



Veröffentlichungen am IKFF



Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen - eine Übersicht

E. Burkard, W. Schinköthe

Vortragspräsentation
(ohne Thermokamerafilme) zur

**SKZ-Fachtagung
Spritzgießen von Elastomeren**

8. - 9. März 2006
Würzburg

© 2006 Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen – eine Übersicht

Eine Zusammenfassung der Arbeiten am IKFF

Dipl.-Ing. E. Burkard

Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF)



Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick

Gliederung



- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick

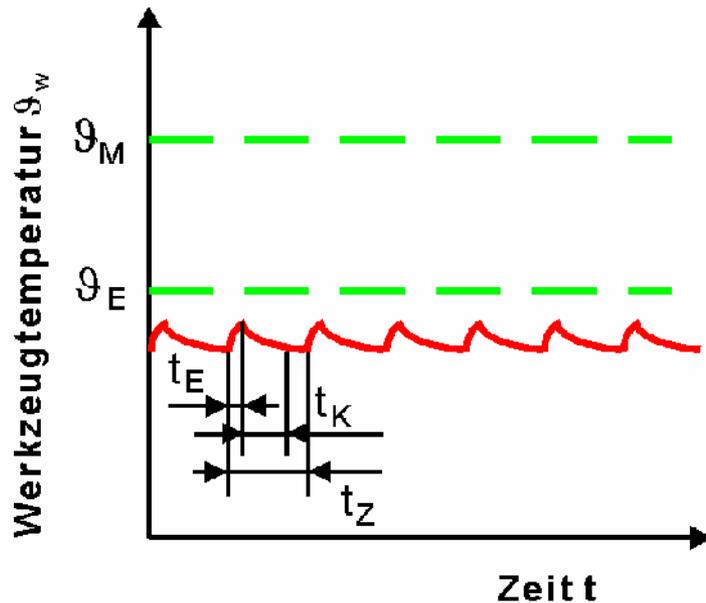
Werkzeugtemperierung beim Spritzgießen von thermoplastischen Formmassen

- Eine konstante Werkzeugtemperatur ist nahezu immer ein Kompromiss zwischen optimaler Formfüllung und schneller Abkühlung eines Teiles.
- Eine optimale Temperierung setzt also eine variotherme Prozessführung voraus, die ausreichend schnell ist, um gleiche Produktivität zu sichern.

Motivation beim Übergang von Standard- zum Mikrospritzguss

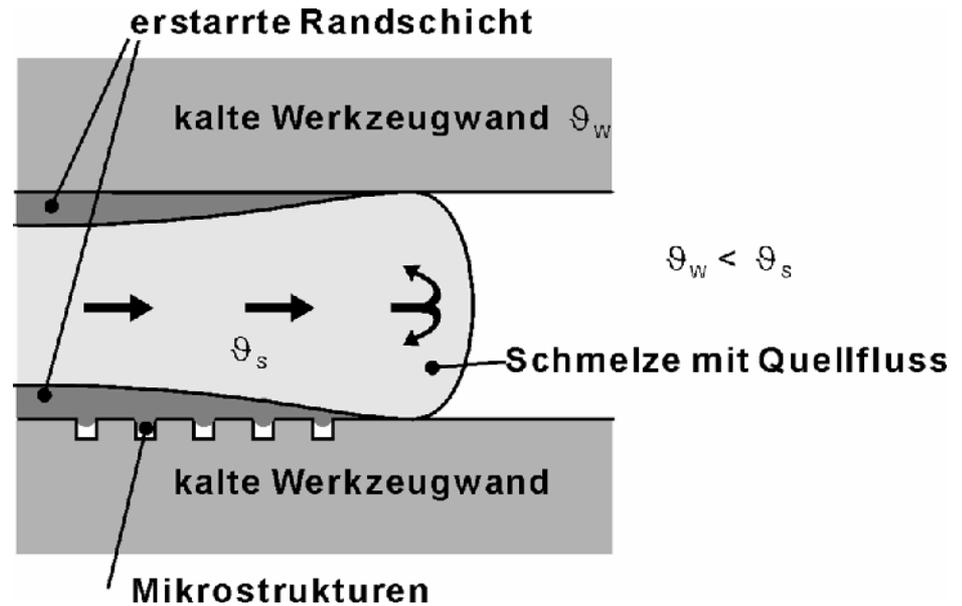
	Standard-Spritzguss	Mikro-Spritzguss
Formteilmaße	mm - m	mm - cm
Strukturmaße	min: 100 μ m	100 μ m - 1 μ m
Einsatzherstellung	Fräsen, Polieren, Elektroerosion	Galvanoformung, mechanische Feinstbearbeitung
Oberfläche	> 1 μ m	< 100 nm
Prozessführung optimiert auf	kleine Zykluszeit, geringer Materialverbrauch	Abformtreue durch variothermen Prozess und Nachdruck

Randschichterstarrung bei isothermer Werkzeugtemperierung



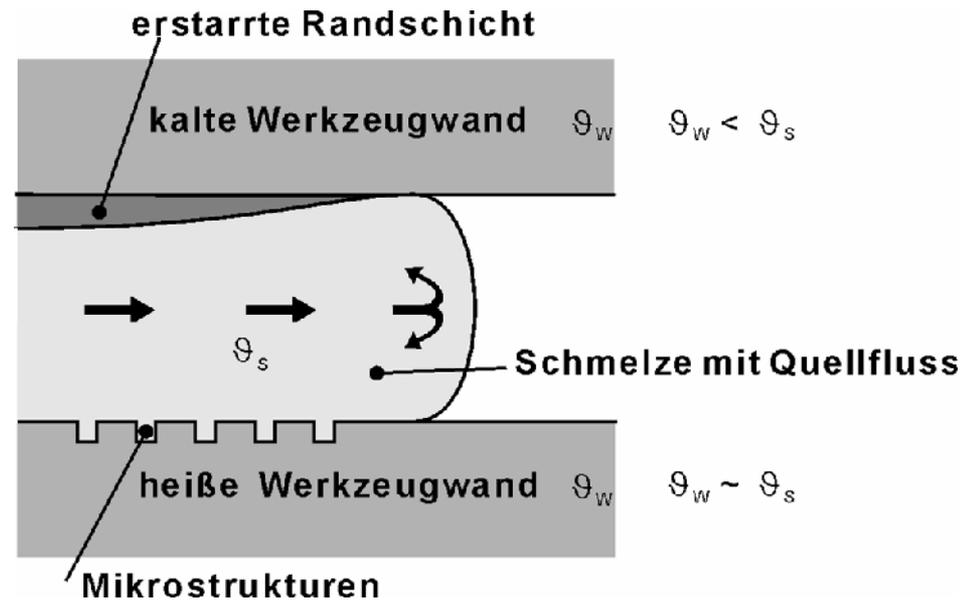
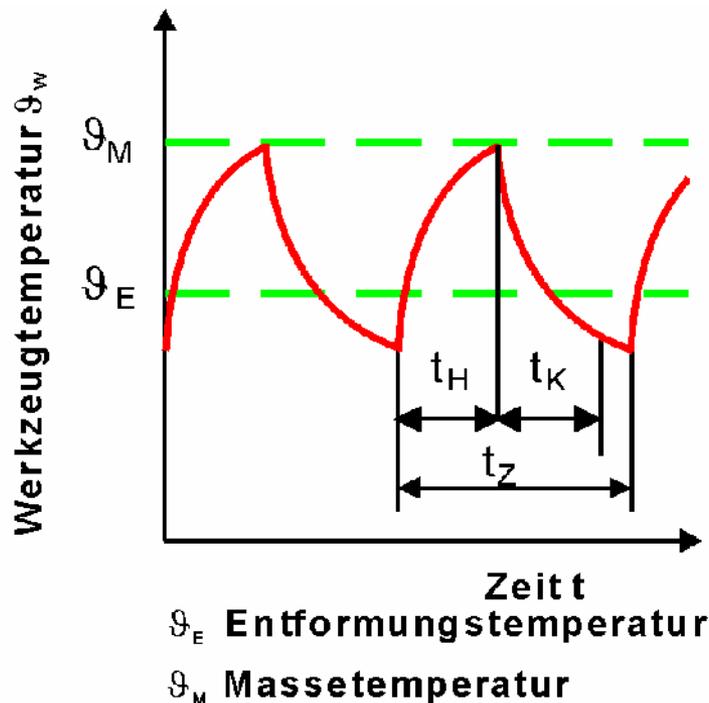
ϑ_E Entformungstemperatur

ϑ_M Massetemperatur



Quelle: Diss. Walther

Variotherme Werkzeugtemperierung (hier einseitig)



Quelle: Diss. Walther

Gliederung

1 Motivation



2 Einführung in die variotherme Prozessführung

3 Prinzip der induktiven Beheizung

4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung

- mit externem Induktor
- mit halb-internem Induktor
- mit voll integriertem Induktor

5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete

6 Zusammenfassung, Ausblick

Variotherme Werkzeugtemperierung

Variothermprinzip

Problematik

- unvollständige Füllung der Kavität bei hohen Aspektverhältnissen und isothermer Werkzeugtemperierung
- zusätzlich auch störende Bindenähte insbesondere bei Mikrostrukturen

Variotherme Werkzeugtemperierung

- Erhöhung der Werkzeugtemperatur zum Einspritzzeitpunkt möglichst bis auf das Niveau der Schmelztemperatur

Realisierung

- Erwärmung der Kavität durch einen zweiten Ölkreislauf oder
- Elektrische Beheizung der Kavität oder
- Induktive Erwärmung der Kavität

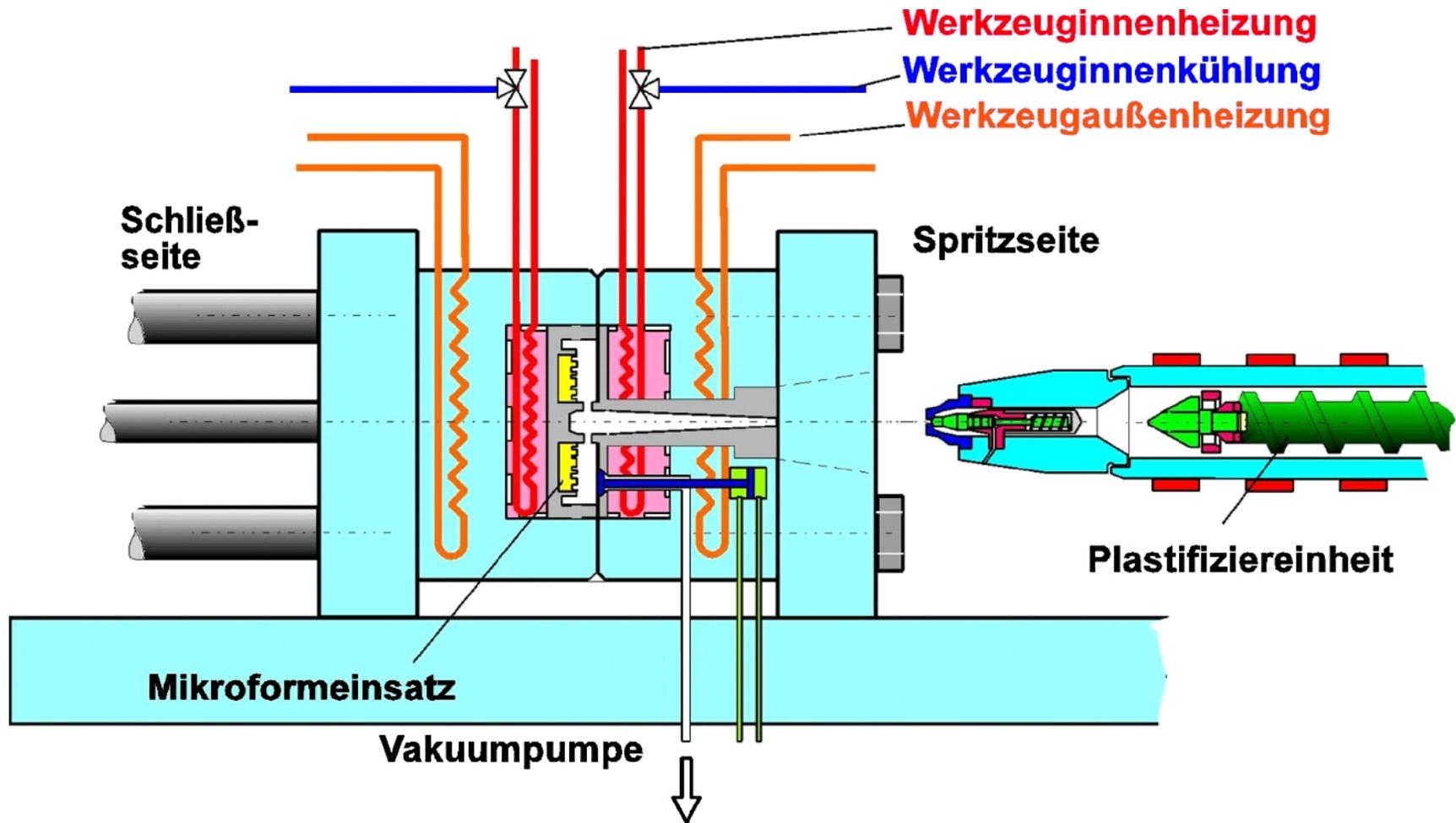
Wie kann variotherm temperiert werden?

- zwei Flüssigkeitskreisläufe
- widerstandselektrische Heizung und Flüssigkeitskühlung
- Sonderverfahren
- induktive Heizung und Flüssigkeitskühlung

Öl-variotherme Temperierung

- zwei Temperiergeräte wechselweise am gleichen Kreislauf zur Heizung und Kühlung
- Temperaturwechsel langsam, große Werkzeugbereiche werden geheizt/gekühlt

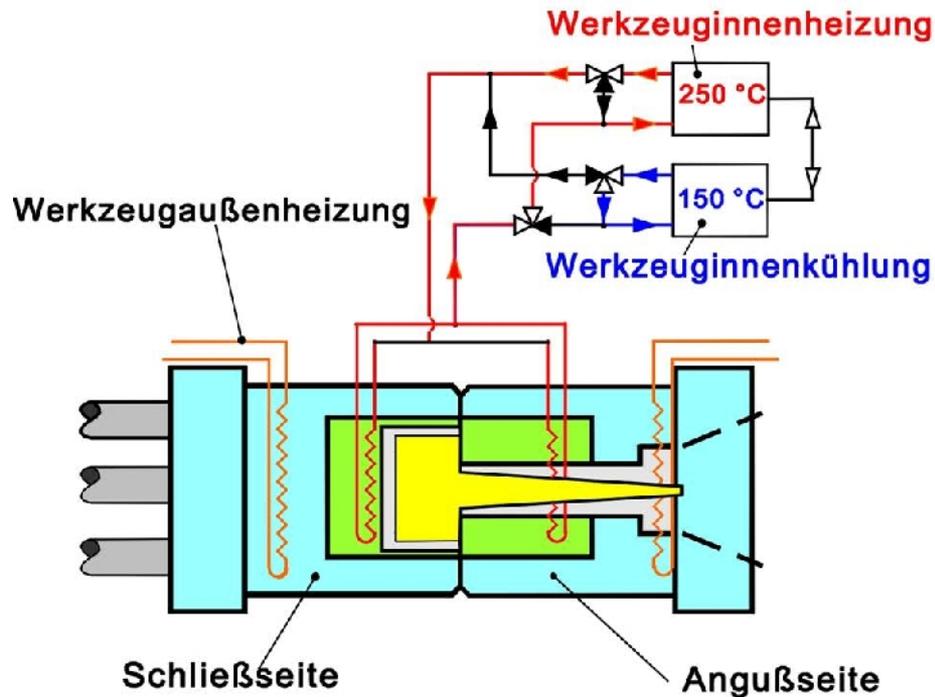
Öl-variotherme Werkzeugtemperierung



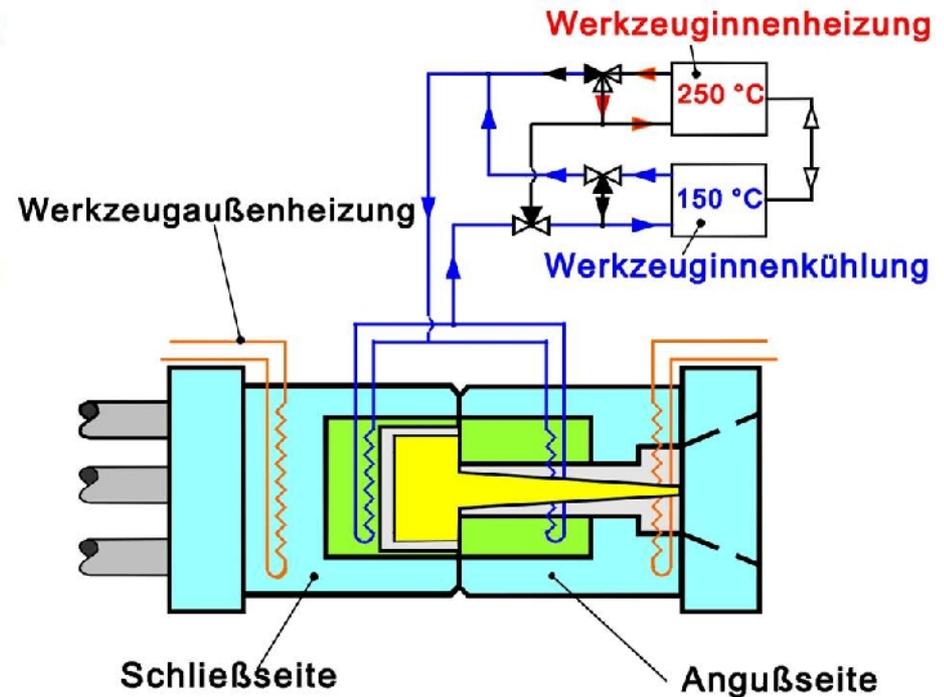
Quelle: IKFF/IMM Mainz

Öl-variotherme Werkzeugtemperierung

Aufheizphase (Phase1)



Abkühlphase (Phase2)



Quelle: IKFF/IMM

Widerstandselektrische Beheizung mit Flüssigkeitskühlung

- Vor allem bei niedrigen Temperaturen ist eine schnelle Aufheizung durch kavitätstnah platzierte Heizelemente möglich.
- Die Kühlung muss räumlich getrennt erfolgen.

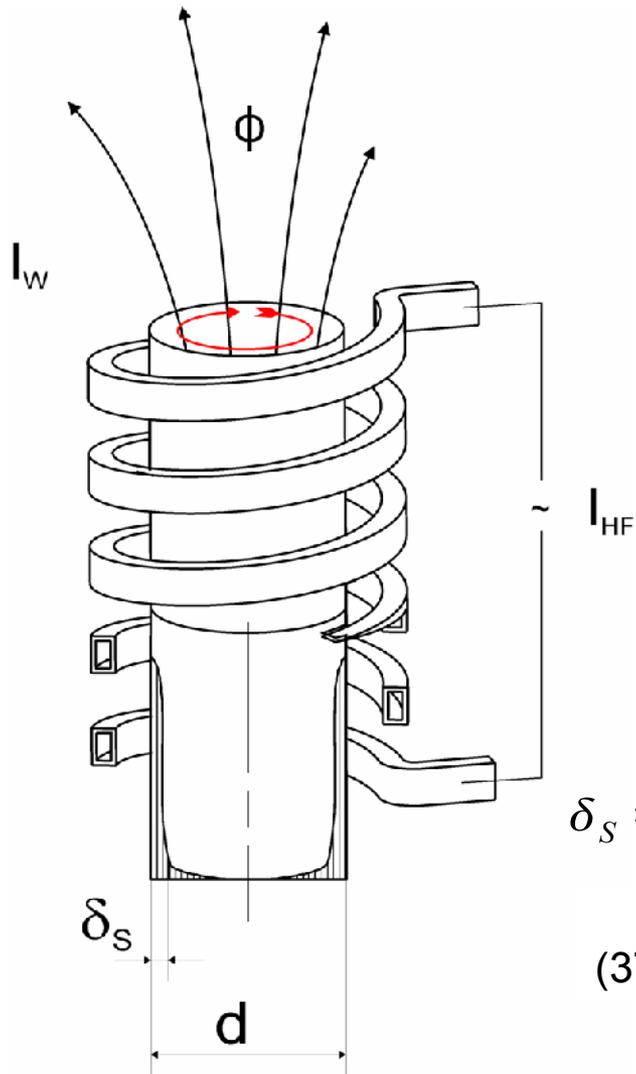
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
-  3 **Prinzip der induktiven Beheizung**
- 4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick

Prinzip der induktiven Wärmeerzeugung

- Transformatorprinzip
- Erzeugung hoher Stromdichten in einer dünnen Oberflächenschicht („Skintiefe“)
- Die Wärme entsteht direkt im Material, berührungslos und mit hohem Wirkungsgrad auch bei hohen Temperaturen.

Prinzip der Induktionserwärmung



Prinzip

- Hochfrequentes Wechselfeld durch Wechselstrom
- Induktion eines Wirbelstroms im Werkstück
- Stromverdrängung an die Randschicht durch Selbstinduktion

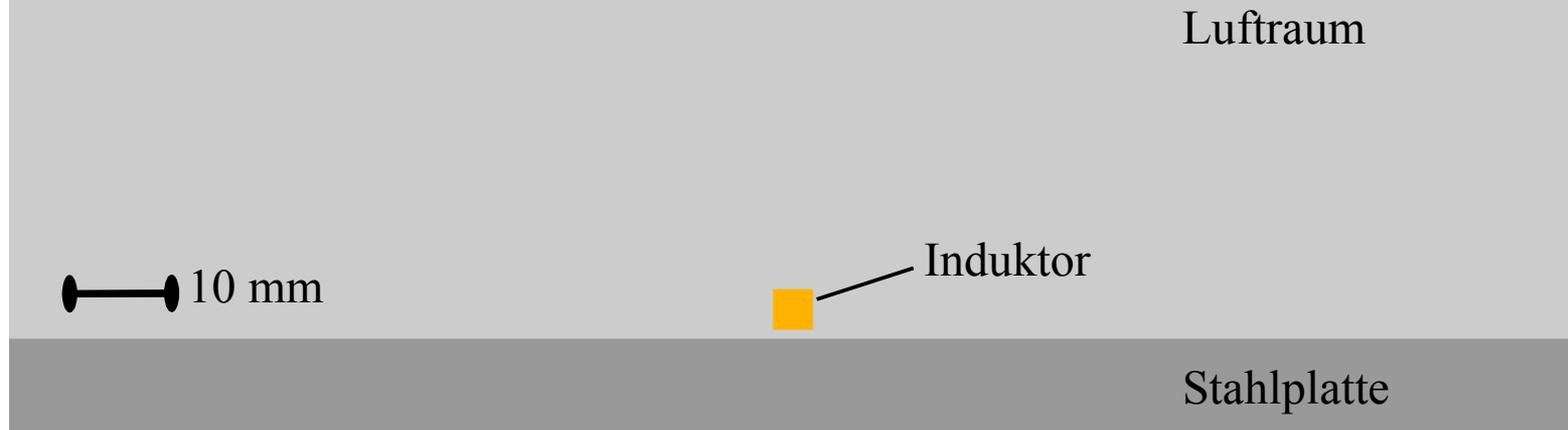
Vorteile

- Hohe erreichbare Wärmeübertragungsraten
- direkte Erwärmung der Kavität möglich
- keine heiße Öl- oder Wasserkreisläufe

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \kappa \cdot \mu}}$$

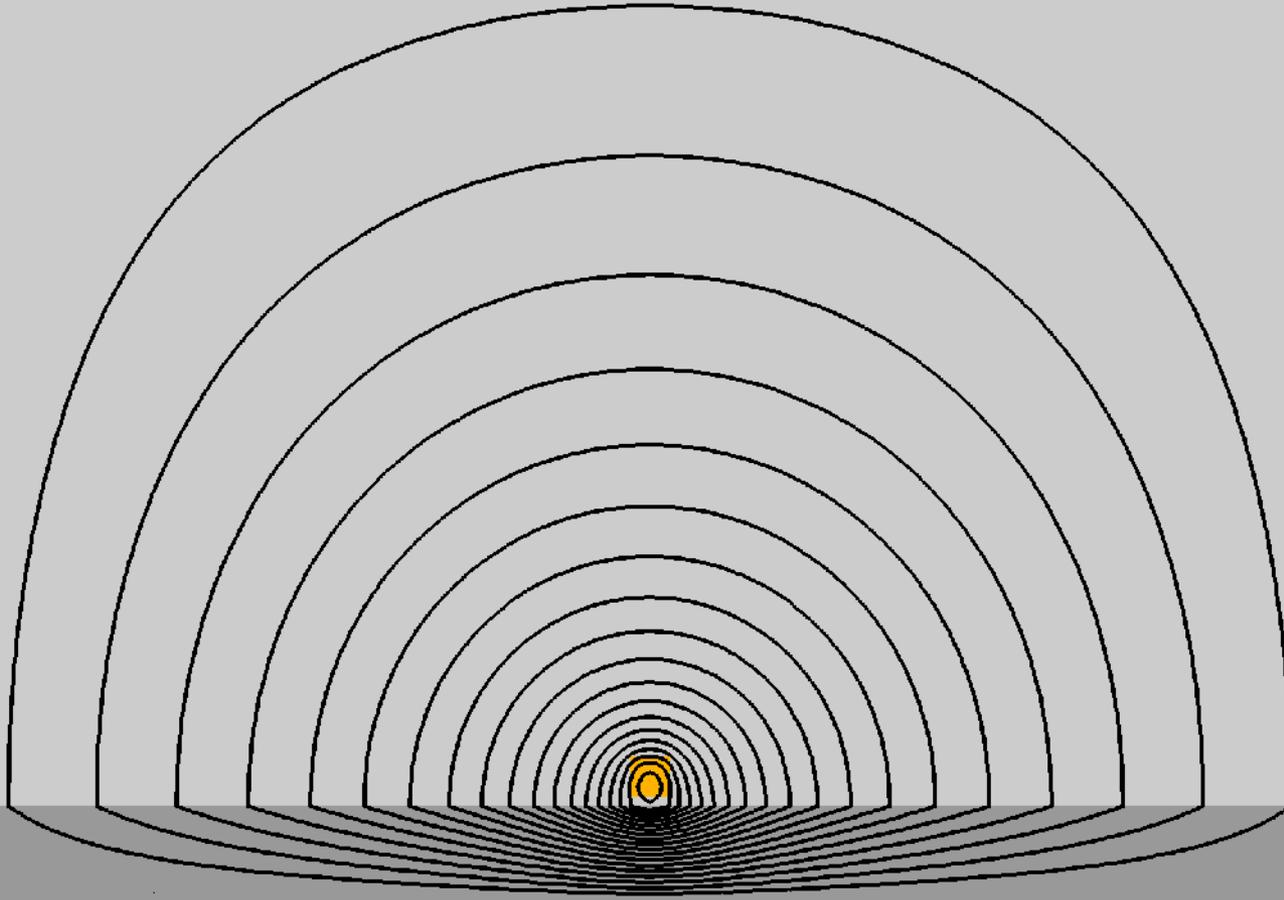
Skintiefe
(37%-Abfall von S)

Querschnittsmodell der induktiven Wärmeerzeugung (FEM-Simulation)



Quelle: A. Weber

Magnetfeld im Modell bei Gleichstrom



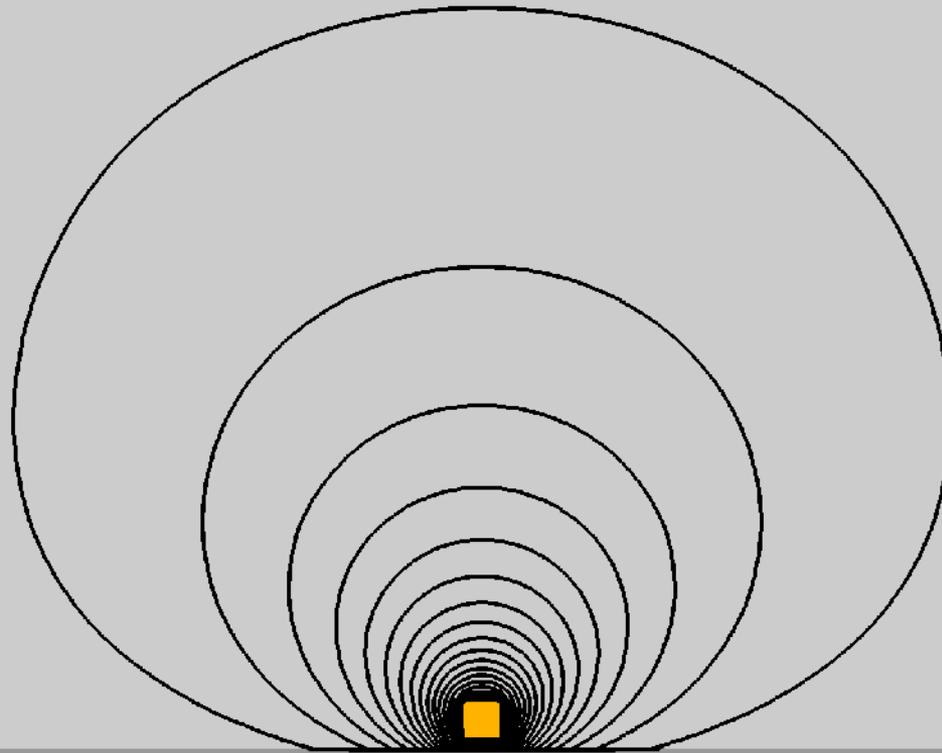
Quelle: A. Weber



Institut für Konstruktion und Fertigung
in der Feinwerktechnik
Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe

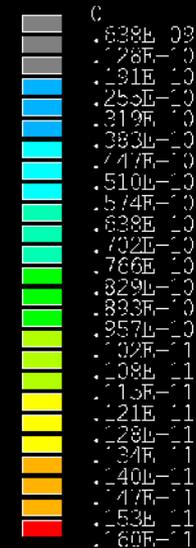
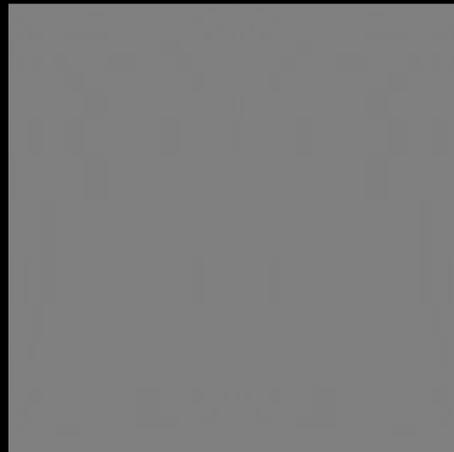
Induktive Beheizung von Spritzgießwerkzeugen – eine Übersicht

Magnetfeld im Modell bei 250 kHz



Quelle: A. Weber

Wärme-Erzeugung durch ohmsche Verluste



Quelle: A. Weber

Skintiefe δ_s

Die Stromdichte hochfrequenter Ströme fällt exponentiell mit dem Abstand von der Oberfläche des Leiters ab, in der Tiefe δ_s auf $1/e$ der Oberflächenstromdichte.

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \kappa \cdot \mu}}$$

Frequenz f

elektrische Leitfähigkeit κ

magnetische Permeabilität μ

Skintiefe

Die Skintiefe variiert mit den Materialeigenschaften, zum Beispiel ergeben sich bei 250 kHz und Raumtemperatur

- für Stahl: $\delta_s \approx 34 \mu\text{m}$
- für Kupfer: $\delta_s \approx 160 \mu\text{m}$
- für Aluminium: $\delta_s \approx 200 \mu\text{m}$

Vergleich von Temperiersystemen

	Fluidisches System (Öl oder Wasser)	Elektrische Widerstandsheizung	Induktionsheizung
Temperier- prinzip	Wärmeübertragung durch Konvektion zwischen Fluid und Werkzeug, Wärmeleitung in den Werkzeugplatten.	Wärmeerzeugung in einem elektrischen Heizkörper, Wärmeleitung vom Heizkörper zum Formeinsatz.	Wärmegenerierung durch elektromagnetische Wechselfelder und Wirbelstromverluste im Formeinsatz.
Geräte	1 Temperiergerät Heiß 1 Temperiergerät Kalt 1 Temperiergerät für Rahmentemperierung, elektronisch geregelter Ventilblock, Steuerung für Spritzgießvorgang.	1 Temperiergerät für Grundtemperierung, Heizkörper (Heizpatrone, flexibler Leiter, Folie), elektronisches Regelgerät, Steuerung für Spritzgießvorgang.	1 Temperiergerät für Grundtemperierung, Generator, Induktor, Zuleitungen, mechanisches Handling oder Getriebe, Steuerung mit Maschine möglich.
Anforderungen an den Werkzeugbau	Aufwendiger Formenbau durch Temperierbohrungen in den Formplatten.	Integration der Heizkörper in die Formplatten, Zusatzkühlung erforderlich.	i. Allg. keine Integration ins Werkzeug, externer Induktor, Zusatzkühlung.
Flexibilität bei variierenden Formeinsatz- geometrien	Keine Anpassung an verschiedene Geometrien möglich, kompletter Austausch der Werkzeugplatten.	Wechsel des gesamten Heizsystems, teilweise Modifikation am Werkzeug notwendig.	Anpassung der Induktorgeometrie, einfacher und schneller Austausch bei externem Induktor.
Zykluszeiten	ca. 180 - 300 (600) s	ca. 60 s	ca. 20-25 (45) s

Gliederung

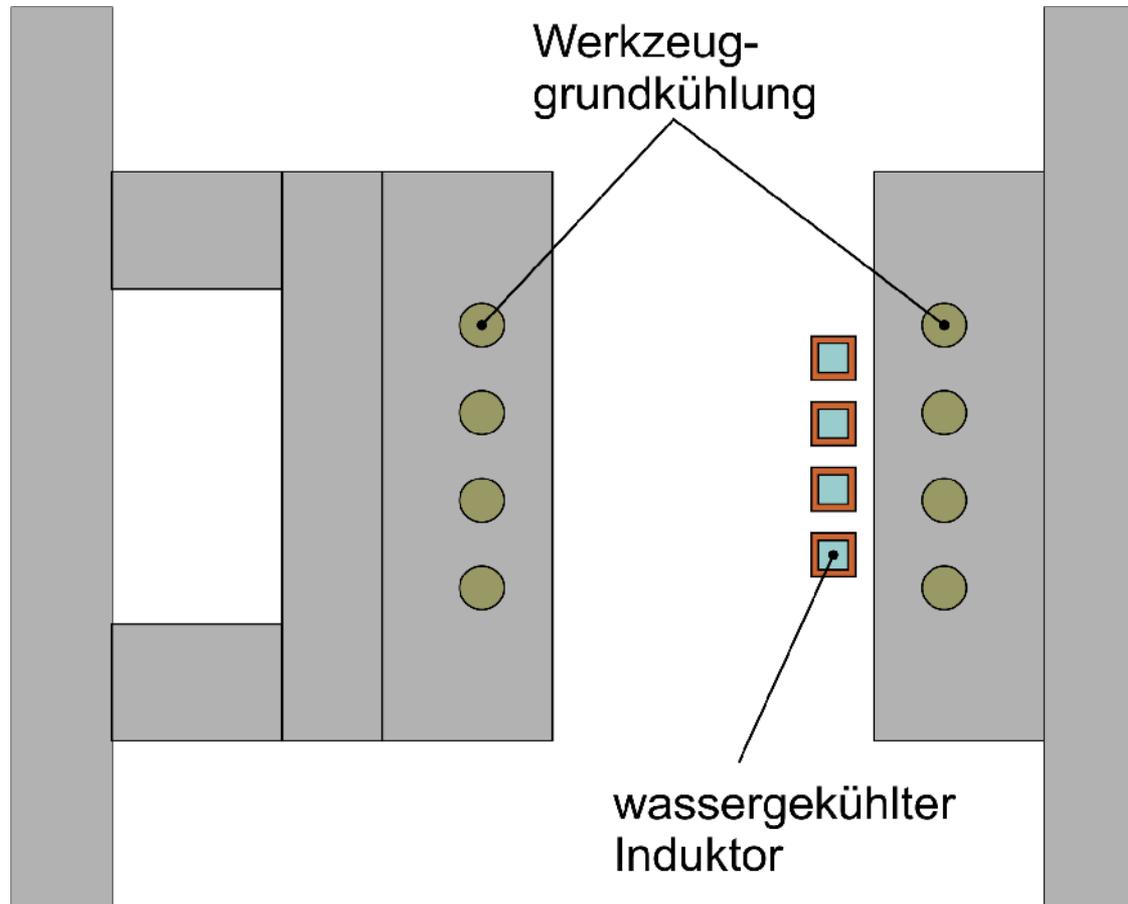
- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 **Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung**
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick



Varianten der induktiven Erwärmung von Werkzeugen

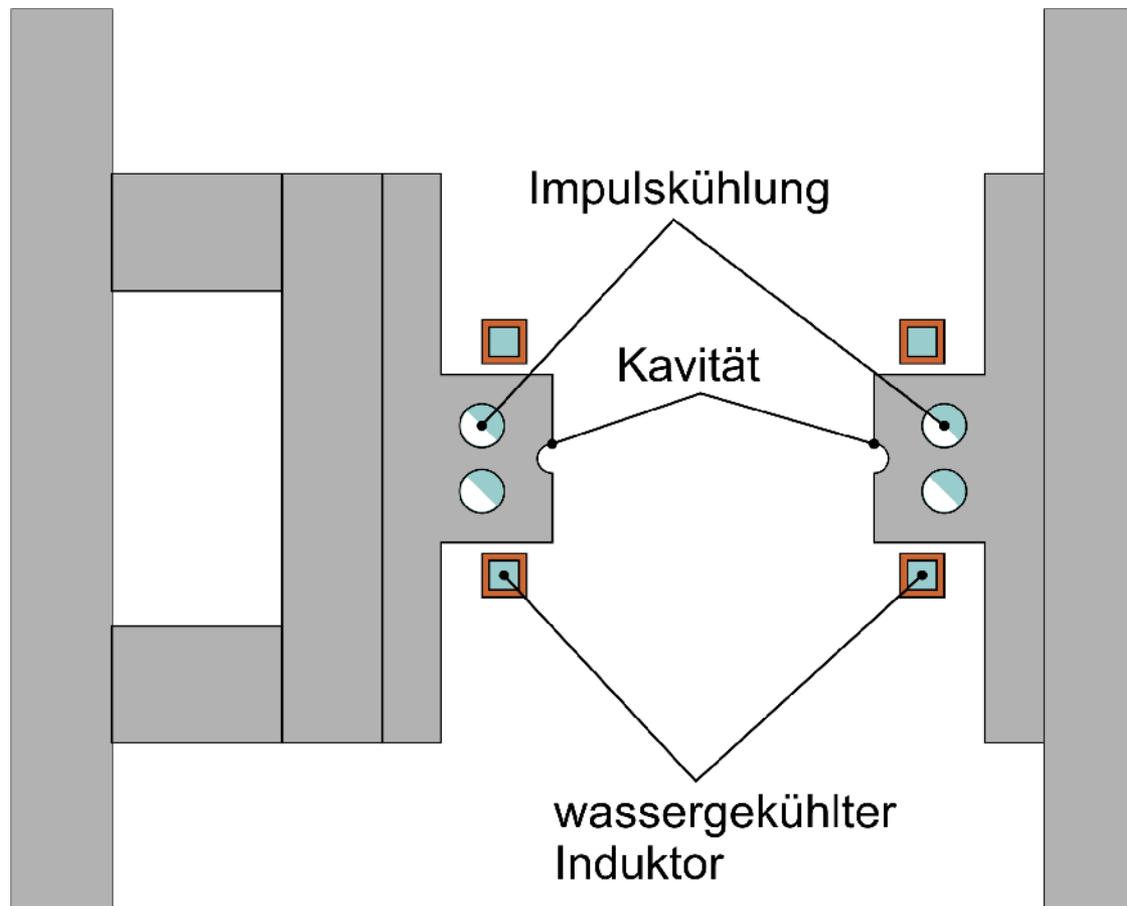
- extern, Abkühlung in den grundtemperierten Werkzeugrahmen
- halb-intern mit Impulskühlung der Form
- vollständig integriert mit Impulskühlung

externe induktive Erwärmung



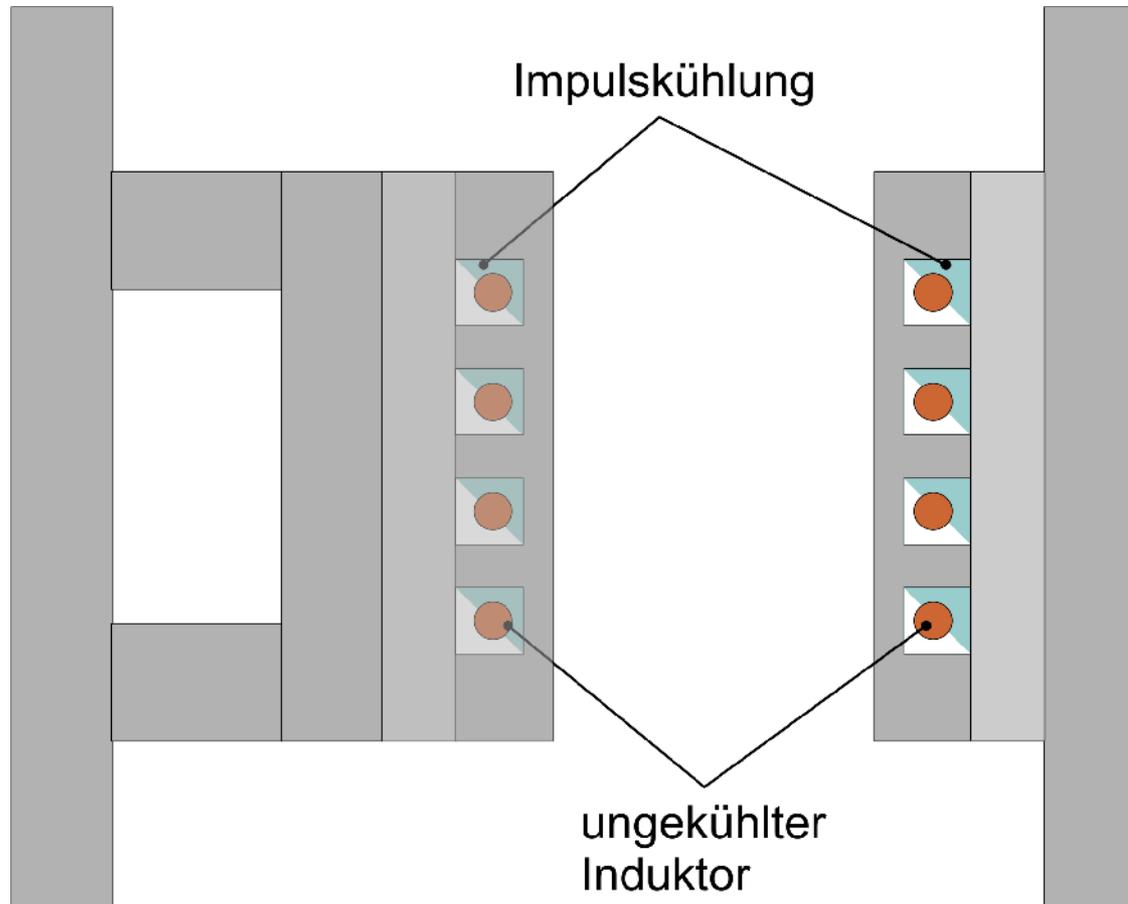
Quelle: A. Weber

halb-interne induktive Erwärmung



Quelle: A. Weber

vollintegrierte induktive Erwärmung



Quelle: A. Weber

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 **Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung**
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick



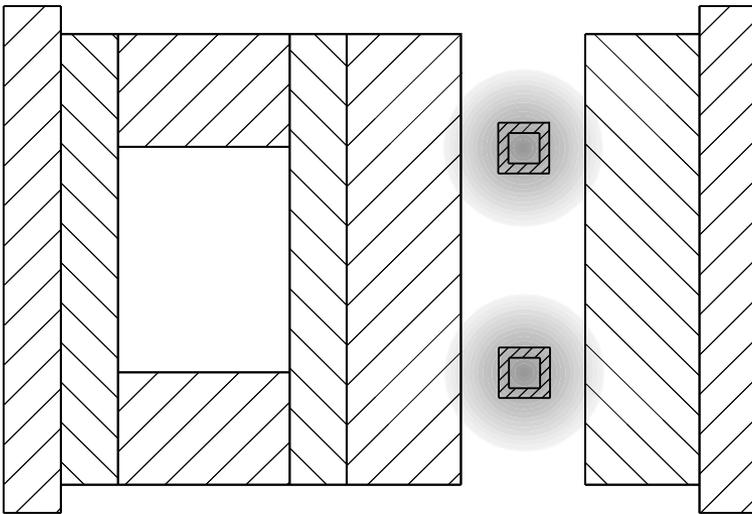
Externer Induktor

Vorteile

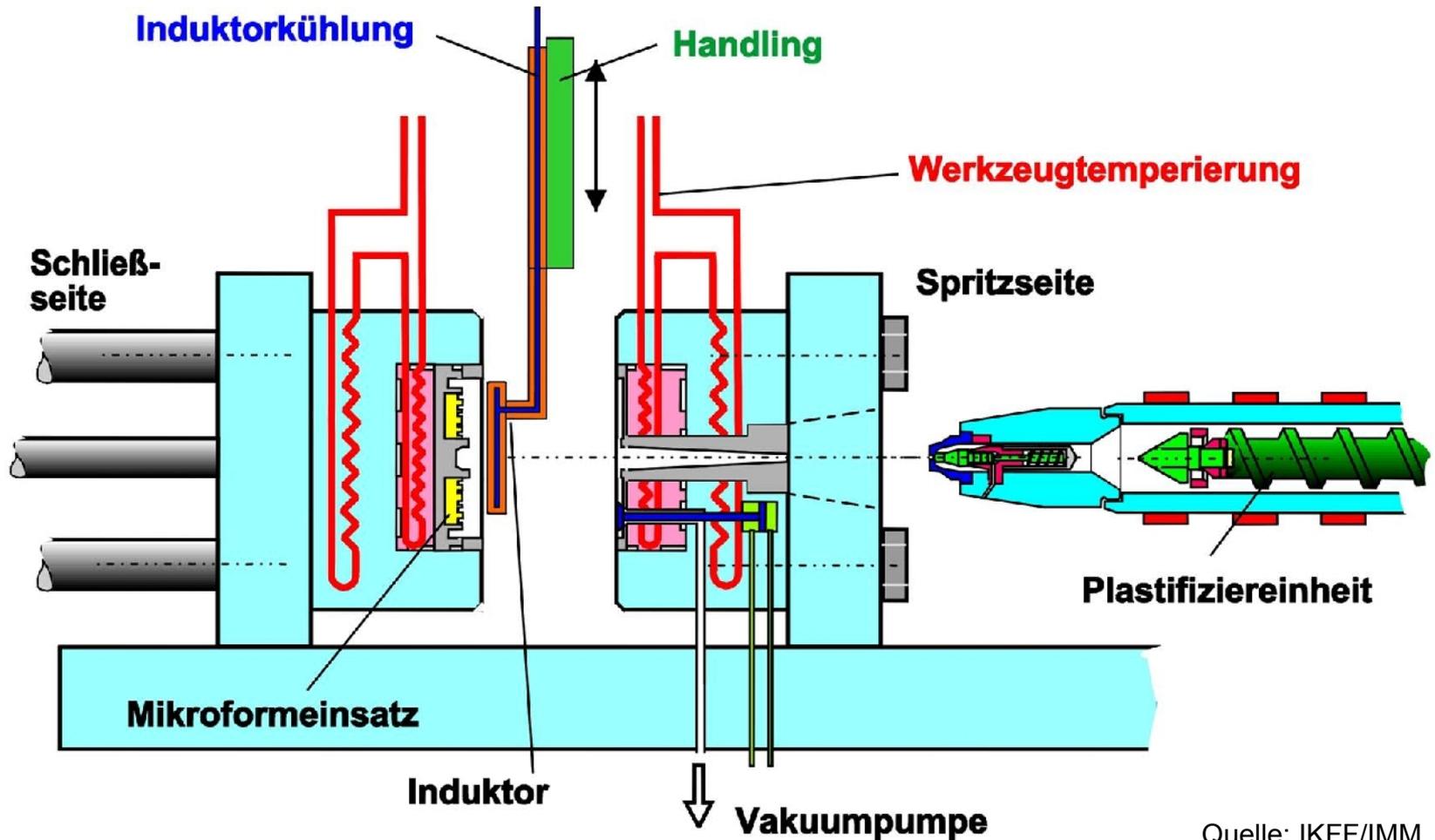
- Wärmegenerierung unmittelbar im Kavitätsbereich
- keine Wärmeleitung notwendig
- kaum Änderungen am Werkzeug
- gezielte Wärmeeinbringung

Nachteile

- Handhabungseinheit für die Induktorbewegung erforderlich
- Inhomogene Temperaturverteilung an der Oberfläche
- Abkühlprozess beginnt vor dem Einspritzvorgang

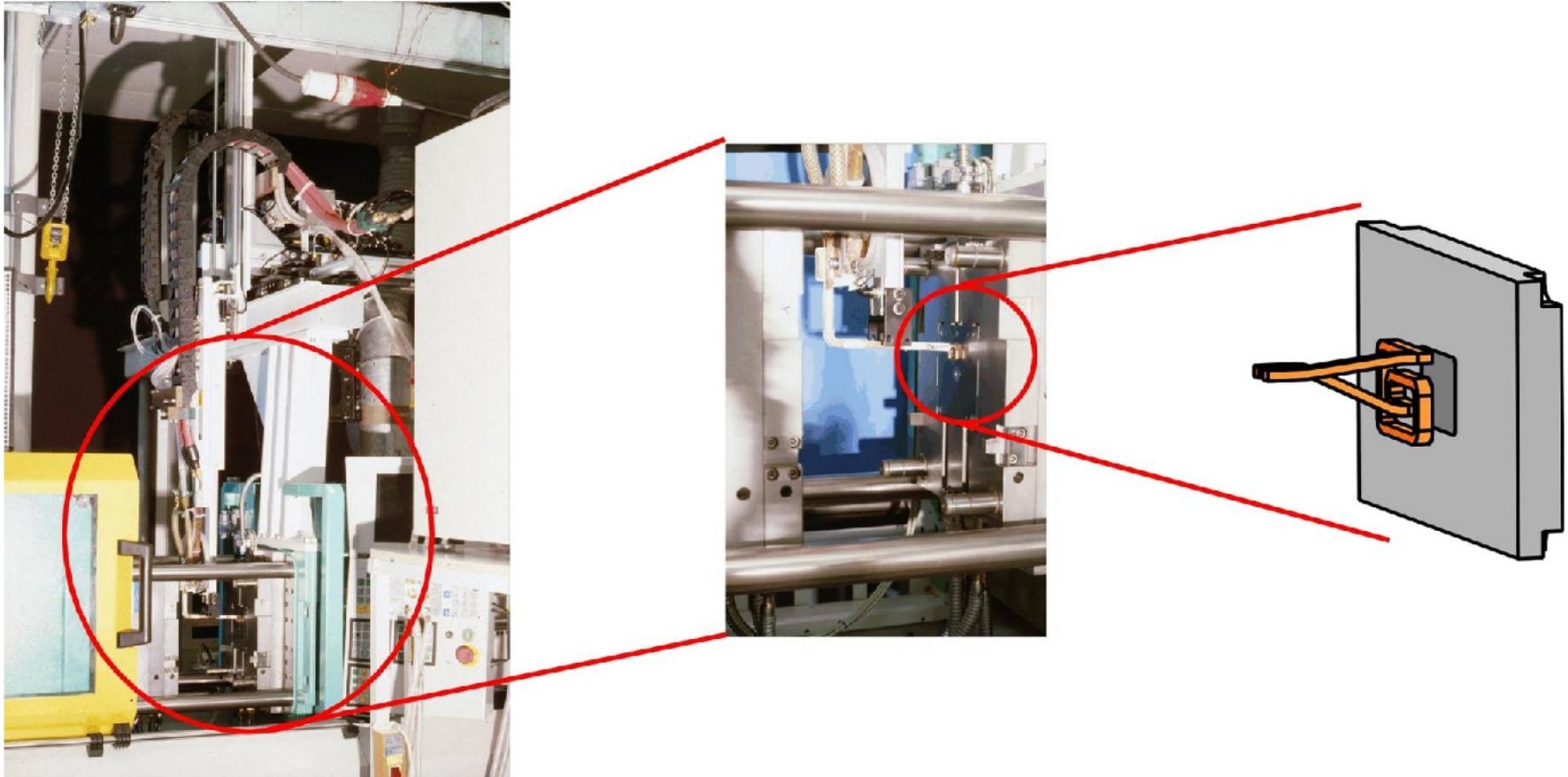


Induktive Werkzeugtemperierung mit externem Induktor



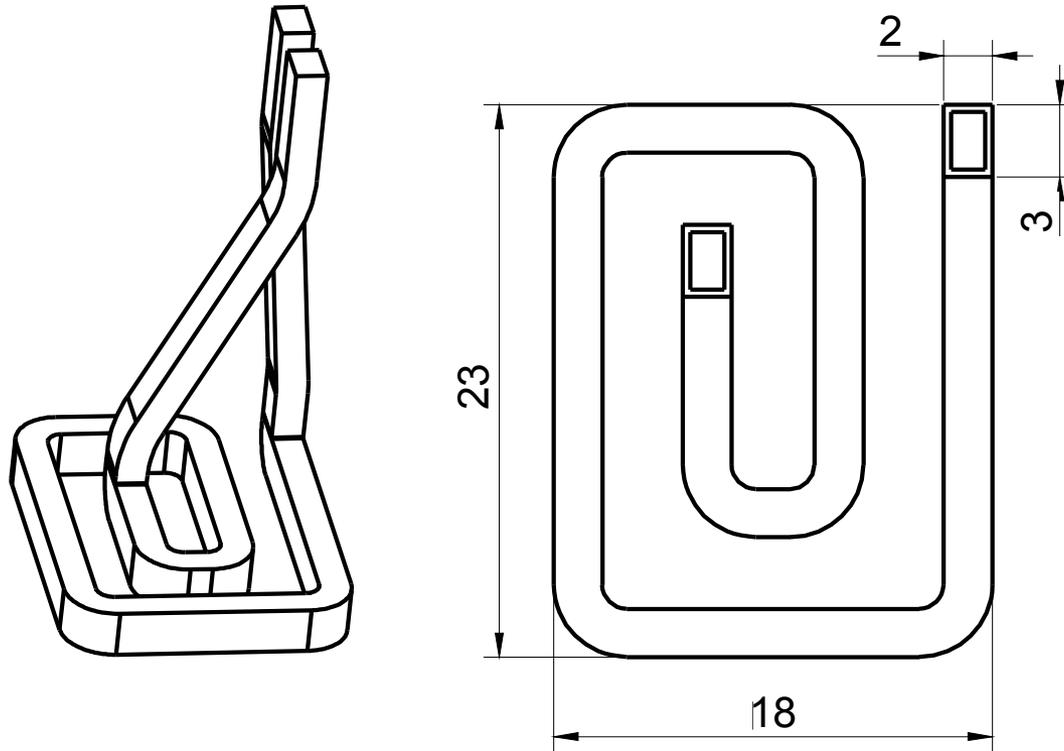
Quelle: IKFF/IMM

Anordnung eines externen Induktors zur Abformung von Mikrostrukturen



Quelle: IKFF

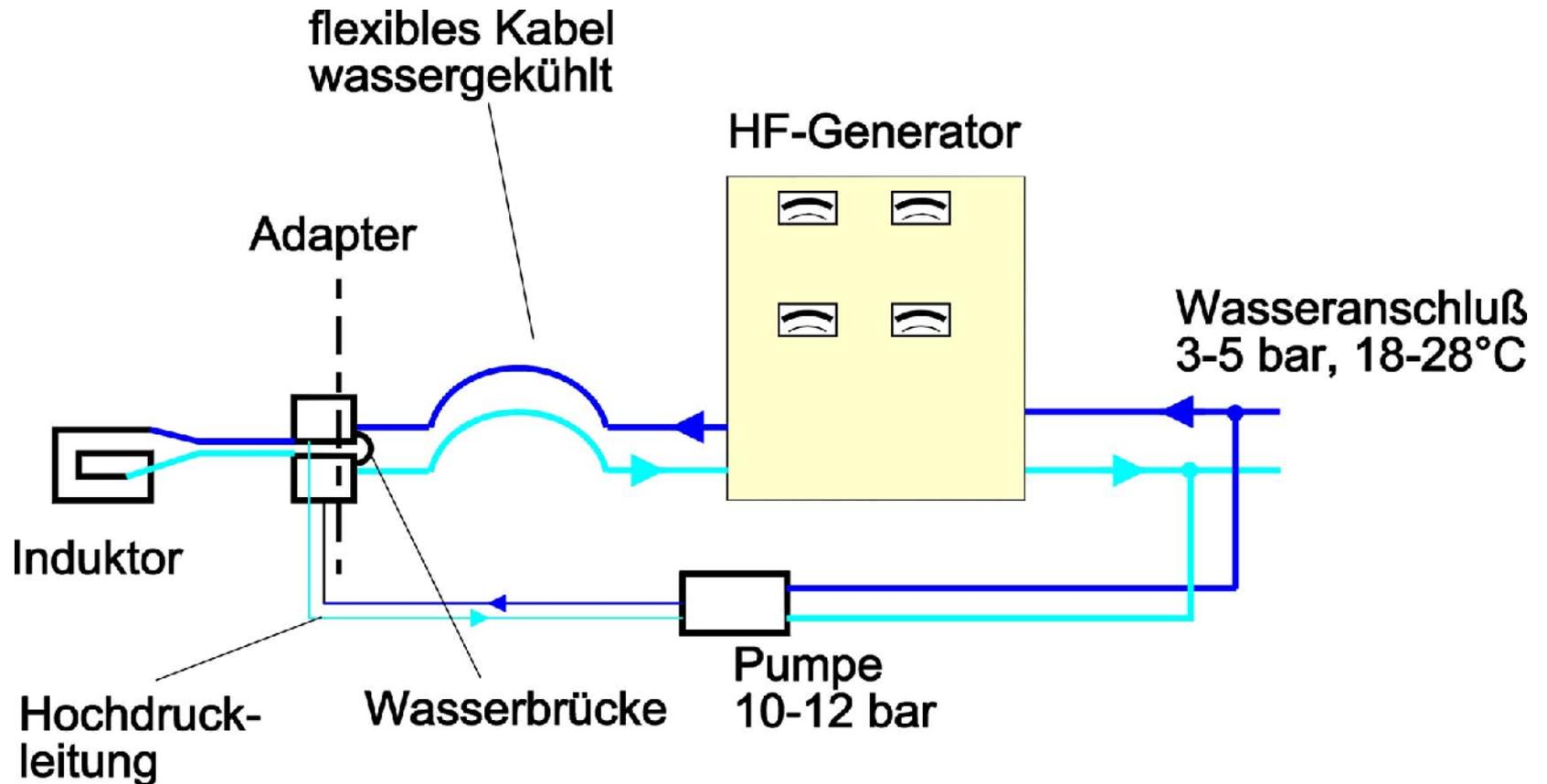
Induktorgeometrie



Kupferhohlprofil Wandstärke 0,5 mm, vom Kühlwasser durchströmt

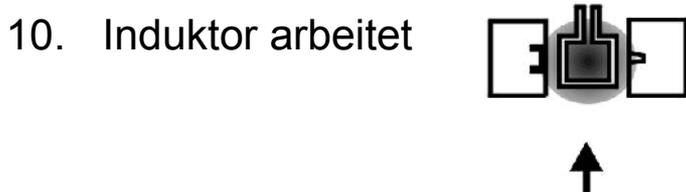
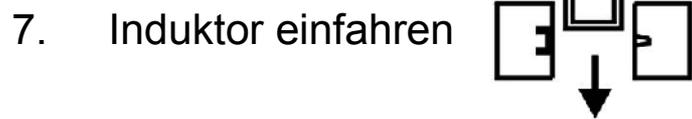
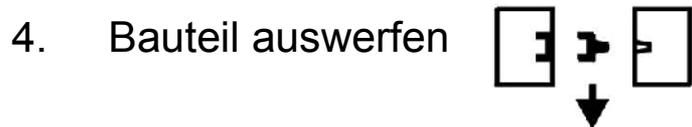
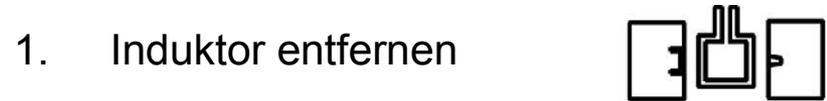
Quelle: Diss. Walther

Erforderliche Gerätetechnik

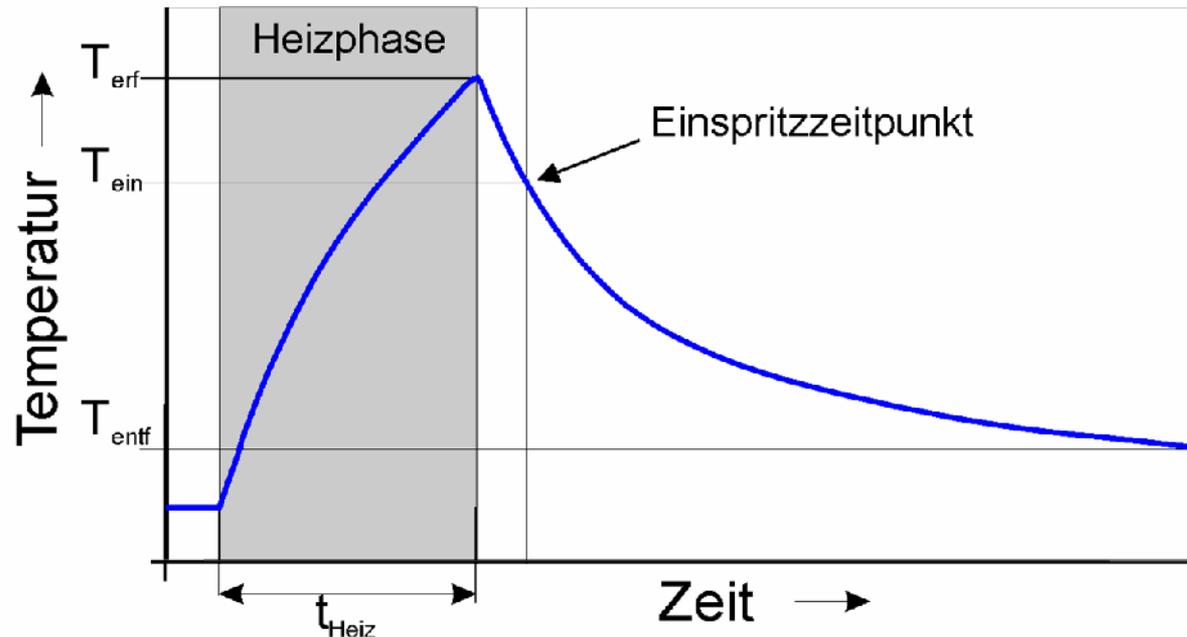


Generatorparameter: genutzt ca. 1,5...3 kW bei bis zu 200 kHz
Stromdichten im Induktor bis 6000 A/mm²

Prozessablauf mit externem Induktor



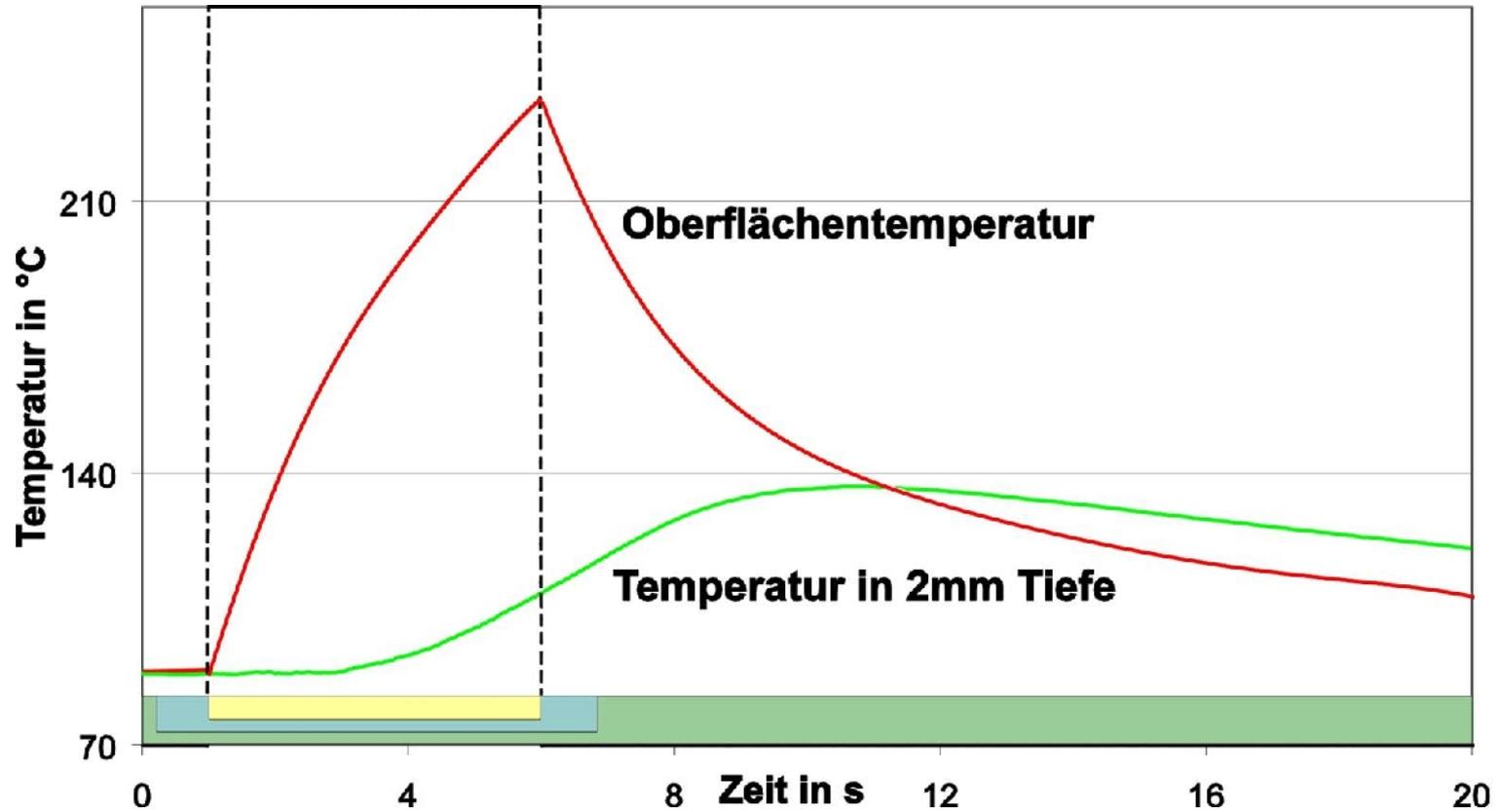
Typischer Temperaturverlauf mit externem Induktor



Werkzeug	offen	geschlossen
Induktor	positioniert	entfernt
Prozeß	Heizen	Einspr., Nachdruck, Kühlen

Quelle: Diss. Walther

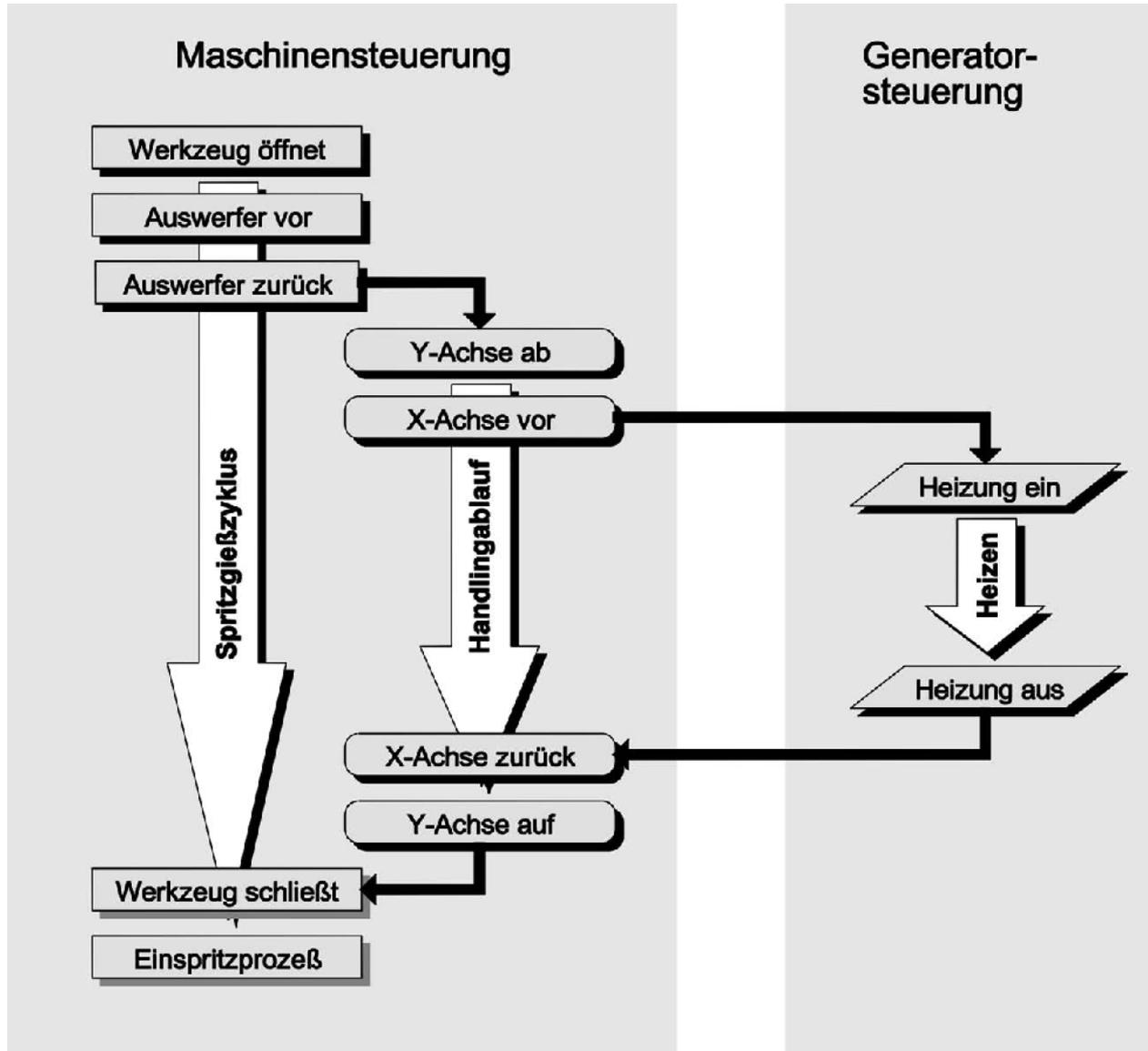
Beispielhafter Temperaturverlauf mit externem Induktor für POM



Quelle: Diss. Walther

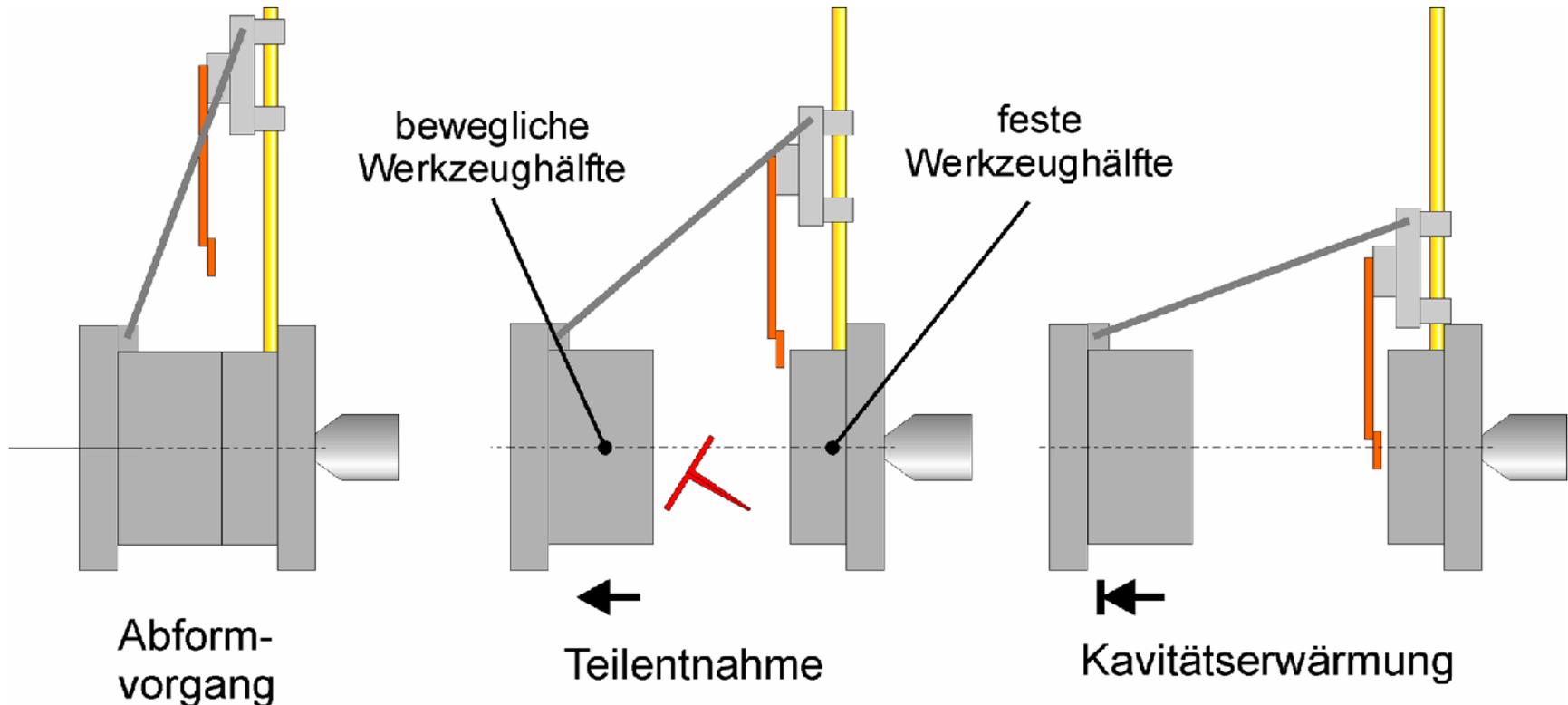


Prozesssteuerung mit externem Induktor



Quelle: IKFF

Zwangsläufige Induktorpositionierung mittels Koppelgetriebe



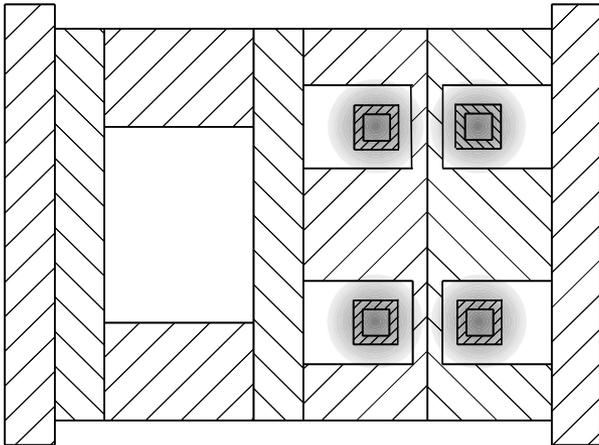
Quelle: Diss. Walther

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 **Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung**
 - mit externem Induktor
 - **mit halb-internem Induktor**
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick



Halb oder voll integrierter Induktor



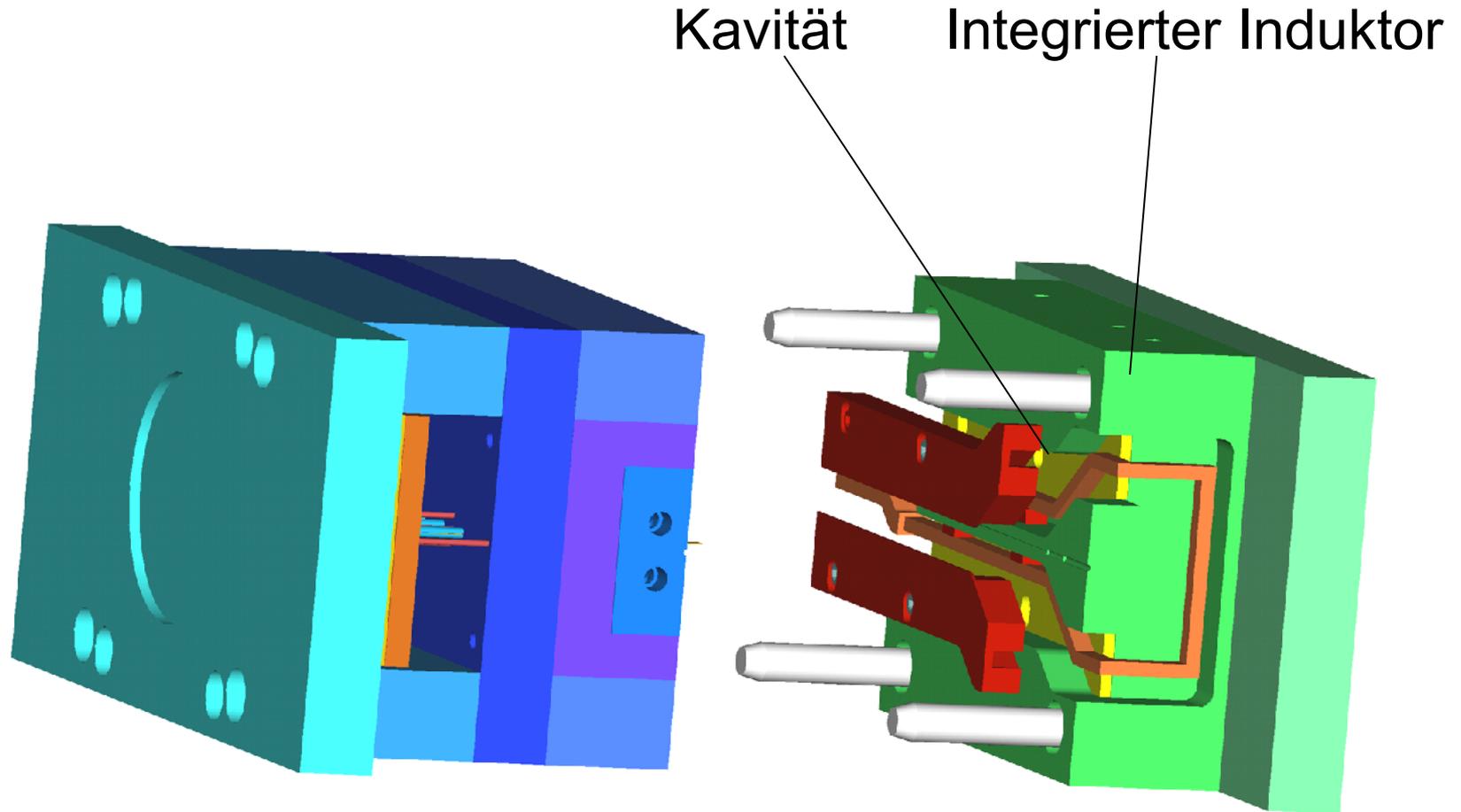
Vorteile

- Heizen bis und während dem Einspritzen
- Wärmetransport zur Kavität bewirkt Temperaturengleich an Kavitätsoberfläche
- kein Zeitverlust durch Induktorbewegungen
- geregelter Temperaturverlauf möglich

Nachteile

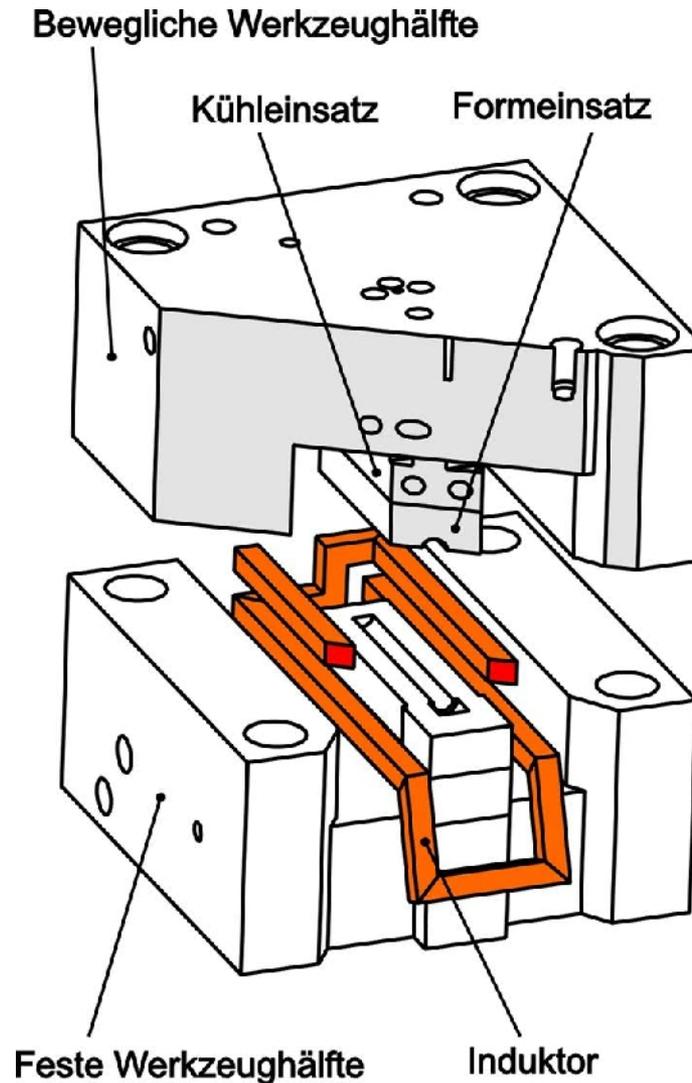
- Wärme wird nicht direkt in der Kavität erzeugt
- Kavität ist nicht wärmste Stelle des Werkzeugs
- konstruktive Änderungen durch Integration des Induktors
- deutlich mehr Wärme wieder abzuführen

Beispiel eines halb-internen Induktors



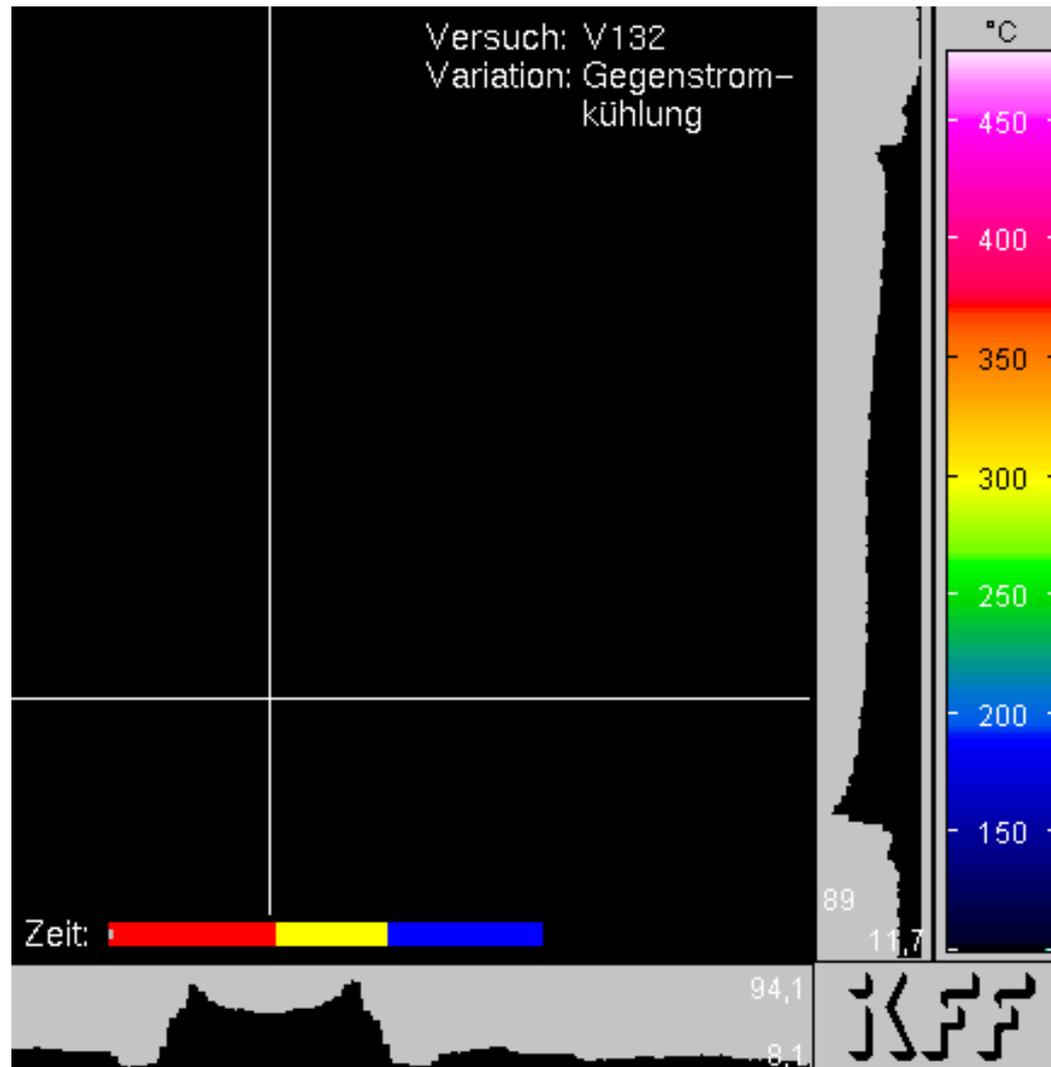
Quelle: IKFF

Beispiel eines halb-internen Induktors



Quelle: IKFF

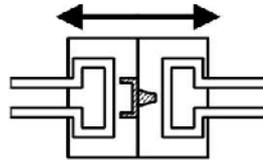
Thermokameraaufnahme einer Induktionserwärmung



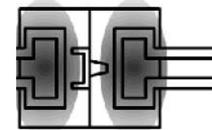
Quelle: IKFF

Prozessablauf mit halb oder voll integriertem Induktor

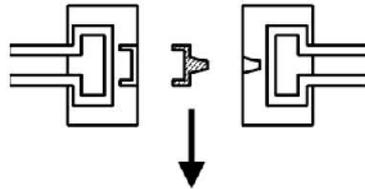
1. Werkzeug öffnen



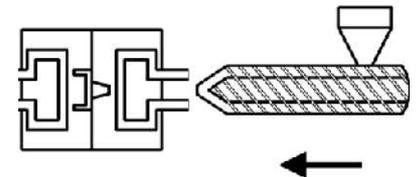
1. Induktor arbeitet



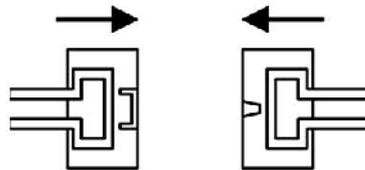
4. Bauteil auswerfen



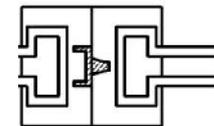
4. Formmasse einspritzen



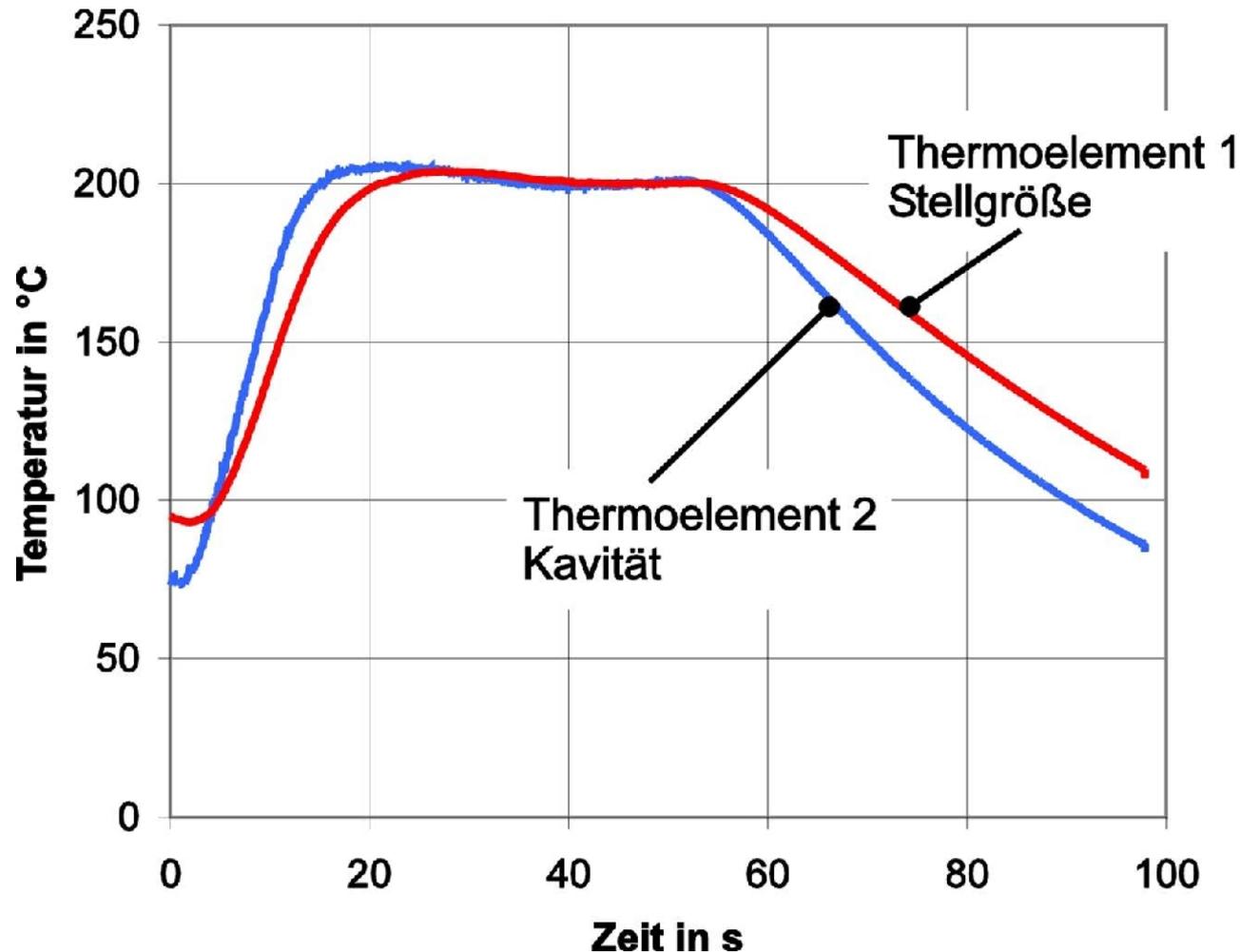
7. Werkzeug schließen



7. Abkühlen



Geregelter Temperaturverlauf mit halb-internen Induktor



Quelle: Diss. Walther

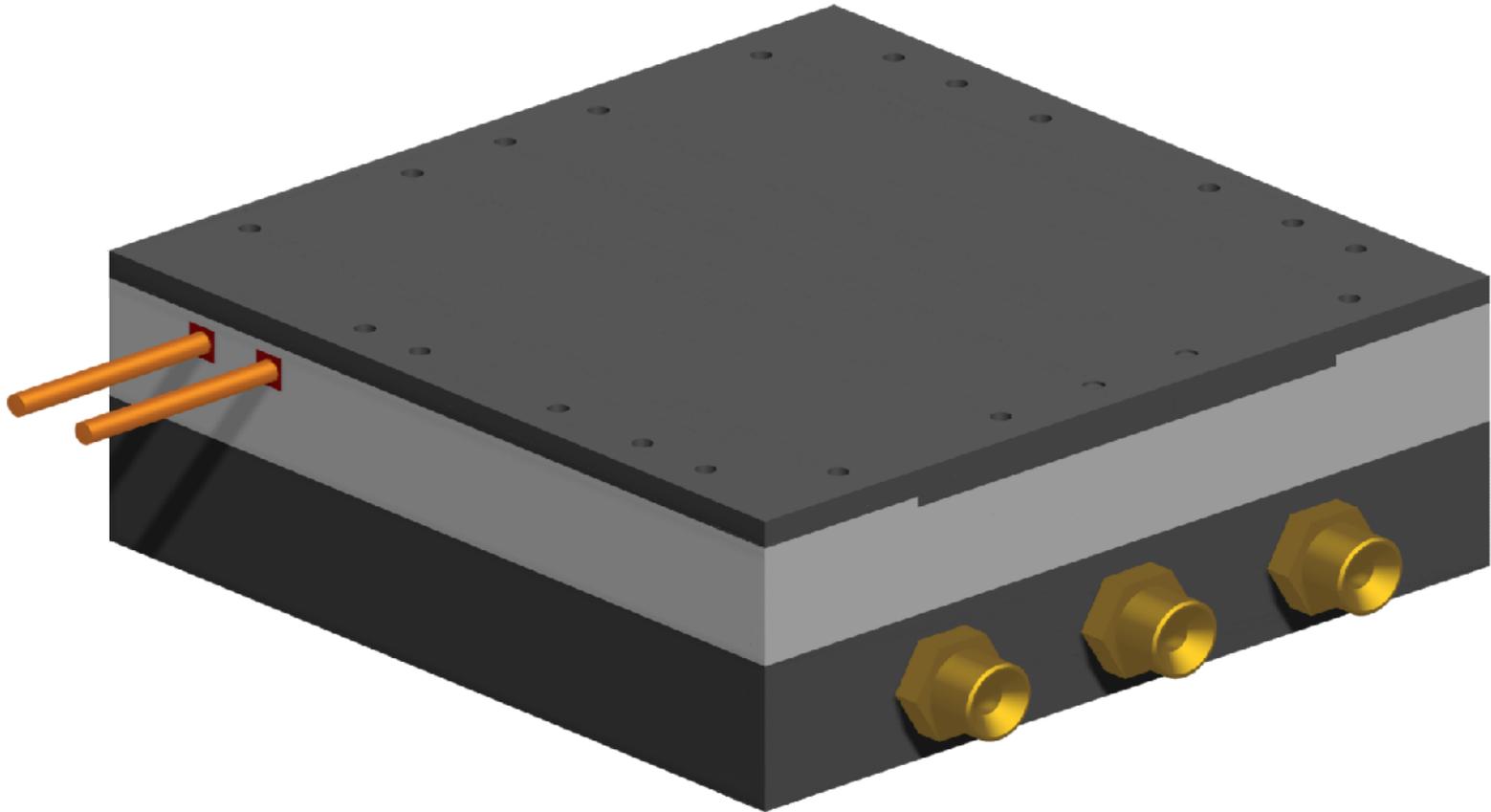


Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 **Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung**
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick



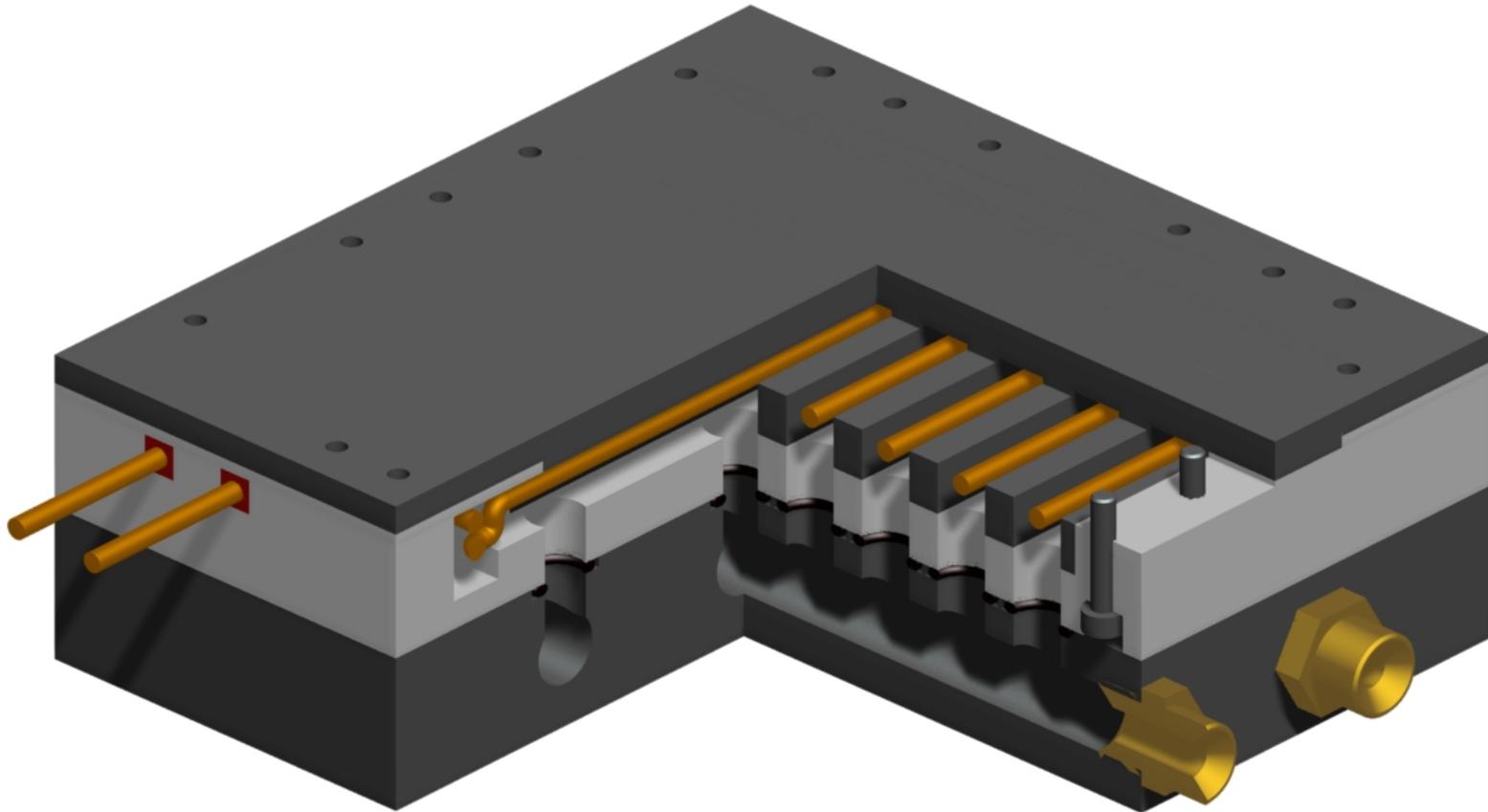
vollintegrierte induktive Erwärmung, realer Versuchsaufbau



Quelle: A. Weber



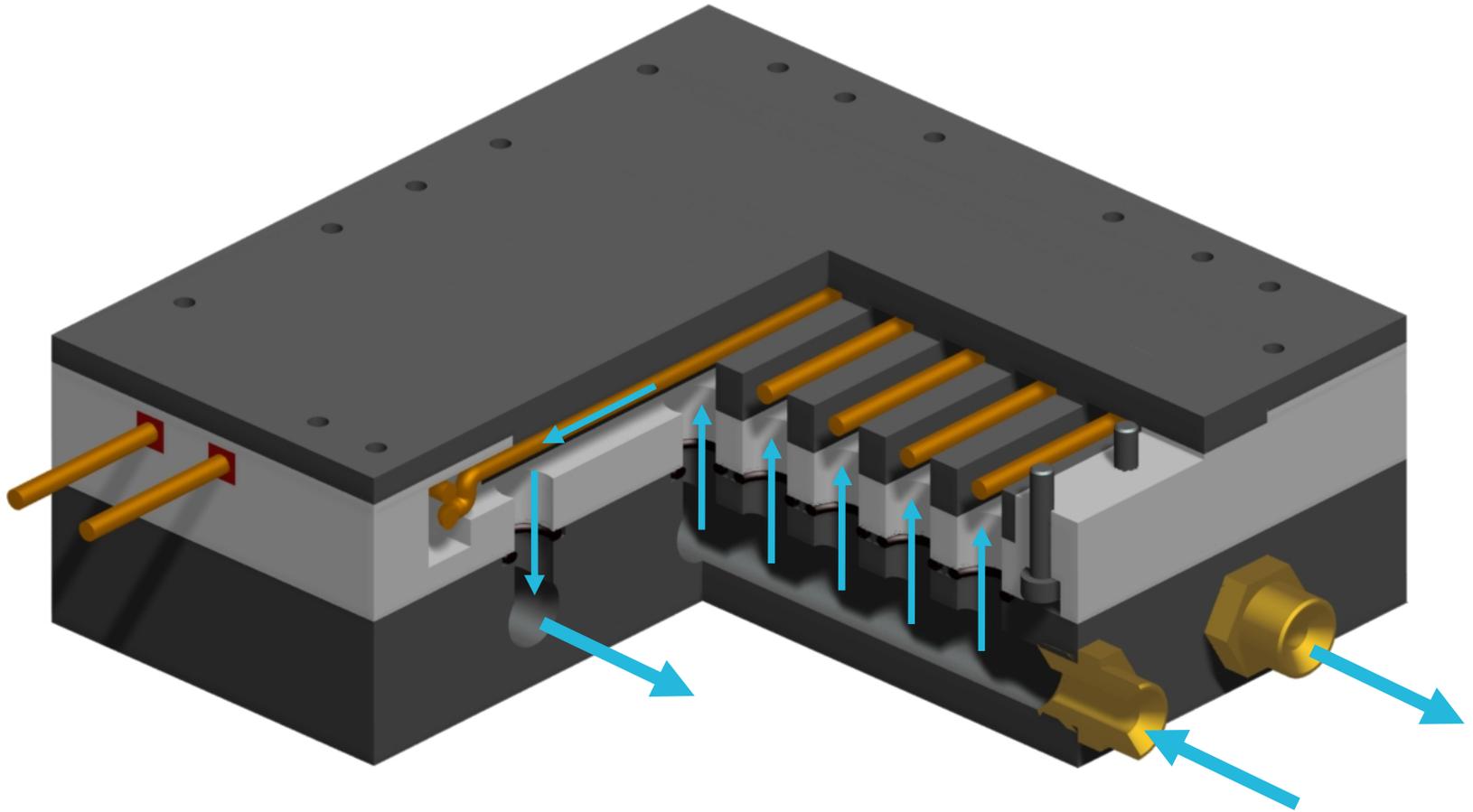
vollintegrierte induktive Erwärmung, realer Versuchsaufbau



Quelle: A. Weber

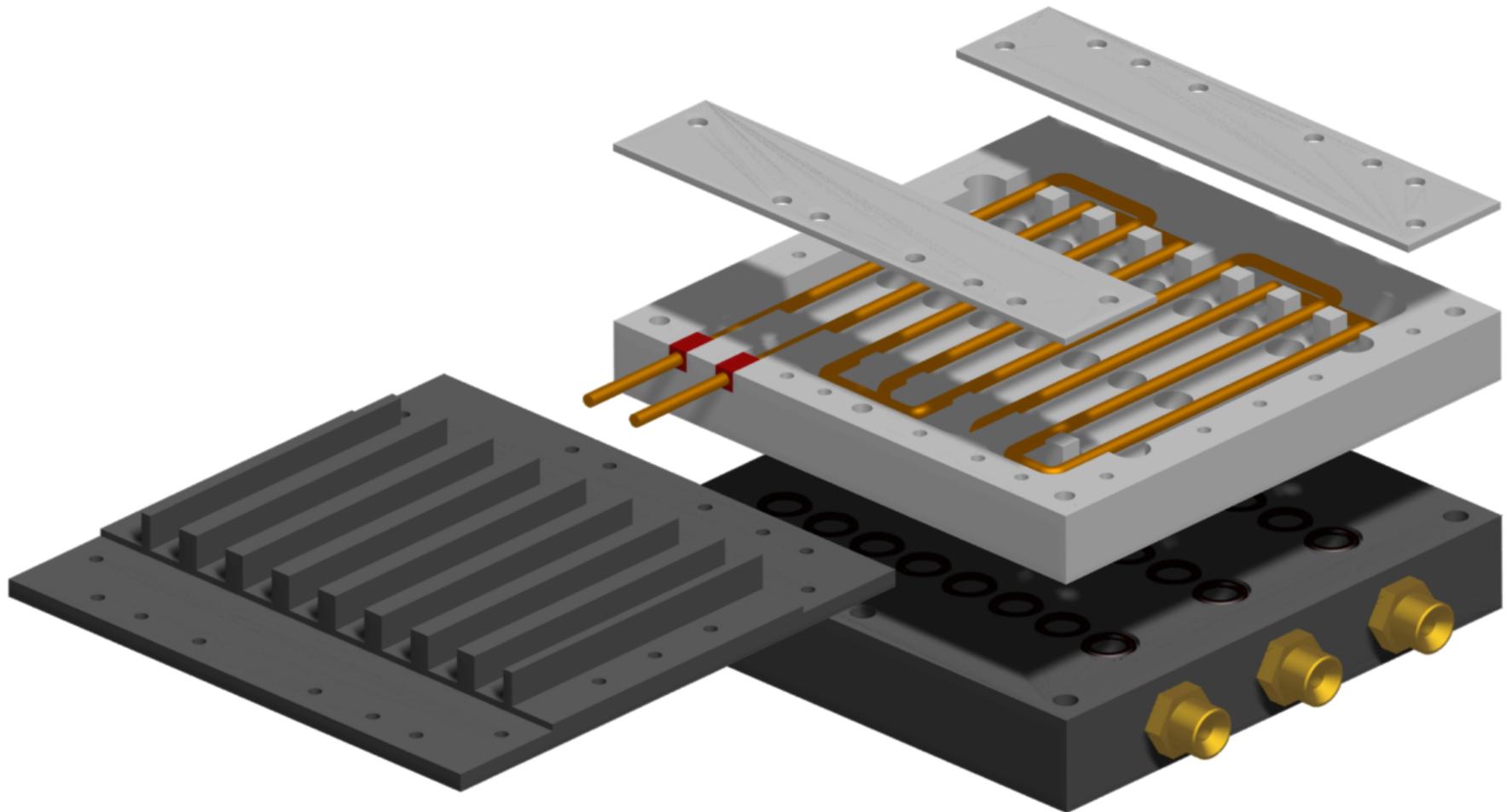


realer Versuchsaufbau, Wasserfluss



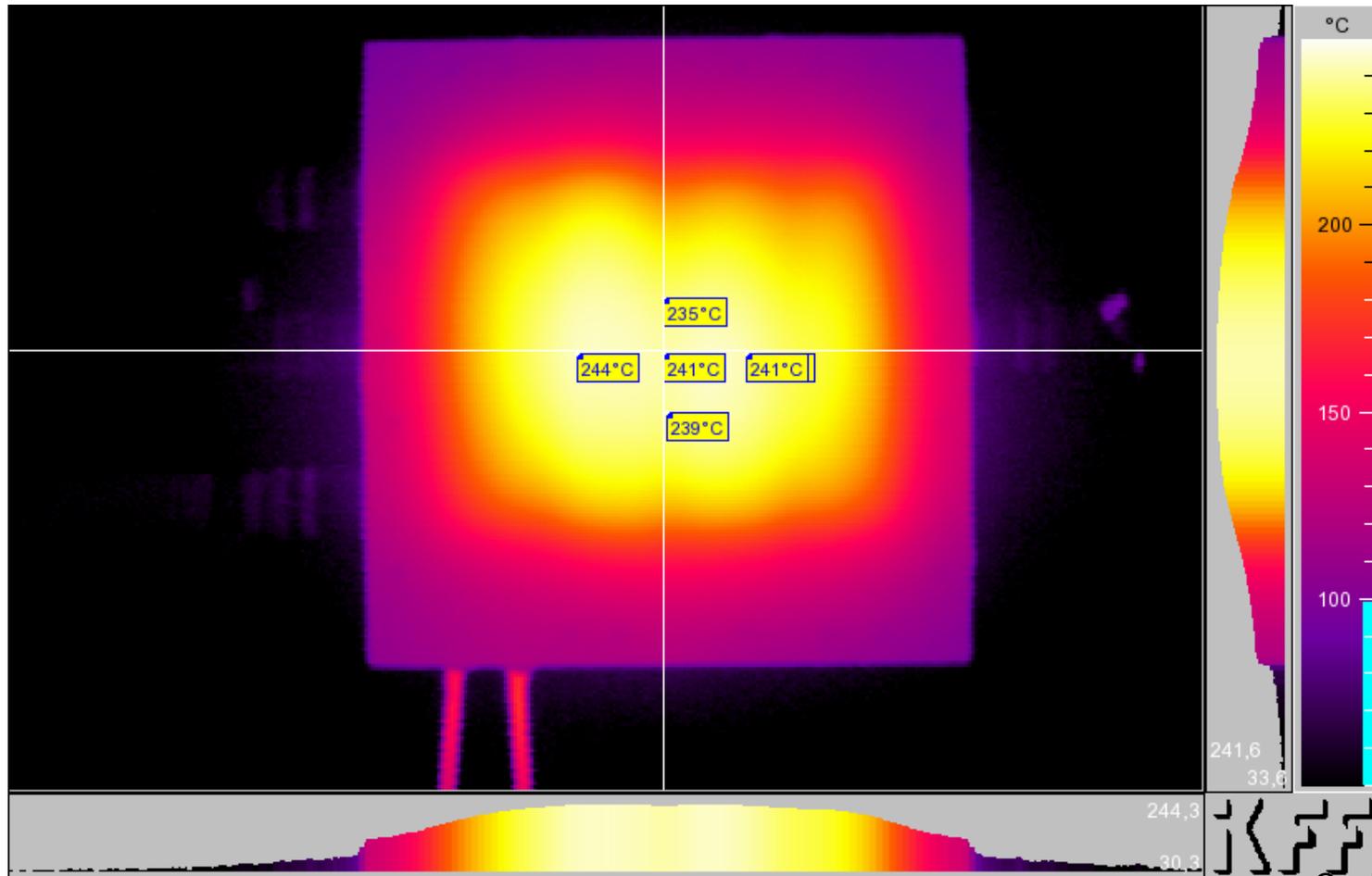
Quelle: A. Weber

realer Versuchsaufbau, aufgeklappt



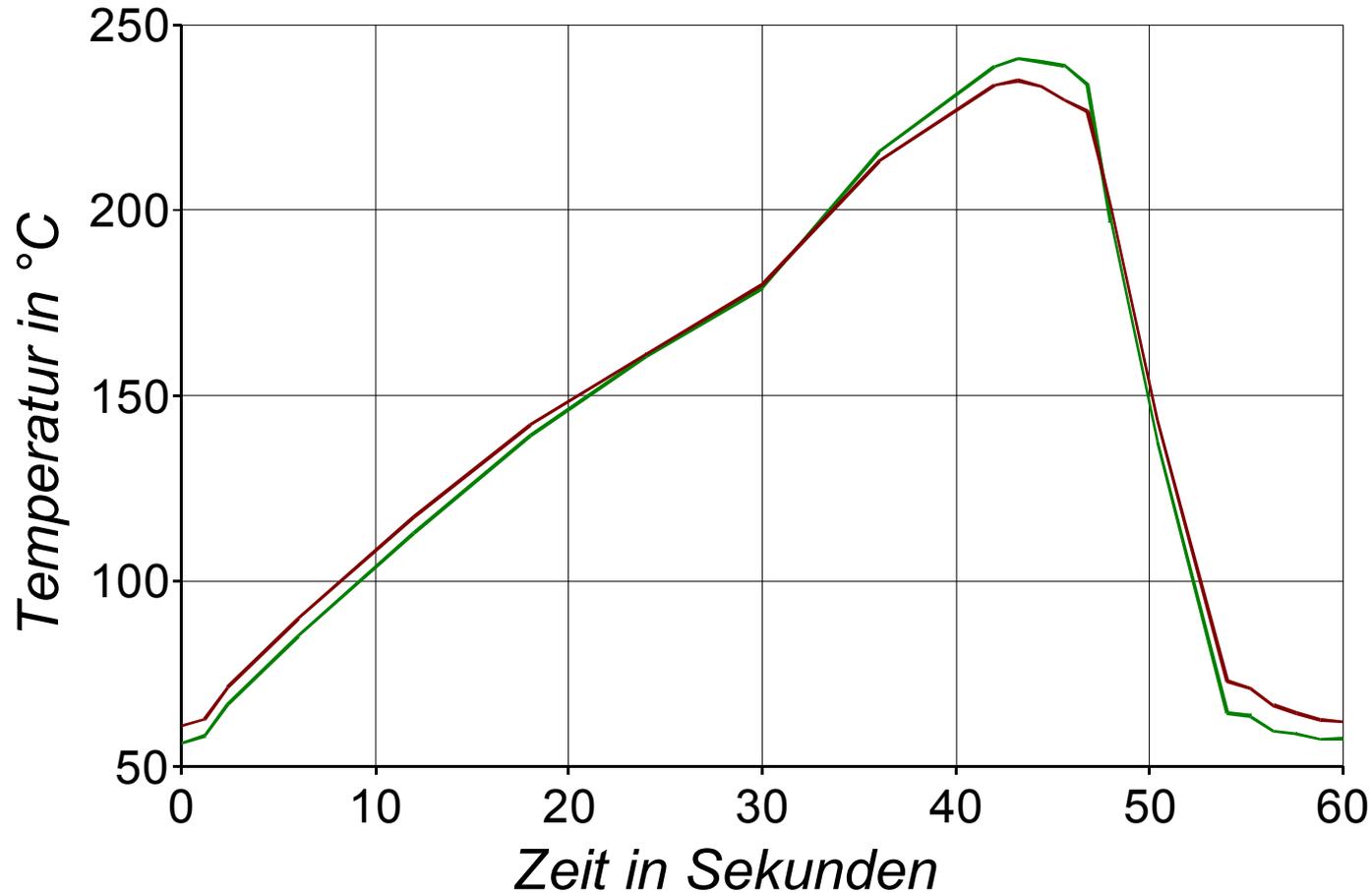
Quelle: A. Weber

vollintegrierte induktive Erwärmung, Versuchsergebnisse



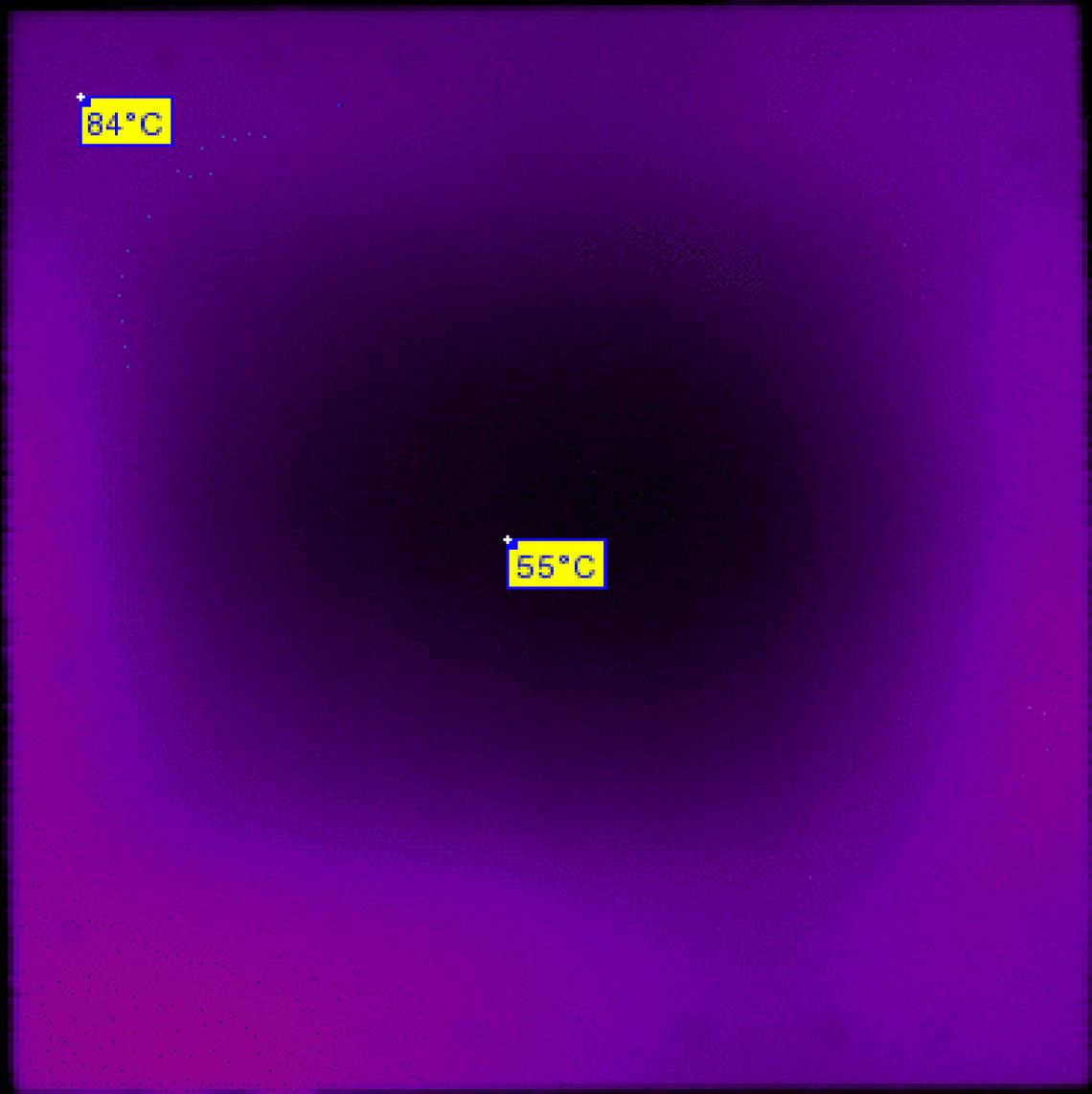
Quelle: A. Weber

vollintegrierte induktive Erwärmung, Versuchsergebnisse



Quelle: A. Weber





JKF



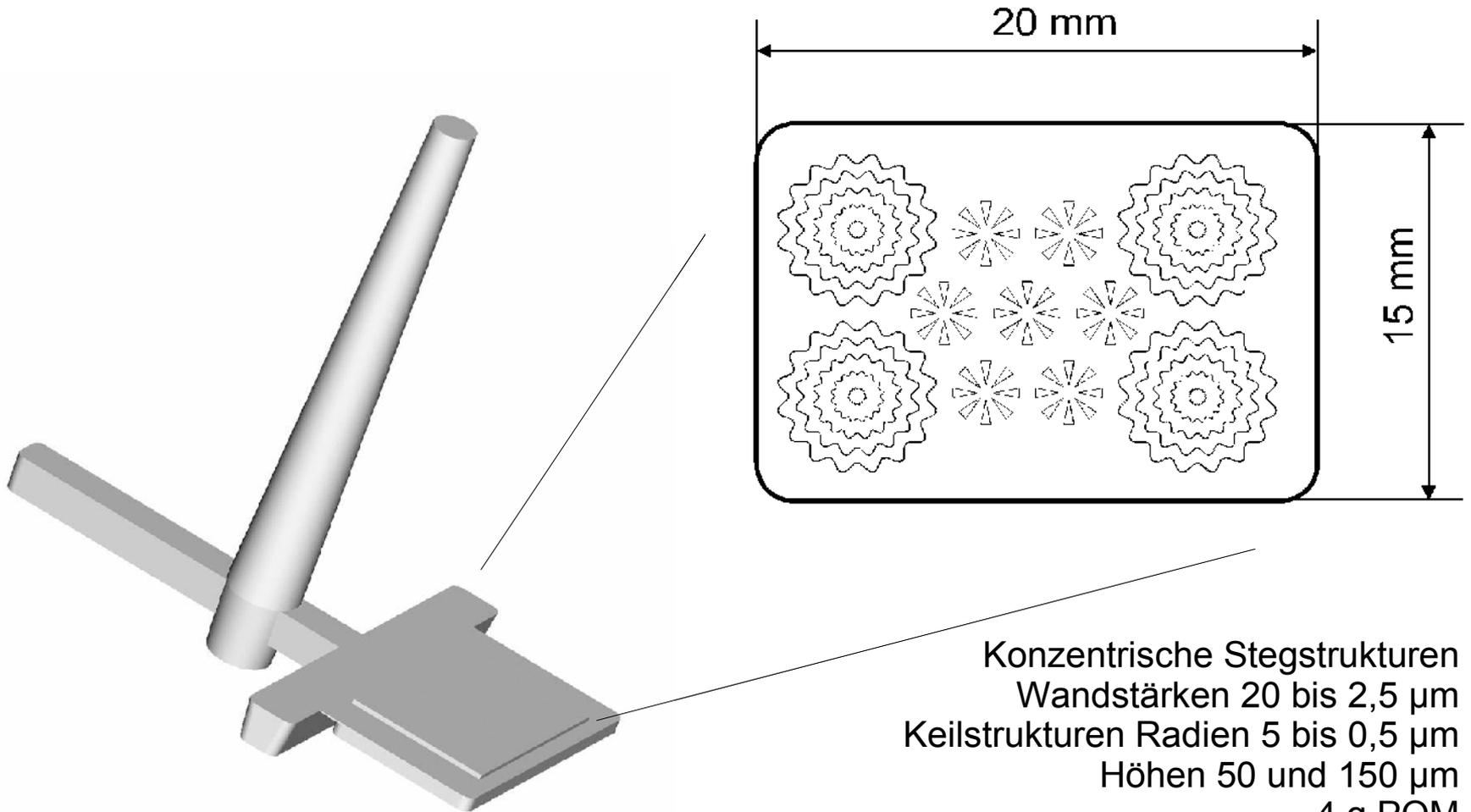
Heizung ca. 3,5 kW

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 **Ergebnisse, Anwendungsgebiete**
- 6 Zusammenfassung, Ausblick



Versuchsbauteil

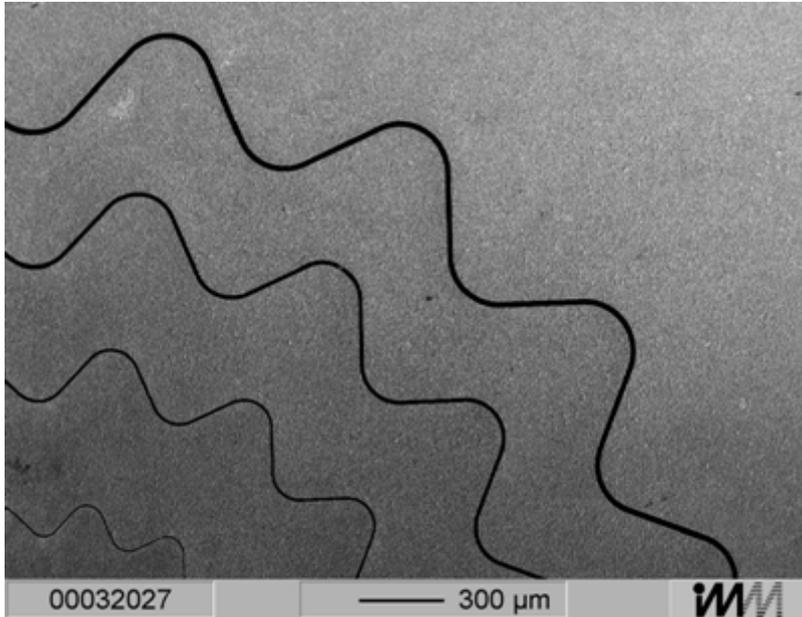


Konzentrische Stegstrukturen
Wandstärken 20 bis 2,5 μm
Keilstrukturen Radien 5 bis 0,5 μm
Höhen 50 und 150 μm
4 g POM

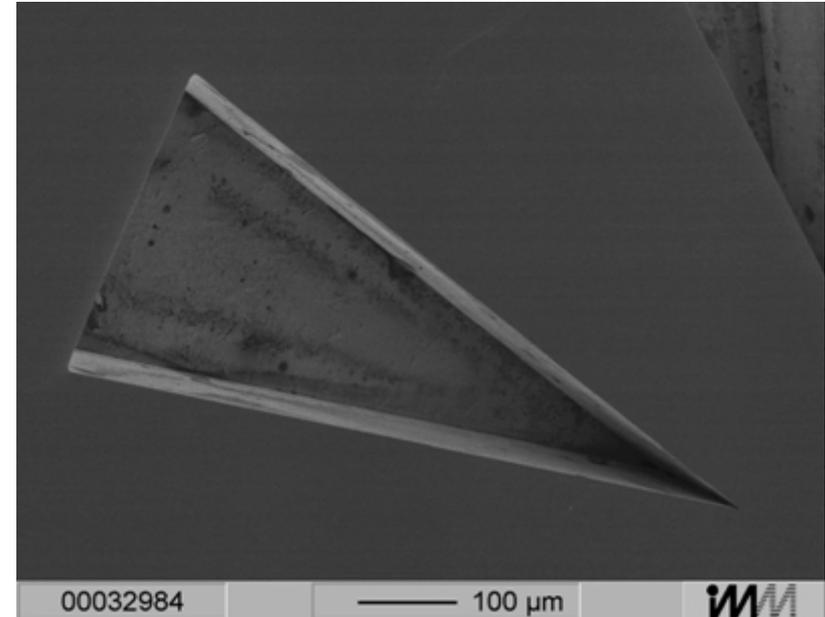
Vergleich Haar: 40...80 μm

Quelle: IKFF/IMM

Versuchsbauteil – LIGA-Formeinsatz



LIGA-Formeinsatz
mit Kanalstrukturen,
150 μm tief, Material
Nickel

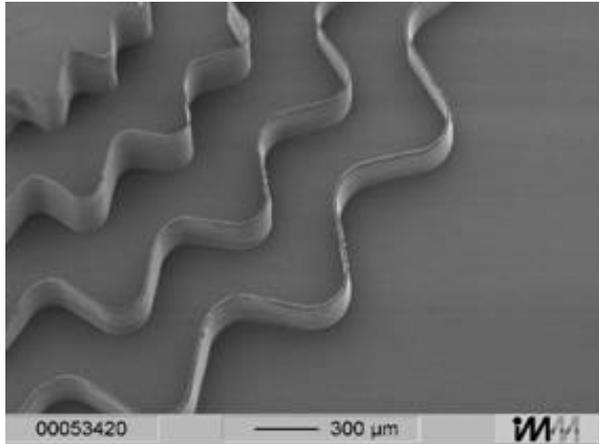


LIGA-Formeinsatz mit
Keilstrukturen, Keilradius
2,5 μm , 150 μm tief, Material
Nickel

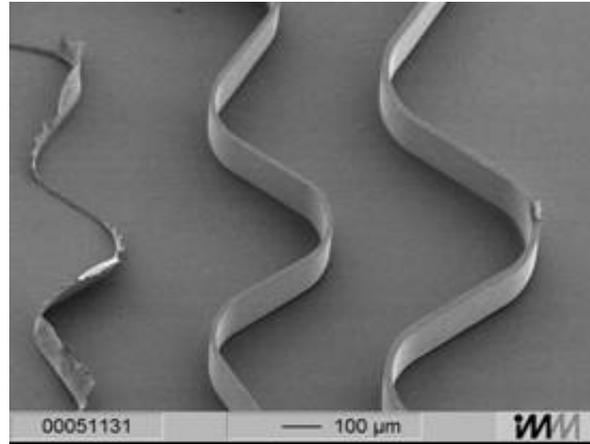
Vergleich Haar: 40...80 μm

Quelle: IMM

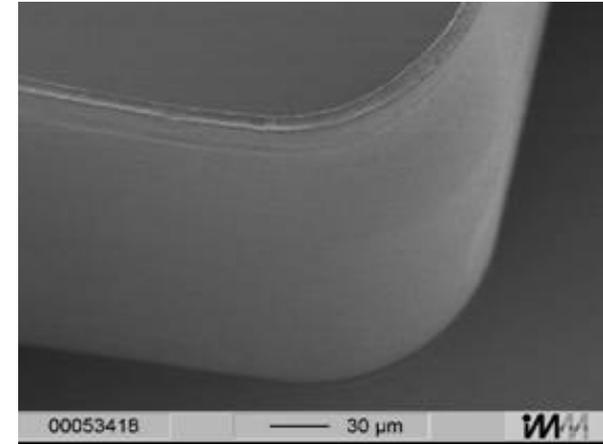
Abformung von Stegstrukturen 150 μm Höhe in POM mit induktiv-variothermer Temperierung



Stegstrukturen 150 μm hoch



Abriss 2,5 μm Steg, 150 μm hoch



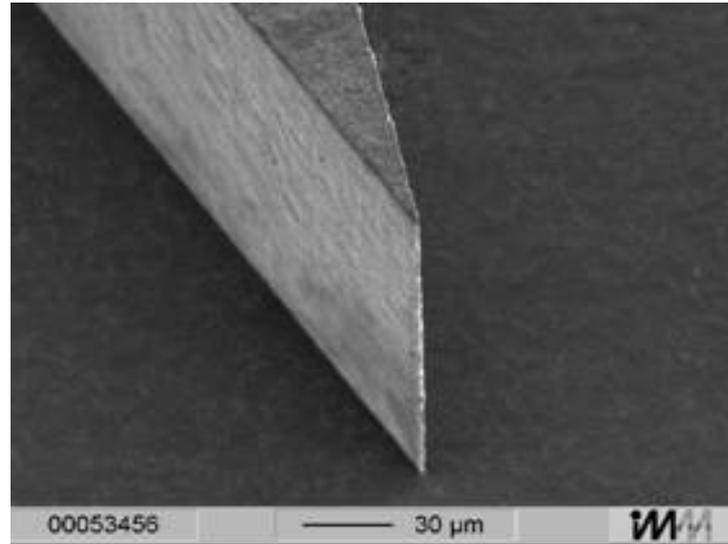
Stegstrukturen 10 μm , 150 μm

Somit lässt sich für die 150 μm hohen Strukturen ein maximales Aspektverhältnis von 30 bei 5 μm Breite realisieren.

Vergleich Haar: 40...80 μm

Quelle: IMM

Abformung von Keilstrukturen 150 μm Höhe in POM mit induktiv-variothermer Temperierung



Keilstruktur 0,5 μm Radius, 150 μm hoch

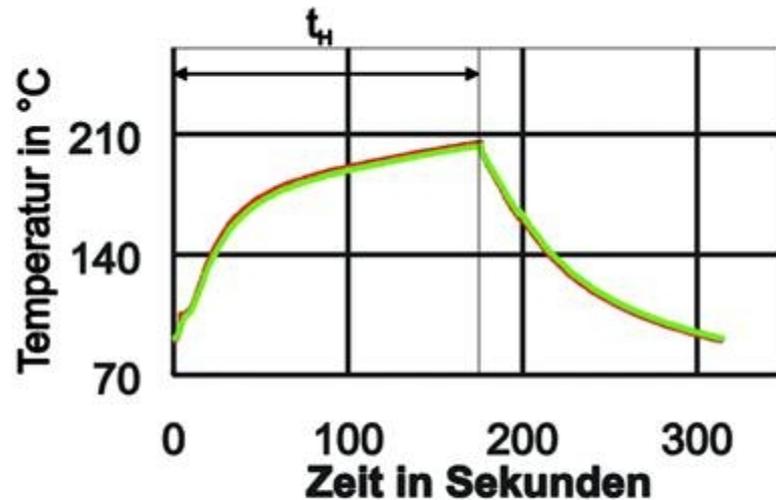
Bei den Keilen werden die 0,5 μm Radien über die volle Höhe abgeformt. Angemerkt sei, dass diese optimale Füllung nur mit Keilen in Fließrichtung erreicht wird.

Somit wird ein Aspektverhältnis von 150 erreicht.

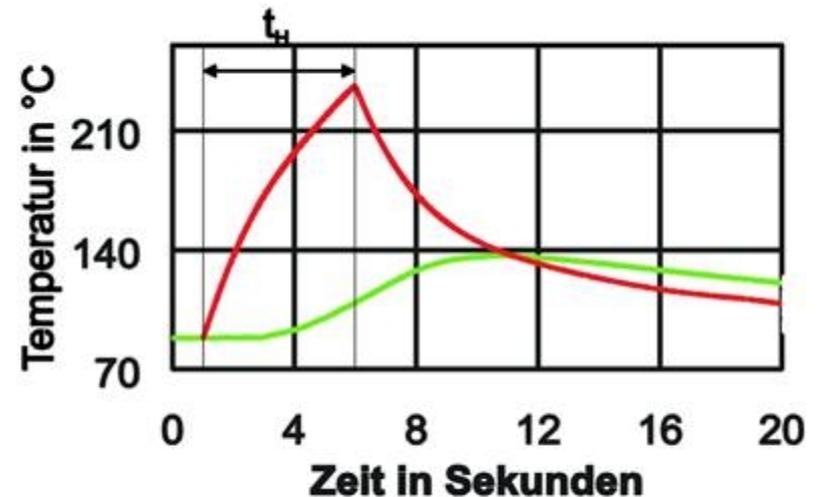
Quelle: IMM

Zeitvergleich öl-variothermer und induktiver Temperierung (POM)

Öl-variothermes Verfahren



Induktives Verfahren



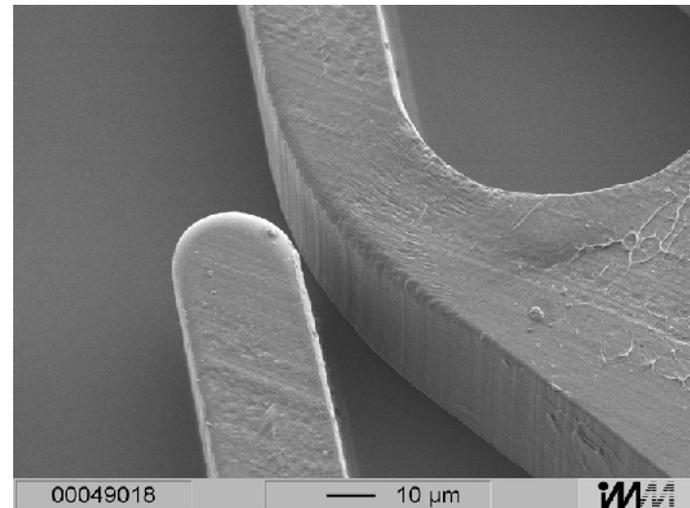
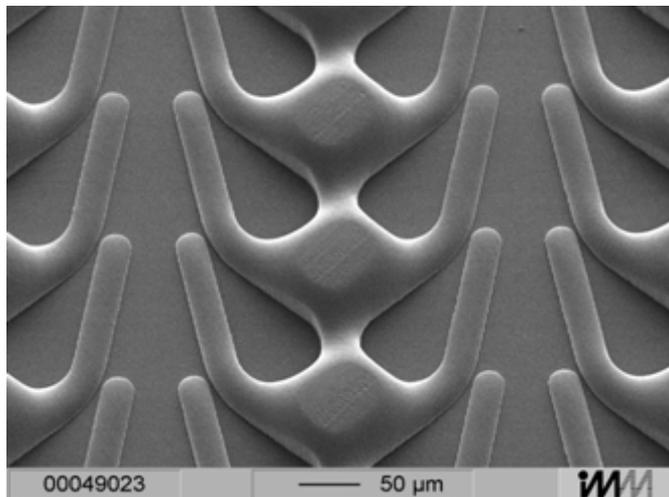
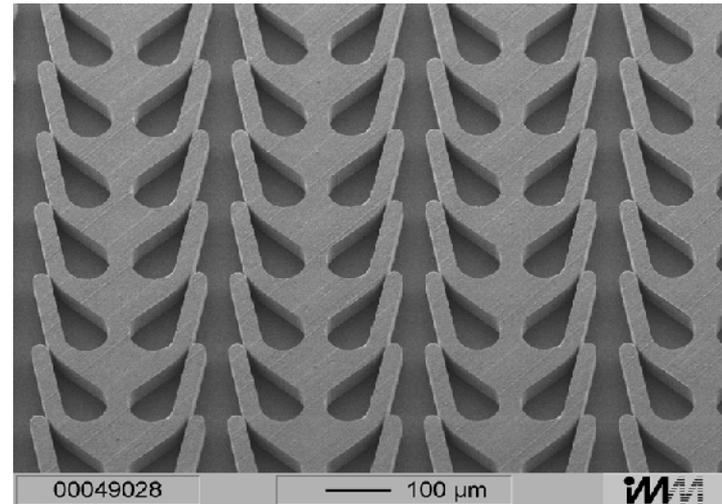
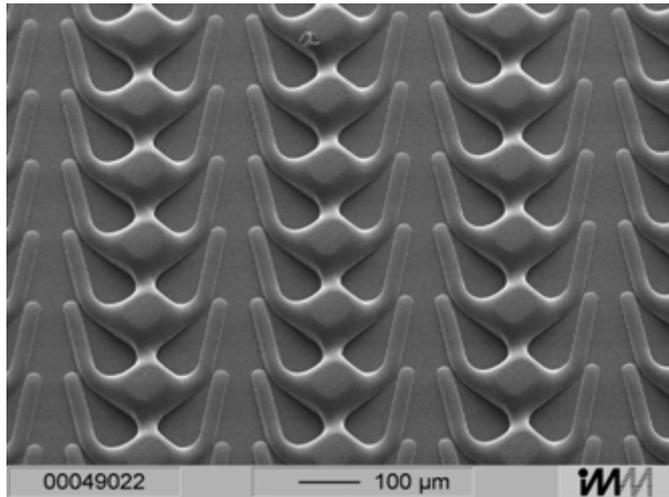
— Oberflächetemperatur
— Thermoelement 2 mm Tiefe
 t_H Heizphase

Heizzeiten: 180 s gegenüber 5 s

Gesamtzykluszeiten: 240 s gegenüber 25 s

Quelle: IKFF/IMM

Abformergebnisse – Blutplasmaseparator



isotherm, unvollständige Füllung

induktiv-variotherm, vollständige Füllung

Quelle: IMM

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Einführung in die variotherme Prozessführung
- 3 Prinzip der induktiven Beheizung
- 4 Umsetzung der induktive Werkzeugtemperierung
 - mit externem Induktor
 - mit halb-internem Induktor
 - mit voll integriertem Induktor
- 5 Ergebnisse, Anwendungsgebiete
- 6 Zusammenfassung, Ausblick



Zusammenfassung / Ausblick

- Induktive Werkzeugtemperierung als interessante alternative Erwärmungsmethode
- schnelle, partielle Erwärmung von Teilbereichen der Kavität möglich
- bei integriertem Induktor ist auch ein geregelter Temperaturverlauf auf hohem Temperaturniveau für größere Kavitätsbereiche möglich
- u. U. Probleme bei großflächigen Konturen bzw. großer Kavitätsanzahl bei Mehrfachwerkzeugen

Was kann durch eine induktive Werkzeugheizung erreicht werden?

- schnelle variotherme Temperaturführung
- kurze Zykluszeiten
- Steigerung der Teilequalität

Anwendungsmöglichkeiten für diese schnelle Erwärmung von Werkzeugen

- Heißprägen
- Spritzgießen
- Sonderverfahren (z.B. Transferpressen)

Dissertationen am IKFF dazu:

Thomas Walther (2002)

„Geräte- und Verfahrenstechnik zur induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen“

Carsten Schaumburg (2001)

„Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung“

Oliver Kemmann (2002)

„Untersuchungen zum Füllverhalten von mikrostrukturierten Formteilen beim Mikrospritzgießen von Polymerschmelzen“

Andreas Weber (2006 ?)

Vollständig integrierte induktive Beheizung und Impulskühlung von Spritzgusswerkzeugen ???



Ende

