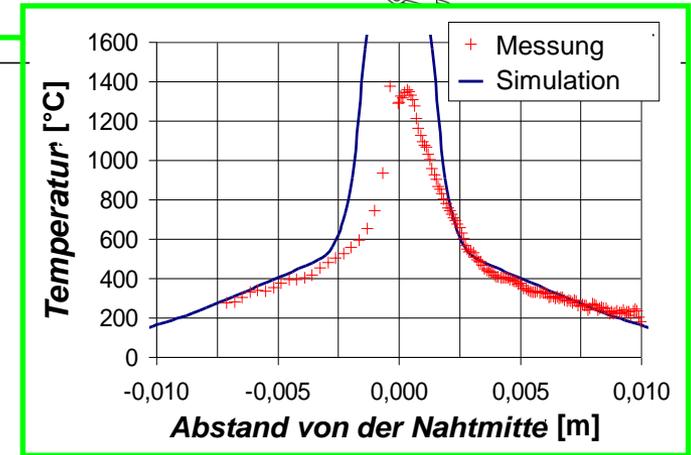
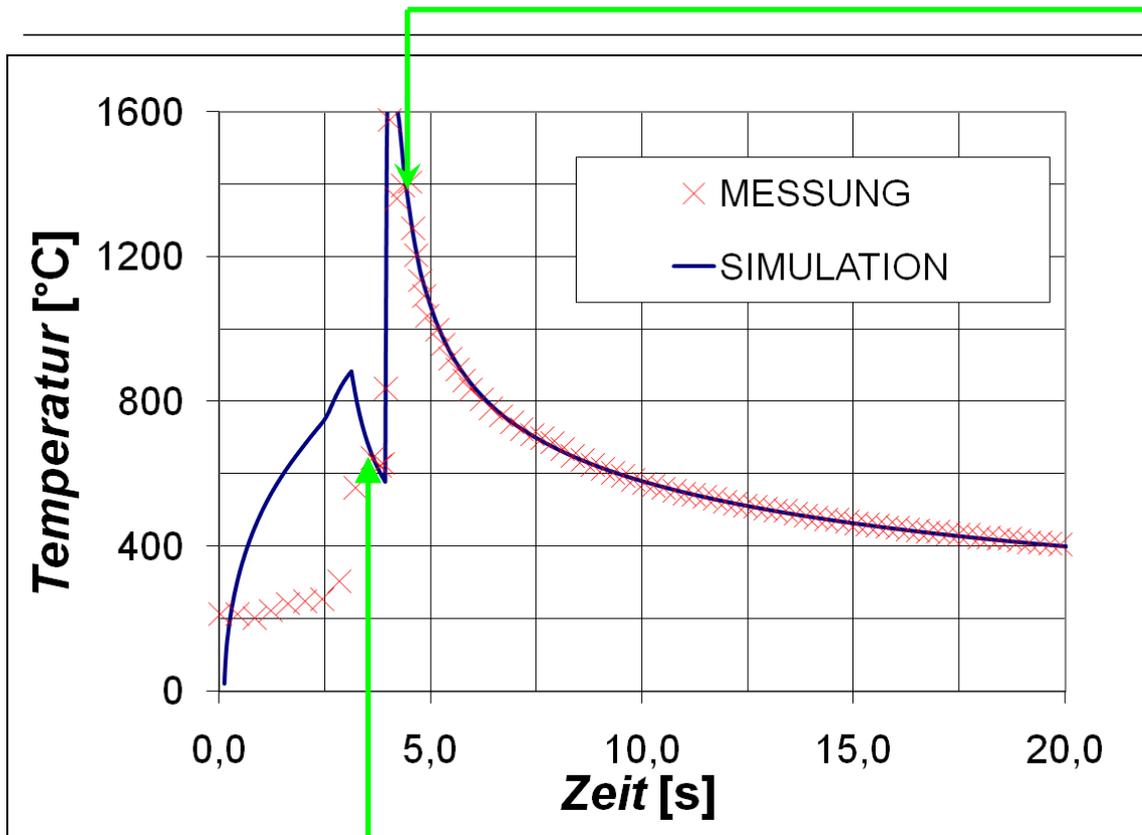
- Anpassung des Energieeintrags durch eine additive Energiequelle (Induktion)
- Veränderung des zeitlichen Temperaturverhaltens
- Gleichzeitige Bewegung des Schweißkopfes und der Induktorspule
- Vermeidung der kritischen Abkühlungszeiten

Verifikation anhand von Messdaten vorhandener Anlagen



Versuchsanordnung und Parameter des untersuchten Prozesses (IWS Dresden)

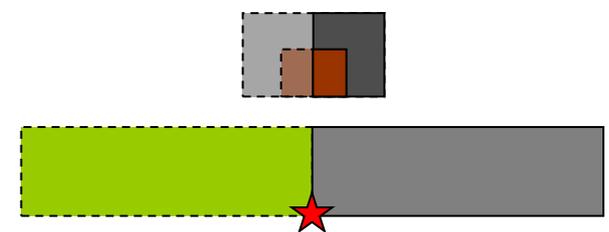
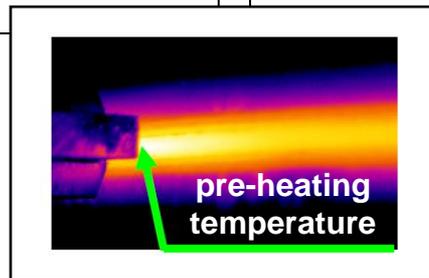
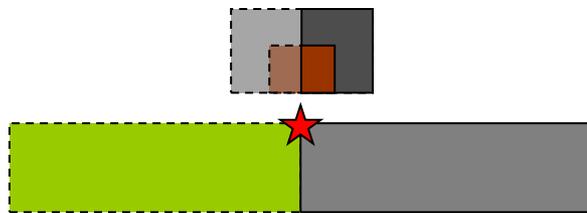
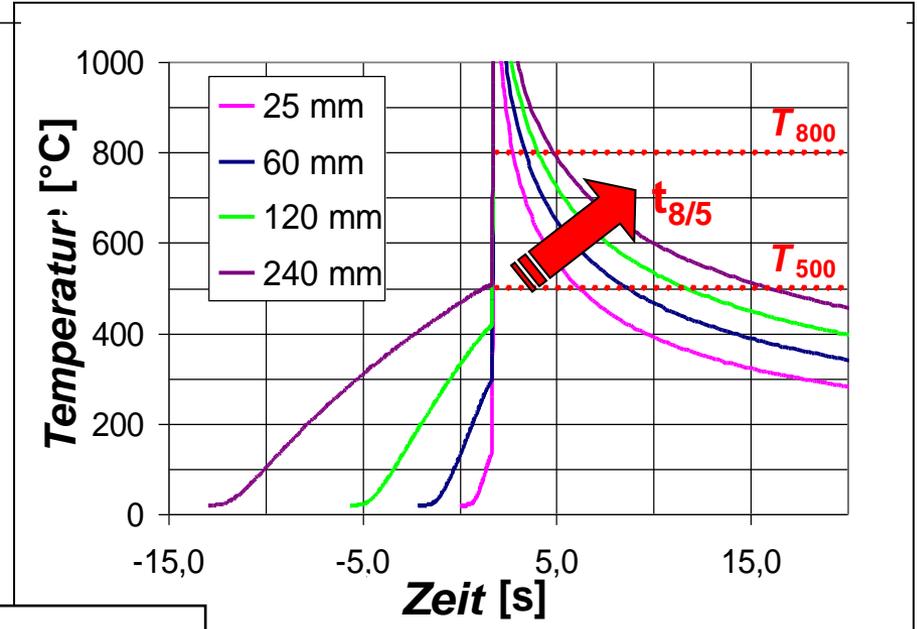
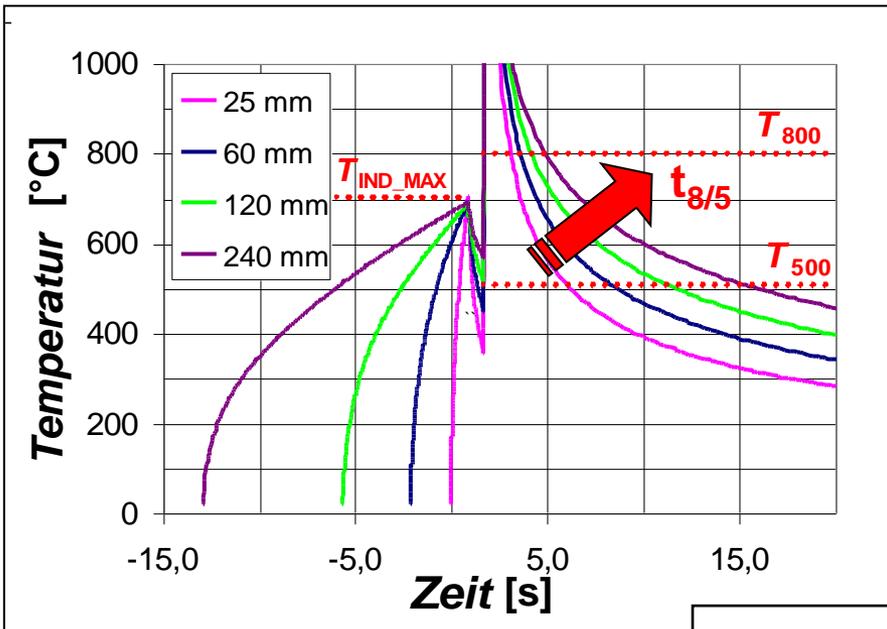
Verifikation anhand von Messdaten vorhandener Anlagen



Laserschweißen mit induktiver Vorerwärmung



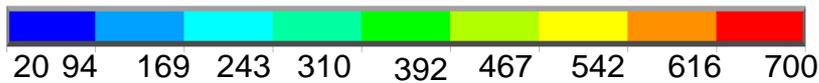
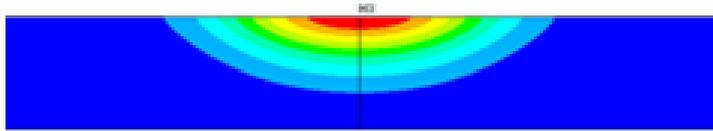
Optimierung der induktiven Erwärmung für Blechdicken von 3 mm bis 12 mm



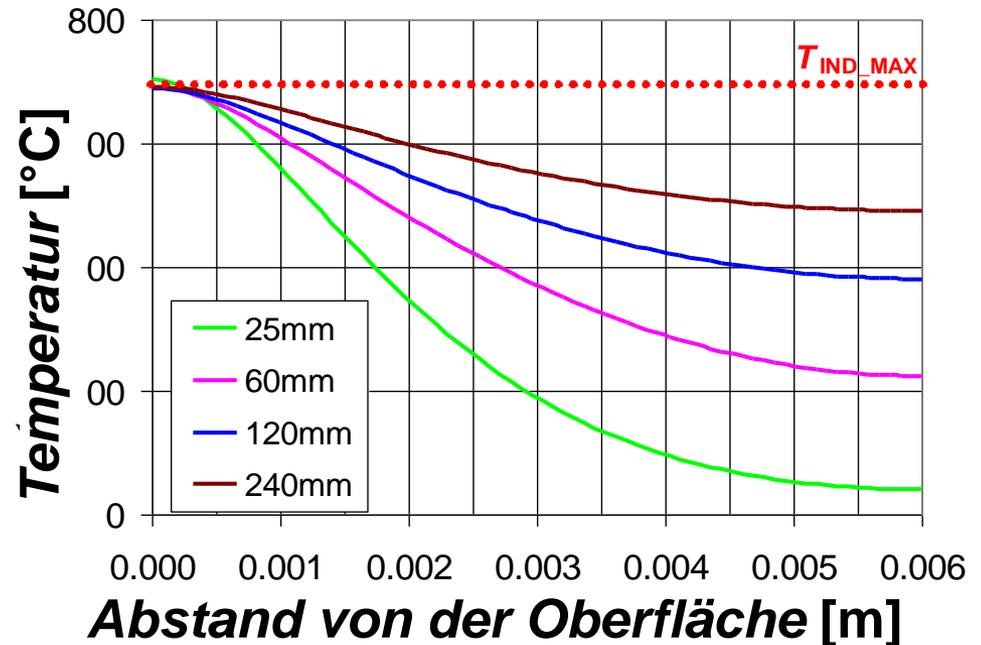
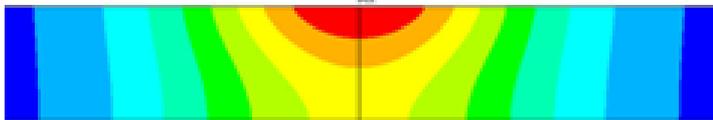
Einfluss der Induktorlänge auf die Abkühlraten (Vorerwärmung, Blechdicke von 6 mm, Prozessgeschwindigkeit 1 m/min)

Optimierung der induktiven Erwärmung für Blechdicken von 3 mm bis 12 mm

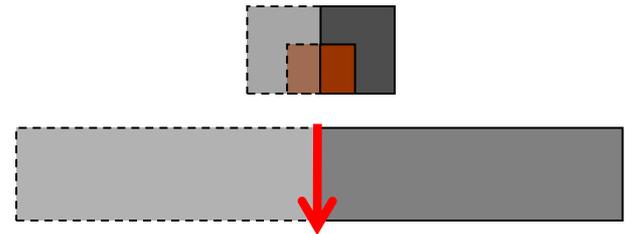
$t = 0.89 \text{ s} \sim l_{\text{IND}} = 25 \text{ mm}$ (1m/min)



$t = 13.8 \text{ s} \sim l_{\text{IND}} = 240 \text{ mm}$ (1m/min)



Laser-Schweißen mit integrierter Vorwärmung:
Einfluss der Induktorklänge



Optimierung der induktiven Erwärmung für Blechdicken von 3 mm bis 12 mm

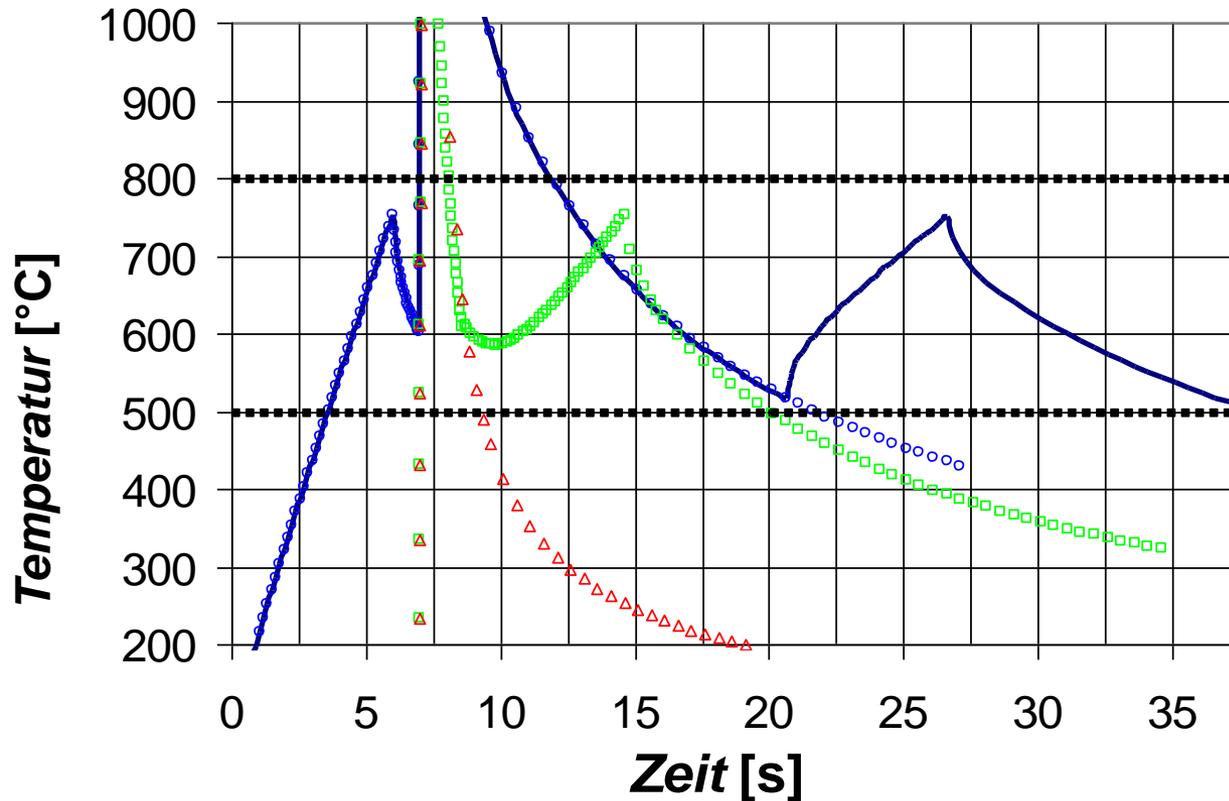
time $t_{8/5}$

2.3 s

12.1 s

9.8 s

26.3 s



- laser
- pre/post
- 6 mm sheets
- 1 m/min
- $T_{IND} = 750^{\circ}\text{C}$

laser

laser+post

laser+pre

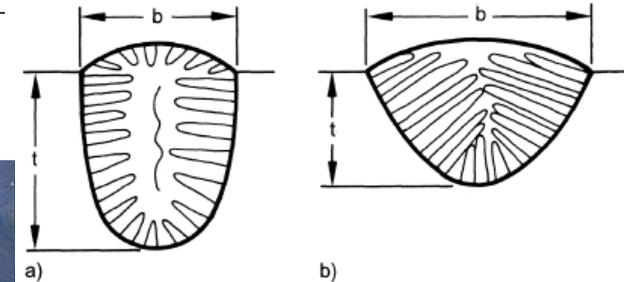
laser+pre/post



Dickwandige Stähle / Motivation

- Problem der Rissentstehung von Mittelrippendefekten bei Blechstärken $> 10\text{mm}$ ungelöst

- Anwendungsgebiete:
 - Rohrfertigung
 - Stahlbau, Brückenbau
 - Windenergieanlagen
 - Kraftwerksbau

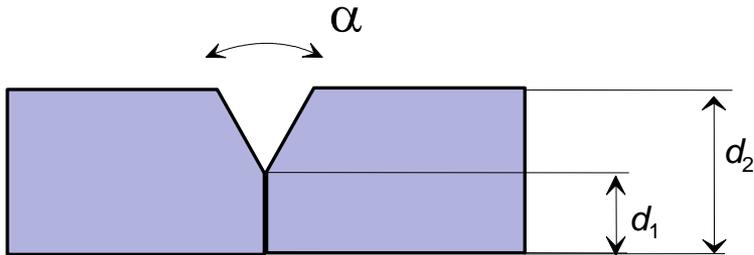


- Laser- bzw. Laser-Hybrid-Schweißverfahren für dickwandige Bleche bedingen
 - Mehrlagiges Schweißen oder
 - Aufwendige Y-Nahtvorbereitung
- Neues Verfahren erfordert lediglich kleine Flanke oder Plasmaschnitt als Kantenvorbereitung und kann die Produktivität erhöhen sowie gleichzeitig Defekte minimieren

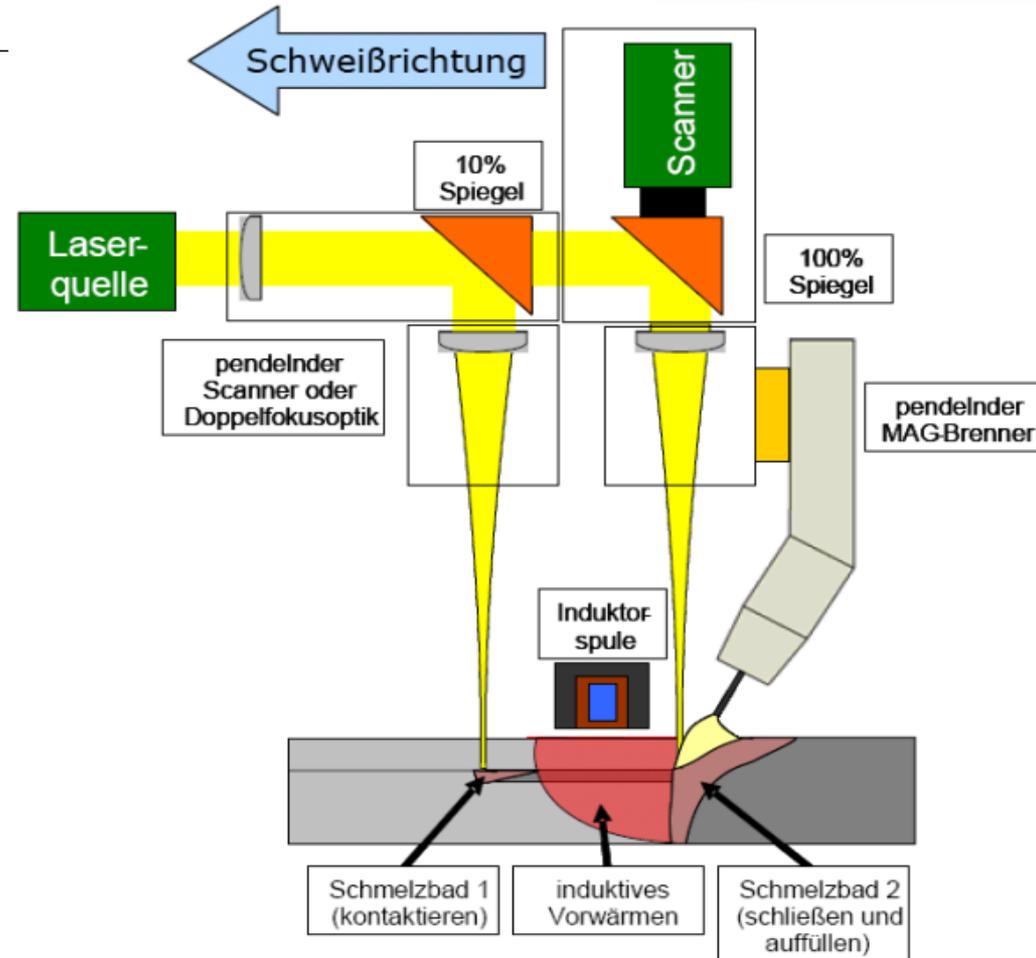


Lösungsansatz

- V- und Y-Nahtvorbereitung
- Quergestellter Induktor
- Laservorkontaktierungsprozess
- Blechdicke von 10 bis 23 mm
- $\alpha = 10^\circ$ bis 30°



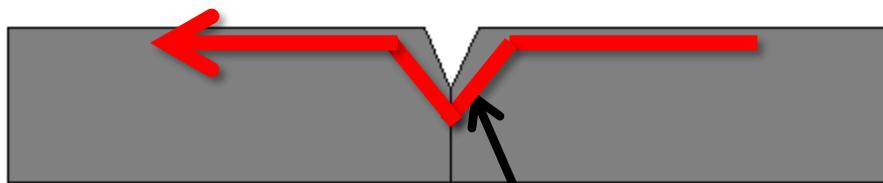
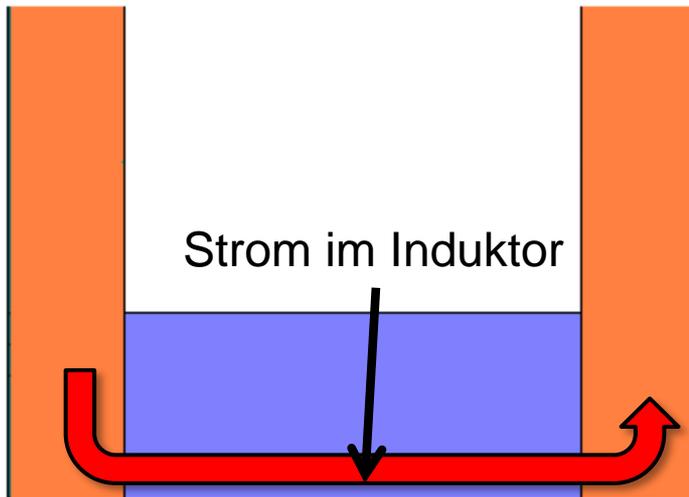
- Anpassung des Induktordesigns und der elektrischen Parameter für optimale Zwischenerwärmung



Einfluss der Vorkontaktierung

➤ Vorkontaktierung zur Herstellung einer elektrisch leitenden Verbindung

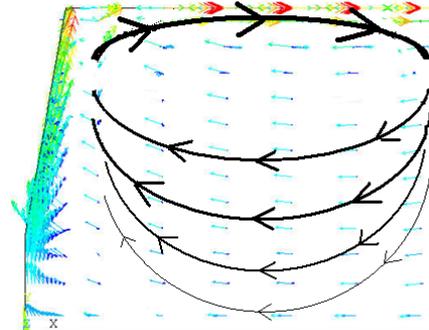
Prinzip



(Vorschubrichtung in die Bildebene hinein)

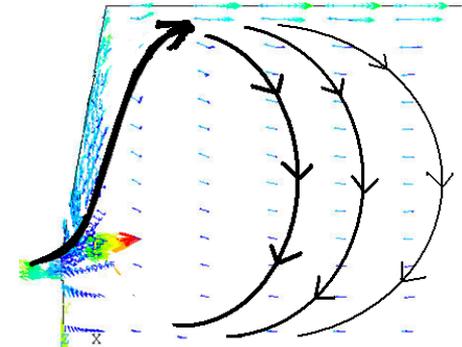
Ergebnisse einer elektromagnetischen Simulation

Ohne Vorkontaktierung



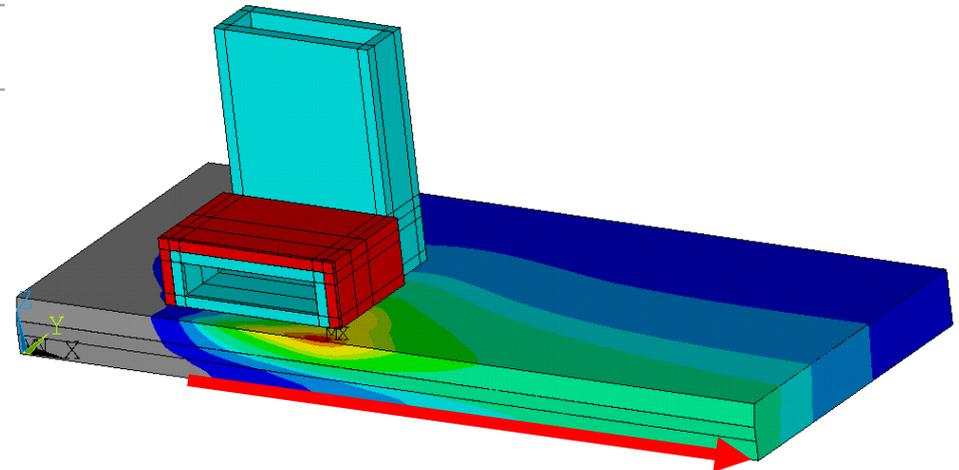
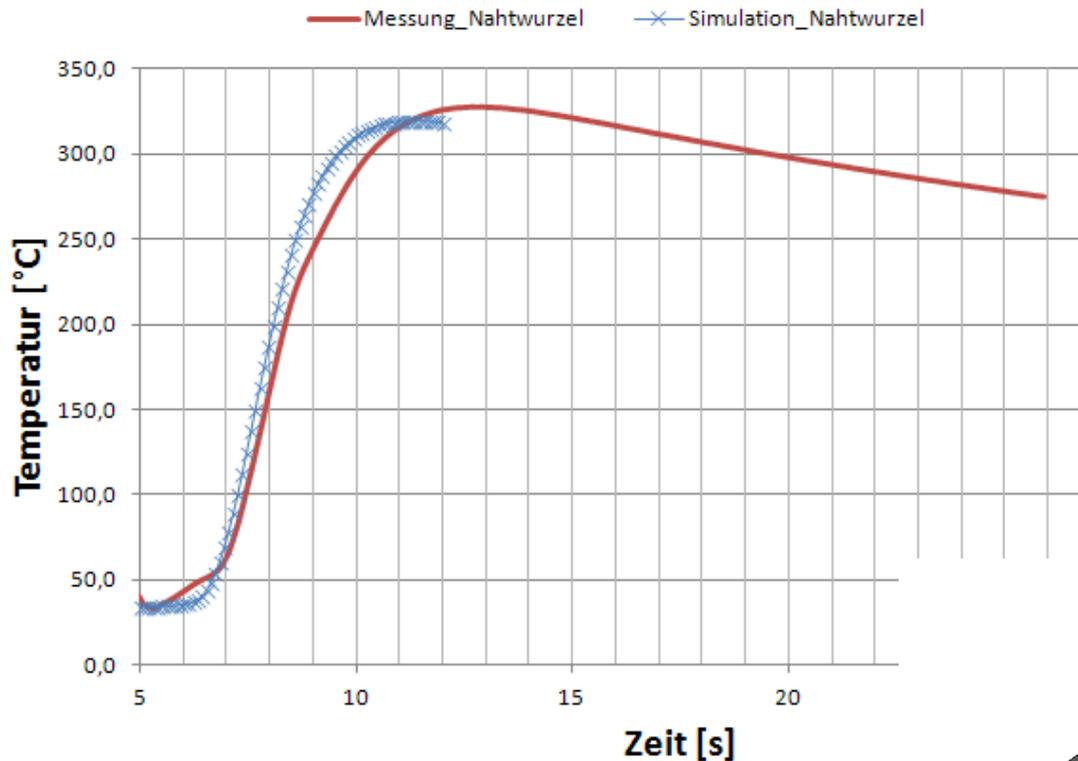
Höchste Stromdichte an der Oberseite des Blechs

Mit Vorkontaktierung



Höchste Stromdichte an der Kontaktstelle der beiden Bleche

Simulations- und Messergebnisse



- Messung bei 30 kW, 1,25 m/min mit einem Spaltwinkel von 20°
- Gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung

Induktion in Schweißprozessen

- Geeignete Energiequelle für gezielte Beeinflussung der Temperatur während des gesamten Prozesses
- Gute Integrierbarkeit von Induktoren in Laserbearbeitungsköpfe
- Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit und Verbesserung der Materialeigenschaften erreicht
- Simulationsmodelle für Design und Optimierung von solchen Induktionsanlagen für reale Bedingungen entwickelt
- Zeitliche und örtliche Beschreibung des thermischen Verhaltens während des gesamten Prozesses

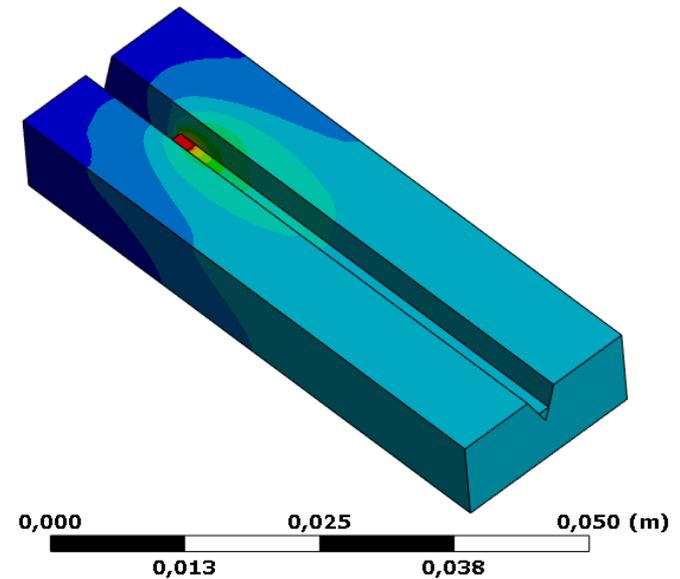
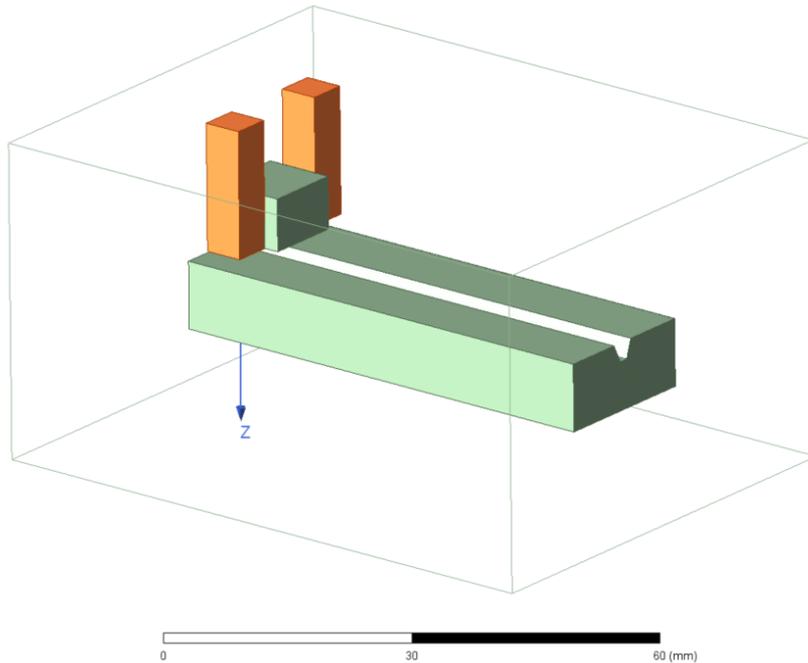
Vereinfachtes Simulationsmodell

A	
1	Maxwell 3D
2	Geometry ✓
3	Setup ✓
4	Solution ✓

Maxwell 3D Design

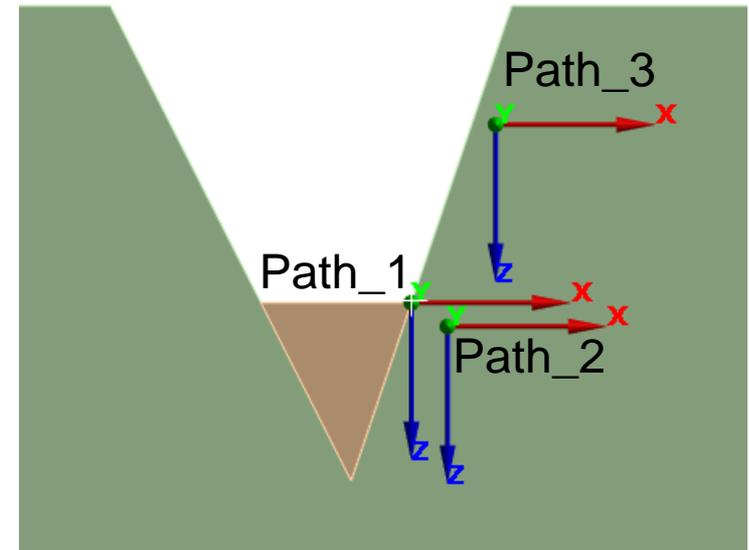
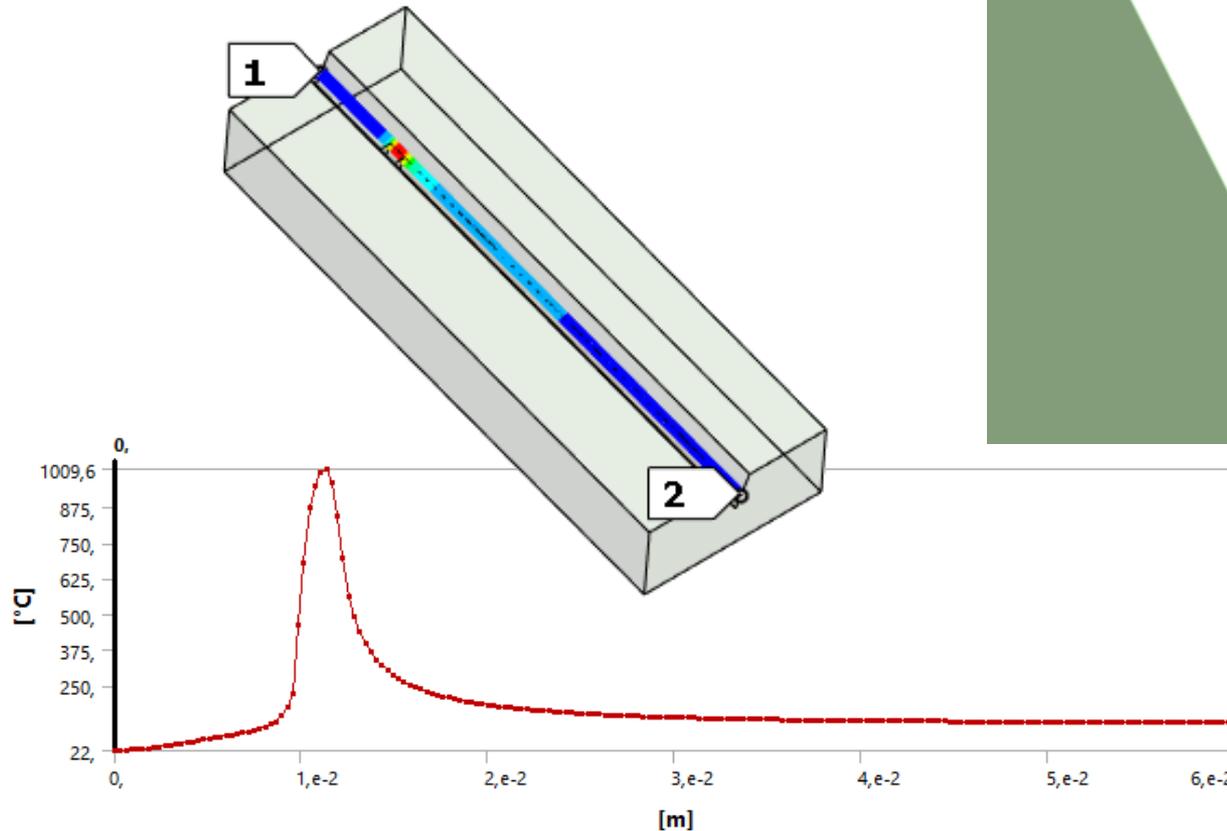
B	
1	Steady-State Thermal
2	Engineering Data ✓
3	Geometry ✓
4	Model ✓
5	Setup ✓
6	Solution ✓
7	Results ✓

Steady-State Thermal



Vereinfachtes Simulationsmodell

- Auswertelinien zur Ableitung der $t_{8/5}$ -Zeit (Abkühlzeit vom 800°C auf 500°C)



Hybridverfahren bei der Blechbehandlung

Motivation

- Erhöhung der Produktivität von Bänderwärmungsanlagen
- Verbesserung der Wärmeeinbringung bei hohen Temperaturen
- Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen
- Bessere Steuerbarkeit der Prozesse
- Innovative und effektive Kombination von Erwärmungsquellen



Prozessunterschiede

Indirekte Erwärmung

nur über Oberfläche
(Strahlung, Konvektion, Wärmeleitung)

- Kammer- und Tunnelofen (Gas, Öl, Strom)
- IR-Strahler (Strom)



- + Teilevariabel
- + einfaches Design
- + gut zum Temperaturhalten
- langsam
- große thermische Verluste
- Entstehung von Zunder

Direkte Erwärmung

berührungslos im Werkstück
(Joule'sche Wärme)

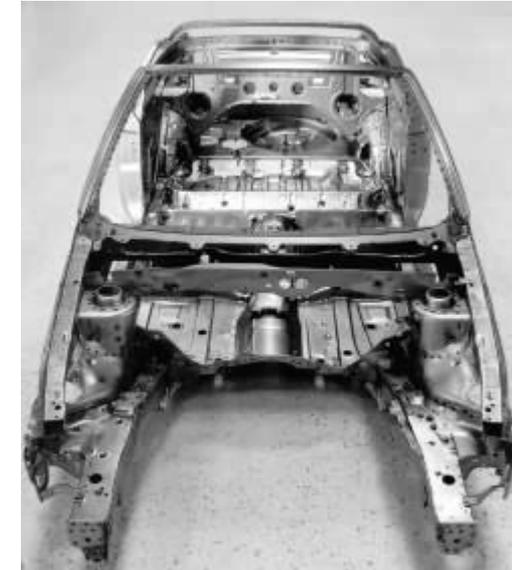
- induktive Längsfelderwärmer
- induktive Quersfelderwärmer



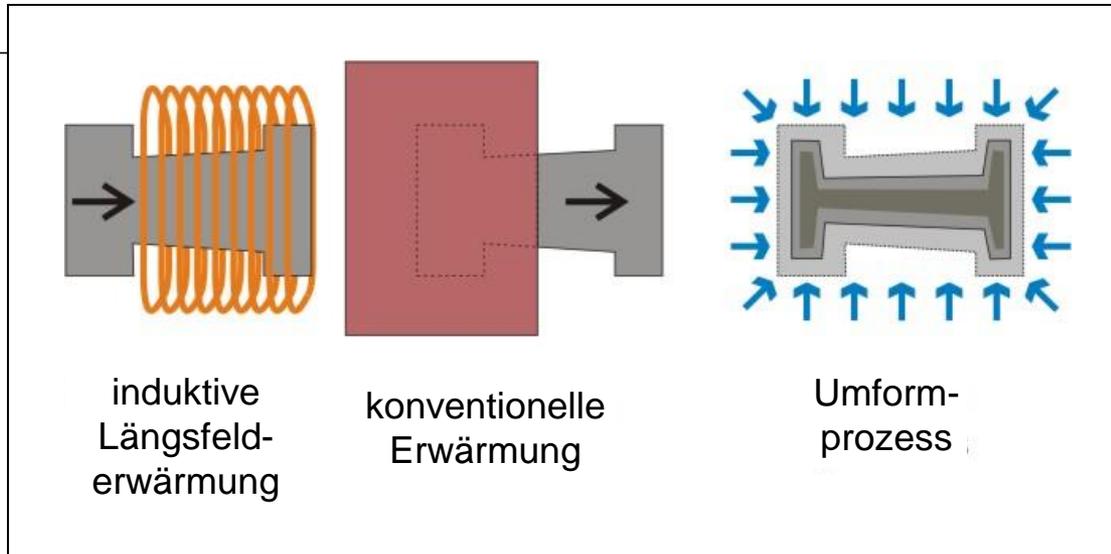
- + hohe Leistungsdichte
- + hoher Prozesswirkungsgrad
- + sehr gut zum schnellen Aufheizen
- + verminderte Zundergefahr
- unwirtschaftlich zum Temperaturhalten
- Werkstückabhängiges Design

Induktives Erwärmen zum Presshärten von hochfesten Stählen (HSS)

- hochfeste Stähle ermöglichen im Automobilbau eine maximale Gewichtsreduzierung bei bestem Crashverhalten
- leichte aber extrem steife Karosseriebauteile
- Der Presshärteprozess von HSS-Blechen vereint die Wärmebehandlung, das Umformen sowie die kontrollierte Abkühlung
- Induktive Erwärmungsmethoden in Kombination mit konventioneller Erwärmung
- ein intelligentes Design des induktiven Erwärmungsprozesses reduziert Über- und Unterhitzungen an den Rändern, Löchern und Kerben der Bleche



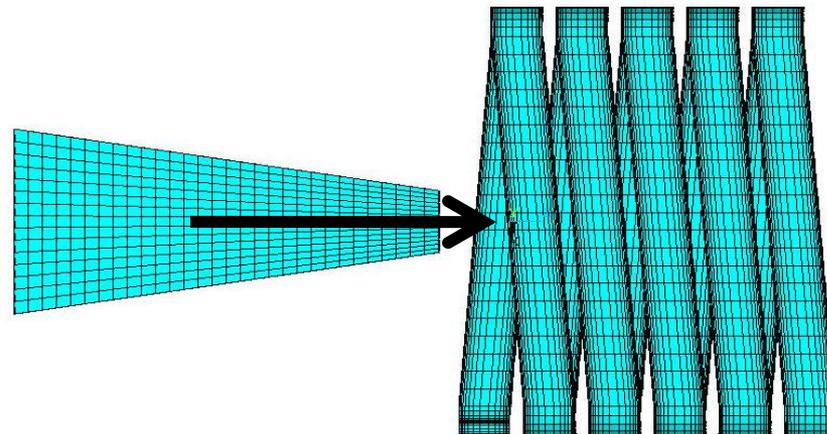
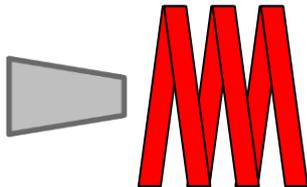
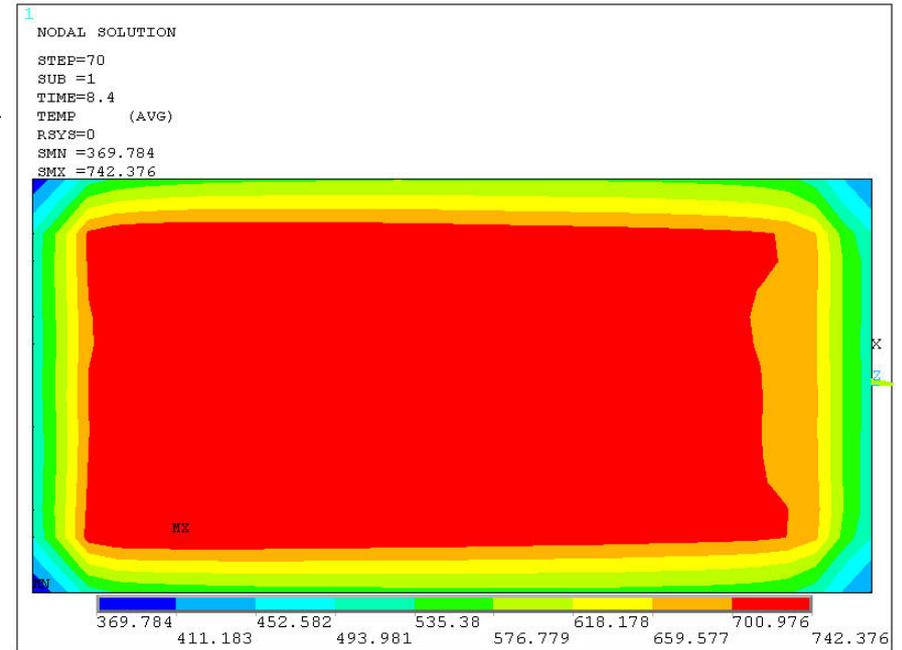
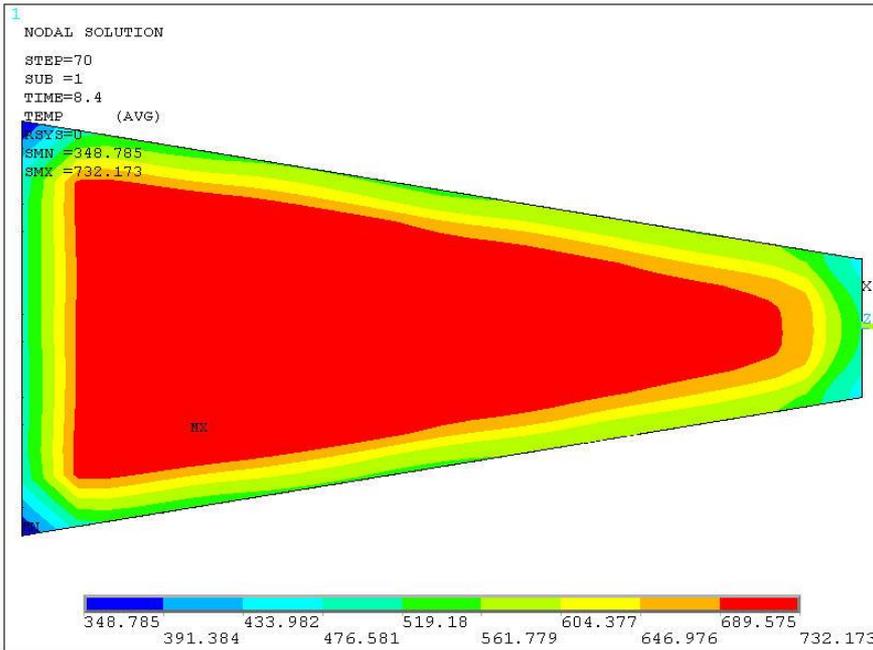
Kombination Induktions- und konventionelle Erwärmung



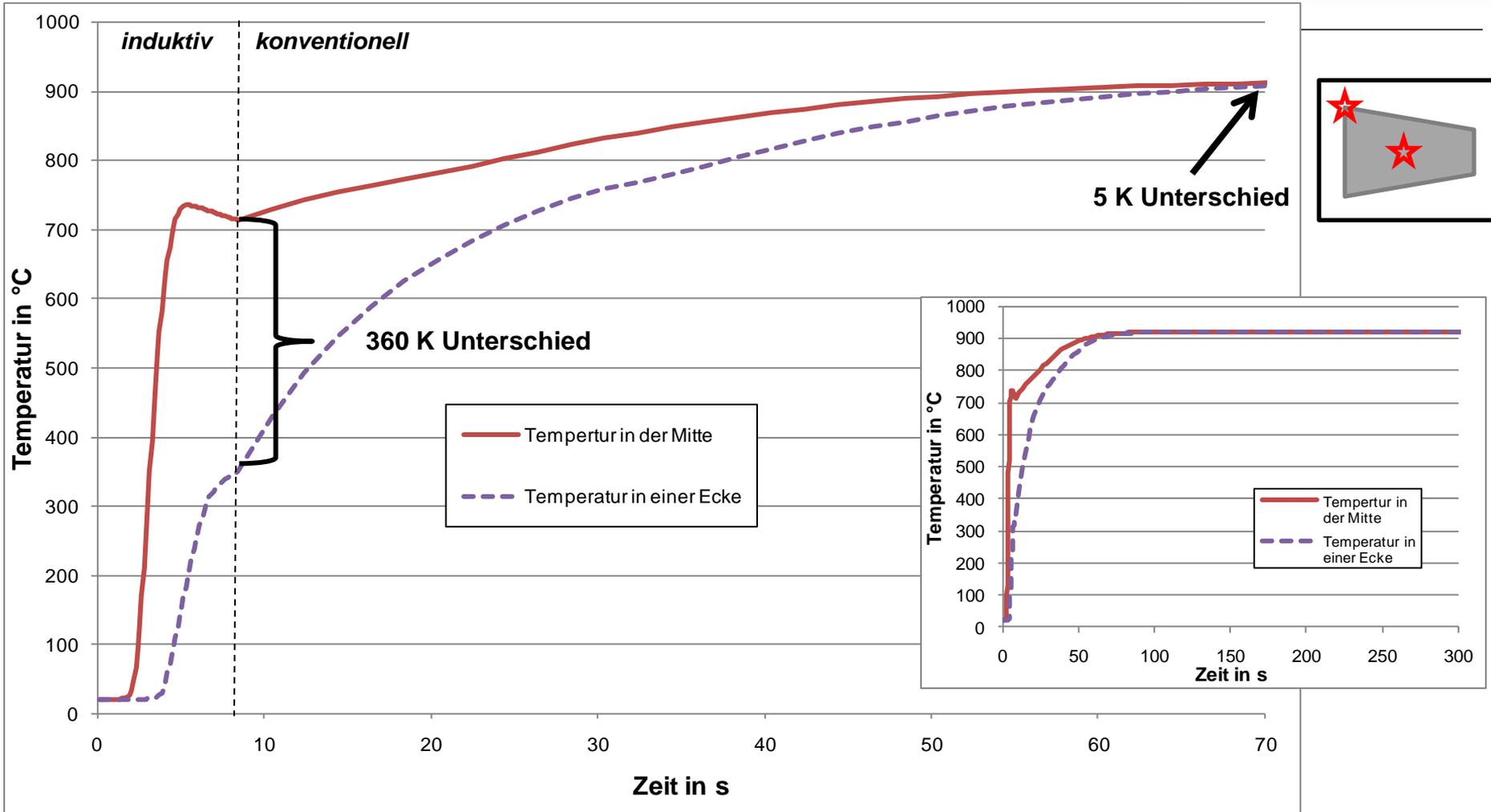
**Temperatur-
homogenität:** **exzellent**
Designaufwand: **gering**
Flexibilität: **Sehr hoch**

- Erwärmung von Blechteilen im Vorschub
- Induktive Längsfelderwärmung bis zur Curie-Temperatur
- Konventionelle Erwärmung für letzten Erwärmungsschritt und zum Halten der Temperatur
- Hohe Flexibilität
- einfache Auslegung

Erwärmungsbilder nach Induktion



Temperaturverhalten über die Zeit



Zusammenfassung

- direkte berührungslose Erwärmung zum Aufheizen
- große Leistungsdichten
- Erhöhung des Durchsatzes
- Reduzierung von Zunderbildung
- Temperaturhalten durch konventionelle Erwärmung
- Entwicklung neuer Produkte und Verfahren

